



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

**RESERVADO**

# **AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA DOS EDIFÍCIOS PRINCIPAIS DAS ESCOLAS DO MUNICÍPIO DE LISBOA**

**Escolas dos 2.º e 3.º ciclos do ensino básico e secundário**





LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

**RESERVADO**

# **AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA DOS EDIFÍCIOS PRINCIPAIS DAS ESCOLAS DO MUNICÍPIO DE LISBOA**

**Escolas dos 2.º e 3.º ciclos do ensino básico e secundário**

Câmara Municipal de Lisboa

Lisboa • setembro 2021

**I&D** ESTRUTURAS

RELATÓRIO 309/2021 – DE/NESDE  
*Versão revista, outubro 2021*

## **Título**

### **AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA DOS EDIFÍCIOS PRINCIPAIS DAS ESCOLAS DO MUNICÍPIO DE LISBOA**

Escolas dos 2.º e 3.º ciclos do ensino básico e secundário

## **Autoria**

### **Filipe Luís Ribeiro**

Doutorado, Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas

### **Paulo Xavier Candeias**

Investigador Auxiliar, Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas

### **Alfredo Campos Costa**

Investigador Principal, Chefe do Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas

## **Colaboração**

DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

### **Alexandra Rodrigues Carvalho**

Investigadora Auxiliar, Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas

### **António Araújo Correia**

Investigador Auxiliar, Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Relatório 309/2021 (*Versão revista, outubro 2021*)

Proc. 0305/1201/2231501

# AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA DOS EDIFÍCIOS PRINCIPAIS DAS ESCOLAS DO MUNICÍPIO DE LISBOA

Escolas dos 2º e 3º ciclos do ensino básico e secundário

## Resumo

---

O Departamento de Educação (DE) da Câmara Municipal de Lisboa - CML solicitou ao LNEC o desenvolvimento de um estudo relativo à vulnerabilidade sísmica de 32 escolas do 2.º e 3.º ciclos e secundárias cuja gestão transitou do Ministério da Educação para a CML. O estudo concentra-se nos edifícios principais das escolas, que correspondem aos edifícios onde estão localizadas as salas de aula e/ou serviços administrativos, precisamente aqueles onde a taxa média anual de ocupantes é mais elevada.

A avaliação da vulnerabilidade sísmica dos edifícios principais tem por base a análise de toda a informação disponível sobre a estrutura desses edifícios, nomeadamente a análise dos documentos fornecidos pelo DE da CML e a recolha e análise de documentos provenientes de outras fontes. Esta informação foi complementada com visitas, para inspeção visual, a um conjunto de escolas e cruzada com dados de escolas construídas na mesma altura ou com tipologia semelhante, e ainda com dados que o LNEC dispõe relativamente às características da construção em Portugal. Das 32 escolas que integram este estudo não foi possível proceder à avaliação de 4 delas por não se dispor das informações necessárias e suficientes à prossecução da sua avaliação.

Todos os dados recolhidos foram sistematizados e utilizados na elaboração de modelos numéricos que permitem avaliar o comportamento estrutural e a resposta não linear de cada edifício principal para diferentes níveis de intensidade da ação sísmica. O cruzamento do comportamento expectável da estrutura com a ação sísmica esperada para a localização e as condições geológico-geotécnicas do local de implantação da escola permite avaliar a vulnerabilidade sísmica da estrutura, tendo por base um objetivo de desempenho pré-estabelecido de acordo com as normas em vigor e a documentação técnica e científica complementar relevante. As escolas foram por isso consideradas como estruturas com classe de importância III, o que corresponde a um objetivo de desempenho essencial.

Os resultados finais do estudo são, por um lado, a definição, para cada escola, de uma matriz de desempenho que representa o cumprimento, ou não, dos níveis de desempenho sísmico estabelecidos para os vários níveis de intensidade da ação sísmica segundo o objetivo de desempenho definido e, por outro lado, a estimativa de parâmetros de risco sísmico, nomeadamente perdas estimadas em função da área coberta das escolas e número de dias de interdição, que permitem ter uma visão global dos efeitos da ação sísmica sobre o parque escolar e também hierarquizar as escolas em função das perdas esperadas. Os resultados individuais de cada escola são apresentados em fichas resumo, anexas a este relatório.

Palavras-chave: Edifícios escolares / Risco sísmico / Resiliência sísmica / Modelação Numérica / Planeamento e resposta de emergência

## SEISMIC VULNERABILITY ASSESSMENT OF LISBON'S MUNICIPAL SCHOOLS MAIN BUILDINGS

Schools of 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> cycles of basic education and secondary education

### Abstract

---

The Education Department (DE) of the Lisbon City Council - CML contacted LNEC to carry out a study on the seismic vulnerability of 32 schools in the 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> cycles and secondary schools whose management was transferred from the Ministry of Education to CML. Given the high number of buildings involved, it was established that the study would focus on the main buildings of each school, which corresponds to the buildings where the classrooms and/or administrative services are located, precisely those where the average annual occupancy rate is higher.

The assessment of the seismic vulnerability of the main buildings is based on the analysis of all available information about the structure of these buildings, namely the analysis of documents provided by the DE of CML and the collection and analysis of documents from other sources. This information was complemented with visits, for visual inspection, to a group of schools in which there were significant doubts regarding their structure and combined with data from schools built in the same epoch or with a similar typology, and also with data that LNEC has regarding the characteristics of construction in Portugal. Of the 32 schools that make up this study, it was not possible to carry out the assessment of 4 of them because they did not have the necessary and sufficient information to carry out their assessment.

All data collected were systematized and used in the development of numerical models that allow evaluating the structural behavior and non-linear response of each main building to different levels of intensity of the seismic action. Crossing the expected behavior of the structure with the expected seismic action for the location and geological-geotechnical conditions of the location of the school allows to assess the seismic vulnerability of the structure, based on a pre-established performance objective in accordance with the standards in force and the relevant complementary technical and scientific documentation. Schools were therefore considered as structures with an importance class III, which corresponds to an essential performance objective.

The final results of the study are, on the one hand, the definition, for each school, of a performance matrix that represents the fulfillment, or not, of the levels of seismic performance established for the various levels of intensity of the seismic action according to the objective of defined performance and, on the other hand, the estimation of seismic risk parameters, namely estimated losses depending on the built area of the schools and number of interdiction days, which allow to have a global view of the effects of the seismic action on the school park and also to rank schools on the basis of expected losses. The individual results for each school are presented in summary sheets, in an annex to this report.

Keywords: School Buildings / Seismic risk / Seismic Resilience / Numerical Modelling / Emergency planning and response

## Índice

1	Introdução .....	1
2	Risco, resiliência e desempenho sísmico de edifícios .....	6
2.1	Considerações gerais sobre risco sísmico .....	6
2.2	Resiliência de redes de infraestruturas a eventos sísmicos .....	8
2.3	Desempenho sísmico de estruturas de edifícios .....	10
2.4	Métodos computacionais para análise da resposta estrutural sísmica .....	20
3	Caracterização dos edifícios principais das escolas CML .....	24
3.1	Revisão histórica do parque escolar português .....	24
3.2	Tipologias estruturais dos edifícios principais das escolas CML .....	33
4	Metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica dos edifícios principais .....	41
4.1	Enquadramento .....	41
4.2	Determinação da resposta sísmica dos edifícios principais .....	42
4.3	Determinação dos períodos de retorno da ação sísmica associados aos estados limite da resposta dos edifícios principais .....	47
4.4	Representação gráfica da vulnerabilidade sísmica dos edifícios principais .....	53
4.5	Indicadores de risco e resiliência dos edifícios principais .....	56
5	Definição probabilística da perigosidade sísmica local das escolas CML .....	60
5.1	Enquadramento sismotectónico da área de Lisboa .....	60
5.2	Metodologia utilizada para a caracterização da ação sísmica no substrato rochoso .....	62
5.3	Espetros de resposta no substrato rochoso .....	69
5.4	Espetros de resposta da ação sísmica à superfície .....	71
5.5	Cenários sísmicos para os locais em estudo .....	76
6	Análise de risco e resiliência das escolas CML .....	78
6.1	Apresentação e discussão de resultados .....	78
6.2	Diretrizes para inspeção estrutural detalhada dos edifícios principais excluídos deste estudo .....	88
7	Conclusões .....	92
	Referências bibliográficas .....	97
	ANEXO – Fichas Resumo Individuais .....	101

## Índice de figuras

Figura 1.1 – Localização das 32 escolas identificadas através do seu ID (ver Tabela 1.1) .....	3
Figura 2.1 – Ciclo de gestão do risco e contribuição da avaliação do risco sísmico .....	7
Figura 2.2 – Exemplo de metas de avaliação relacionadas com as quatro dimensões de resiliência, aplicadas a uma comunidade universitária (adaptado de Bruneau et al. (2003)) .....	8
Figura 2.3 – Curva de resiliência – variação da funcionalidade de uma rede devido à ocorrência de um evento sísmico .....	9
Figura 2.4 – Espectro dos estados de dano .....	13
Figura 2.5 – Matriz de objetivos de desempenho recomendados para edifícios (adaptado de VISION 2000 (SEAOC, 1995)) .....	18
Figura 2.6 – Determinação da curva de capacidade de uma estrutura através de uma análise <i>pushover</i> .....	22
Figura 2.7 – Curva de capacidade genérica (Hazus, 2012) .....	22
Figura 3.1 – Escola Secundária Maria Amália Vaz de Carvalho (inaugurada em 1885) .....	25
Figura 3.2 – Escola básica Patrício Prazeres (construída em 1953) .....	27
Figura 3.3 – Escola José Gomes Ferreira (construída entre 1974 e 1980) .....	29
Figura 3.4 – Escola secundária do Restelo (tipologia pavilhonar 3x3) .....	31
Figura 3.5 – Planta do sistema estrutural da tipologia pavilhonar 3x3 (Santos, 2015) .....	32
Figura 3.6 – Escola Bairro Padre Cruz .....	32
Figura 3.7 – Desenhos da EBI Telheiras fornecidos pela CML .....	33
Figura 3.8 – Desenhos da EB Telheiras provenientes do “Atlas da Arquitectura Escolar em Portugal” (Alegre e Heitor, 2019) .....	34
Figura 3.9 – Furação com berbequim na EB23 Eugénio dos Santos para caracterização de pormenores construtivos das paredes interiores (ligação de painel de alvenaria de tijolo a montantes em betão) .....	34
Figura 3.10 – Furação na fachada da EB23 Almirante Gago Coutinho para definição das dimensões dos elementos estruturais do pórtico de betão armado (na ausência de dados de projeto) .....	35
Figura 3.11 – Número total de escolas em cada tipologia estrutural (total: 32 escolas) .....	37
Figura 3.12 – Número total de edifícios (principais) em cada tipologia estrutural (total: 85 edifícios principais) .....	37
Figura 3.13 – Salão da ES Maria Amália Vaz de Carvalho (esq.); edifício da EA de Dança do Conservatório Nacional (dir.) (fotografias das visitas do LNEC) .....	40
Figura 4.1 – Imagem do modelo numérico da EB Quinta de Marrocos – blocos com paredes em betão armado e laje aligeirada .....	42
Figura 4.2 – Imagem do modelo numérico da EB Luis António Verney: modelo de grelha das lajes (esq.); imagem geral (dir.) – estrutura com diagonais em betão armado e vigas invertidas na laje de esteira .....	43
Figura 4.3 – Modelo mecânico adotado para a alvenaria estrutural do edifício principal .....	43
Figura 4.4 – Imagem do modelo numérico da EB Eugénio dos Santos .....	44
Figura 4.5 – Curva de capacidade e representação dos estados limite para avaliação do desempenho dos edifícios principais das escolas .....	46
Figura 4.6 – Curva de <i>Hazard</i> - representação gráfica do procedimento de cálculo dos períodos de retorno associados aos estados limite da resposta estrutural: EL1 – estado limite 1; EL2 – estado limite 2 .....	47
Figura 4.7 – Representação gráfica do espectro de capacidade e do espectro de resposta no formato ADRS .....	48
Figura 4.8 – Determinação do ponto de desempenho com recurso ao CSM .....	49
Figura 4.9 – Cálculo do Amortecimento: procedimento exato (esq.); procedimento aproximado proposto pelo ATC-40 (dir.) .....	51

Figura 4.10 – Matriz de desempenho para os edifícios principais das escolas CML .....	54
Figura 4.11 – Exemplo de preenchimento da matriz de desempenho para um dos edifícios principais das escolas CML - escola com desempenho insatisfatório.....	55
Figura 4.12 – Exemplo de preenchimento da matriz de desempenho para um dos edifícios principais das escolas CML - escola com desempenho satisfatório .....	55
Figura 4.13 – Exemplo conceptual da evolução do número de escolas encerradas após a ocorrência de cenários sísmicos .....	59
Figura 5.1 – a) Sismicidade histórica, 63 a.C – 1960 d.C; b) Sismicidade instrumental 1961-2007 (Carrilho et al., 2010) .....	60
Figura 5.2 – Principais estruturas tectónicas do Vale Inferior do Tejo e área envolvente (Vilanova e Fonseca, 2004) .....	61
Figura 5.3 – Zonas sismogénicas da margem continental SW-Ibérica (Ribeiro, 2005).....	62
Figura 5.4 – Zonas sismogénicas definidas no modelo do ERSTA - Estudo do Risco Sísmico e Tsunamis do Algarve .....	64
Figura 5.5 – Localização geográfica para determinação da ação sísmica em Lisboa ao nível do substrato rochoso .....	70
Figura 5.6 – Espectros de resposta para o sismo próximo, no substrato rochoso, em Lisboa .....	70
Figura 5.7 – Espectros de resposta para o sismo afastado, no substrato rochoso, em Lisboa .....	71
Figura 5.8 – Colunas de solo do LNECLoss para a AML e concelhos limítrofes .....	71
Figura 5.9 – Número de escolas por classe de solo .....	73
Figura 5.10 – Coluna de solo tipo H do LNECLoss .....	73
Figura 5.11 – Coluna de solo tipo I do LNECLoss .....	74
Figura 5.12 – Coluna de solo tipo V do LNECLoss.....	74
Figura 5.13 – Espectros de resposta à superfície para o sismo próximo .....	75
Figura 5.14 – Espectros de resposta à superfície para o sismo afastado .....	75
Figura 6.1 – Perdas esperadas em 50 anos (TEL) em percentagem de área coberta das escolas ....	81
Figura 6.2 – Perdas esperadas em 50 anos (TEL) em área coberta das escolas.....	82
Figura 6.3 – Número de dias de encerramento das escolas em 50 anos (TEI) .....	85
Figura 6.4 – Número de alunos*mês deslocados em 50 anos (SMI) .....	85
Figura 6.5 – Escolas encerradas em função do tempo pós-sismo para vários cenários sísmicos (total: 28 escolas).....	87
Figura 6.6 – Alunos deslocados em função do tempo pós-sismo para vários cenários sísmicos (total: 17250 alunos) .....	88
Figura 6.7 – Extração de provete de betão para ensaio laboratorial .....	89
Figura 6.8 – Medições de recobrimento (esq.); abertura de janelas em pilares e paredes (centro); medição com esclerómetro em pilares e paredes resistentes (dir.) .....	89
Figura 6.9 – Interface gráfica do módulo <i>Modal Analysis-Output Only</i> – Visualização de Resultados	90
Figura 6.10 – Sistema de aquisição de dados em ensaio de identificação dinâmica (esq.); vista de dois acelerómetros num pilar, para uma das configurações de ensaio (dir.).....	91

## Índice de tabelas

Tabela 1.1 – Escolas com gestão da CML (32) .....	1
Tabela 2.1 – Descrição geral dos danos por níveis de desempenho e sistemas (adaptado de VISION 2000 (SEAOC, 1995)).....	15
Tabela 2.2 – Níveis de intensidade da ação sísmica de projeto (adaptado de VISION 2000 (SEAOC, 1995)).....	16
Tabela 2.3 – Parâmetros da perigosidade sísmica (adaptado de VISION 2000 (SEAOC, 1995)).....	17
Tabela 2.4 – Objetivos de desempenho recomendados para os edifícios críticos .....	19
Tabela 2.5 – Objetivos de desempenho recomendados para as instalações essenciais/perigosos ....	19
Tabela 2.6 – Objetivos de desempenho recomendados para as instalações básicas .....	20
Tabela 3.1 – Exemplos de seis escolas de diferentes tipologias estruturais .....	36
Tabela 3.2 – Tipologias estruturais das escolas em análise.....	38
Tabela 4.1 – Cargas permanentes e sobrecargas consideradas na análise .....	44
Tabela 4.2 – Definição dos estados limite para análise da vulnerabilidade sísmica .....	45
Tabela 4.3 – Períodos de retorno de referência para cada estado limite, em função dos objetivos de desempenho de edifícios essenciais .....	46
Tabela 4.4 – Fatores de dano para o cálculo das perdas anuais esperadas (AEL) (Sousa e Campos Costa, 2016).....	56
Tabela 4.5 – Dias de interrupção na utilização (IT) (HAZUS v.4.2.3, 2019).....	57
Tabela 5.1 – Solos das escolas CML com base na sua localização e no mapa de solos do LNEC ....	72
Tabela 5.2 – Magnitudes correspondentes a diferentes períodos de retorno .....	77
Tabela 6.1 – Períodos de retorno da ação sísmica associados à excedência dos estados limite da resposta sísmica dos edifícios principais das escolas .....	79
Tabela 6.2 – Probabilidades anuais de excedência dos estados limite da resposta sísmica dos edifícios principais das escolas.....	80
Tabela 6.3 – Perdas esperadas anuais (AEL) e perdas esperadas em 50 anos (TEL) em função da área coberta das escolas .....	81
Tabela 6.4 – Número de dias de encerramento das escolas por ano (AEI) e total de dias de encerramento esperado em 50 anos (TEL).....	84
Tabela 6.5 – Perdas esperadas para cada cenário sísmico .....	86

# 1 | Introdução

O Departamento de Educação da Câmara Municipal de Lisboa - CML solicitou ao LNEC o desenvolvimento de um estudo relativo à vulnerabilidade sísmica de 32 escolas do 2.º e 3.º ciclos e secundárias (Tabela 1.1), e cuja gestão transitou do Ministério da Educação para a CML. Dado o elevado número de edifícios envolvidos, com diferentes tipologias e usos, foi estabelecido que o estudo se iria concentrar nos edifícios principais das escolas, que correspondem aos edifícios onde estão localizadas as salas de aula e/ou serviços administrativos, precisamente aqueles onde a taxa média anual de ocupantes é mais elevada e, como tal, maximiza o risco de eventual perda de vidas humanas associadas aos danos estruturais nesses edifícios na ocorrência de sismos intensos.

Tabela 1.1 – Escolas com gestão da CML (32)

Nord	Escola	ID	Agrupamento de Escolas
1	Escola Básica Alto do Lumiar	8	Alto do Lumiar
2	Escola Básica Almirante Gago Coutinho	14	Alvalade
3	Escola Básica Bairro do Padre Cruz	16	Bairro Padre Cruz
4	Escola Secundária José Gomes Ferreira	27	Benfica
5	Escola Básica Marília	30	D.Dinis
6	Escola Básica Damião de Góis	36	D.Dinis
7	Escola Básica Vasco da Gama	43	Eça de Queiroz
8	Escola Básica Fernando Pessoa	47	Fernando Pessoa
9	Escola Básica Professor Delfim Santos	68	Laranjeiras
10	Escola Básica Luís António Verney	73	Luís António Verney
11	Escola Básica Luís de Camões	75	Luís de Camões
12	Escola Básica Manuel da Maia	79	Manuel da Maia
13	Escola Básica Nuno Gonçalves	92	Nuno Gonçalves
14	Escola Secundária Dona Luísa de Gusmão	93	Nuno Gonçalves
15	Escola Básica Olaias	97	Olaias
16	Escola Básica Patrício Prazeres	108	Patrício Prazeres
17	Escola Básica Pintor Almada Negreiros	111	Pintor Almada Negreiros
18	Escola Básica Piscinas	116	Piscinas – Olivais
19	Escola Básica Professor Lindley Cintra	122	Prof.Lindley Cintra
20	Escola Secundária Lumiar	123	Prof.Lindley Cintra
21	Escola Básica Quinta de Marrocos	124	Quinta de Marrocos
22	Escola Básica Eugénio dos Santos	131	Rainha D.Leonor
23	Escola Básica Paula Vicente	138	Restelo
24	Escola Secundária Restelo	139	Restelo
25	Escola Básica Olivais	143	Santa Maria dos Olivais
26	Escola Básica São Vicente – Telheiras	152	Vergílio Ferreira
27	Escola Básica Telheiras	147	Vergílio Ferreira
28	Escola Artística de Dança do Conservatório Nacional	160	Desagrupada
29	Escola Artística Instituto Gregoriano de Lisboa		Desagrupada
30	Escola Profissional Ciências Geográficas		Desagrupada
31	Escola Secundária Maria Amália Vaz de Carvalho	86	Desagrupada
32	Escola Secundária Marquês de Pombal	57	Desagrupada

Os resultados finais do estudo são, por um lado, a definição, para cada escola, de uma matriz de desempenho que representa de forma gráfica o cumprimento, ou não, de objetivos de desempenho sísmico estabelecidos para vários níveis de intensidade da ação sísmica e, por outro lado, a estimativa de parâmetros de risco e resiliência, nomeadamente perdas, em função da área das escolas, assim

como na análise do número de escolas encerradas e correspondente número de alunos deslocados para um conjunto de cenários sísmicos, definidos com recurso ao estudo probabilístico da ação sísmica. Estas estimativas permitem ter uma visão global dos efeitos da ação sísmica sobre o parque escolar e também hierarquizar as escolas em função das perdas esperadas.

Os cenários sísmicos considerados variam, em magnitude, entre 5.3 e 7.1. Para cada cenário, além da estimativa das perdas económicas diretas em função dos danos nos edifícios principais, é estimada a evolução do número de escolas encerradas e do correspondente número de alunos deslocados ao longo do tempo, até toda a rede escolar estar novamente operacional. É de referir que tal estimativa assume que todos os recursos necessários serão alocados, sem qualquer limitação, pelo que esta estimativa depende apenas dos danos expectáveis e do tempo útil necessário para repor a operacionalidade das escolas. No entanto, o enquadramento económico, social e político terá necessariamente de ser ponderado numa situação pós-sismo, afetando assim as estimativas aqui apresentadas. Não obstante, as estimativas apresentadas permitem aferir da necessidade expectável de alocação de alunos para vários cenários sísmicos de referência.

A avaliação da vulnerabilidade sísmica dos edifícios principais tem por base a análise de toda a informação disponível sobre a estrutura desses edifícios, nomeadamente a análise dos documentos fornecidos pela CML e a recolha e análise de documentos provenientes de outras fontes. A informação disponível revelou-se, mesmo assim, insuficiente em muitos casos, em particular devido à ausência de projetos de estruturas e fundações, o que impossibilita uma avaliação detalhada do comportamento sísmico das estruturas. Para obviar esta escassez de informação, foram realizadas várias visitas, para inspeção visual, a um conjunto de escolas em que subsistiam dúvidas significativas relativas à sua estrutura. Os dados recolhidos nessas visitas, a informação cruzada com escolas construídas na mesma altura ou com tipologia semelhante, assim como os dados que o LNEC dispõe relativamente às características da construção em Portugal, permitiram elaborar um conjunto de considerações que tornam este estudo exequível.

Todos os dados recolhidos são sistematizados e resultam na elaboração de modelos numéricos, desenvolvidos em programa de elementos finitos, que permitem avaliar o comportamento estrutural sísmico de cada edifício principal. Esta análise numérica permite determinar a resposta não linear de cada edifício para diferentes níveis de intensidade da ação sísmica. O cruzamento do comportamento expectável da estrutura com a ação sísmica esperada para a localização e as condições geológico-geotécnicas do local de implantação da escola permite avaliar a vulnerabilidade sísmica da estrutura, tendo por base um objetivo de desempenho pré-estabelecido de acordo com as normas em vigor e a documentação técnica e científica complementar relevante.

É de salientar que o *Regulamento de Segurança das Construções Contra os Sismos* (RSCCS) foi implementado em 1958, existindo escolas anteriores que não foram projetadas tendo em consideração a ação sísmica de forma direta. Por outro lado, o *Regulamento de Segurança e Acções em Estruturas de Edifícios e Pontes* (RSAEEP), publicado em 1983, ainda não abrange a totalidade das escolas a analisar. Acresce ainda que, de acordo com o EC8-1 (NP EN 1998-1:2010), as escolas devem ser consideradas estruturas com classe de importância III, pelo que os níveis de desempenho que deverão

ser verificados para as escolas, associados a cada objetivo de desempenho, devem ter este aspeto em atenção, tal como é descrito no Capítulo 2 deste relatório.

A caracterização da ação sísmica é feita através de um estudo probabilístico, desenvolvido no âmbito deste trabalho, que considera a contribuição das várias fontes sismogénicas e a localização geográfica das escolas (Figura 1.1), por forma a poder caracterizar os locais do ponto de vista geotécnico e, conseqüentemente, a poder estimar os efeitos de sítio, isto é, a amplificação da ação sísmica desde o substrato rochoso até à superfície.



Figura 1.1 – Localização das 32 escolas identificadas através do seu ID (ver Tabela 1.1)

Sucintamente, a metodologia aplicada neste estudo baseia-se em: (1) definição do comportamento não-linear da estrutura e dos estados limite da resposta (secção 4.2); (2) determinação dos pontos de desempenho, através da utilização do *Capacity Spectrum Method*, CSM (secção 4.3), para um conjunto de espectros de resposta da ação sísmica definidos especificamente através de um estudo probabilístico da perigosidade sísmica (Capítulo 5); (3) determinação dos períodos de retorno (através de metodologia descrita em 4.3), associados à intensidade da ação sísmica que conduzem à excedência dos estados limite definidos em 4.2, sendo utilizados para calcular a probabilidade anual de excedência de tais estados limite; (4) cálculo de parâmetros de risco, nomeadamente perdas anuais e em 50 anos esperadas em função da área das escolas e número de dias de encerramento das escolas num ano e ao longo de 50 anos (secção 4.5); e (5) cálculo de indicadores de resiliência, para um conjunto de cenários sísmicos, que correspondem à variação do número de escolas encerradas e correspondente número de alunos deslocados num período de 2 anos subsequentes à ocorrência de um evento sísmico, para cada cenário considerado (secção 4.5).

A estimativa destes parâmetros de risco permite ordenar as escolas desde a menos vulnerável até à mais vulnerável, contribuindo assim para a priorização da necessidade de intervenção e/ou para o desenvolvimento de um plano de ação com vista à mitigação do risco sísmico. Por outro lado, a estimativa dos indicadores de resiliência fornece dados quantitativos úteis no desenvolvimento de um plano de resposta e emergência à ação sísmica, integrado ao nível da rede escolar do município.

Assim, a avaliação da vulnerabilidade sísmica dos edifícios principais assenta nos seguintes passos:

- 1) Tipificação dos edifícios principais em tipologias estruturais;
- 2) Identificação das características de solo nos locais de implantação de cada escola e caracterização da ação sísmica a considerar com base num estudo probabilístico da perigosidade sísmica;
- 3) Análise não-linear da resposta sísmica com o método do espectro de capacidade (*Capacity Spectrum Method* - CSM), preconizado pela NP EN1998-3:2017, recentemente publicada;
- 4) Avaliação do desempenho sísmico da estrutura, tendo por base um objetivo de desempenho pré-estabelecido;
- 5) Cálculo das perdas esperadas em função da área da escola e número de dias de interdição;
- 6) Elaboração e preenchimento de fichas de avaliação individuais para o edifício principal de cada escola, com a informação recolhida, descrição dos modelos e pressupostos de análise adotados, resultados e recomendações.

De entre as 32 escolas que integram este estudo não foi possível proceder à análise de 4 delas, por não respeitarem os pressupostos base do estudo solicitado pela CML ou por não disporem de dados que permitam a execução da análise, tal como descrito na Secção 3.2.

No Capítulo 2 é introduzida a problemática do risco sísmico e da gestão do mesmo, sendo também descrito o método de análise do comportamento sísmico dos edifícios e os critérios de avaliação da segurança dos mesmos à luz de objetivos de desempenho estabelecidos. No Capítulo 3 são caracterizados os edifícios principais das escolas em análise, no que concerne à sua tipologia estrutural e principais características funcionais. No Capítulo 4 deste relatório são definidos os estados limite que

caracterizam a resposta sísmica das escolas, assim como os métodos numéricos de cálculo e avaliação da vulnerabilidade sísmica dos edifícios principais, através da estimativa de parâmetros de risco e de resiliência da rede escolar, que permitem hierarquizar as escolas com maior risco e providenciar indicadores para o desenvolvimento de planos de resposta e emergência para a ação sísmica. De seguida, no Capítulo 5, é apresentado o estudo probabilístico da perigosidade sísmica e os cenários sísmicos utilizados para estudo da resiliência, enquanto que no Capítulo 6 são apresentados os resultados globais da análise, através dos indicadores de risco e resiliência estimados. Os resultados individuais de cada escola são apresentados nas fichas respetivas, anexas a este relatório. Finalmente, no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões e recomendações, incluindo diretrizes para desenvolvimento de um estudo detalhado de duas escolas cuja análise não é exequível com as informações disponibilizadas, tal como descrito na Secção 3.2.

## 2 | Risco, resiliência e desempenho sísmico de edifícios

### 2.1 Considerações gerais sobre risco sísmico

São três os fatores principais, interligados entre si, que contribuem para o risco sísmico de uma região: (i) o perigo potencial, designado de perigosidade, da ocorrência de sismos que afetam a região; (ii) a exposição, ou seja, o valor dos elementos em risco e a sua distribuição geográfica; e (iii) a vulnerabilidade estrutural dos elementos expostos e consequente extensão e grau dos seus danos face à ação dos sismos. Desta forma, é natural que a variação de qualquer um dos três fatores mencionados influencie a severidade do risco sísmico.

Não sendo possível condicionar a perigosidade sísmica, intrínseca a cada região, cabe à comunidade e às entidades com responsabilidades de gestão e legislação adotarem medidas relativamente à exposição dos elementos da comunidade e às vulnerabilidades das infraestruturas, no sentido de mitigar o risco sísmico.

A caracterização da ação sísmica deve ter em conta a identificação das falhas existentes no território e que são suscetíveis de gerar sismos que afetam a região (no caso de Lisboa, tanto falhas no interior do continente como no oceano). Esta informação é incorporada em modelos sofisticados que modelam a propagação de energia desde a falha até ao local em estudo, o que corresponde às boas práticas adotadas pelo LNEC para a caracterização da ação sísmica em locais de perigosidade sísmica elevada ou próximo de sistemas de falhas importantes.

A vulnerabilidade sísmica das tipologias de edifícios de interesse será avaliada de forma rigorosa e descrita em termos de curvas de capacidade estrutural, com identificação clara dos estados limites de dano de interesse para a quantificação do risco sísmico, bem como das incertezas associadas ao comportamento de cada tipologia estrutural.

A avaliação do risco sísmico é um passo fundamental no ciclo de gestão do risco (Figura 2.1) e, conseqüentemente, na definição de estratégias de mitigação. Estas assentam em fundamentos como: (i) o planeamento de emergência e comunicação com a comunidade; e (ii) o apoio à decisão em estratégias de intervenção sobre o parque edificado, permitindo estudar o efeito de diferentes intervenções de reabilitação e reforço, em termos de custo-benefício.

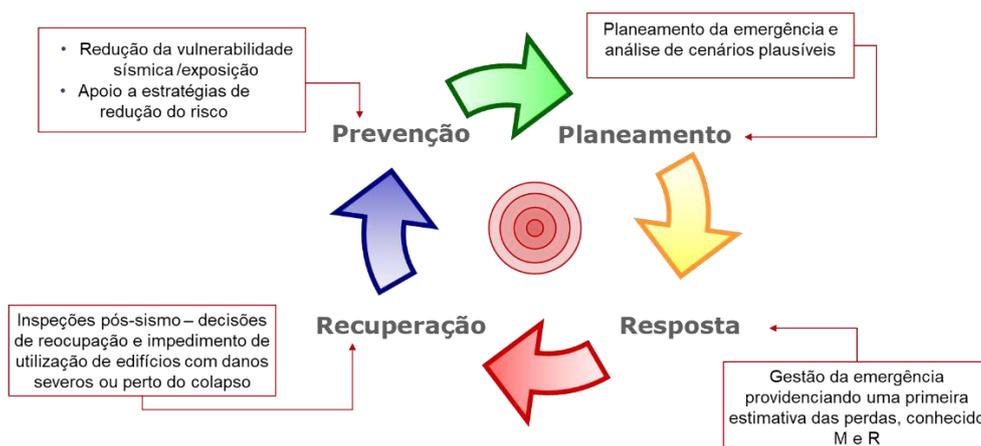


Figura 2.1 – Ciclo de gestão do risco e contribuição da avaliação do risco sísmico

Importa ainda referir que a investigação sobre comunicação do risco indica que muitas ações de educação para a segurança sísmica falham por não se adequarem às características específicas dos grupos a que se destinam e por desconhecerem os mecanismos subjacentes à tomada de decisão dos indivíduos relativamente à sua própria proteção. A ação protetiva individual representa o culminar de um processo psicossocial que passa por vários patamares: conhecimento e consciencialização do risco; confirmação da ameaça, designadamente através do diálogo com outrem (i.e. familiares, amigos, cientistas); personalização da ameaça, ganhando uma visão das consequências de um sismo para o próprio e familiares; e desenvolvimento de competências em matéria de proteção sísmica. Assim, proceder à sensibilização pública para o risco sísmico junto da população, com um plano integrado e adaptado à realidade local, é fundamental para a eficaz implementação de programas de redução do risco.

Por último, é de realçar que a mitigação do risco sísmico deve ter em conta que entre 60% a 70% dos ferimentos e internamentos após um sismo se devem à queda de elementos não-estruturais. Estes elementos não fazem parte da estrutura (fundação, pilar, viga, laje, parede estrutural, cobertura), embora sejam parte integrante de um edifício (tetos falsos, paredes divisórias, mobiliários e outros objetos, equipamentos mecânicos e eletromecânicos, etc.).

São os sismos moderados, e por isso mais frequentes, que atingem principalmente esses elementos, causando vítimas, feridos, perda de bens e de funcionalidade. Assim sendo, para além de salvaguardar a resistência e o comportamento estrutural, é também fundamental salvaguardar a resistência destes elementos a fim de minimizar perdas humanas, económicas ou funcionais (FEMA E-74, Ferreira *et al.*, 2018). As medidas protetivas para os elementos não-estruturais são, na sua maior parte, de baixo custo (fixar, colar, ancorar), ou mesmo custo zero, quando se trata apenas de mover objetos pesados das prateleiras mais altas para as mais baixas, por exemplo.

## 2.2 Resiliência de redes de infraestruturas a eventos sísmicos

A Resiliência é vista como uma característica intrínseca dos sistemas e das comunidades. Comunidades resilientes são normalmente dotadas de infraestruturas adequadas e adaptadas aos riscos a que estão expostas e também de capacidade para, por um lado prever/antecipar riscos que possam levar a perdas (humanas, económicas, ambientais, entre outras) através de ações pré-evento de sensibilização e preparação e, por outro lado, mitigar as consequências de desastres através de uma ação estratégica coordenada, previamente planeada, de resposta a esse tipo de eventos. Wildavsky (1991) define Resiliência como a “capacidade para lidar com riscos imprevistos após estes se terem manifestado, aprender com os eventos ocorridos e recuperar rapidamente”. Por outro lado, Home e Orr (1997) definem Resiliência como a “habilidade de um sistema para suportar ações resultantes do meio envolvente (...) uma qualidade fundamental em indivíduos, grupos, organizações e em ecossistemas no seu todo”.

O conceito de Resiliência é bastante abrangente e a sua aplicação tem sido discutido nas últimas décadas. O conceito de resiliência e a sua aplicação a comunidades urbanas foi extensamente discutido por Ainuddin and Routray (2012) and Longstaff et al. (2010). Bruneau et al. (2003) foi responsável pela introdução do conceito de Resiliência na área da Engenharia, nomeadamente na Engenharia Sísmica.

Os principais objetivos de aumentar a resiliência de uma comunidade passam por minimizar as consequências, em termos de perdas de vidas humanas, doença, assim como prejuízos económicos, sociais ou ambientais resultantes de um desastre, assim como recuperar a operacionalidade de todas as redes (de infraestruturas, abastecimento, serviços, sociais, etc.) o mais rápido possível após a ocorrência de um evento sísmico.

De acordo com Bruneau et al. (2003) a resiliência integra quatro dimensões fundamentais: técnica, organizacional, social e económica. Cada uma destas dimensões pode definir metas específicas para avaliar a resiliência de uma rede ou de uma comunidade. Exemplos de tais metas, no âmbito de uma comunidade universitária, são as apresentadas na Figura 2.2.

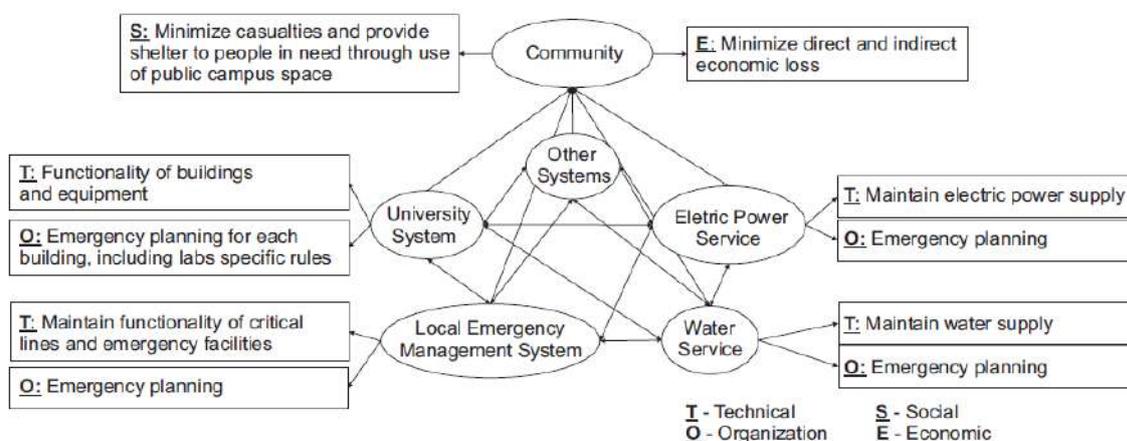


Figura 2.2 – Exemplo de metas de avaliação relacionadas com as quatro dimensões de resiliência, aplicadas a uma comunidade universitária (adaptado de Bruneau et al. (2003))

A avaliação da resiliência constitui uma área de investigação em largo desenvolvimento nas últimas décadas. Ainda que não exista uma metodologia estabelecida para avaliar a resiliência de uma rede, é comumente aceite que a resiliência corresponde à junção de quatro medidas interdependentes: (1) robustez das infraestruturas; (2) redundância da rede; (3) rapidez na resposta ao evento; e (4) recursos. A robustez é definida como a capacidade de uma infra-estrutura de responder a dado evento sem ter um dano desproporcional, face aquilo que é expectável em termos do seu dimensionamento construtivo. Por outro lado, a redundância traduz-se na existência de alternativas que permitam à rede continuar em operação mesmo quando alguns dos seus elementos estão inoperacionais. A rapidez está relacionada com a capacidade da comunidade em recuperar a operacionalidade da rede o mais rapidamente possível após o evento sísmico, minimizando dessa forma as perdas. Por fim, a existência de recursos, financeiros e de outro tipo (por exemplo, abrigos provisórios), providencia uma maior resiliência para responder rapidamente após a ocorrência de um evento sísmico, o que se traduz numa maior resiliência.

A resiliência sísmica é usualmente avaliada através da perda de operacionalidade ou funcionalidade de uma rede após um evento sísmico e do tempo que demora a recuperar o nível de funcionalidade pré-evento. Assim, definindo uma função  $Q(t)$  que representa a funcionalidade da rede, variando entre 0% e 100%, onde 100% é o nível de funcionalidade pré-evento e 0% representa a total perda de funcionalidade da rede (interrupção total), encontra-se na Figura 2.3 a representação gráfica desta função. O tempo  $t_0$  corresponde à ocorrência de um sismo. Como é possível observar, uma curva com menor perda de funcionalidade e menor tempo de recuperação está associada a uma maior resiliência de determinada rede (rede 1, neste caso). Refira-se ainda que o desejável será a recuperação para um nível de funcionalidade superior à inicial, o que corresponde a uma melhoria da rede.

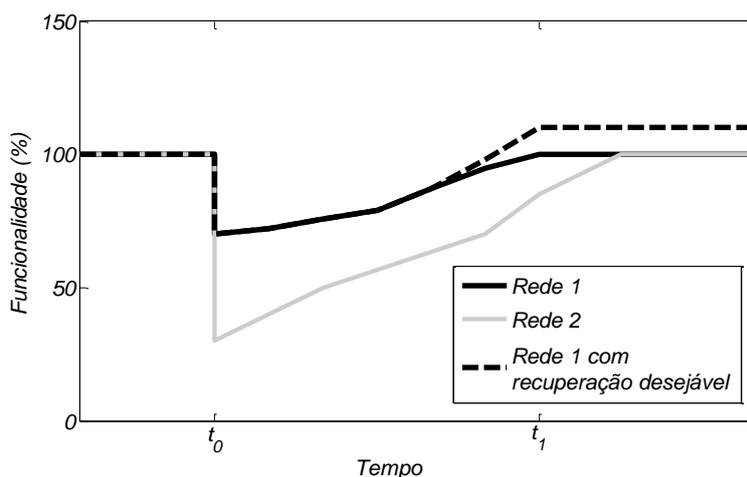


Figura 2.3 – Curva de resiliência – variação da funcionalidade de uma rede devido à ocorrência de um evento sísmico

Assim, a resiliência é medida através do cálculo da área da função  $Q(t)$  entre o instante  $t_0$  e um qualquer instante  $t_1$ , em que se pretenda avaliar a resiliência da rede:

$$R = \int_{t_0}^{t_1} (100 - Q(t))dt \quad (2.1)$$

onde  $(100-Q(t))$  corresponde à perda de funcionalidade ao longo do período  $t_0-t_1$ . Salienta-se que a perda de funcionalidade, no caso da rede escolar da CML pode ser traduzida pelo número de escolas encerradas e correspondente número de alunos deslocados.

## 2.3 Desempenho sísmico de estruturas de edifícios

### 2.3.1 Conceitos sobre verificação da segurança sísmica

O primeiro objetivo dos regulamentos de dimensionamento de estruturas é o de proteger as vidas humanas, providenciando construções íntegras, robustas e com resistência suficiente para resistir sem colapsar ou originar muitos destroços após a ocorrência de sismos muito severos mas relativamente pouco frequentes. O segundo objetivo inclui o controlo dos danos materiais e a manutenção da sua função em eventos moderados mas que são expectáveis de ocorrer mais vezes. Os regulamentos foram desenvolvidos empiricamente, baseados em observação dos danos ocorridos em sismos e de uma investigação extensíssima nos vários centros de investigação em engenharia sísmica espalhados pelo mundo. Após um grande sismo, técnicos especializados observam os danos sofridos pelos edifícios, com particular interesse no desempenho das estruturas construídas segundo os regulamentos. Se são observados danos inaceitáveis, os regulamentos são modificados para prevenir danos recorrentes em eventos futuros.

Os sismos severos são eventos relativamente pouco frequentes, que podem ou não ocorrer durante a vida útil de um edifício. É tecnicamente possível projetar e construir edifícios que resistam a um evento muito severo sem nenhum dano, mas geralmente é considerado desnecessário e pouco económico fazê-lo, particularmente em regiões de sismicidade moderada a baixa. Assim, a filosofia de projeto de engenharia evoluiu ao longo dos anos e o dimensionamento sísmico é desenvolvido com a antecipação que eventos muito severos causam danos na maioria dos edifícios. Deste modo, objetivo do projeto com resistência sísmica tornou-se numa tentativa de limitar os danos sofridos pelo edifício a níveis aceitáveis pela engenharia de estruturas. Historicamente, danos que resultaram apenas em feridos ligeiros, sem perda de vidas humanas, são considerados aceitáveis para a maioria das estruturas.

Conceptualmente, em engenharia baseada em *objetivos de desempenho* e *níveis de desempenho*, a aceitabilidade de diferentes níveis de danos é determinada pelas consequências que esses danos provocam na comunidade e a frequência com que tais danos ocorrem. Se uma estrutura tiver maior resistência sísmica reduz os custos de reparação relacionados com a sua vida útil, interrupção da sua operação e a reparação/reforço após um sismo. Numa situação ideal, os custos para garantir que a estrutura tem resistência sísmica devem ser ponderados com os custos de reparação dos danos

causados por um sismo. O objetivo é minimizar os custos de reparação dos danos em eventos sísmicos futuros, algo que é feito considerando um conjunto de objetivos de desempenho.

Cada *objetivo de desempenho*, estabelecido para uma dada infraestrutura, deve corresponder a um *nível de desempenho* estabelecido em relação ao comportamento da respetiva estrutura de suporte, que não deve ser excedido na ocorrência de um certo *nível de severidade sísmica*, caracterizada por uma medida da perigosidade sísmica do local de implementação dessa infraestrutura. Os *objetivos de desempenho* de uma infraestrutura devem ser selecionados de acordo com a ocupação dos seus edifícios, a importância das suas funções, considerações económicas incluindo os custos relacionados com a manutenção/reparação de danos e a interrupção de operacionalidade e considerações quanto ao seu potencial valor histórico ou cultural. Ao nível do território, os decisores políticos devem, portanto, definir um conjunto de *objetivos de desempenho* baseados na combinação dos efeitos para classes de edifícios e de infraestruturas que minimizem o risco, se possível numa lógica de custo-benefício generalizados ou, simplesmente, de custo-eficácia.

O *nível de desempenho* é, portanto, a expressão da extensão máxima desejada de um dano num edifício, dada a ocorrência de um certo nível de severidade da ação sísmica. A condição dos seus elementos estruturais e não estruturais e do conteúdo desse edifício são considerados nos *níveis de desempenho*, assim como a disponibilidade das infraestruturas necessárias ao completo desempenho de funções a que se destinava esse edifício. Os *níveis de desempenho* são expressos de duas maneiras diferentes, mas relacionadas entre si:

1. Em termos qualitativos têm que fazer sentido para a lei pública incluindo o proprietário, o gestor do edifício, os inquilinos e os decisores políticos.
2. Em termos técnicos têm que ser úteis no projeto de engenharia e na avaliação de segurança do edifício, incluindo a extensão da deterioração e degradação permitida para a estrutura e para os elementos não estruturais, assim como, todo o comportamento das infraestruturas de abastecimento do edifício.

De acordo com as recomendações do VISION 2000 (SEAOC, 1995), são definidos quatro *níveis de desempenho*. Para cada nível é definido o limite para um conjunto de estados de dano que atendem às necessidades básicas de utilização dos edifícios, tais como a continuidade no desempenho da função a que se destina, adequação para a reparação, segurança, etc. Os quatro níveis são:

- Completamente operacional
- Operacional
- Salvaguarda de vida
- Próximo do colapso

A engenharia baseada em *objetivos de desempenho* e *níveis de desempenho* procura o controlo destes níveis de danos que afetam uma estrutura para um largo espetro de eventos que podem vir a ocorrer. De maneira a permitir uma aplicação prática desta metodologia, é necessário selecionar uma série de sismos de entre o conjunto discreto de todos os sismos que possam ocorrer. Deve representar o

conjunto de diferentes sismos com níveis diferentes de severidade (*níveis de intensidade da ação sísmica*) para os quais o desempenho do edifício seja requerido.

### 2.3.2 Níveis de desempenho para estruturas de edifícios

A análise de eventos extremos, como os sismos, deve ser baseada na capacidade/desempenho das estruturas medida através de parâmetros de resposta estruturais. O desempenho é expresso no que respeita à adequação da estrutura para a sua função e ocupação, a extensão da proteção da salvaguarda de vidas e a necessidade/praticabilidade dos efeitos das reparações na estrutura e no restabelecimento das funções que desempenhava. De notar que, os edifícios são estruturas complexas que contêm um número alargado de sistemas interdependentes. Assim, dentro de um determinado nível de desempenho, diferentes sistemas integrantes da infraestrutura podem registar diferentes estados de dano, que podem ser classificados de acordo com o seu desempenho específico, tal como referido na secção 2.2. As definições dadas abaixo definem cada um destes intervalos em termos de dano máximo e funcionalidade mínima que correspondem a um nível de desempenho pretendido. A Figura 2.4, adaptada do VISION 2000 (SEAOC, 1995), ilustra o espectro completo dos estados de dano que um edifício pode experienciar quando sujeito a ações sísmicas de intensidade crescente. Esta figura relaciona os vários intervalos de danos que são permitidos dentro de cada limite do nível de desempenho e uma referência que define um índice numérico de dano. Estas definições são também adequadas para classificar o desempenho dos edifícios após os sismos.

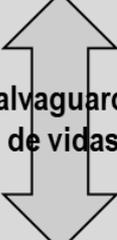
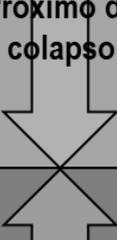
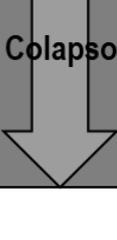
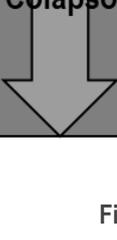
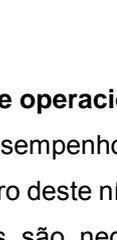
Intervalo de danos e Índice de danos		Estado de danos e limites do nível de desempenho	
10	Negligenciável	 <b>Completamente operacional</b> 	Sem danos, sem interrupção de serviço.  Serviço sem interrupção, a instalação mantém-se em funcionamento após o sismo. Danos estruturais e não estruturais negligenciáveis.
9			
8	Ligeiro	 <b>Operacional</b> 	A maioria das operações e funções podem ser reparadas imediatamente. São necessárias reparações para restaurar serviços não essenciais. Danos ligeiros.  A estrutura é segura para ocupação imediata após o sismo. As operações essenciais estão protegidas, as não essenciais são interrompidas.
7			
6	Moderado	 <b>Salvaguarda de vidas</b> 	Danos moderados. Componentes não estruturais podem não estar operacionais porém encontram-se seguros.  A segurança dos ocupantes está de um modo geral protegida. As estruturas encontram-se danificadas mas permanecem estáveis. Não existe perigo da estrutura ruir.
5			
4	Severo	 <b>Próximo do colapso</b> 	Não há colapso estrutural. Os elementos não estruturais podem ruir.  Danos severos nos elementos estruturais sem terem colapsado. Os elementos não estruturais caem.
3			
2	Completo	 <b>Colapso</b> 	Sistema estrutural primário colapsa.  Colapso estrutural completo.
1			

Figura 2.4 – Espectro dos estados de dano

**A. Completamente operacional**

É o nível de desempenho no qual nenhum dano ocorre. Se a resposta de um edifício a um sismo está dentro deste nível de desempenho, as consequências na utilização do edifício pelos seus ocupantes são negligenciáveis. O edifício permanece seguro para habitar. Todo o equipamento e serviços básicos relacionados com a ocupação e função do edifício estão disponíveis para uso. De forma geral, o edifício não necessita de reparações.

## **B. Operacional**

Ocorrem danos moderados em elementos não estruturais e no seu recheio e danos ligeiros nos elementos estruturais. O dano é limitado e não compromete a estabilidade do edifício no caso de ser ocupado após o sismo. Contudo, devido aos danos de alguns elementos não estruturais, utensílios e componentes, podem ser interrompidas algumas funções normais do edifício. A existência de um plano de resposta e emergência é fundamental para permitir a minimização da recuperação pós-sismo e garantia da continuidade de utilização.

## **C. Salvaguarda de vidas humanas**

Ocorrem danos moderados em elementos estruturais e não estruturais, assim como no seu recheio. A rigidez lateral da estrutura e a sua capacidade de resistir a forças laterais adicionais ficam reduzidas, possivelmente devido a deslocamentos permanentes pós sismo que, não obstante, não induziram o colapso da estrutura. Não existe grande risco de queda de elementos. A evacuação do edifício não é substancialmente prejudicada, apesar dos elevadores e equipamento elétrico poderem não estar operacionais. Neste caso, o edifício poderá não estar em condições de ser ocupado imediatamente após o sismo. O edifício necessitará provavelmente de ser reparado, apesar de, em alguns casos, tal reparação não ser economicamente viável.

## **D. Próximo do colapso**

Ocorrem estados danos muito severos para os quais a resistência da estrutura do edifício a forças horizontais e gravíticas está gravemente comprometida. As réplicas do sismo podem resultar no colapso parcial ou total da estrutura. A queda de elementos pode comprometer a evacuação do edifício, contudo, existe pelo menos um caminho de cargas que garante a resistência às cargas gravíticas, estando numa situação de colapso iminente. O edifício fica indisponível para ser ocupado e a sua reparação é provavelmente economicamente inviável.

Na Tabela 2.1, descrevem-se os níveis de dano admissíveis dos vários sistemas e subsistemas de um edifício para cada um dos quatro níveis de desempenho. Também são apresentados os deslocamentos máximos admissíveis durante o sismo (resposta transiente) e residual (permanente pós-sismo) que podem ser suportados pelo edifício nesses níveis de desempenho. Os níveis de deslocamento admissível são função do sistema estrutural e não estrutural. Alguns sistemas estruturais podem suportar maiores movimentos sem sofrerem danos significativos. De forma semelhante, alguns elementos não estruturais podem ser instalados de tal forma que podem suportar grandes deslocamentos entre pisos enquanto outros podem colapsar ou sofrer danos severos para o mesmo nível de deslocamentos. Assim, os limites de deslocamentos indicados no quadro devem ser aplicados com precaução.

Tabela 2.1 – Descrição geral dos danos por níveis de desempenho e sistemas (adaptado de VISION 2000 (SEAO, 1995))

Descrição do sistema	10 Completamente operacional	9 8 Operacional	7 6 Salvaguarda de vida	5 4 Próximo do colapso	3 2 Colapso	1
Edifício	Sem dano	Ligeiro	Moderado	Severo	Completo	
Deslocamento transiente admissível	< 0.2% +/-	< 0.5% +/-	< 1.5% +/-	< 2.5% +/-	< 2.5% +/-	
Deslocamento permanente (residual) admissível	Sem dano.	Sem dano.	< 0.5% +/-	< 2.5% +/-	< 2.5% +/-	
Estrutura de suporte das forças gravíticas	Sem dano.	Sem dano.	Dano ligeiro a moderado, mas permanecendo com a rigidez e resistência que possuía antes da ocorrência do sismo.	Dano moderado a severo, mas continua a suportar as forças gravíticas.	Perda total ou parcial da capacidade de suporte das forças gravíticas.	
Sistema estrutural resistente às forças horizontais	Sem dano – geralmente resposta elástica; pouca perda de resistência ou rigidez.	Ligeiro – resistência e rigidez originais mantidas, mas perto do limite elástico. Pequenas fendas/cedência de elementos estruturais; reparações implementadas consoante as necessidades.	Dano moderado – redução da rigidez e resistência, mas o sistema estrutural mantém-se em funcionamento.	Dano residual - perda de resistência e de rigidez. Não há colapso de pisos, mas há grandes deslocamentos permanentes. Elementos de sistemas estruturais secundários podem ter ruído completamente.	Colapso total ou parcial - Os elementos estruturais primários podem requerer demolição. Sem reserva de resistência a forças horizontais.	
Elementos não estruturais	Dano reduzido no revestimento, vidros, divisórias, acabamentos, etc. Elementos isolados podem necessitar de reparação.	Dano ligeiro a moderado no sistema arquitetónico. Alguns elementos essenciais não apresentam danos. Contenção completa de materiais perigosos.	Dano moderado a severo no sistema arquitetónico, mas sem se observarem, ou estarem iminentes, grandes quedas. Contenção de derrame de materiais perigosos é mantida.	Danos severos no sistema arquitetural. Alguns elementos estão destacados e prestes a cair. Contenção de derrame de materiais perigosos é mantida.	Derrame de materiais perigosos. Destruição generalizada de componentes de elementos não estruturais.	
Sistema de fuga/saída	Não prejudicado.	Não há grande obstrução nos corredores de saída. Os elevadores podem entrar ao serviço após uma pequena vistoria.	Não há grande obstrução nos corredores de saída. Os elevadores podem não funcionar por um longo período de tempo.	O sistema de fuga pode estar comprometido ou parcialmente obstruído.	O sistema de fuga pode estar completamente obstruído.	
Redes de infraestruturas Mecânicas/Elétricas/ Canalização/Sistemas utilitários	Funcional.	Equipamento essencial e de bombeiros encontram-se operacionais. Outros sistemas podem necessitar de reparação.	Alguns equipamentos estão deslocados das suas posições ou derrubados. Muitos sistemas não se encontram a funcionar. Há roturas nas condutas de abastecimento.	Danos severos e permanentes nas redes de infraestruturas de abastecimento.	Destruição parcial ou total das redes de infraestruturas. Interrupção permanente no abastecimento.	
Conteúdos	Danos ligeiros nos conteúdos. Materiais perigosos estão	Danos ligeiros a moderados. Materiais críticos e perigosos estão seguros.	Danos moderados a severos no recheio. Derrame de materiais	Danos severos no recheio. Contenção de materiais	Perda parcial ou total do recheio.	

	seguros e não apresentam danos.		críticos e perigosos está contido.	perigosos pode não ser possível.	
Reparação	Não requerida.	De acordo com os proprietários ou inquilinos.	Possível – alguns edifícios estão fechados.	Não é aconselhável.	Não é possível.
Efeitos na ocupação	Sem efeito.	A ocupação permanente é possível.	Perda a curto prazo ou indefinido para uso.	Potencial perda definitiva para uso.	Perda definitiva para uso.

### 2.3.3 Níveis de intensidade da ação sísmica

Os níveis de intensidade da ação sísmica são expressos em termos do seu período de retorno médio ou da probabilidade de excedência. O período de retorno médio (por exemplo 475 anos) é uma expressão da média do período de tempo, medido em anos, entre a ocorrência de sismos que produzem os mesmos efeitos de severidade ou maiores. A probabilidade de excedência (por exemplo 10% em 50 anos) é uma representação estatística da probabilidade de a intensidade da ação sísmica exceder um determinado grau de severidade, que será sentido num local dentro de um determinado número de anos. O período de retorno pode ser diretamente relacionado com a probabilidade de excedência para um determinado número de anos.

É recomendado que os níveis de intensidade da ação sísmica definidos na Tabela 2.2 sejam usados na avaliação de segurança, ou dimensionamento, de estruturas de edifícios que recorram à metodologia de avaliação de desempenho sísmico. É fundamental que a ação sísmica seja caracterizada através de medidas de intensidade adequadas, tais como, a aceleração espectral associada ao período fundamental de vibração da estrutura, entre outras.

Tabela 2.2 – Níveis de intensidade da ação sísmica de projeto (adaptado de VISION 2000 (SEAOC, 1995))

Intensidade da ação sísmica	Período de retorno	Probabilidade de excedência
Frequente	43 anos	50% em 30 anos
Ocasional	72 anos	50% em 50 anos
Raro	475 anos	10% em 50 anos <sup>1</sup>
Muito raro	975 anos <sup>1,2</sup>	5% em 50 anos <sup>2</sup>
Máxima considerado	2475 anos	2% em 50 anos

1. Para locais em zonas de baixa sismicidade, os parâmetros da perigosidade sísmica para um sismo raro devem ser baseados no cálculo no sismo máximo provável para a região.

2. Para locais situados a menos de 40km de distância da falha ativa ou da zona sísmica, os parâmetros da perigosidade sísmica para um sismo muito raro não devem exceder a média calculada +1 intervalo de confiança para o máximo evento determinístico da falha ou da zona sísmica que é capaz de gerar baseado nos dados geológicos.

Para cada nível de intensidade da ação sísmica, os parâmetros da perigosidade sísmica indicados na Tabela 2.3 devem ser determinados. A adequabilidade das componentes estruturais e não estruturais de um edifício para resistir a essa perigosidade deve ser determinada de acordo com os níveis de desempenho descritos na secção anterior.

Tabela 2.3 – Parâmetros da perigosidade sísmica (adaptado de VISION 2000 (SEAOC, 1995))

Perigosidade	Parâmetro
Ação sísmica	Aceleração de pico Espectros de resposta elásticos e inelásticos Conjunto de séries temporais
Liquefação	Tensão admissível do terreno de fundação Assentamento diferencial vertical Deslocamento horizontal do solo
Deslizamento	Deslocamento horizontal e vertical do solo expectável
Assentamento	Assentamento diferencial expectável
Rutura de falha	Movimentos diferenciais horizontais e verticais esperados à superfície

### 2.3.4 Objetivos de desempenho sísmico para estruturas de edifícios

Nesta seção são apresentadas as recomendações do VISION 2000 (SEAOC, 1995) relativas aos objetivos de desempenho mínimos de um edifício com três diferentes ocupações e usos. A matriz que se apresenta na Figura 2.5 tem, para cada linha e por ordem crescente, *níveis de intensidade da ação sísmica* definidos através períodos de retorno também crescentes. As colunas definem os *níveis de desempenho*, conforme se apresentou na secção 2.3.2, que refletem de forma crescente e da esquerda para a direita, limites máximos de desenvolvimento dos danos sísmicos observados. Consequentemente, o cruzamento de cada linha com cada coluna define um desempenho estrutural expectável de edifícios caracterizados por uma descrição geral de danos transcrito na Tabela 2.1 e na ocorrência de sismos com intensidade igual ou superior ao nível da ação sísmica correspondente a esse período de retorno.

Assim sendo, as linhas diagonais que se encontram na matriz correspondem a três objetivos de desempenho diferentes, em função do nível de exigência que se pretende para determinado edifício. Estas linhas marcam, para cada nível de intensidade da ação sísmica, o nível de desempenho mínimo aceitável para um dado edifício. Assim, o “objetivo crítico de segurança” é necessariamente mais exigente que o “objetivo básico”, estando associados a edifícios com características e usos diferenciados.

A cada nível de intensidade sísmica deverá corresponder apenas um nível de desempenho, indicando qual o estado (de dano e respetiva funcionalidade) em que a estrutura se encontra no caso de ocorrência de um sismo com tal nível de intensidade. Por outro lado, o mesmo nível de desempenho pode ser registado para vários níveis de intensidade da ação sísmica. No limite, uma estrutura com resistência ilimitada poderá estar no nível de desempenho “completamente operacional” para todos os níveis de intensidade sísmica, mesmo os sismos mais fortes. No entanto, tal não é expectável, sendo normal que à medida que a intensidade sísmica aumente sejam registados maiores danos e, consequentemente, um nível de desempenho inferior.

As linhas diagonais dos objetivos de desempenho apresentadas na matriz da Figura 2.5 delimitam a região do desempenho aceitável da região de desempenho não aceitável. Assim, a zona para a esquerda e para baixo destas linhas corresponde à região de desempenho aceitável, enquanto que para a direita e para cima se encontra a região não aceitável.

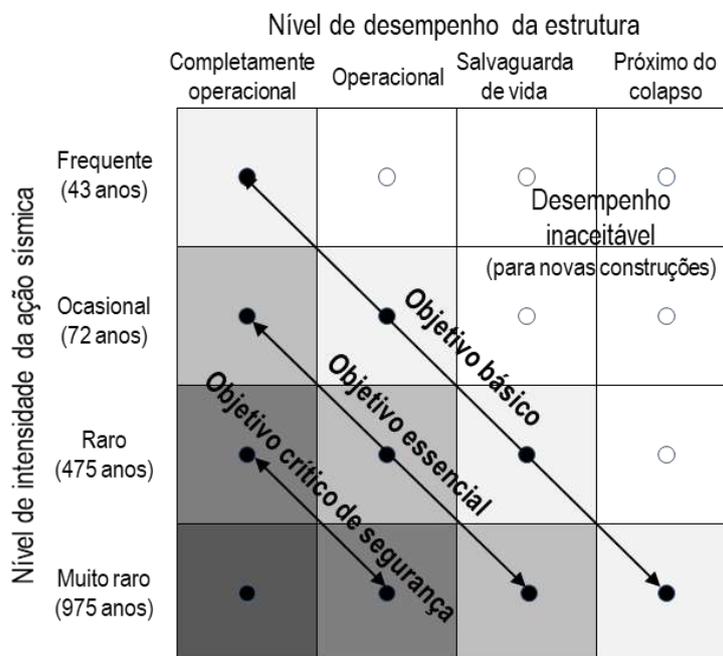


Figura 2.5 – Matriz de objetivos de desempenho recomendados para edifícios (adaptado de VISION 2000 (SEAOC, 1995))

As entidades proprietárias e/ou gestores de novas construções, redes de infraestruturas ou de abastecimento podem especificar individualmente o objetivo de desempenho que resulta num nível de dano maior ou menor para um ou mais níveis de intensidade das ações sísmicas de projeto do que as recomendadas no documento VISION 2000 (SEAOC, 1995), para uma classe específica de edifícios, e desde que os objetivos de desempenho especificados conduzam a um dimensionamento que respeite os valores mínimos regulamentares fixados pelas autoridades supervisores competentes para o caso em questão.

No caso de edifícios singulares, ou rede de edifícios escolares, existentes pode não ser economicamente viável alcançar plenamente os níveis de desempenho recomendados. Nesse sentido, objetivos de desempenho ligeiramente menos exigentes podem ser definidos, tal como recomendado na NP EN 1998-3. Os proprietários e gestores de edifícios existentes devem ser encorajados a reabilitar os seus edifícios, numa extensão que seja economicamente praticável, para atingir as recomendações dos objetivos de desempenho.

Os objetivos de desempenho são definidos para três níveis distintos:

### A. Instalações críticas

As instalações críticas são aquelas de cuja falha originará, com grande probabilidade, graves desastres. Exemplos destes edifícios são instalações que contenham materiais perigosos, cuja libertação poderá resultar num desastre para vários segmentos da população. A Tabela 2.4 resume os objetivos de desempenho recomendados para os edifícios críticos.

Tabela 2.4 – Objetivos de desempenho recomendados para os edifícios críticos

Nível de intensidade do sismo de projeto <sup>1</sup>	Nível de desempenho mínimo
Frequente	Completamente operacional
Ocasional	Completamente operacional
Raro	Completamente operacional
Muito raro	Operacional

1. Ver Tabela 2.2 para a definição

### B. Instalações essenciais/perigosas

As instalações essenciais são aquelas que desempenham um papel crítico nas operações pós-sismo. São por exemplo: hospitais, esquadras da polícia, bombeiros, centros de telecomunicações, centros de controlo de emergência, abrigos de emergência e rede escolar de edifícios. As instalações perigosas são aquelas que contêm grandes quantidades de materiais perigosos, mas cuja libertação pode ser contida dentro dos limites da instalação e com impacto mínimo para a população. Estas instalações são, por exemplo: refinarias, fábricas de equipamento eletrónico e outro tipo semelhante de instalações que lidam com grandes quantidades de materiais perigosos. A Tabela 2.5 resume os objetivos de desempenho recomendados para edifícios com estas funções.

Tabela 2.5 – Objetivos de desempenho recomendados para as instalações essenciais/perigosas

Nível de intensidade do sismo de projeto <sup>1</sup>	Nível de desempenho mínimo
Frequente	Completamente operacional
Ocasional	Completamente operacional
Raro	Operacional
Muito raro	Salvaguarda de vidas

1. Ver Tabela 2.2 para a definição

### C. Instalações básicas

As instalações básicas são edifícios que não pertencem às classes de instalações anteriores, integrando assim o conjunto de edifícios residenciais e de serviços. A Tabela 2.6 resume os objetivos de desempenho recomendados para estes edifícios.

Tabela 2.6 – Objetivos de desempenho recomendados para as instalações básicas

Nível de intensidade do sismo de projeto <sup>1</sup>	Nível de desempenho mínimo
Frequente	Completamente operacional
Ocasional	Operacional
Raro	Salvaguarda de vidas
Muito raro	Perto do colapso

1. Ver Tabela 2.2 para a definição

O conjunto de objetivos de desempenho recomendados na Tabela 2.4, na Tabela 2.5 e na Tabela 2.6 encontram-se representados na matriz da Figura 2.5 pelas três linhas diagonais acima referidas.

Relativamente aos edifícios principais das escolas CML, estes são considerados no âmbito deste estudo, e de acordo com a prática corrente da engenharia de estruturas, como edifícios essenciais. Esta classificação assenta na importância relativa das escolas no contexto da comunidade, nomeadamente pelo tipo de população que as ocupa, mas também pela sua importância na resposta de emergência pós-sismo. Com efeito, as escolas são regularmente utilizadas como abrigo para os desalojados ou enfermaria para feridos ligeiros, pelo que a manutenção da sua funcionalidade após um sismo é muito importante.

## 2.4 Métodos computacionais para análise da resposta estrutural sísmica

A definição e quantificação dos parâmetros inerentes à resposta das estruturas, com base numa análise baseada no desempenho sísmico (*performance-based seismic assessment*) assenta no desenvolvimento de um procedimento multidisciplinar com os seguintes quatro passos fundamentais:

- Análise de perigosidade sísmica, que permite a obtenção de medidas de intensidade da ação sísmica verosímil, tendo em conta as características tectónicas e geotécnicas para o local em estudo;
- Análise estrutural, para a ação sísmica considerada, com a caracterização da resposta através de parâmetros de resposta (*engineering demand parameters*) ajustados à estrutura em análise;
- Obtenção de indicadores de dano (estrutural e não estrutural), em função dos parâmetros de resposta derivados na análise estrutural;
- Análise de perdas, que dependem dos danos estimados.

Todos os passos de análise descritos são desenvolvidos sob uma abordagem probabilística. Os parâmetros assim estimados podem depois ser relacionados com os índices de resposta que se pretende estudar, nomeadamente, o nível de segurança estrutural face à ação sísmica.

Um dos passos de maior relevância neste contexto é o segundo passo apresentado, o estudo da resposta estrutural. Com efeito, as relações entre a resposta estrutural e as medidas de intensidade

são tipicamente obtidos através de simulações não-lineares, cujos fundamentos são multidisciplinares (engenharia estrutural, geotecnia, interação solo-estrutura-fundação).

A análise da relação entre a medida de intensidade adotada, usualmente a aceleração espectral associada ao período fundamental de vibração da estrutura, e os parâmetros de resposta estrutural segue habitualmente procedimentos de integração e simulação da resposta dinâmica da estrutura. Uma das metodologias mais relevantes é a Análise Incremental Dinâmica (*incremental dynamic analysis – IDA*) (Vamvatsikos e Cornell, 2002).

Segundo esta metodologia, é executada uma simulação que pretende obter a resposta da estrutura quando submetida a uma aceleração de base com determinada intensidade. A resposta da estrutura obtida é caracterizada em função dos parâmetros de resposta. Este processo é repetido aumentando a intensidade do sismo e registando a respetiva resposta estrutural. O resultado é a relação medida de intensidade – resposta estrutural, sendo esta uma relação não-linear que traduz a evolução da resposta face a diferentes níveis de intensidade sísmica. Uma vez repetido o procedimento anterior para um número suficiente de diferentes acelerogramas, devidamente adaptados ao local, pode fazer-se um estudo estatístico da referida relação e estabelecer a probabilidade de determinado valor dos parâmetros de resposta estrutural ser excedido para determinado valor da intensidade sísmica.

Ainda que a análise incremental dinâmica seja considerada um dos métodos mais sofisticados para análise da resposta estrutural face à ação sísmica, a sua complexidade e exigência computacional são elevadas. As principais limitações prendem-se com a necessidade de utilização de um elevado número de registos sísmicos (acelerogramas) devidamente adaptados ao local e a exigência computacional relacionada com o elevado número de análises executadas para cada um dos acelerogramas.

Estas limitações levam a que sejam comumente utilizados outros métodos para análise da resposta estrutural. Um desses métodos, previsto na NP EN 1998 (Eurocódigo 8), é a análise estática não-linear (*pushover*). Este tipo de análise consiste na aplicação à estrutura de uma distribuição de forças laterais ou deslocamentos horizontais crescentes, tal como representado na Figura 2.6, de modo a que a resposta obtida, não linear, se aproxime das respostas de pico obtidas recorrendo a uma análise incremental dinâmica. Admite-se, como hipótese, que a resposta obtida sob o efeito de um vetor crescente de forças ou deslocamentos possa traduzir o resultado que seria obtido pela análise incremental dinâmica. Durante a análise, a distribuição lateral de forças que equilibra a deformação incremental da estrutura, tendo em conta o estado (rigidez e resistência) da estrutura, é calculado. Assim, em cada passo de análise é registado um conjunto de informações sobre várias características de resposta de uma estrutura a sismos, que as análises estáticas lineares não conseguem fornecer. No final da análise *pushover* é possível definir a curva de capacidade da estrutura que relaciona a força lateral aplicada (corte basal) com o deslocamento de um nó específico da estrutura (nó de controlo), para cada passo de análise. Esta curva de capacidade é um dado fundamental do comportamento sísmico da estrutura.

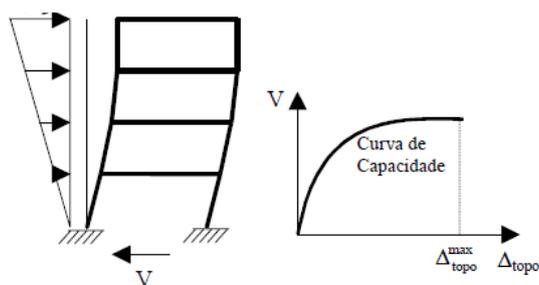


Figura 2.6 – Determinação da curva de capacidade de uma estrutura através de uma análise *pushover*

A Figura 7.2 apresenta uma curva de capacidade típica, com a indicação dos pontos característicos associados à primeira cedência e à capacidade máxima da estrutura.

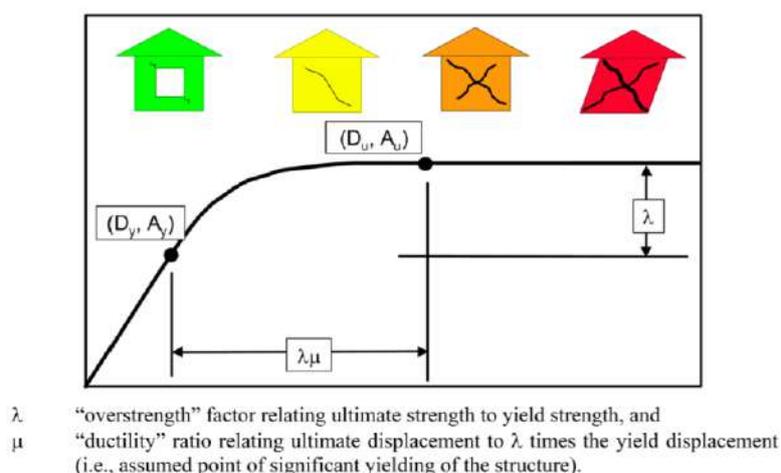


Figura 2.7 – Curva de capacidade genérica (Hazus, 2012)

De um modo geral, podem salientar-se as seguintes características da análise *pushover*:

- Considera o comportamento não-linear da estrutura;
- Permite a avaliação do desempenho sísmico para diferentes estados limites;
- Permite identificar sequencialmente os danos até ao colapso dos elementos, assim como a capacidade global da estrutura;
- Relaciona a resposta global da estrutura com uma estrutura equivalente de 1 grau de liberdade (1GL).

Existem diferentes métodos de análise *pushover*, incluindo o Método do Espectro da Capacidade Resistente (ATC-40), descrito no Capítulo 4, o Método do Coeficiente de Deslocamento (FEMA-273/FEMA-356) e o Método N2 (NP EN 1998).

De entre as principais vantagens das análises *pushover* é de salientar o facto de estas evitarem a utilização de um coeficiente de comportamento, necessário em análises lineares, e de resultar em boas

estimativas da resposta sísmica para estruturas que vibram principalmente de acordo com um modo de vibração específico. Nesse caso, estas análises fornecem informação sobre as características da estrutura que não se obtêm em análises elásticas, como sejam a capacidade de deformação em regime não-linear, as zonas críticas da estrutura que exigem um dimensionamento mais pormenorizado e as descontinuidades de resistência em planta e em altura.

Relativamente às suas limitações, é de referir a incapacidade de obter resultados precisos quando os efeitos dos modos de vibração mais elevados de uma estrutura são importantes na sua resposta. Além disso, não se considera a degradação progressiva da rigidez que ocorre durante a ação cíclica não-linear dos sismos. Esta degradação tem como consequências a mudança das características modais da estrutura e o aumento do seu período de vibração, o que não é tido em conta na análise *pushover*. Por outro lado, admite-se que o modo de vibração da estrutura utilizado para a definição da distribuição de forças laterais não varia ao longo do tempo. Além disso, há também dificuldade de modelar adequadamente os efeitos dos modos de vibração mais elevados, assim como a impossibilidade de deteção de zonas de vulnerabilidade que não as relacionadas com o primeiro mecanismo local a ser formado.

Uma das principais questões relacionadas com a execução deste tipo de análises prende-se com a definição da distribuição de forças laterais a aplicar à estrutura. Como alternativa aos sistemas de forças proporcionais a uma distribuição linear em altura, foram desenvolvidos métodos designados de “*Adaptative Pushover Methods*”, onde os vetores das forças laterais são atualizados em todos os passos de análise, considerando um ou mais modos de resposta, incluindo desta forma os efeitos que a degradação progressiva da estrutura tem na forma como a mesma responde à solicitação crescente a que está submetida. Noutros casos, onde se incluem os edifícios de alvenaria, utilizam-se como alternativa sistemas de forças horizontais proporcionais às massas, geradas por uma aceleração imposta na base que é incrementada ao longo da análise. Simulam-se desta forma os efeitos das ações supondo que as estruturas dos edifícios possuem uma elevada rigidez horizontal.

## 3 | Caracterização dos edifícios principais das escolas CML

### 3.1 Revisão histórica do parque escolar português

#### 3.1.1 Enquadramento

As seguintes secções são baseadas na investigação de doutoramento do Doutor André Guimarães dos Santos (Santos, 2015) que incidiu no estudo da reabilitação arquitetónica do parque escolar, no âmbito de um programa promovido pela Parque Escolar, E.P.E., no norte de Portugal, entre 2007 e 2011. A partir da análise deste programa torna-se evidente a recorrência a soluções de standardização que se manifestam em variados momentos da construção do parque escolar nacional.

Ainda que nos liceus construídos no início do período da ditadura militar (1930-33), se parta de um programa comum, estão presentes os valores da arquitetura modernista. No entanto, noutros momentos, como no âmbito dos edifícios concebidos ao abrigo do Plano de 1938, concertado com os ideais do regime do Estado Novo, assistimos a uma produção que, originada por um programa unificador, criando-se condições particulares para uma uniformidade na imagem e na coerência da organização espacial das soluções, explicando um dos primeiros momentos de homogeneização do programa liceal. As escolas técnicas resultantes do Plano de 1947, com as suas variantes, intensificam este sentido normalizador que se estende à totalidade do território nacional, sendo esta atitude prosseguida no contexto dos edifícios construídos ao abrigo do Plano de 1958. A expressão da normalização atinge particular relevância a partir do início da década de sessenta com a adoção dos vários estudos normalizados, e da conceção dos modelos de base liceal e de base técnica no final da década de sessenta.

Os edifícios construídos entre as décadas de 70 e 90, desde os que assentarem em processos de pré-fabricação, aos que decorreram do Programa espacial de execução de escolas preparatórias e secundárias (1980), vem assegurar pela massificação a estratégia de tipificação.

A Parque Escolar produziu o documento desqualificação física, construtiva e funcional do parque escolar nacional, que constitui provavelmente a (sua) abordagem mais completa sobre o legado edificado no momento anterior à intervenção ao abrigo do PMEES (Programa de Modernização do Parque Escolar destinado ao Ensino Secundário). Nesse documento propõe-se uma organização cronológica dos edifícios escolares em três períodos (do final do séc. XIX até 1935; de 1936 até 1968 e a partir dessa data até 2007). Os momentos que assinalam as clivagens entre os diferentes períodos são explicados, o primeiro (1935) pelo início da atuação da Junta das Construções para o Ensino Técnico e Secundário (JCETS), e o segundo (1968) pela necessidade de adoção da tipologia pavilhonar, logo a seguir reconfirmada pela democratização de acesso e frequência massificada ao ensino público.

Em “PARQUE ESCOLAR - Enquadramento histórico” é referido que do 1º período referido (escolas construídas até 1935) resultou a construção de 12 escolas, do 2º período (escolas construídas entre

1936 e 1968) resultou a construção de 94 escolas, enquanto que do 3º período (escolas construídas a partir de 1968) registam-se 356 novas escolas. Ainda que estes dados possam não estar completamente atualizados, são uma boa base para compreender o desenvolvimento do parque escolar nacional.

Nas seguintes secções serão abordados os principais períodos de construção do parque escolar, começando com os liceus que decorrem do modelo utilizado pelos antigos colégios, nomeadamente de jesuítas; seguidamente os edifícios construídos tendo por inspiração o Lycée francês, e finalmente os liceus construídos no âmbito do desempenho da JAEES (de 1928 a 1934). A atuação da JCETS iniciada com o Plano de 38, o plano das escolas técnicas e o Plano de 58 encerram um segundo momento significativo. A partir da década de sessenta em particular com a adoção da tipologia pavilhonar assiste-se a um desenvolvimento dos projetos normalizados que culmina com a produção da tipologia pavilhonar 3x3.

### 3.1.2 Inspiração no modelo francês

A interpretação e transposição do modelo liceal francês para a arquitetura liceal portuguesa encontra na solução linear de configuração aberta a matriz para a conceção do liceu Camões (1909) e o liceu Pedro Nunes (1911), ambos em Lisboa pelo Arq.º Ventura Terra, enquanto que no Porto, o Arq.º Marques da Silva desenvolveu os projetos para o liceu Alexandre Herculano (1914-31) e para o liceu D. Manuel II (1918-26)878, atualmente denominada escola secundária Rodrigues de Freitas. Apesar da solução final corresponder a um modelo de ocupação encerrado em torno de um pátio central, a essência da sua composição assenta sobretudo na lógica de alas desenvolvidas longitudinalmente a partir de um sistema de circulação que promove o posicionamento lateral dos corredores.



Figura 3.1 – Escola Secundária Maria Amália Vaz de Carvalho (inaugurada em 1885)

### 3.1.3 Escolas modernas (década de 1930)

No primeiro período de vigência do Estado Novo (1930-1933), os projetos para a construção de novos liceus decorrem do investimento desenvolvido pela JAEES na criação de um conjunto de parâmetros normativos para a construção dos espaços liceais que funcionaram como um programa-tipo. Os quatro liceus decorrentes do concurso público (liceu D.<sup>a</sup> Filipa de Lencastre, em Lisboa, liceu Diogo de Gouveia, em Beja, liceu D. João III – atual escola secundária José Falcão, em Coimbra, e liceu Latino Coelho, em Lamego), apesar de concebidos por diferentes autores, fundamentam-se naqueles documentos enquanto matriz programática.

Deste conjunto, apenas o liceu Latino Coelho não apresenta uma composição veiculada aos ideais da arquitetura modernista, reproduzindo um modelo ainda conotado com valores de matriz clássica. Os restantes três liceus apresentam uma linguagem fundamentada nos valores do modernismo, explorando soluções de composição espacial e formal que os demarca claramente da produção anterior, qualidades que se fundamentam na incorporação da elasticidade plástica que a utilização plena do betão armado passou a permitir equacionar.

### 3.1.4 Plano de 1938

No contexto da atuação da JCETS, em 1938 é concebido um programa para a construção de edifícios escolares destinados ao ensino secundário, designado por programa de construções, ampliação e melhoramentos de edifícios liceais, mais conhecido como o Plano de 1938. Este plano previa a construção de onze novos liceus e melhoramentos em treze liceus existentes.

Os novos liceus a construir a partir do Plano de 1938, na vigência do Estado Novo, foram decisivamente determinados pela existência de um programa-base a observar, elaborado intencionalmente para este plano de construção de liceus, documento que fixava as necessidades técnicas, higiénicas, pedagógicas e topográficas, para as quais se devem desenhar as soluções arquitetónicas.

O sistema construtivo, apesar de recorrer ao betão armado na constituição das lajes, recusa a exploração deste material na expressividade do edifício, retomando-se a sustentação da construção sobre paredes de alvenaria de pedra o que vem a determinar uma composição rígida, aparentemente robusta e, conseqüentemente, uma imagem austera. A pedra, para além de utilizada na estrutura do edifício vem ainda expressar exteriormente a afirmação de carácter monumental dos edifícios, seja pela formalização dos momentos de entrada, pelos embasamentos e cornijas, seja ainda pelas molduras exteriores dos vãos e demarcação dos cunhais, enfatizando uma imagem de composição clássica. A componente estrutural do edifício é assegurada pelas paredes exteriores em alvenaria de pedra que assumem uma função portante sobre as quais descarregam as lajes realizadas em betão armado (normalmente aligeiradas). A cobertura é estruturada por um sistema de asnas em madeira enquanto suporte para o telhado em telha cerâmica.

A organização do programa funcional assenta sobretudo em edifícios compostos por vários corpos que se sucedem em continuidade, a partir de uma estrutura longitudinal sustentada pelo posicionamento lateral das circulações.

### 3.1.5 Plano de construção de escolas técnicas para o ensino industrial, comercial e agrícola (1947)

Em 1947 é realizada uma reforma curricular que promove significativamente o ensino técnico-profissional razão pela qual se justificou a criação de um conjunto de escolas capazes de responderem eficazmente aos novos programas. O plano, da responsabilidade da JCETS, foi implementado em três fases, correspondendo a diferentes projetos-tipo, realizados sucessivamente em 1947, 1950 e 1952.

A execução da primeira fase do plano foi iniciada em 1947 com o 1º ante-projeto-tipo destinado às escolas técnicas elementares desenvolvido com a coordenação do Arq.º José Costa e Silva. Este projeto teve como objetivo desenvolver uma solução construtiva económica e capaz de se adaptar a diferentes topografias e orientações. Esta grande adaptabilidade foi conseguida através da distribuição do programa em três corpos distintos.

O anteprojecto tipo de 1950 mantém na essência as características do anterior, estendendo-se a sua aplicação às escolas profissionais, e em 1952 a JCETS redesenha a solução anterior com o objetivo de otimizar o custo de construção, assistindo-se por exemplo à redução das áreas e do pé-direito e a um aumento no número de pisos. Note-se ainda o reposicionamento do corredor, agora numa posição absolutamente coincidente com o eixo longitudinal do edifício, o que veio a homogeneizar a dimensão das salas de aula.

As escolas, concebidas a partir de um princípio de racionalidade cujo primeiro objetivo seria o de assegurar a economia das soluções recorriam a um sistema construtivo misto composto por paredes executadas em alvenaria de pedra assumindo a função de suporte para as lajes em betão armado. O ritmo estrutural é definido por um pórtico de quatro pilares cuja distância relativa desenha a composição dos edifícios de corredor central numa sequência longitudinal subordinada ao mesmo objetivo.

Um segundo edifício destinado às oficinas e um terceiro para o refeitório e ginásio. O edifício do ginásio mantém a sua condição anteriormente experimentada nos liceus, partilhando no piso inferior as funções de refeitório e de cozinha e no piso superior um espaço vocacionado para o desporto que serve igualmente a função de sala polivalente. Um elemento de circulação exterior e coberto (normalmente integrado num dos edifícios) permite estabelecer a continuidade na circulação entre os diferentes edifícios unificando o conjunto.



Figura 3.2 – Escola básica Patrício Prazeres (construída em 1953)

### 3.1.6 Plano de 1958

Em 1958 é desenhado outro plano, conhecido como o Plano de 1958, em que se previa a construção de dezasseis liceus construídos de raiz. Ao grupo anteriormente previsto, foram ainda acrescentados três liceus. Note-se que a União Internacional dos Arquitetos (UIA) em concertação com a UNESCO publicaram em 1959 a Carta das Construções Escolares (CCE) definindo um conjunto de condicionantes mínimos a observar na construção dos edifícios escolares, sendo de destacar a crítica sobre a geometria longitudinal e uniformidade das salas de aula, bem como do sistema de circulação longitudinal como forma de estruturar a morfologia escolar, apresentando-se a solução do espaço central como forma alternativa e, em contraponto, a defesa dos sistemas modulares inspirados e inspiradores dos processos de pré-fabricação.

Este conjunto de informação apenas foi divulgado publicamente em Portugal no início de 1965, salientando-se a prestação do Arq.º Augusto Brandão na apresentação da CCE. A escola, mantendo os princípios de composição anteriormente praticados, assenta numa organização que usa a contiguidade de vários momentos construídos sem que estes se assumam com plena autonomia. Ao contrário, a escola é afirmada por uma sucessão de edifícios normalmente encadeados através de um sistema de composição quebrada e ortogonal na qual a independência de cada edifício apenas sobressai a partir da leitura da sua volumetria. Na perceção planimétrica do conjunto, a escola assume-se como um todo em contínuo. As várias funções da escola surgem mais consistentemente interligadas e coesas, apesar de se manter a identidade de cada um dos sectores funcionais.

Construtivamente, a utilização de sistemas mais tradicionais fundamentados paramentos resistentes em alvenaria de pedra e em pórticos de betão armado acentua a composição planimétrica e de imagem, mantendo-se a relação direta entre a componente estrutural e a conformação do espaço da sala de aula de geometria quadrangular (correspondendo a dois módulos estruturais espaçados de 4,15 metros entre eixos).

Salienta-se que o Plano de 58 abrange soluções arquitetónicas bastante diversificadas, seja na comparação que se estabelece entre os vários liceus construídos no decorrer da primeira fase, seja ainda pela incorporação dos liceus pavilhonares decorrentes dos 2.º e 4.º projetos normalizados, não se assistindo a uma única determinação tipológica, seja na composição espaço-funcional ou na construção da imagem global.

### 3.1.7 Estudos normalizados (1960)

A partir do início da década de sessenta a atitude para a conceção e construção dos edifícios escolares com ensino secundário foi intensificada com base numa estratégia de normalização. Seguindo uma determinação justificada pela emergência em aumentar significativamente o número dos edifícios escolares, e ao mesmo tempo garantir uma racionalidade técnico-construtiva capaz de assegurar uma gestão eficaz dos recursos financeiros a envolver, passaram a ser desenvolvidos estudos e projetos-tipo. O seu propósito visava a construção de diferentes edifícios, em diferentes localizações, mas subordinados às características essenciais definidas em cada um dos projetos. Apesar das variantes implementadas em função do destino de uso (ensino liceal, ensino técnico, ensino preparatório), e das

adaptações na implantação determinadas pelas condições topográficas de cada contexto, a estratégia assentava genericamente na reprodução de edifícios autónomos com carácter pavilhonar (também designados por blocos ou corpos), dispostos no recinto escolar com diferentes composições, que se complementavam com uma estratégia de circulação exterior descoberta, relacionando os diferentes edifícios da escola.

A partir de 1964, e ainda na sequência do previsto no Plano de 1958 e da determinação em construir oito novos liceus nacionais, são desenvolvidos vários estudos normalizados, inicialmente da responsabilidade do Arq. Augusto Brandão. De entre os vários tipos de estudos normalizados destacam-se os Liceus-tipo ou Base-liceal (a partir de 1968), projeto coordenado pela Arq.<sup>a</sup> Maria do Carmo Matos. Os pavilhões destinados às atividades letivas desenvolvem-se originalmente em dois pisos em torno de um espaço central onde se localiza a escada aberta, e que as salas de aula circundam numa organização compositiva que prenuncia a tipologia 3x3. O acesso a cada um destes edifícios, articulado a partir da galeria exterior coberta. A estrutura realizada em betão armado é mantida aparente na revelação da textura que resulta do processo de cofragem. Normalmente estes elementos eram apenas pintados mantendo aquela caracterização.

A consolidação do modelo para as escolas pavilhonares de base técnica corresponde ao momento de expansão desta solução à escala nacional, em 1969, processo ainda coordenado pelo Arq.<sup>o</sup> Augusto Brandão no último ano de atuação da JCETS. Esta tipologia foi sendo utilizada em diferentes escolas até finais da década de oitenta.

O liceu de Benfica (atualmente ES José Gomes Ferreira) revela-se paradigmático na reafirmação da instituição escolar como um equipamento que, à escala de cidade, pretende recuperar o protagonismo alienado com as mais recentes experiências pavilhonares. Nesse sentido, ultrapassa o seu programa funcional para se implantar enquanto momento que participa na identidade do seu contexto urbano



Figura 3.3 – Escola José Gomes Ferreira (construída entre 1974 e 1980)

### 3.1.8 Escolas de pré-fabricação mista e pesada (1974)

Durante a década de setenta foram desenvolvidas soluções que fomentadas pela necessidade de otimizar os meios e os custos, bem como pelo interesse em responder massivamente à construção de novas escolas, se fundamentaram em sistemas e elementos pré-fabricados, sobretudo ao nível de painéis de parede e de lajes. Estas soluções normalmente possuem três tipos de edifícios implantados ortogonalmente entre si e interligados por percursos exteriores cobertos.

O edifício principal, com dois pisos, e normalmente localizado numa zona central e próximo da entrada do lote, albergando as funções administrativas e sociais. Os pavilhões letivos, são igualmente definidos por dois ou três pisos. O pavilhão desportivo, de um único piso e de pé-direito elevado, localiza-se como habitualmente numa zona periférica do lote.

Algumas destas escolas são constituídas por uma estrutura base metálica articulada com painéis pré-fabricados em betão. Os montantes encontram-se dispostos segundo uma malha regular de 2,40 x 7,20 m, sendo garantidos vãos livres até 7,20 m. Os montantes são ligados, ao nível dos pisos, por treliças na direção transversal e por perfis metálicos na direção longitudinal. Sobre a estrutura, são apoiadas lajetas lisas ou nervuradas em betão armado, definição dos paramentos exteriores são utilizados painéis pré-fabricados em betão sustentados pela estrutura metálica do edifício e estabilizados pela sequência de encaixes que estabelecem uns nos outros.

Outras escolas deste período são construídas sobretudo em betão armado, utilizando sistema de pórticos e lajes alveolares. Apesar desta diferença, os paramentos exteriores seguem o mesmo princípio e sistema construtivo.

### 3.1.9 Programa especial de execução de escolas preparatórias e secundárias (1980)

Este programa, desenvolvido no âmbito da DGCE-MOP, com a equipa coordenada pela Arq.<sup>a</sup> Maria do Carmo Matos e pelo Eng.<sup>o</sup> Victor Quadros Martins, estabelecendo continuidade com o trabalho anterior, desenvolveu um novo projeto assente na estratégia pavilhonar, designado por 3x3, solução absolutamente tipificada e que tinha como enquadramento o recurso aos sistemas industriais de construção.

A partir dos finais da década de setenta, os edifícios escolares foram construídos no âmbito de um processo que intensificou a expansão da rede escolar nacional, caracterizado sobretudo pela emergência de construir num curto espaço de tempo um número muito significativo de escolas.

O “*programa especial de execução de escolas preparatórias e secundárias*”, aprovado em 1980, teve como objetivo criar condições para responder à intensificação e massificação da construção de edifícios destinados ao ensino secundário, estendendo-se à totalidade do território nacional, prevendo-se então que no espaço de cerca de sete anos fossem realizadas duzentas e dezoito escolas a partir desta tipologia.

Esta solução é marcada pela fraca e desqualificada relação que estabelece com o contexto urbano, seja exteriormente pela definição das condições urbanas que lhe servem de implantação, seja internamente pela estratégia de composição, que dispõe os edifícios afastados do contato com o espaço público, quase numa situação de anonimato, ou pelo menos de independência em relação à envolvente urbana.

Por outro lado, sendo esta tipologia a que se constrói com menor número diferenciado de edifícios, o papel anteriormente desempenhado pelo edifício principal, aglutinador das funções administrativas e sociais, que paralelamente geria o posicionamento dos restantes edifícios letivos na mediação com o espaço público, deixa agora de se manifestar materialmente por um edifício.

O edifício mais repetido é definido por uma morfologia quadrangular. Um segundo edifício, de geometria retangular e apenas um piso, sustenta as funções da cantina, cozinha e espaços de apoio.



Figura 3.4 – Escola secundária do Restelo (tipologia pavilhonar 3x3)

Apesar de na primeira fase terem sido construídos por sistemas pré-fabricados, a partir de 1983 passaram a ser executados com pilares e lajes fungiformes aligeiradas ou com estruturas porticadas viga-pilar e lajes maciças.

Os elementos verticais e horizontais definem uma reticula de base quadrangular definindo três módulos em cada um dos lados do quadrado (Figura 3.5). Cada um desses módulos é delimitado por pórticos estruturais alinhados segundo duas direções ortogonais. Os afastamentos entre os alinhamentos dos pórticos estruturais são de 7,20 metros em cada uma das direções. Este sistema constitui a estrutura principal do edifício que assim corresponde a uma forma quadrangular de 21,60 metros de lado, entre eixos. Sobrepostos na malha principal, e apenas ao longo da periferia exterior, apresentam-se pilares intermédios que servem de sustentação e travamento dos panos de alvenaria, permitindo uma redução da secção das vigas periféricas de modo a possibilitar a instalação de caixas de estore em alguns vãos. A estrutura repete-se no segundo piso, sem alterações dimensionais ao nível planimétrico. Da

sobreposição destes dois sistemas resulta uma grelha de grande densidade, que se presente ser eventualmente mais pesada do que o estruturalmente necessário, o que provavelmente decorre da intenção de possibilitar a adaptação do edifício aos mais variados contextos e a terrenos com piores características para solos de fundação. Desta disposição dos elementos estruturais determina a criação de um módulo base ao qual corresponde a sala de aula normal com cerca de 50 m<sup>2</sup>, de morfologia quadrada.

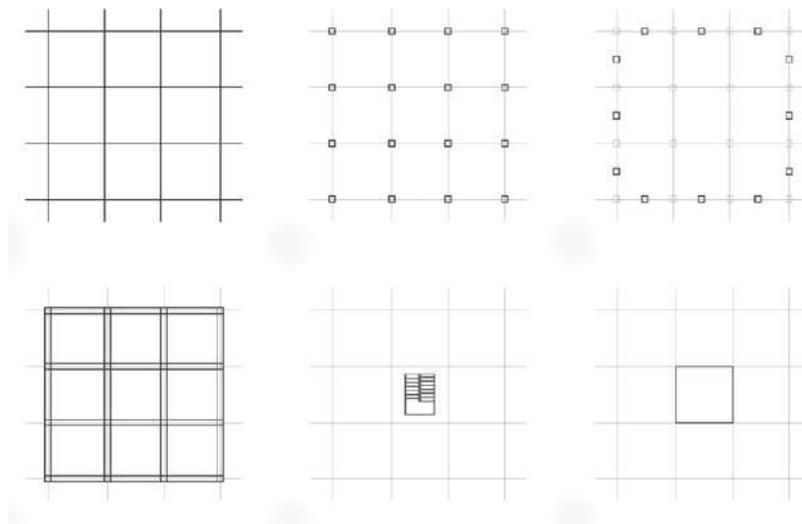


Figura 3.5 – Planta do sistema estrutural da tipologia pavilhonar 3x3 (Santos, 2015)

### 3.1.10 Contemporaneidade

Finalmente, assiste-se a uma reação crítica ao défice de qualidade verificado na construção dos mais recentes edifícios escolares da tipologia pavilhonar, e que de algum modo prenuncia a atitude que viria a ser implementada pelo PMEES. Em 1991 o Ministério da Educação investe num concurso para a conceção de quatro escolas, tendo este procedimento resultado na construção das escolas de Gondifelos, em Vila Nova de Famalicão (Arq.º Fernando Bagulho e Arq.ª Cristina Salvador), de Ílhavo (Arq.º Jorge Cruz Pinto e Arq.ª Cristina Manta) e do Bairro Padre Cruz em Lisboa (Arq.º Vítor Figueiredo). Estas escolas, projetadas e construídas entre 1997 e 2002, apesar de se destinarem ao ensino básico, permitem de forma consistente entender uma significativa alteração na atitude anterior de standardização.



Figura 3.6 – Escola Bairro Padre Cruz

### 3.2 Tipologias estruturais dos edifícios principais das escolas CML

Com vista à análise das 32 escolas básicas de 2.º, 3.º ciclo e secundárias sob gestão da CML, as mesmas foram em primeiro lugar analisadas no que à sua tipologia diz respeito. Para tal, sistematizou-se a informação disponível, proveniente de:

- desenhos fornecidos pela CML no âmbito do presente estudo;
- informação constante de publicações sobre o parque escolar nacional, nomeadamente os anexos do “Atlas da Arquitectura Escolar em Portugal” (Alegre e Heitor, 2019), resultante de um projeto de investigação financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia decorrido entre 2016 e 2019;
- visitas às escolas, realizadas por elementos do LNEC, nas quais foi executada inspeção visual e alguns testes de pequena escala (furação com berbequim) para aferir a posição de elementos estruturais e materiais construtivos.

A informação recolhida com base nas fontes referidas revelou-se, em alguns casos, insuficiente para caracterizar com detalhe alguns pormenores construtivos, os materiais utilizados ou, em última instância, o sistema construtivo. Esta dificuldade deveu-se, essencialmente, ao facto da informação disponível, em particular os desenhos que a CML disponibilizou e os desenhos que constam do “Atlas da Arquitectura Escolar em Portugal”, ser focada no aspeto arquitetónico e funcional (e.g., planos de emergência) dos edifícios, existindo, conseqüentemente, um défice de informação relativo às especialidades de engenharia, nomeadamente engenharia de estruturas. Nesses casos, com base na data de construção da escola e no conhecimento do parque escolar nacional, para o qual muito contribui o trabalho do “Atlas da Arquitectura Escolar em Portugal”, assim como a investigação de Santos (2015), foram assumidos pressupostos que se descrevem nas fichas de cada escola, apresentadas em anexo.

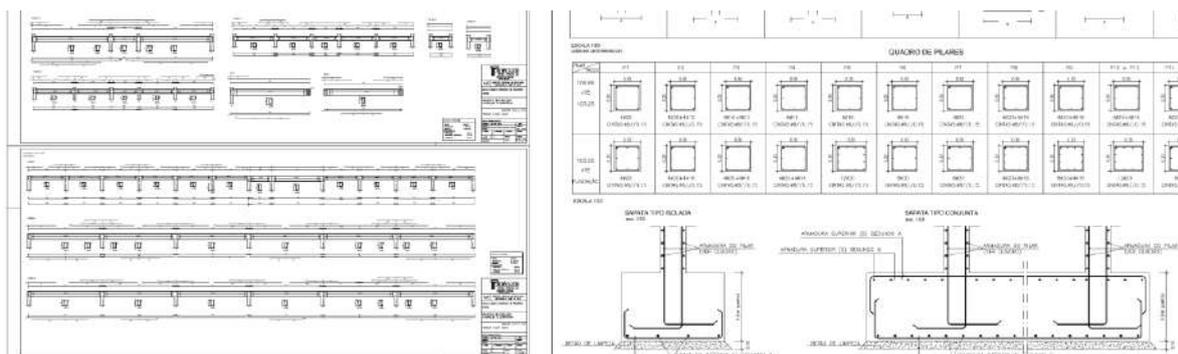


Figura 3.7 – Desenhos da EBI Telheiras fornecidos pela CML

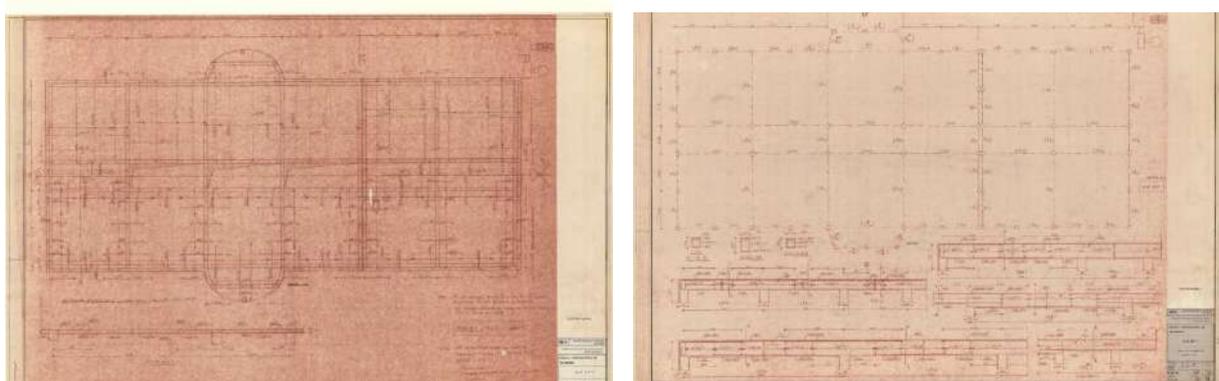


Figura 3.8 – Desenhos da EB Telheiras provenientes do “Atlas da Arquitectura Escolar em Portugal” (Alegre e Heitor, 2019)



Figura 3.9 – Furação com berbequim na EB23 Eugénio dos Santos para caracterização de pormenores construtivos das paredes interiores (ligação de painel de alvenaria de tijolo a montantes em betão)

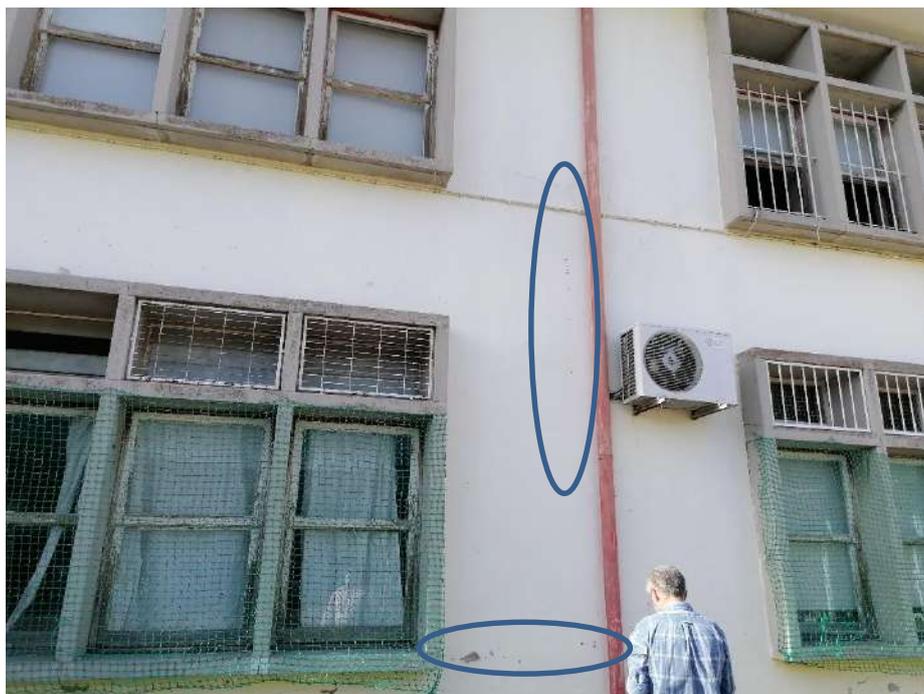


Figura 3.10 – Furação na fachada da EB23 Almirante Gago Coutinho para definição das dimensões dos elementos estruturais do pórtico de betão armado (na ausência de dados de projeto)

Assim, tendo em consideração o exposto, as escolas foram divididas nas seguintes tipologias, criando grupos que se diferenciam no tipo de análise estrutural a desenvolver. As tipologias são:

- Estrutura mista de alvenaria-betão (“mista AB”)
- Estrutura mista de betão-alvenaria (“mista BA”)
- Estrutura de betão armado (“BA”)
- Estrutura pavilhonar 3x3
- Estrutura pavilhonar Vale Rosal (“VR”)
- Estrutura pavilhonar Compacto 24T (“C24T”)

Estas diferentes tipologias têm correspondência com diferentes períodos construtivos, tal como descrito na secção anterior. É de referir que a distinção entre as duas primeiras tipologias reside na relevância dos elementos de alvenaria para resistir a ações horizontais, como é o caso dos sismos. No primeiro caso (estrutura mista de alvenaria-betão), os elementos de alvenaria representam uma parte significativa dos elementos principais, resistentes à ação sísmica. Por outro lado, na segunda tipologia (Estrutura mista de betão-alvenaria), os elementos de alvenaria têm essencialmente uma função de suporte das cargas gravíticas, provenientes das lajes, sendo a resistência à ação sísmica conferida pelos elementos de betão armado. Embora a diferença entre as duas possa diluir-se dentro de cada época construtiva, esta diferenciação é fundamental para se definir uma metodologia de análise consistente e precisa da resposta estrutural sísmica dos edifícios.

Embora as tipologias 3x3, VR e C24T correspondam a estruturas porticadas de betão armado (eventualmente pré-fabricado), estas tipologias são completamente tipificadas, o que justifica a criação

de uma tipologia específica para cada uma delas, facilitando assim a análise e interpretação de resultados. Desta forma, a tipologia “estrutura de betão armado” integra apenas as estruturas que não se integram nas referidas três categorias tipificadas e, conseqüentemente, carecem de uma análise individualizada. A caracterização pormenorizada das tipologias e a respetiva aplicação às escolas é apresentada nas fichas individuais das escolas.

Na Tabela 3.1 apresentam-se seis exemplos de escolas que ajudam a enquadrar as seis tipologias estruturais definidas.

Tabela 3.1 – Exemplos de seis escolas de diferentes tipologias estruturais

<p style="text-align: center;"><b>Tipologia Mista AB</b></p>  <p style="text-align: center;">EB Eugénio dos Santos</p>	<p style="text-align: center;"><b>Tipologia Mista BA</b></p>  <p style="text-align: center;">EB Paula Vicente</p>
<p style="text-align: center;"><b>Tipologia BA</b></p>  <p style="text-align: center;">ES Marquês de Pombal</p>	<p style="text-align: center;"><b>Tipologia 3x3</b></p>  <p style="text-align: center;">EB Alto do Lumiar</p>
<p style="text-align: center;"><b>Tipologia C24T</b></p>  <p style="text-align: center;">EB Marvila</p>	<p style="text-align: center;"><b>Tipologia VR</b></p>  <p style="text-align: center;">EB São Vicente de Telheiras</p>

Na Figura 3.11 apresenta-se o número total de escolas por cada tipologia, de onde se pode observar que a tipologia com maior número de escolas (9) é a tipologia “estrutura de betão armado”. As restantes tipologias que incluem estruturas em betão armado (3x3, VR e C24T) totalizam 13 escolas. As

estruturas mistas, as mais antigas, correspondem a 10 escolas, sendo 3 escolas com estrutura mista betão-alvenaria e 7 escolas com estrutura mista alvenaria-betão.

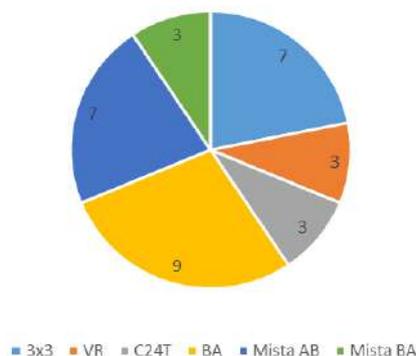


Figura 3.11 – Número total de escolas em cada tipologia estrutural (total: 32 escolas)

Na Tabela 3.2 apresentam-se as tipologias das 32 escolas incluídas neste estudo. Na Figura 3.12 apresenta-se o número total de edifícios, catalogados como edifícios principais, por tipologia estrutural. Como se pode verificar, o número de edifícios das tipologias que assentam num modelo tipificado de construção rápida, nomeadamente as tipologias 3x3, VR e C24T, são as tipologias que incluem um maior número de edifícios. Tal facto deve-se à existência, em cada uma das escolas destas tipologias, de um número significativo de blocos, que funcionam como edifícios de aulas/administrativo e, como tal, são considerados edifícios principais. Ainda assim, o facto de o sistema estrutural destes blocos ser semelhante, facilita a análise uma vez que o comportamento sísmico expectável dos vários blocos é semelhante, dependendo assim a vulnerabilidade sísmica da variabilidade da ação sísmica que é discutida no Capítulo 5. Por outro lado, os edifícios mistos que, tal como referido na secção anterior eram baseados na existência de um edifício único, são aqueles que se encontram em menor número. Não obstante, as tipologias mistas carecem de uma análise bastante mais morosa e complexa do comportamento sísmico, tal como descrito mais à frente neste relatório.

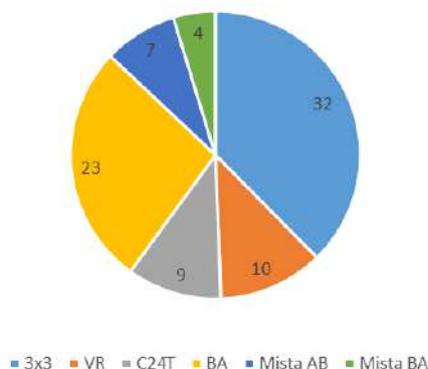


Figura 3.12 – Número total de edifícios (principais) em cada tipologia estrutural (total: 85 edifícios principais)

Tabela 3.2 – Tipologias estruturais das escolas em análise

Nord	Escola	ID	Agrupamento de Escolas	Tipologia
1	Escola Básica Alto do Lumiar	8	Alto do Lumiar	3x3
2	Escola Básica Almirante Gago Coutinho	14	Alvalade	Mista BA
3	Escola Básica Bairro do Padre Cruz	16	Bairro Padre Cruz	BA
4	Escola Secundária José Gomes Ferreira	27	Benfica	BA
5	Escola Básica Marvila	30	D.Dinis	C24T
6	Escola Básica Damião de Góis	36	D.Dinis	3x3
7	Escola Básica Vasco da Gama	43	Eça de Queiroz	BA
8	Escola Básica Fernando Pessoa	47	Fernando Pessoa	BA
9	Escola Básica Professor Delfim Santos	68	Laranjeiras	3x3
10	Escola Básica Luís António Verney	73	Luís António Verney	BA
11	Escola Básica Luís de Camões	75	Luís de Camões	BA
12	Escola Básica Manuel da Maia	79	Manuel da Maia	BA
13	Escola Básica Nuno Gonçalves	92	Nuno Gonçalves	Mista AB
14	Escola Secundária Dona Luísa de Gusmão	93	Nuno Gonçalves	Mista BA
15	Escola Básica Olaias	97	Olaias	3x3
16	Escola Básica Patrício Prazeres	108	Patrício Prazeres	Mista AB
17	Escola Básica Pintor Almada Negreiros	111	Pintor Almada Negreiros	VR
18	Escola Básica Piscinas	116	Piscinas – Olivais	3x3
19	Escola Básica Professor Lindley Cintra	122	Prof.Lindley Cintra	C24T
20	Escola Secundária Lumiar	123	Prof.Lindley Cintra	3x3
21	Escola Básica Quinta de Marrocos	124	Quinta de Marrocos	BA
22	Escola Básica Eugénio dos Santos	131	Rainha D.Leonor	Mista AB
23	Escola Básica Paula Vicente	138	Restelo	Mista BA
24	Escola Secundária Restelo	139	Restelo	3x3
25	Escola Básica Olivais	143	Santa Maria dos Olivais	C24T
26	Escola Básica São Vicente – Telheiras	152	Vergílio Ferreira	VR
27	Escola Básica Telheiras	147	Vergílio Ferreira	VR
28	Escola Artística de Dança do Conservatório Nacional	160	Desagrupada	Mista AB
29	Escola Artística Instituto Gregoriano de Lisboa		Desagrupada	Mista AB
30	Escola Profissional Ciências Geográficas		Desagrupada	Mista AB
31	Escola Secundária Maria Amália Vaz de Carvalho	86	Desagrupada	Mista AB
32	Escola Secundária Marquês de Pombal	57	Desagrupada	BA

Destas 32 escolas, há três escolas que foram excluídas da análise apresentada neste relatório por não respeitarem os pressupostos de base do estudo solicitado pela CML ou por não se dispor de informações que permitam a sua análise. As escolas em causa, e as razões que levam à sua exclusão, são as seguintes:

- Escola Profissional de Ciências Geográficas – Esta escola funciona no interior de um edifício que integra outros serviços não educativos e que está sob gestão de entidade exterior à CML. Uma análise do comportamento sísmico apenas fará sentido do ponto de vista global, i.e., analisando o edifício na sua globalidade. Por outro lado, a mitigação do risco sísmico apenas faz sentido com uma intervenção integrada e considerando todo o edifício. Por estes motivos, o estudo deverá ser concertado com a entidade gestora do edifício, neste caso a DGOT, pelo que, em consenso com a CML, esta escola é excluída do presente estudo.
- Escola Artística de Dança do Conservatório Nacional – Esta escola foi um dos vários edifícios visitados pela equipa do LNEC, tendo sido recolhida informação com recurso a inspeção visual (foram apenas realizados alguns furos com berbequim para identificar as paredes estruturais). No entanto, trata-se de um edifício complexo, combinando estrutura nova em betão armado

com estrutura antiga em alvenaria, pelo que o desenvolvimento de um estudo da vulnerabilidade sísmica do edifício implica a caracterização de disposições construtivas (como a ligação das lajes às paredes e ao núcleo de escadas, entre outras) essenciais para o comportamento sísmico e que só são possíveis de identificar através de uma inspeção estrutural detalhada com recurso à abertura de janelas de inspeção, recolha de provetes dos materiais estruturais e ensaios de caracterização dinâmica. Por este motivo, recomenda-se que seja realizada tal inspeção previamente à avaliação da vulnerabilidade sísmica do edifício, tendo a análise desta escola sido excluída do presente estudo (ver Figura 3.13).

- Escola Secundária Maria Amália Vaz de Carvalho - os desenhos que foram obtidos (através do Atlas da Arquitectura Escolar em Portugal) não possuem cotas (dimensões em planta, espessuras das paredes, etc.) nem pormenores dos pavimentos em betão armado da parte principal do edifício (secções, localização das vigas, orientação das armaduras das lajes, etc.), apenas de uma pequena ampliação do edifício. Não existe, portanto, informação suficiente para prosseguir com as simulações numéricas necessárias à análise. Trata-se de um edifício significativamente grande e complexo e que, como tal, necessita de um levantamento detalhado, à semelhança da Escola Artística de Dança do Conservatório Nacional. Acresce o facto de possuir três salas grandes junto à fachada principal, com duplo pé direito na zona central, que deverão ser alvo de uma análise de pormenor, nomeadamente com recurso a ensaios de identificação dinâmica (ver Figura 3.13).
- Escola Básica Vasco da Gama – apesar de se tratar de um edifício em betão armado relativamente recente (final da década de 1990), não foi possível obter para esta escola dados sobre o projeto de fundações e estrutura para poder prosseguir com a análise. Sendo esta escola recente e dimensionada de acordo com normas de projeto que contemplam a ação sísmica, poder-se-ia colocar a hipótese de a considerar segura, dentro da margem de risco que as normas estruturais preveem. Não obstante, considera-se que o desenvolvimento de uma análise da vulnerabilidade sísmica deste edifício é necessário como forma de a enquadrar com as demais escolas no âmbito do presente estudo. Caso contrário, os resultados obtidos não seriam consistentes com os fatores associados às restantes escolas, o que conduziria a uma posição do ranking final de vulnerabilidade não consistente com a metodologia adotada. Desta forma, esta escola foi excluída do presente estudo.



Figura 3.13 – Salão da ES Maria Amália Vaz de Carvalho (esq.); edifício da EA de Dança do Conservatório Nacional (dir.) (fotografias das visitas do LNEC)

No Capítulo 6 são apresentadas diretrizes para as inspeções estruturais recomendadas para a Escola Artística de Dança do Conservatório Nacional e para a Escola Secundária Maria Amália Vaz de Carvalho.

## 4 | Metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica dos edifícios principais

### 4.1 Enquadramento

Tal como referido anteriormente, entende-se por avaliação de vulnerabilidade sísmica a verificação do cumprimento de certos requisitos de segurança e/ou de funcionalidade relativamente a vários níveis de intensidade sísmica. Como referido no Capítulo 2, em função do tipo de edifício e do seu uso, deverão ser definidos *objetivos de desempenho*. Estes *objetivos de desempenho* associam *níveis de desempenho* (*Operacionalidade, Salvaguarda de Vida, etc.*) a *níveis de intensidade da ação sísmica*. Assim, para um dado *nível de intensidade da ação sísmica* deve garantir-se que a estrutura regista um *nível de desempenho* mínimo.

Também no Capítulo 2 foram apresentados alguns indicadores gerais dos danos expectáveis, por níveis de desempenho e sistemas habitualmente existentes em edifícios. Com efeito, os níveis de desempenho referidos têm que ser caracterizados através de parâmetros que permitam aferir do cumprimento dos objetivos de desempenho estabelecidos. No âmbito da avaliação da vulnerabilidade sísmica tais parâmetros são relativos ao comportamento e dano nos elementos estruturais e não-estruturais. No entanto, devido à dificuldade em traduzir o comportamento dos elementos e sistemas não-estruturais através de modelos numéricos, é usual relacionar-se o dano nos elementos não-estruturais com o comportamento estrutural, em particular o nível de deslocamentos registados na estrutura.

Desta forma, a cada nível de desempenho estabelecido é associado um valor limite (máximo) da resposta estrutural, descrito através da curva de capacidade da análise *pushover* (tal como descrito na secção 2.4). Este valor limite, designado de estado limite, corresponde ao ponto em que a estrutura ultrapassa o nível de desempenho em questão. Em cada uma das curvas de capacidade dos edifícios principais das escolas são identificados os estados limite referidos, associados aos vários níveis de desempenho. Subsequentemente, é verificado se esses estados limite são excedidos para níveis de intensidade sísmica condizentes com os objetivos de desempenho definidos (objetivos essenciais – secção 2.3.4).

Em suma, a avaliação da segurança sísmica é feita neste estudo através da comparação do período de retorno estimado, associado à intensidade da ação sísmica que conduz à excedência de estados limite da resposta estrutural, com os períodos de retorno de referência da ação sísmica. Essa comparação permite aferir qual é o nível de desempenho da estrutura e a sua relação com os objetivos de desempenho estabelecidos para este tipo de edifícios.

## 4.2 Determinação da resposta sísmica dos edifícios principais

### 4.2.1 Análise numérica do comportamento sísmico

Todos os edifícios principais das escolas CML incluídas neste estudo são analisados através de análises *pushover* modais, considerando as configurações de deformação associadas ao primeiro modo de vibração, sendo determinadas as curvas de capacidade respetivas.

O modelo numérico de simulação do comportamento estrutural, desenvolvido no programa SeismoStruct, é composto por elementos de barra (*frame*) de plasticidade distribuída com formulação em força. No caso de elementos de betão armado, cada secção destes elementos é definida através de fibras com comportamento uniaxial, associadas a aço ou a betão. Os elementos finitos são definidos tendo em consideração as dimensões acima apresentadas e as armaduras que foram sistematizadas com base no projeto de execução, obtidos através das fontes referidas no Capítulo 3. No que concerne a paredes de betão armado, devido à sua elevada dimensão em planta são unidas às vigas através de *links* rígidos com comprimento igual à maior dimensão da parede.

As fibras uniaxiais que definem o comportamento do betão são definidas através do modelo de *Mander et al.*, enquanto que as fibras de aço são definidas através do modelo de comportamento de *Menegotto-Pinto*.

Relativamente às lajes, estas são modeladas no programa Seismostruct em função das suas características. Para lajes maciças é definida a espessura média da laje e a armadura colocada. Para lajes aligeiradas regulares (sem variações nos tarugos ou nervuras ao longo do comprimento) é adotada uma modelação simplificada, com uma lâmina maciça de espessura equivalente, correspondente à área de secção transversal equivalente num metro de laje fungiforme, e uma espessura para a flexão correspondente à inércia de um metro linear de laje. Em qualquer dos casos, a rigidez da laje é contabilizada pelo cálculo da largura efetiva do banzo em “T” das vigas, enquanto que a carga aplicada na laje é distribuída de forma automática pelas vigas de piso. Apenas no caso da laje aligeirada ter variações significativas e não ser admissível uma modelação simplificada, como é o caso das lajes da EB Luis Antonio Verney, é adotada uma modelação das lajes com um modelo de grelha, que considera de forma explícita todos os elementos em betão armado, considerados resistentes, e os blocos de aligeiramento em material cerâmico (Figura 4.2).



Figura 4.1 – Imagem do modelo numérico da EB Quinta de Marrocos – blocos com paredes em betão armado e laje aligeirada

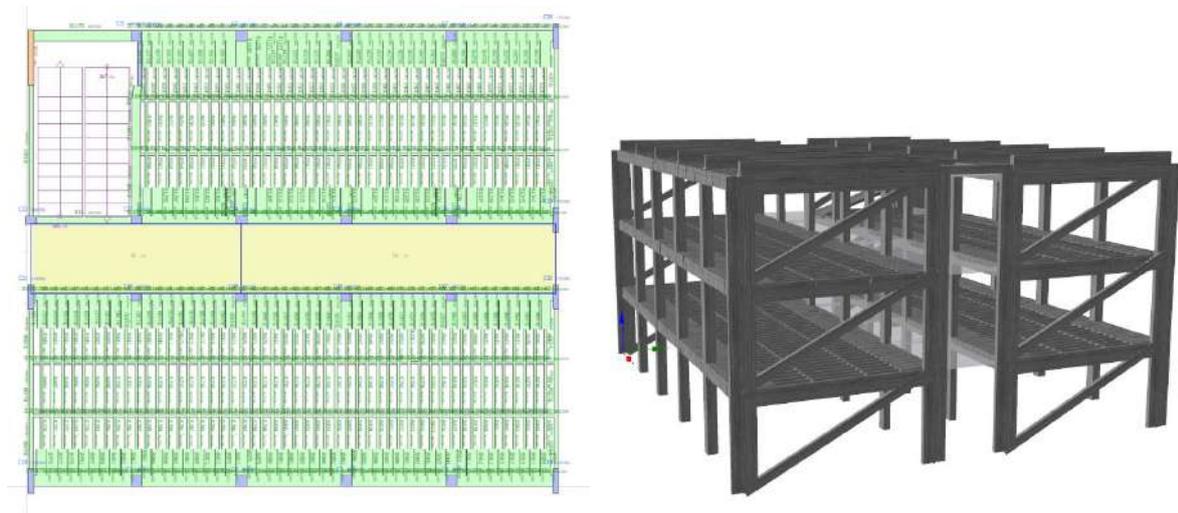


Figura 4.2 – Imagem do modelo numérico da EB Luis António Verney: modelo de grelha das lajes (esq.); imagem geral (dir.) – estrutura com diagonais em betão armado e vigas invertidas na laje de esteira

Em relação aos edifícios mistos alvenaria-betão, são incluídas no modelo as paredes resistentes na direção mais vulnerável e apenas os troços das paredes longitudinais que contribuem para a resistência nessa direção. O modelo de cálculo, desenvolvido igualmente no programa SeismoStruct, é composto por elementos de barra (*frame*) que simulam o comportamento no plano de paredes, nembos e lintéis de alvenaria quando sujeitos a forças horizontais (como é o caso dos sismos). Nas fibras uniaxiais que definem o comportamento da alvenaria foi utilizado um modelo uniaxial trilinear com capacidade resistente à tração (*mas\_par*).

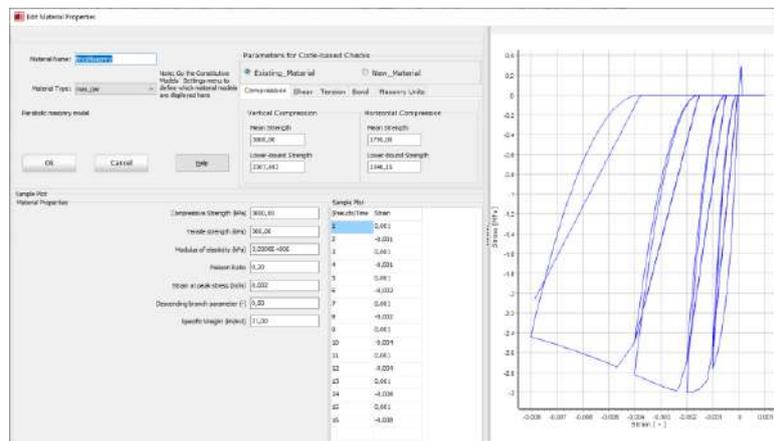


Figura 4.3 – Modelo mecânico adotado para a alvenaria estrutural do edifício principal

Nestes edifícios mistos alvenaria-betão, as vigas e pilares em betão armado foram simulados com elementos de barra com comportamento elástico linear, sendo as respetivas secções definidas de acordo com os desenhos de pormenor apresentados anteriormente. Nas fibras uniaxiais que definem o comportamento do betão foi utilizado o modelo de comportamento de *Mander et al.* (*con\_ma*), enquanto nas fibras de aço foi utilizado o modelo de comportamento de *Menegotto-Pinto* (*stl\_mp*).

Os pisos foram simulados como diafragmas indeformáveis no seu próprio plano através da imposição de condições cinemáticas entre os graus de liberdade do próprio piso.

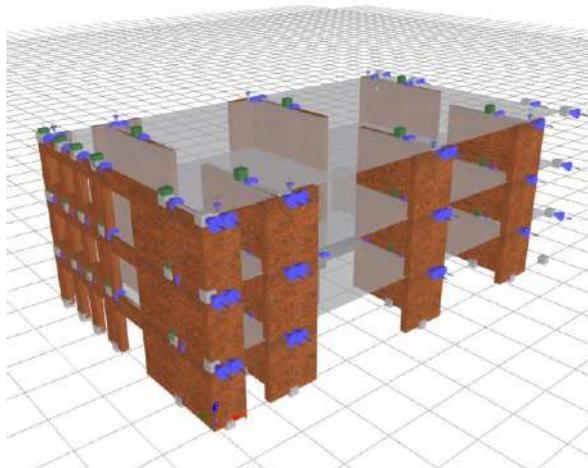


Figura 4.4 – Imagem do modelo numérico da EB Eugénio dos Santos

Relativamente às cargas gravíticas atuantes, adotaram-se as cargas definidas de acordo com a norma portuguesa em vigor (NP EN1991-1-1), para o tipo de edifício em questão. Assim, as cargas permanentes e sobrecargas a considerar na análise são as que se apresentam abaixo.

Tabela 4.1 – Cargas permanentes e sobrecargas consideradas na análise

Carga	Piso corrente	Cobertura
<b>Pavimento (RCP)</b>	1.5 kN/m <sup>2</sup>	2.5 kN/m <sup>2</sup>
<b>Paredes (RCP)</b>	<u>Divisórias</u> : 1.75 kN/m <sup>2</sup> (aplicada na laje do 1º piso) <u>Exteriores</u> : 7.8 kN/m (aplicada nas vigas exteriores do 1º piso)	-
<b>Sobrecarga</b>	Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>	<u>Cobertura não acessível</u> : 0.4 kN/m <sup>2</sup> <u>Cobertura acessível</u> : Igual a piso intermédio
<b>Paredes de alvenaria resistentes</b>	<u>Exteriores</u> : 28,8 kN/m (20% de aberturas) <u>Interiores</u> : 25,3 kN/m (10% de aberturas)	<u>Exteriores</u> : 18,0 kN/m (metade da altura) <u>Interiores</u> : 14,0 kN/m (metade da altura)

As massas dos elementos estruturais são geradas automaticamente pelo programa. As restantes massas, associadas aos elementos estruturais não incluídos no modelo (troços de paredes

longitudinais não representados no modelo, nembos e lintéis de alvenaria, lajes e algumas vigas, escadas e vergas) foram simuladas através de massas localizadas ao nível dos pisos, distribuídas de acordo com áreas de influência.

#### 4.2.2 Definição dos estados limite para avaliação da vulnerabilidade sísmica

Na Tabela 4.2 são apresentados os estados limite para a análise da vulnerabilidade sísmica dos edifícios principais das escolas CML. A definição de cada um destes estados limite é feita com um indicador estrutural, passível de ser identificado através da curva de capacidade estrutural, tal como representado na Figura 4.5. Recorda-se que cada estado limite representa o valor máximo da resposta estrutural para cada nível de desempenho sísmico homólogo.

Tabela 4.2 – Definição dos estados limite para análise da vulnerabilidade sísmica

<b>Estado Limite</b>	<b>Indicador estrutural</b>
<i>Completamente operacional (EL1)</i>	<i>70% do valor do deslocamento espectral associado ao estado limite operacional.</i>
<i>Operacional (EL2)</i>	<i>Deslocamento espectral associado ao limite elástico da curva de capacidade.</i>
<i>Salvaguarda de vida (EL3)</i>	<i>Deslocamento espectral associado a <math>\frac{3}{4}</math> do valor do deslocamento espectral associado ao estado limite de colapso iminente.  Nota: no caso de se verificarem roturas por corte nos pilares, este estado limite corresponde ao ponto em que tal rotura ocorre.</i>
<i>Colapso iminente (EL4)</i>	<i>Deslocamento associado ao ponto em que a força de corte basal (ou a aceleração espectral) decresce 20% relativamente à força de corte basal máxima (ou à aceleração espectral máxima).  Nota: No caso de se verificarem roturas por corte nos pilares este estado limite está associado a um deslocamento espectral igual a <math>\frac{4}{3}</math> do deslocamento espectral associado ao estado limite de salvaguarda de vida</i>



Figura 4.5 – Curva de capacidade e representação dos estados limite para avaliação do desempenho dos edifícios principais das escolas

Desta forma, uma vez definidos os deslocamentos associados aos vários estados limite, é possível calcular os períodos de retorno da ação sísmica que conduzem a tais estados limite, tal como descrito na secção seguinte. Estes períodos são comparados com os períodos de retorno de referência  $T_{R,ref}$  da ação sísmica. De recordar que quanto maior o período de retorno menos frequente será a ação sísmica associada e, como tal, mais intensa será essa ação sísmica. Assim sendo, é fundamental reter que estes valores de períodos de retorno de referência representam os valores mínimos que devem ser obtidos para que o comportamento sísmico seja aceitável, face aos objetivos de desempenho definidos.

Na Tabela 4.3 são descritos os níveis de intensidade da ação sísmica, descritos através dos períodos de retorno de referência  $T_{R,ref}$  da ação sísmica, associados a cada um dos estados limite definidos. Por exemplo para o estado limite *completamente operacional*, a ação sísmica que respeita o objetivo de desempenho definido tem um período de retorno de referência (mínimo) de 72 anos. Por um lado, períodos de retorno inferiores traduzem um comportamento inaceitável desta estrutura, para este estado limite. Por outro lado, períodos de retorno superiores traduzem uma boa capacidade da estrutura na resposta a este estado limite.

Tabela 4.3 – Períodos de retorno de referência para cada estado limite, em função dos objetivos de desempenho de edifícios essenciais

<b>Estado Limite</b>	<b>Período de retorno de referência <math>T_{R,ref}</math></b>
<i>Completamente operacional (EL1)</i>	<i>72 anos</i>
<i>Operacional (EL2)</i>	<i>475 anos</i>
<i>Salvaguarda de vida (EL3)</i>	<i>975 anos</i>
<i>Colapso iminente (EL4)</i>	<i>2475 anos</i>

### 4.3 Determinação dos períodos de retorno da ação sísmica associados aos estados limite da resposta dos edifícios principais

A avaliação da segurança sísmica é feita neste estudo através da comparação da intensidade da ação sísmica, medida através do seu período de retorno estimado, que conduz à excedência dos estados limite referidos na secção anterior, com os períodos de retorno de referência da ação sísmica, função dos objetivos de desempenho estabelecidos para este tipo de edifícios. Assim sendo, um dos passos fundamentais da metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica dos edifícios principais das escolas CML consiste na determinação dos períodos de retorno da ação sísmica que conduzem a determinados estados limite, por sua vez associados a níveis de desempenho estabelecidos de acordo com a literatura e a prática da engenharia na área da análise de risco.

A determinação do período de retorno associado a determinado estado limite é feita com recurso à curva de *Hazard* que é definida para cada edifício principal. A curva de *Hazard* relaciona a intensidade da ação sísmica, caracterizada através dos períodos de retorno, com uma variável de resposta estrutural. Neste caso é usado o deslocamento espectral como variável estrutural. Assim, para cada estado limite, definido através do deslocamento espectral da curva de capacidade (ver secção 4.2), é possível calcular o período de retorno da ação sísmica associado, tal como representado graficamente na Figura 4.6.

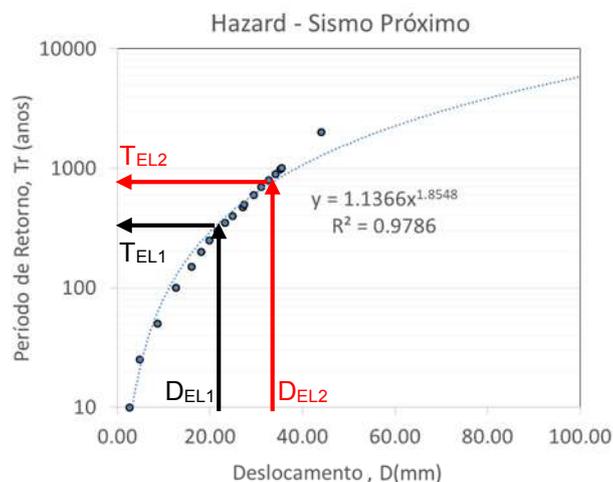


Figura 4.6 – Curva de *Hazard* - representação gráfica do procedimento de cálculo dos períodos de retorno associados aos estados limite da resposta estrutural: EL1 – estado limite 1; EL2 – estado limite 2

Este cálculo é feito de forma analítica, utilizando funções do tipo potência ou exponenciais derivadas através da aproximação aos pontos das curvas de *Hazard*. Desta forma, o cálculo da curva de *Hazard* torna-se num passo central da metodologia adotada. Esta curva é definida com recurso a vários pontos, designados de pontos de desempenho, cada um associado a um período de retorno específico. Neste caso consideram-se 23 pontos, um valor suficientemente elevado, de acordo com a experiência do LNEC na aplicação deste método, para a obtenção de resultados precisos. A determinação de cada um destes pontos é descrita de seguida.

O cálculo dos períodos de retorno da ação sísmica (número expectável de anos que decorre entre a ocorrência de dois sismos com determinada intensidade), especificamente para os edifícios principais das escolas CML, recorre aos espectros de resposta calculados no estudo da perigosidade descrito no Capítulo 5 e ao método do espectro de capacidade (ATC-40; FEMA 440). O método do espectro de capacidade (*Capacity Spectrum Method – CSM*), que corresponde a uma das metodologias mais utilizadas na avaliação do desempenho sísmico de estruturas, permite determinar o ponto de desempenho de determinada estrutura, caracterizada por um espectro de capacidade, face a uma ação sísmica específica, definida através de um espectro de resposta (efeito da ação, ou exigência). Tanto o espectro de capacidade (curva de capacidade) como o espectro de resposta deverão ser definidos no formato ADRS (*Acceleration-Displacement Response Spectrum*), tal como representado na Figura 4.7. Os seus fundamentos encontram-se descritos no ATC-40 “Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings” (ATC-40, 1996) e no FEMA-440 “Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures” (FEMA-440, 2005). O espectro de capacidade é calculado neste estudo através de análises *pushover* modais, considerando as configurações de deformação associadas ao primeiro modo de vibração, tal como descrito na secção 4.2.

O ponto de desempenho representa a intersecção do espectro de capacidade com o espectro de resposta referente à ação sísmica em análise para o mesmo nível de energia dissipada, isto é, para o mesmo nível de amortecimento. Como tal, é necessário um processo iterativo para determinar o ponto em que a curva de capacidade e o espectro de resposta se interseitam com igual nível de energia dissipada. Para o exemplo apresentado na Figura 4.7, o ponto de desempenho, após o processo iterativo referido, é o que se representa na Figura 4.8.

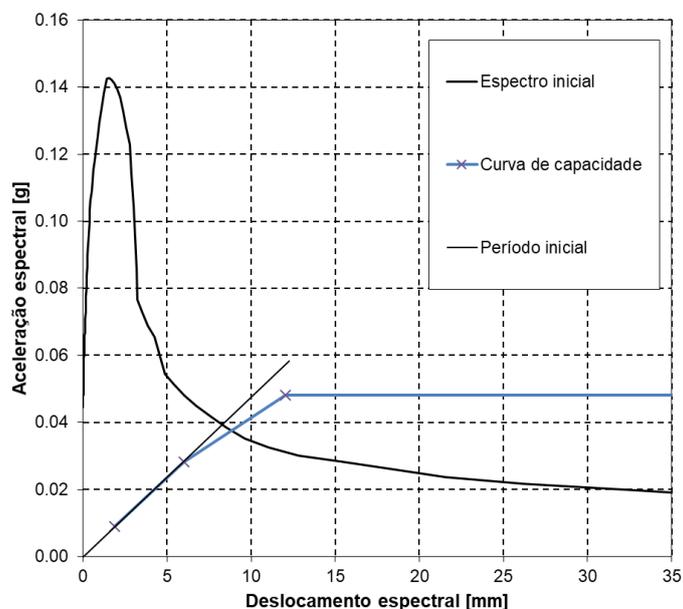


Figura 4.7 – Representação gráfica do espectro de capacidade e do espectro de resposta no formato ADRS

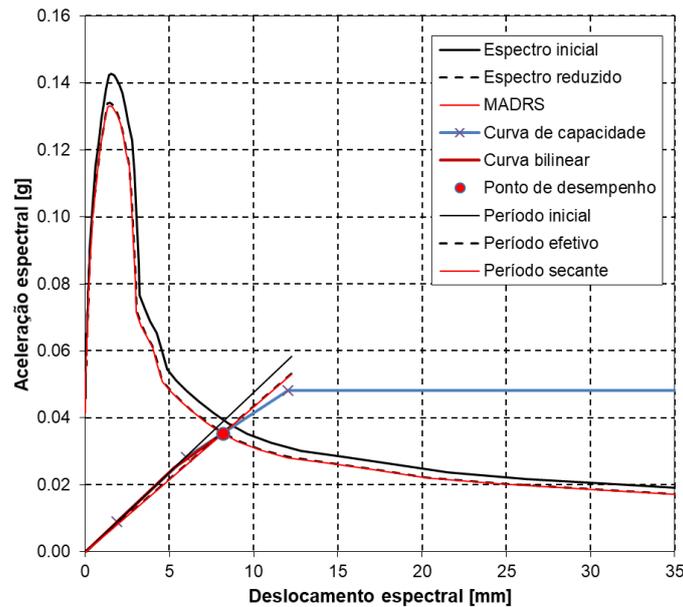


Figura 4.8 – Determinação do ponto de desempenho com recurso ao CSM

A conversão da curva de capacidade em termos de força-deslocamento para uma curva de capacidade expressa em termos de deslocamentos e acelerações espectrais (espectro de capacidade), é realizada mediante a aplicação das seguintes expressões:

$$S_d = d^* = \frac{\sum m_i d_i^2}{\sum m_i d_i} \quad (4.1)$$

$$S_a = a^* = \frac{V_{base}}{M \times g} = \frac{V_{base}}{g} \frac{\sum m_i d_i^2}{(\sum m_i d_i)^2} = \frac{V_{base}}{g} \frac{d^*}{\sum m_i d_i} \quad (4.2)$$

em que  $S_d$  é o deslocamento espectral,  $S_a$  é a aceleração espectral (expressa em g, aceleração da gravidade),  $m_i$  e  $d_i$  correspondem à massa e ao deslocamento associados ao grau de liberdade  $i$ , e  $V_{base}$  representa o corte basal. Nestas expressões assume-se que os somatórios incluem todos os graus de liberdade com deslocamentos horizontais e massas associadas, e apenas estes.

No caso de a curva de capacidade em força-deslocamento estar associada a um determinado modo de vibração  $n$  da estrutura, com deslocamentos no grau de liberdade  $i$  dados por  $\phi_{n,i}$ , a conversão para acelerações e deslocamentos espectrais é obtida por:

$$S_d = d^* = \frac{d_{ref} \sum m_i \phi_{n,i}^2}{\phi_{n,ref} \sum m_i \phi_{n,i}} = \frac{d_{ref}}{\Gamma_n \times \phi_{n,ref}} \quad (4.3)$$

$$S_a = a^* = \frac{V_{base}}{M \times g} = \frac{V_{base}}{g} \frac{\sum m_i \phi_{n,i}^2}{(\sum m_i \phi_{n,i})^2} = \frac{V_{base}}{g} \frac{1}{\Gamma_n \times \sum m_i \phi_{n,i}} \quad (4.4)$$

onde  $d_{ref}$  corresponde ao deslocamento de um ponto de referência (usualmente no topo do edifício) e  $\Gamma_n$  é o fator de participação modal.

De seguida é apresentado, simplificada, o procedimento base para a aplicação da metodologia. O método divide-se em duas partes, a primeira diz respeito à construção da curva de capacidade e a sua transformação para o formato ADRS relativo a um sistema com um grau de liberdade (1GDL). A segunda parte da metodologia diz respeito à forma como, a partir do espectro de capacidade definido para o sistema de 1GDL no formato ADRS, se obtém a resposta da estrutura para uma determinada ação sísmica.

Os princípios de conversão de um sistema com múltiplos graus de liberdade (nGDL) para um sistema 1GDL e, por conseguinte, da curva de capacidade (F-d) para o espectro de capacidade (Sa-Sd) assentam na aplicação das seguintes expressões:

$$S_{a,i} = \frac{V_i}{W \times a_1} \quad (4.5)$$

$$S_{d,i} = \frac{\Delta_{roof}}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \quad (4.6)$$

onde:

$S_{a,i}$  – aceleração espectral no ponto i do espectro de capacidade (m/s<sup>2</sup>);

$V_i$  – força basal no ponto i da curva de capacidade (kN);

$W$  – peso da estrutura para a combinação de ações em questão (kN);

$$a_1 = \frac{\sum_{j=1}^N (W_j \times \phi_{j,1}) / g^2}{\sum_{j=1}^N W_j / g \times \sum_{j=1}^N (W_j \times \phi_{j,1}^2) / g} \quad (4.7)$$

$N$  – nível N;

$W_j$  – peso associado ao nível j (kN);

$g$  – aceleração da gravidade ( $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ );

$\phi_{j,1}$  – amplitude do modo 1 no nível j;

$S_{d,i}$  – deslocamento espectral no ponto i do espectro de capacidade (m);

$\Delta_{roof}$  – deslocamento no topo da estrutura (m);

$$PF_1 = \frac{\sum_{j=1}^N (W_j \times \phi_{j,1}) / g}{\sum_{j=1}^N (W_j \times \phi_{j,1}^2) / g} \quad (4.8)$$

De notar que a apresentação da conversão, tal como se encontra no ATC-40, centra-se na aplicação do método a edifícios, com vários níveis (pisos). Ainda assim, o método pode ser adaptado e utilizado na análise de vários tipos de estruturas e qualquer tipo de configuração lateral de deslocamentos.

A segunda parte da metodologia diz respeito à forma como, a partir do espectro de capacidade definido para o sistema 1GDL no formato ADRS, se obtém a resposta da estrutura para uma determinada ação sísmica.

De forma a obter uma rotina expedita para a resolução do problema, o ATC-40 propõe a bilinearização do espectro de capacidade. As propostas para efetuar esta aproximação são variadas e devem ser adaptadas a cada situação. O ATC-40 refere a manutenção da rigidez inicial do espectro e uma

avaliação do melhor declive após cedência para que as áreas acima e abaixo do espectro simplificado sejam iguais (conservação da energia dissipada).

Sabendo que o cálculo do amortecimento é definido pela Eq. 4.5 (Clough e Penzien, 1995) é possível calcular diretamente o valor de amortecimento para um ponto do espectro de capacidade. Por outro lado, tendo em consideração a representação bilinear, o amortecimento também pode ser calculado aproximadamente através da Eq. 4.6. Ambos os procedimentos encontram-se representados na Figura 4.9.

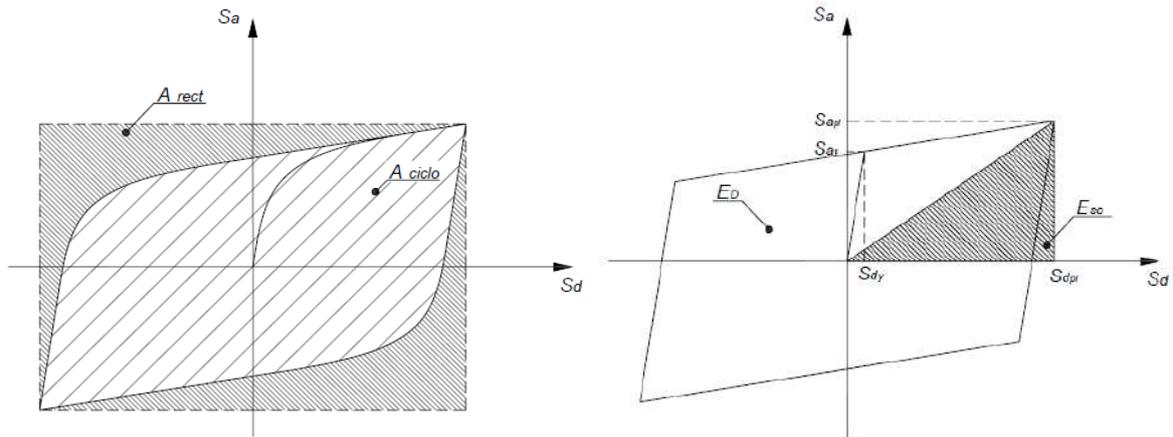


Figura 4.9 – Cálculo do Amortecimento: procedimento exato (esq.); procedimento aproximado proposto pelo ATC-40 (dir.)

$$\xi_h = \frac{2 A_{ciclo}}{\pi A_{ret}} \quad (4.9)$$

$\xi_h$  – Amortecimento hysterético;

$A_{ciclo}$  – Área definida por um ciclo hysterético;

$A_{ret}$  – Área definida pelo retângulo envolvente dos ciclos hysteréticos.

$$\xi_h = \frac{1}{4\pi} \frac{S_{ay}S_{dpi} - S_{dy}S_{api}}{S_{api}S_{dpi}} \quad (4.10)$$

$S_{ay}$  – Aceleração espectral correspondente ao ponto de cedência ( $m/s^2$ );

$S_{dy}$  – Deslocamento espectral correspondente ao ponto de cedência (m);

$S_{api}$  – Aceleração espectral correspondente ao valor máximo ( $m/s^2$ );

$S_{dpi}$  – Deslocamento espectral correspondente ao valor máximo (m);

$E_D$  – Energia dissipada por amortecimento ( $m^2/s^2$ );

$E_{so}$  – Energia de deformação elástica ( $m^2/s^2$ )

O amortecimento total é dado por:

$$\xi = \kappa \times \xi_h + \xi_0 \quad (4.11)$$

onde:

$\xi$  – Amortecimento total;

$\xi_0$  – Amortecimento elástico;

$\kappa$  - Fator de correção do amortecimento hysterético.

A consideração de uma correção  $\kappa$  que contempla o efeito de elevados níveis de amortecimento em estruturas pouco dúcteis e que simulam imperfeições dos ciclos hysteréticos (por exemplo, o efeito de Bauschinger ou o efeito de *pinching*). O ATC-40 apresenta várias hipóteses para estes valores, dependendo do tipo de estrutura e do tipo de ação sísmica a considerar.

A redução do espectro de resposta regulamentar, referente à ação sísmica com 5% de amortecimento, pode ser efetuada recorrendo ao fator definido no EC8-1, através das expressões 3.8, 3.9 e 3.10.

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5+\xi}} \geq 0.55 \quad (4.12)$$

$$S'_a = S_a \times \eta \quad (4.13)$$

$$S'_d = \frac{T'^2}{4\pi^2} S'_a \quad (4.14)$$

$T'$  – Período de vibração do sistema equivalente 1GDL (segundo);

$S_a$  – Aceleração espectral elástica (m/s<sup>2</sup>);

$S_d$  – Deslocamento espectral elástico (m).

A determinação do ponto de desempenho, i.e., a intersecção do espectro de capacidade com o espectro de resposta referente à ação sísmica para o mesmo nível de energia dissipada (mesmo amortecimento equivalente) implica um processo iterativo onde, através de algumas aproximações, se tenta encontrar o ponto de intersecção onde o amortecimento equivalente resultante do espectro de capacidade corresponde igualmente ao fator de redução do espectro de resposta da ação sísmica, definindo assim o ponto de desempenho da estrutura.

O ATC-40 propõe três procedimentos, A, B e C para o cálculo deste ponto de intersecção. Neste estudo apenas será apresentado o procedimento A, que corresponde ao mais simples e direto. De uma forma simplificada, o procedimento A tem como base os seguintes passos fundamentais:

- i) representar num mesmo gráfico o espectro de resposta elástico correspondente à ação sísmica, com 5% de amortecimento, e o espectro de capacidade calculado através dos procedimentos anteriores;
- ii) escolher um primeiro ponto de desempenho para iniciar o processo iterativo;
- iii) construir uma representação bilinear do espectro de capacidade até ao ponto definido;
- iv) calcular o valor de amortecimento equivalente, o respetivo fator de redução e proceder ao traçado do espectro de resposta reduzido;
- v) calcular os pares de valores  $a_{pi}$  e  $d_{pi}$  relativos à intersecção do espectro de capacidade com o espectro de resposta reduzido;

- vi) verificar se a diferença entre os valores de aceleração e deslocamento espectral correspondentes à intersecção e os valores da primeira iteração é inferior a um determinado valor de tolerância;
- vii) caso essa tolerância seja excedida é necessário prosseguir com o processo iterativo a partir de iii) até atingir a convergência.

Com este procedimento é possível definir a curva de *Hazard* (Figura 4.6) para cada estrutura, i.e., para cada edifício principal. Com a curva de *Hazard* é possível determinar os períodos de retorno associados a cada um dos estados limite definidos.

#### 4.4 Representação gráfica da vulnerabilidade sísmica dos edifícios principais

O nível de desempenho sísmico das estruturas, para vários níveis de intensidade da ação sísmica, representa-se graficamente na matriz de desempenho que se apresenta na Figura 4.10. Esta matriz serve de referência à avaliação da segurança sísmica dos edifícios principais das escolas CML e tem como base a matriz proposta pelo VISION 2000 (SEAOC, 1995) descrita na secção 2.3 deste relatório. O preenchimento desta matriz é efetuado através da comparação dos períodos de retorno estimados, associados aos vários estados limite definidos, com os períodos de retorno de referência, definidos no Capítulo 2.

A título de exemplo, apresenta-se na Figura 4.11 uma matriz de desempenho preenchida. Nesta matriz pode verificar-se que para o nível de intensidade sísmica mais baixa, isto é, para sismos recorrentes (probabilidade de excedência de 50% em 30 anos e período de retorno de 43 anos) a estrutura regista um nível de desempenho *operacional*. Para níveis de intensidade sísmica correspondentes a sismos frequentes (probabilidade de excedência de 50% em 50 anos e período de retorno de 72 anos) e a sismos raros (probabilidade de excedência de 10% em 50 anos e período de retorno de 475 anos), a estrutura tem um nível de desempenho corresponde a *salvaguarda de vida*. Por último, para sismos muito raros (probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e período de retorno de 975 anos) a estrutura regista um desempenho *próximo do colapso*. Em suma, neste exemplo, o desempenho da estrutura é insatisfatório, uma vez que o desempenho registado para os vários níveis de intensidade da ação sísmica é inferior (pior) que os níveis de desempenho objetivos, representados graficamente pela linha diagonal tracejada.

Por outro lado, é apresentada na Figura 4.12 um outro exemplo de matriz de desempenho cujo preenchimento indica que o desempenho sísmico é satisfatório. Neste caso, para sismos recorrentes a estrutura regista um comportamento perfeitamente linear, não sendo registado qualquer impacto do sismo na estrutura, pelo que não há nada a registar na matriz de desempenho. Para o nível de intensidade da ação sísmica corresponde a sismos frequentes e a sismos raros é registado o nível de desempenho *completamente operacional*. Por último, para sismos muito raros, a estrutura regista um desempenho *operacional*. Como tal, neste exemplo, o desempenho da estrutura é satisfatório, uma vez que o desempenho registado para os vários níveis de intensidade da ação sísmica é igual ou superior (melhor) que os níveis de desempenho objetivo.

Casos existem em que o desempenho da estrutura é satisfatório para algum(s) nível de intensidade da ação sísmica e insatisfatório para outros. Nesses casos, deverá ser ponderada a avaliação global do desempenho da estrutura em função dos níveis de intensidade da ação sísmica cujo desempenho é insatisfatório e as consequências do dano (inoperacionalidade) para o edifício em questão.

Neste sentido, a avaliação do desempenho sísmico através de uma matriz de desempenho como a que é aqui utilizada, permite representar graficamente o desempenho sísmico para os diferentes níveis de intensidade de forma desagregada. Não obstante, em certas circunstâncias é útil a definição de um parâmetro de desempenho que permita a comparação global entre vários edifícios. Tal questão é discutida no próximo capítulo.

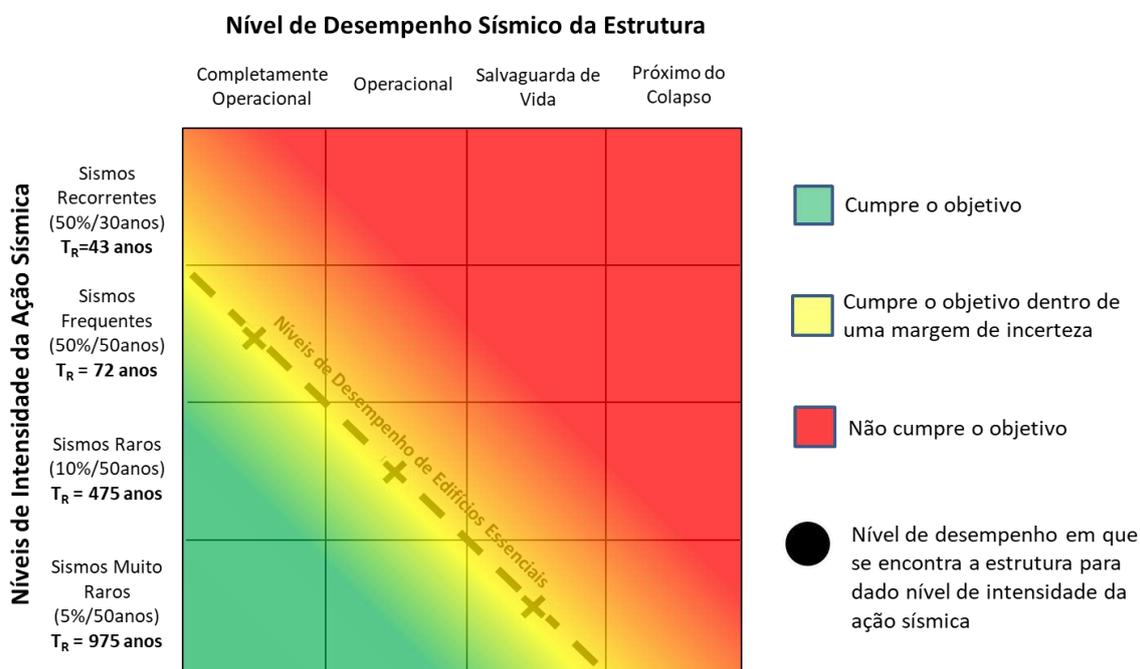


Figura 4.10 – Matriz de desempenho para os edifícios principais das escolas CML

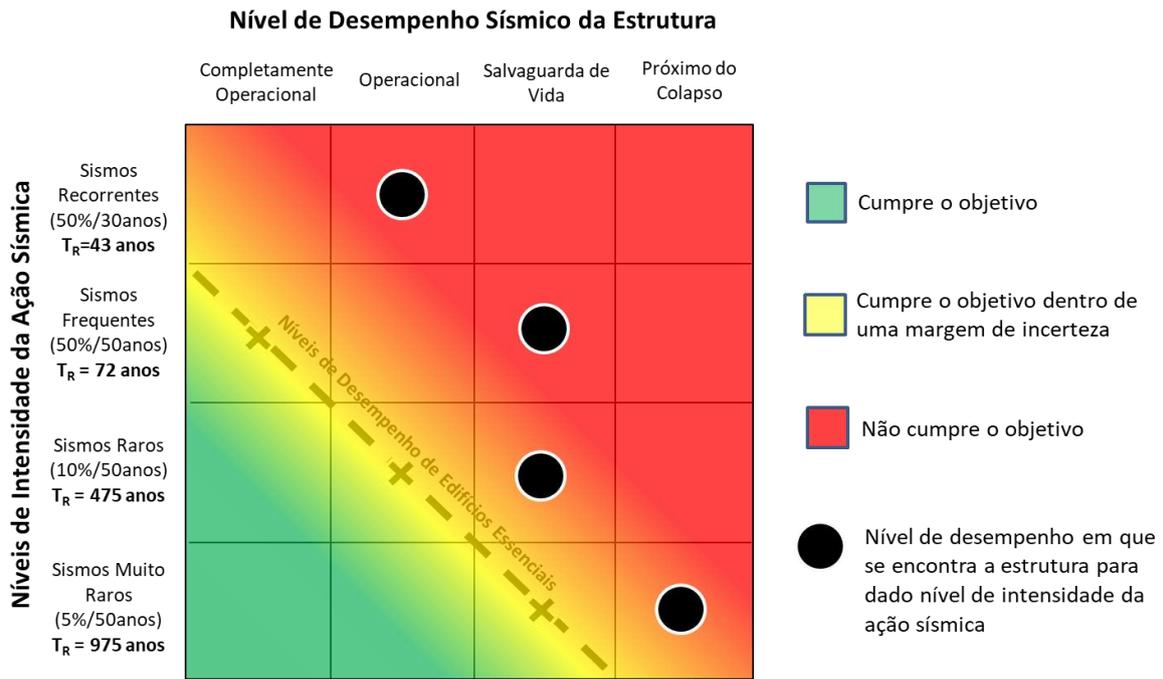


Figura 4.11 – Exemplo de preenchimento da matriz de desempenho para um dos edifícios principais das escolas CML - escola com desempenho insatisfatório

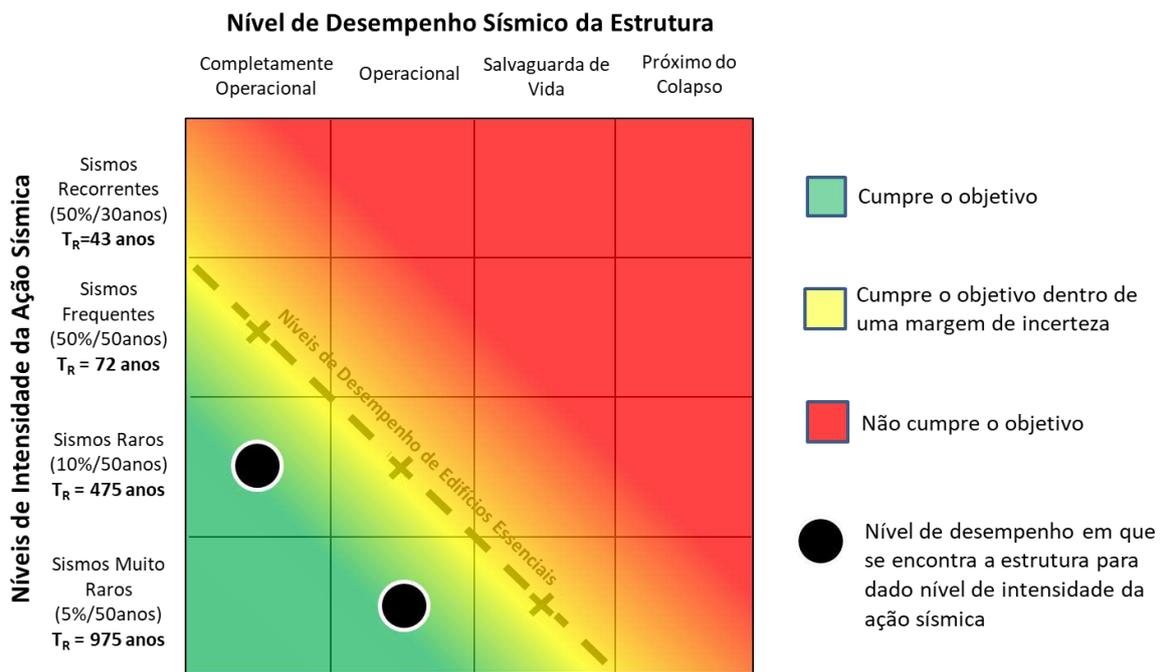


Figura 4.12 – Exemplo de preenchimento da matriz de desempenho para um dos edifícios principais das escolas CML - escola com desempenho satisfatório

## 4.5 Indicadores de risco e resiliência dos edifícios principais

A estimativa de parâmetros de risco sísmico, nomeadamente perdas estimadas em função da área das escolas e número de dias de interdição, permitem ter uma visão global dos efeitos da ação sísmica sobre o parque escolar e também hierarquizar as escolas em função das perdas esperadas.

O cálculo das perdas anuais esperadas (*Annual Expected Loss, AEL*), em percentagem da área do edifício em análise, é feita através de:

$$AEL(\%) = \sum P_{ELi} \times DF_{ELi} \quad (4.15)$$

onde:

$P_{ELi}$  – probabilidade anual de ser igualado ou excedido o estado limite  $ELi$ ;

$DF_{ELi}$  – fator de dano (*Damage Factor, DF*) associado ao estado limite  $ELi$ .

A probabilidade anual de um estado limite ser igualado ou excedido é igual ao inverso do período de retorno associado a tal estado limite, cujo cálculo é descrito na secção 4.3:

$$P_{ELi} = \frac{1}{T_{R,ELi}} \quad (4.16)$$

uma vez que o período de retorno é, por definição, o intervalo estimado entre ocorrências de igual intensidade ou com iguais consequências (neste caso, estado limite da resposta estrutural).

Por outro lado, os fatores de dano associados aos vários estados limite utilizados são baseados na evidência empírica dos danos registados em eventos sísmicos passados e são iguais a valores de referência já utilizados em anteriores estudos de risco sísmico desenvolvidos no LNEC (Sousa e Campos Costa, 2016). Estes fatores são indicados na Tabela 4.4 e correspondem à percentagem da área do edifício que é danificada devido à ocorrência de um sismo.

Tabela 4.4 – Fatores de dano para o cálculo das perdas anuais esperadas (AEL) (Sousa e Campos Costa, 2016)

	<b>EL1</b>	<b>EL2</b>	<b>EL3</b>	<b>EL4</b>
DF (%)	1	10	75	100

As perdas esperadas podem também ser calculadas ao longo de um período de tempo específico. Tal é útil no sentido de se perceber quais as perdas esperadas ao longo da vida útil de um edifício ou ao longo de determinado período de tempo. É de referir que tal cálculo assume que: (i) ao longo do período de tempo especificado, diga-se 50 anos, o estado atual das escolas é, pelo menos, mantido por ações de reabilitação/recuperação, isto é, não há um agravamento da vulnerabilidade sísmica das mesmas; e que (ii) a probabilidade de ocorrência de um evento sísmico é uniforme ao longo do tempo. Com estes pressupostos, as perdas totais esperadas ao longo de 50 anos (*Total Expected Loss, TEL*) podem ser calculadas através de:

$$TEL(\%) = \sum (1 - (1 - P_{ELi})^{50}) \times DF_{ELi} \quad (4.17)$$

O fator TEL (%) associado a cada escola é multiplicado pela área coberta,  $A_{cob}$ , correspondente à área total de construção tal como definida pelo INE (2010), de cada da escola para se obter a área total perdida em 50 anos:

$$TEL(m^2) = TEL(\%) \times A_{cob} \quad (4.18)$$

A soma das áreas perdidas nas várias escolas CML permite obter um indicador global do risco a que as escolas estão sujeitas neste momento ou, por outras palavras, as perdas estimadas que se preveem ao longo dos próximos 50 anos considerando o estado atual de vulnerabilidade das escolas. Tal indicador corresponde a:

$$I_V(\%) = \frac{\sum TEL_i}{\sum A_{cob,i}} \quad (4.19)$$

variando  $i$  entre 1 e o número de escolas consideradas no estudo. Tais perdas podem ser reduzidas por medidas de mitigação do risco sísmico, como é o caso do reforço estrutural dos edifícios, o que, necessariamente, diminuirá a probabilidade dos estados limite mais graves serem excedidos ou, dito de outra forma, aumentará os períodos de retorno associados a tais estados limite.

Não obstante o cálculo das perdas esperadas ao longo de 50 anos ser um indicador fundamental do risco, para edifício essenciais, como é o caso das escolas da CML, é igualmente fundamental aferir da sua operacionalidade pós-sismo, verificando assim que as mesmas podem ser utilizadas sem interrupção. No caso de alguma(s) escola(s) não poder(em) ser utilizada(s), tais alunos deverão ser deslocalizados para outras escolas. O cálculo do número de dias de interrupção na utilização da escola, por ano (*Annual Expected Interruption, AEI*), é calculado de forma semelhante à AEL, ou seja:

$$AEI(dias) = \sum P_{ELi} \times IT_{ELi} \quad (4.20)$$

onde:

$IT_{ELi}$  – número de dias de interrupção na utilização associado ao estado limite  $ELi$ .

Os valores de  $IT_{ELi}$  são assumidos de acordo com a prática internacional em análise de risco, nomeadamente no que concerne à metodologia do HAZUS (versão 4.2.3, 2019). Assim, o número de dias de interrupção associado a cada estado limite são os que se apresentam na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Dias de interrupção na utilização (IT) (HAZUS v.4.2.3, 2019)

	<b>EL1</b>	<b>EL2</b>	<b>EL3</b>	<b>EL4</b>
IT (dias)	1	60	240	720

O cálculo do número esperado de dias de interrupção ao longo de 50 anos (*Total Expected Interruption, TEI*) pode ser calculado de forma semelhante ao cálculo de TEL, ou seja:

$$TEI(dias) = \sum (1 - (1 - P_{ELi})^{50}) \times IT_{ELi} \quad (4.21)$$

O número total de dias de interrupção de cada escola, TEI, pode ser multiplicado pelo número de alunos da escola, obtendo-se assim o valor de alunos\*dias deslocados ao longo de 50 anos. Dividindo o valor anterior por 30, obtém-se o valor de alunos\*mês (*Students-Month Dislocated, SMI*) deslocados em 50 anos devido à ação sísmica:

$$SMI = TEI(dias) \times N_{alunos} \quad (4.22)$$

No sentido de se obterem informações sobre a resposta sísmica e a resiliência da rede escolar, foi feita uma análise de resiliência que consiste na análise do número de escolas encerradas e correspondente número de alunos deslocados para um conjunto de cenários sísmicos, definidos com recurso ao estudo probabilístico da ação sísmica apresentado no Capítulo 5. Os cenários sísmicos considerados variam, em magnitude, entre 5,3 e 7,1 e são especificamente simulados tendo em conta um sismo que ocorra na Falha do Vale Inferior do Tejo (FVIT). Para cada cenário, além da estimativa das perdas económicas diretas em função dos danos nos edifícios principais, é estimada a evolução do número de escolas encerradas e do correspondente número de alunos deslocados ao longo do tempo, até toda a rede escolar estar novamente operacional.

O cálculo das perdas corresponde, para cada cenário, à verificação do nível de desempenho atingido por cada edifício principal para o nível de intensidade sísmica associado ao cenário em questão. Uma vez determinado o nível de desempenho atingido para tal cenário, as perdas totais correspondem à soma das perdas de cada escola dada a ocorrência do cenário sísmico em análise.

Por outro lado, a análise da resiliência pós-sismo é feita calculando o número de dias que cada escola permanecerá encerrada dada a ocorrência do cenário sísmico em análise. Assim, para cada cenário, será novamente verificado o nível de desempenho atingido por cada edifício principal e o número de dias de encerramento a ele associado e, conseqüentemente, de interrupção de atividade. Desta forma é possível verificar o número de escolas encerradas em função do tempo após o sismo. Por exemplo, para um sismo com fraca intensidade (cenário 1 na Figura 4.13) será expectável que o número de escolas encerradas seja um valor  $N_i$ , inferior ao número total de escolas  $N_{escolas}$ . Por outro lado, assumindo um cenário 2 correspondente a um sismo muito intenso, é expectável que no dia seguinte ao sismo todas as escolas permaneçam encerradas para inspeção. No entanto, as escolas vão sendo incrementalmente reabertas, por reunirem as condições para tal ou devido a ações de reabilitação, até todas as escolas estarem novamente operacionais.

É de referir que tal estimativa assume que todos os recursos necessários serão alocados, sem qualquer limitação, pelo que esta estimativa é apenas indicativa e tem como base os danos expectáveis e o tempo útil necessário para repor a operacionalidade das escolas. O enquadramento económico, social e político terá necessariamente de ser ponderado numa situação pós-sismo, afetando assim as estimativas aqui apresentadas. Não obstante, as estimativas apresentadas permitem determinar o número expectável de alunos que será necessário alocar para vários cenários sísmicos de referência.

Estes indicadores de resiliência permitem desenvolver planos de resposta e emergência para a ação sísmica, com o objetivo de minimizar as perdas e recuperar o mais rapidamente possível a

operacionalidade da rede escolar, quer através da reabilitação dos edifícios escolares, quer através de alternativas temporárias que permitam minimizar os efeitos dos danos no edificado.

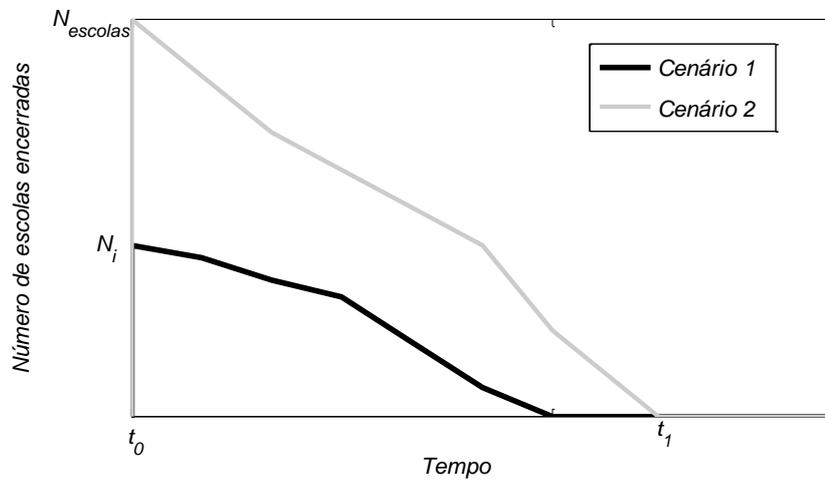


Figura 4.13 – Exemplo conceptual da evolução do número de escolas encerradas após a ocorrência de cenários sísmicos

## 5 | Definição probabilística da perigosidade sísmica local das escolas CML

### 5.1 Enquadramento sismotectónico da área de Lisboa

Lisboa localiza-se numa região de moderada sismicidade e perigosidade sísmica, intitulada de zona de falhas do Vale Inferior do Tejo (VIT). A importância do VIT como fonte geradora de sismos é expressa através dos vários sismos gerados ao longo dos tempos (Figura 5.1), de que são expressão mais relevante o sismo de Benavente de 23 de abril de 1909, com uma magnitude de 6.0 (Teves-Costa e Batlló, 2010), o sismo de 26 de janeiro de 1531, em Vila Franca de Xira, com uma magnitude de cerca de 7.0 e o sismo de 1 de janeiro de 1344, em Benavente, de magnitude 6.0 (Bezzeghoud et al., 2016).

Como principais estruturas tectónicas desta zona, refira-se a Falha de Vila Franca (VF, Figura 6.2) e a Falha de Alcochete (AF, Figura 6.2).

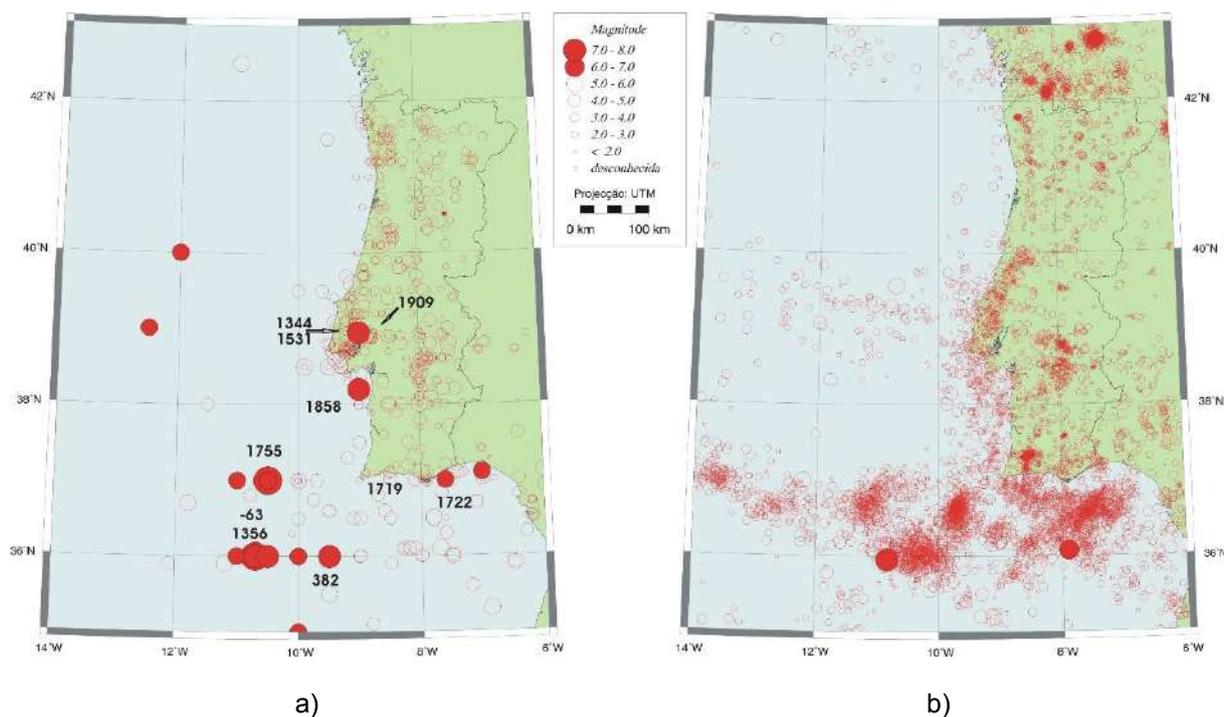
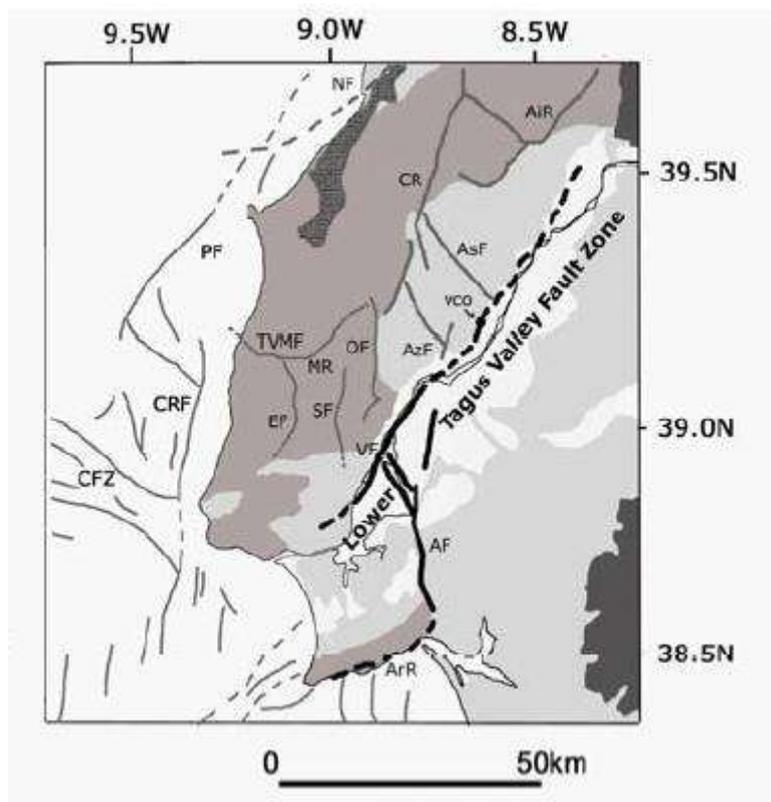


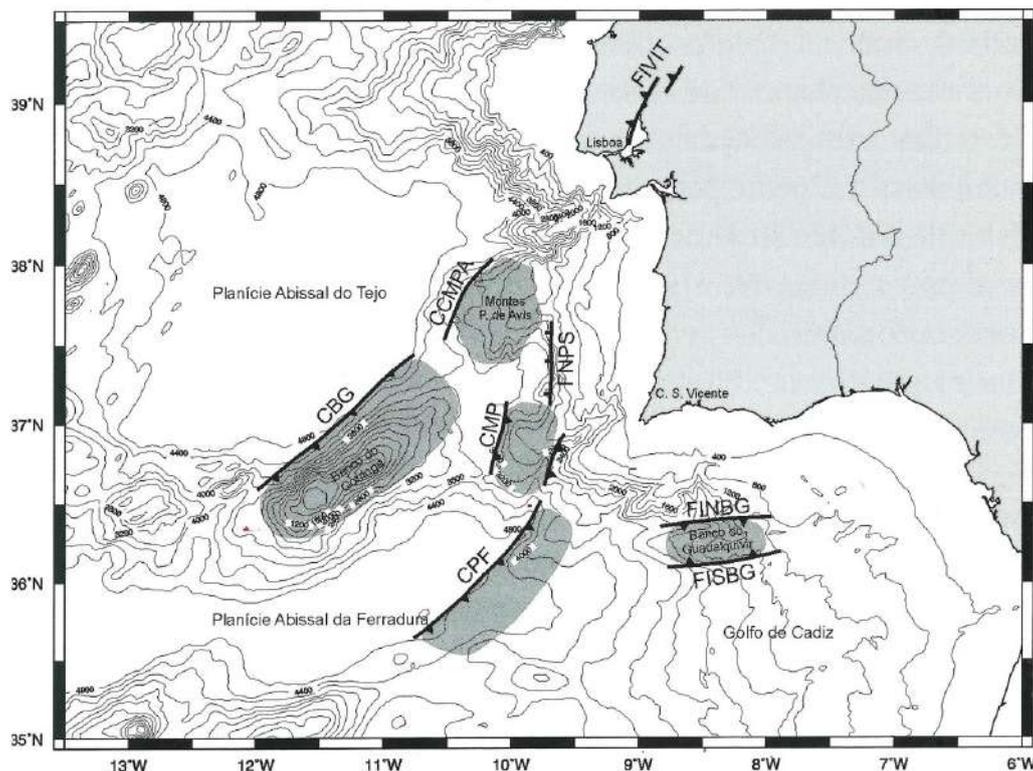
Figura 5.1 – a) Sismicidade histórica, 63 a.C – 1960 d.C; b) Sismicidade instrumental 1961-2007 (Carrilho et al., 2010)



NF – Falha da Nazaré; AiR – Serra de Aire; CR – Serra dos Candeeiros; PF – falha de Peniche; AsF – falha de Asseca; VCO – Vila de Chã de Ourique; TVMF – Falha Torres Vedras Montejunto; MR – Serra de Montejunto; OF – Falha da Ota; AzF – Falha da Azambuja; CRF – Falha do Cabo da Roca; EF – Falha do Espigão; SF – Falha do Sobral; CFZ – Zona de Falhas de Cascais; VF – Falha de Vila Franca; AF – Falha de Alcochete; ArR – Serra da Arrábida

Figura 5.2 – Principais estruturas tectónicas do Vale Inferior do Tejo e área envolvente (Vilanova e Fonseca, 2004)

Qualquer local da região de Lisboa está ainda sujeito à ação de sismos originados em falhas tectónicas localizadas na crosta oceânica do Atlântico, a sudoeste do Cabo de S. Vicente (Figura 5.3). É nesta região, entre o Banco de Gorringe (CBG, Figura 5.3) e a costa oeste Portuguesa que se encontra uma das zonas sismogénicas mais ativas. Os sismos que ocorrem nessa zona têm geralmente foco superficial (profundidade < 40km) e magnitude moderada, estando intercalados por alguns grandes sismos muito espaçados no tempo (Borges et al, 2001). Estas estruturas tectónicas deram origem ao sismo de 1 de novembro de 1755, de magnitude 8.5-8.7 (Martins e Mendes Victor, 1990; Johnston, 1996; Martínez Solares e López Arroyo, 2004). Foi também nesta área que se originou o sismo de 28 de fevereiro de 1969, de magnitude 7.9 (Fukao, 1973), localizado na planície Abissal da Ferradura (CPF, Figura 5.3), perto do flanco Sudeste do Banco de Gorringe (CBG, Figura 5.3), e os sismos de 12 de fevereiro de 2007 e de 17 de dezembro de 2009, ambos de magnitude 6.0.



**CBG** – Carreamento do Banco de Gorringe; **CCMPA** – Carreamento da Montanha Príncipes de Avis;  
**CPF** – Carreamento da Planície da Ferradura; **CMP** – Carreamento do Marquês de Pombal;  
**FNPS** – Falha normal de Pereira de Sousa; **FINBG** e **FISBG** – Falha inversa Norte e Sul, respetivamente, do Banco de Guadalquivir; **FIVIT** – Falhas inversas do Vale Inferior do Tejo.

Figura 5.3 – Zonas sísmicas da margem continental SW-Ibérica (Ribeiro, 2005)

## 5.2 Metodologia utilizada para a caracterização da ação sísmica no substrato rochoso

### 5.2.1 Modelos de geração da ação sísmica

A caracterização da ação sísmica para um dado local pode ser objeto de diferentes abordagens em função dos dados de base disponíveis, da importância e características da obra e do tipo de análises que se prevê realizar.

Uma abordagem possível é utilizar o documento normativo sísmo-resistente existente para Portugal, na sua mais recente versão, a Norma Portuguesa NP EN 1998-1:2010 (IPQ, 2010a). Esta norma substituiu a anterior regulamentação, nomeadamente o RSA. A NP EN 1998-1:2010, intitulada “Eurocódigo 8 – Projeto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, ações sísmicas e regras para edifícios”, e doravante denominado EC8-1, aplica-se ao projeto de edifícios e de outras obras de engenharia civil em zonas sísmicas, estabelecendo, entre outros, regras para a

quantificação da ação sísmica. No seu Anexo Nacional, encontra-se o zonamento sísmico de Portugal e os valores da aceleração máxima de referência, para as várias zonas sísmicas. Para um determinado local, o movimento sísmico é apresentado por um espectro de resposta elástica da aceleração à superfície do terreno.

O EC8-1 introduz o espectro de resposta elástica regulamentar e os valores de aceleração de referência considerando o requisito de não-ocorrência de colapso (correspondendo a 10% de probabilidade de excedência em 50 anos, isto é, 475 anos de período de retorno), apresentando um fator multiplicativo que permite obter ações sísmica associadas a taxas anuais de ocorrência distintas.

Esta é uma formulação simplificada, que poderá ser utilizada para edifícios correntes e localizados em zonas de sismicidade reduzida, mas que não capta características fundamentais dos movimentos intensos do solo e para o qual o nível da ação para probabilidades de excedência baixos (períodos de retorno elevados) estaria sujeita a níveis de incerteza epistémica muito elevados.

Assim sendo, torna-se necessário, para um problema com este nível de especificidade recorrer à análise probabilística da perigosidade sísmica (probabilistic seismic hazard analysis), que consiste no cálculo da probabilidade de determinado parâmetro, que mede a intensidade de um sismo, exceder, num dado local, um determinado nível, num intervalo de tempo especificado.

Neste estudo, a perigosidade sísmica nos locais específicos em que se encontram as 32 escolas CML é avaliada em termos de espectros de resposta em aceleração, para um amortecimento crítico de 5% e para várias probabilidades de excedência.

Esta secção apresenta as principais etapas da metodologia para a avaliação probabilística da ação sísmica num dado local, referindo a importância que esta avaliação tem no contexto mais alargado dos critérios de avaliação de segurança de estruturas. Circunstancia-se a modelação do processo sísmico de ocorrência e descrevem-se modelos de atenuação de deslocamento espectral publicados recentemente.

De salientar que neste trabalho é efetuado um estudo específico da influência das condições geológicas na resposta sísmica do local, sendo a ação sísmica avaliada para as características específicas do solo determinada com base no mapa de solos que o LNEC dispõe e que foi construído com base na sistematização de centenas de sondagens geotécnicas realizadas (Campos Costa et al., 2010).

O primeiro passo da metodologia para a avaliação probabilística da ação sísmica consiste em dividir a região sísmica em análise em zonas de geração sísmica, as quais delimitam regiões que partilham as mesmas características sismológicas, tectónicas e geológicas. Neste contexto, uma zona de geração sísmica representa uma região da crosta aproximadamente homogénea no que respeita às distribuições que caracterizam a sua atividade sísmica.

O modelo de zonas de geração de base adotado no presente estudo é o modelo utilizado no ERSTA - Estudo do Risco Sísmico e Tsunamis do Algarve, um dos mais recentes estudos probabilísticos desenvolvidos para o zonamento sísmico do território continental (Figura 5.4). Uma vez construído o modelo de zonas de geração, a exposição de determinado local à ação dos sismos resultará da soma da perigosidade associada a cada uma das zonas.

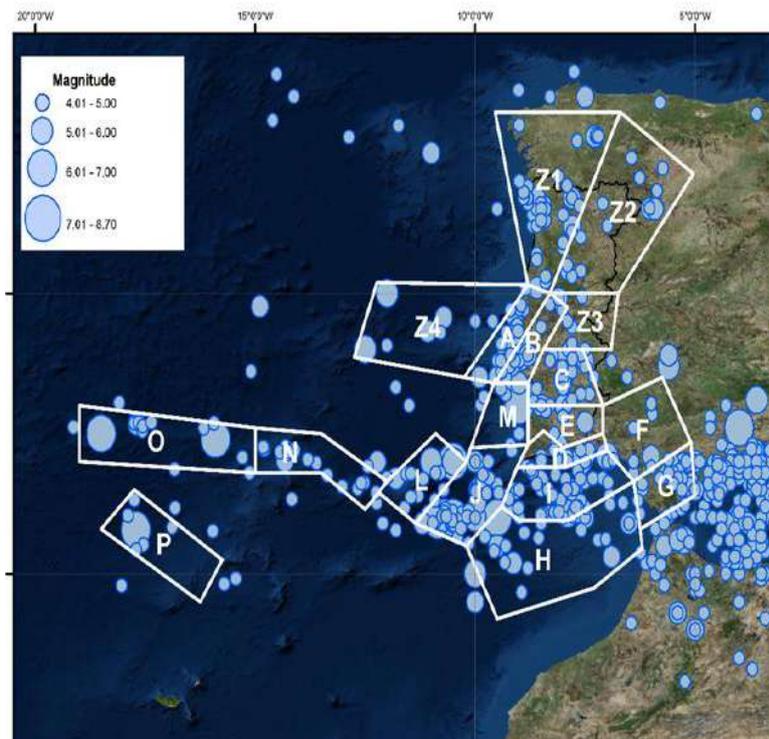


Figura 5.4 – Zonas sísmogénicas definidas no modelo do ERSTA - Estudo do Risco Sísmico e Tsunamis do Algarve

A informação sismotectónica disponível para Portugal permite concluir que os sismos que afetam o território português possuem dois tipos de mecanismos bem diferenciados: os sismos interplacas que resultam da interação na fronteira oceânica das placas Africana e Euroasiática e os sismos intraplaca associados à atividade sísmica em falhas no interior da placa Euroasiática.

Devido aos diferentes mecanismos de geração de sismos que afetam o território de Portugal Continental, são considerados dois cenários diferentes para a avaliação da sua ação: o primeiro é representativo dos sismos de magnitude moderada e pequena distância focal, contemplado no EC8 pela ação sísmica tipo 2, e o segundo é representativo de sismos de maior magnitude e maior distância focal, contemplado no EC8 pela ação sísmica tipo 1.

Assim, as zonas de geração apresentadas na Figura 5.4 podem ser classificadas em duas categorias: as que originam maioritariamente sismos com epicentro oceânico e as que originam predominantemente sismos com epicentro na placa Ibérica.

Nas regiões de sismicidade marcadamente difusa, como é o caso da maior parte das possíveis zonas de geração identificadas na região continental portuguesa, em que é difícil estabelecer uma associação entre as estruturas tectónicas ativas e os epicentros, admite-se que a sismicidade se distribui uniformemente dentro de cada zona. Desta forma assume-se que a localização dos epicentros é equiprovável em qualquer ponto de uma dada zona de geração sísmica e utiliza-se a distribuição uniforme bidimensional para modelar a distribuição de ocorrências no espaço.

O modelo estocástico utilizado mais correntemente para caracterizar o processo de ocorrência temporal de sismos,  $N(t)$ , é o de Poisson, devido à simplicidade da sua formulação e aplicação.

Num processo de Poisson homogéneo as ocorrências são independentes ao longo do tempo e a taxa média de ocorrências,  $\lambda$ , é constante.

$$P(N_t = n, \lambda t) = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^n}{n!}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \infty. \quad (5.1)$$

A análise dos catálogos sísmicos de uma determinada região permite obter a relação entre a frequência com que ocorrem os sismos e as respetivas magnitudes, para um dado período de tempo.

A relação de frequência-magnitude que mais se utiliza a nível mundial foi desenvolvida por Gutenberg e Richter em 1944 (Gutenberg et al., 1944). O modelo proposto por estes autores estabelece uma dependência linear entre o logaritmo da frequência de ocorrências de sismos e as suas magnitudes, para uma dada região,  $k$ , que se presume homogénea em termos de sismicidade:

$$\log N_k(m) = a_k + b_k \cdot m, \quad (5.2)$$

em que  $N_k(m)$  é o número de sismos com magnitude maior ou igual a  $m$  que ocorre na região analisada, para um dado período de observação. O coeficiente  $a_k$  é conhecido por atividade sísmica da região e está relacionado com a taxa de ocorrência total no período de observação considerado. O coeficiente  $b_k$  descreve a taxa relativa de ocorrência entre sismos de maior e menor magnitude. Os valores destes parâmetros devem ser ajustados aos dados do catálogo sísmico da região em análise.

A Eq. 5.2 escreve-se usualmente na forma:

$$N_k(m) = e^{\alpha_k - \beta_k \cdot m}, \quad (5.3)$$

sendo portanto  $\alpha_k = \ln(10) \cdot a_k$  e  $\beta_k = -\ln(10) \cdot b_k$ .

Assumindo que a grandeza de eventos sucessivos de uma dada zona de geração são independentes, que os sismos com magnitude inferior a  $m_0$ , que ocorrem na zona de geração  $k$ , contribuem pouco para os valores finais das intensidades dos movimentos sísmicos no local, e incorporando no modelo um valor de magnitude máxima  $m_1$  que não pode ser ultrapassado, então a distribuição cumulativa de probabilidades das magnitudes para essa zona,  $F_{M(k)}(m)$ , que se adequa à relação de Gutenberg-Richter truncada inferior e superiormente escreve-se (Araya et al., 1988):

$$F_{M(k)}(m) = P(M < m \mid m_0 \leq M \leq m_1) = \frac{1 - e^{-\beta_k(m-m_0)}}{1 - e^{-\beta_k(m_1-m_0)}}, \quad m_0 \leq m \leq m_1, \quad (5.4)$$

em que  $m_0$  é o limiar mínimo de magnitude e  $m_1$  designa-se por magnitude do sismo máximo provável, a qual é fundamentada por estudos de sismotectónica e paleosismicidade:

A respetiva função densidade de probabilidade vem dada por:

$$f_{M(k)}(m) = \frac{\beta_k e^{-\beta_k(m-m_0)}}{1 - e^{-\beta_k(m_1-m_0)}}, \quad m_0 \leq m \leq m_1. \quad (5.5)$$

Para todas as zonas de geração, escolheu-se o valor de magnitude 3.45 para o parâmetro  $m_0$  das expressões 5.4 e 5.5. Para além dos limites inferiores de truncatura, adotou-se a magnitude do sismo mais intenso que ocorreu no passado, com epicentro na zona analisada, para a truncatura superior,  $m_1$ , da distribuição de probabilidade da magnitude (equações 5.4 e 5.5).

Conhecidos os limites de truncatura e selecionando do catálogo histórico e instrumental, os sismos com magnitude superior a 3.45, os parâmetros  $a_k$  e  $b_k$  da relação de frequência-magnitude de Gutenberg-Richter (Eq. 5.2) foram estimados pelo método da máxima verosimilhança proposto por Weichter (1980), para cada zona de geração.

## 5.2.2 Leis de atenuação da ação sísmica

Uma vez caracterizado o processo de ocorrência sísmica, torna-se indispensável conhecer a lei de atenuação que, para cada zona sísmica, caracteriza a propagação do movimento sísmico entre a fonte e o local em análise. A intensidade do movimento do solo aumenta com a energia libertada na fonte (magnitude do sismo) e diminui geralmente com a distância ao epicentro, uma vez que as ondas sísmicas são atenuadas no meio em que se propagam.

Uma lei de atenuação é uma relação empírica que exprime a dependência entre a intensidade do movimento do solo e uma série de variáveis explicativas, como sejam a distância à fonte e a energia nela libertada. A relação funcional a escolher para traduzir a amplitude dos movimentos do solo num dado local dado a ocorrência de um evento na fonte, nomeadamente quais as variáveis, ou parâmetros, que deverão constar na lei, parte da forma geral adotada pelos modelos de atenuação e dada por:

$$\log Y = f(M,R,P) + \varepsilon \quad (5.6)$$

sendo:

$Y$  a intensidade do movimento do solo que se pretende prever (aceleração espectral ou valores de pico da aceleração, velocidade ou deslocamento) e  $f(M,R,p)$  o valor estimado pelo modelo matemático;

$M$  a variável que descreve a grandeza do sismo (magnitude ou intensidade epicentral);

$R$  a distância entre a fonte e o local em análise;

$P$  um vetor de variáveis que pode caracterizar a fonte ou o local (por exemplo mecanismo focal da fonte sísmica ou condições geológicas locais);

$\varepsilon$  uma variável aleatória que reflete a natureza imprevisível do movimento do solo e as características do modelo utilizado que se traduz numa dispersão em relação ao valor previsto pelo modelo de atenuação. Admite-se que esta variável tem distribuição normal de média nula e variância  $\sigma_\varepsilon^2$ .

Geralmente a relação funcional é caracterizada de maneira a que os seus termos tenham significado físico e assume uma forma do tipo:

$$\log Y = \text{Cte} + f_1(M) + f_2(R) + f_3(M,R) + f_4(P) + \varepsilon \quad (5.7)$$

onde:

$f_1(M)$  considera a variação da amplitude do movimento do solo com a energia libertada na fonte sísmica;

$f_2(R)$  tem em conta a variação da amplitude do movimento do solo com a distância do local à fonte sísmica sendo composta, normalmente, por dois termos que consideram a atenuação geométrica (em que  $\log Y$  é proporcional a  $\log R$ ) e a atenuação inelástica (em que  $\log Y$  é proporcional a  $R$ );

$f_3(M,R)$  é o termo que reflete a dependência estatística entre a magnitude e a distância e que não é usualmente encontrado nas leis de atenuação;

$f_4(P)$  representa a função relacionada com as características da fonte e/ou efeitos locais e normalmente utiliza valores 0, 1 e 2 para as diferentes classes de solos [Ambraseys *et al.*, 1996] ou diferentes tipos de falhas [Boore *et al.*, 1997], por vezes a relação entre a velocidade média das ondas de corte nos 30 m abaixo da superfície do local e uma velocidade de referência [Boore *et al.*, 1997]. Actualmente começam já a aparecer expressões que traduzem os efeitos não lineares dos solos [Atkinson & Boore, 2006; Boore & Atkinson, 2007].

As funções  $f_3(M,R)$  e  $f_4(P)$  são utilizadas principalmente em regiões tectonicamente ativas como a Califórnia, onde o volume de dados permite caracterizar esse tipo de dependência. Obviamente, tal não é o caso de Portugal Continental.

Para as leis de atenuação para o estudo da perigosidade sísmica nas escolas CML e tendo em conta os dois mecanismos de geração existentes no território continental, foram consideradas duas atenuações diferentes para as duas categorias de zonas sísmicas.

Carvalho (2007) concluiu que as leis de Ambraseys *et al.* (1996) são ajustadas para o campo próximo, para Portugal Continental, mas subestimam os valores de amplitude dos movimentos do solo para sismos de magnitude elevada a grandes distâncias, isto é, para a ação tipo 1 do EC8. Estas leis não serão, então, consideradas para caracterizar o processo de atenuação da energia sísmica nas zonas passíveis de gerar sismos interplacas. Em substituição, serão utilizadas leis de atenuação em aceleração espectral obtidas utilizando modelos de propagação e rutura em falha finita (Carvalho & Campos Costa, 2004; Carvalho *et al.*, 2008; Carvalho, 2007), calibrados com sismos obtidos na rede acelerográfica nacional. As leis consideradas foram as utilizadas para o estudo do zonamento sísmico no território nacional, para o Anexo Nacional do Eurocódigo 8.

Nesse estudo, utilizaram-se os modelos de rutura em falha para a simulação dos movimentos intensos do solo para uma grelha de magnitudes, distâncias e frequências para o cenário afastado (ação tipo 1 do EC8) que caracterizam a ação sísmica em Portugal Continental, obtendo-se, deste modo, leis de atenuação espectrais regionais. Estas simulações tiveram em conta apenas, para cada magnitude, 1 rutura no centro da falha.

As curvas de atenuação foram obtidas através da regressão dos dados sintéticos na relação funcional simples do tipo

$$\log_{10} SA = c_1 + c_2 M + c_3 R + c_4 \log_{10} R + \sigma \varepsilon \quad (5.9)$$

sendo SA a aceleração espectral, M a magnitude de momento e R a distância ao ponto de início de rutura (hipocentro).

A avaliação da casualidade sísmica nas escolas CML decorre da implementação computacional do modelo matemático para a quantificação probabilística da casualidade sísmica desenvolvido por Cornell (Cornell, 1968), para o cálculo da casualidade sísmica baseado no teorema da probabilidade total (Carvalho, 2007).

O programa de cálculo automático existente no NESDE/LNEC resulta da adaptação do programa EQRISK, desenvolvido por McGuire (McGuire, 1976), por forma a permitir calcular espectros de resposta uniformes, para além de curvas de perigosidade sísmica para um dado local.

A avaliação probabilística da perigosidade sísmica foi efetuada para um local de coordenadas 38.42° N, 9.7° W, um ponto central da cidade de Lisboa, tendo-se considerado dois cenários para a sismicidade que afeta este local:

- a) Ação sísmica próxima (tipo 2), para a sismicidade que ocorre num círculo com raio de 50 km em torno do local.
- b) Ação sísmica afastada (tipo 1), para a sismicidade que ocorre na área exterior a uma circunferência com raio de 50 km em torno do local e compreendida entre os paralelos 35° N e 44° N e os meridianos 4° E e 13° W.

### 5.2.3 Obtenção dos espectros de resposta

Na análise para verificação da segurança das estruturas tem particular interesse a determinação dos valores máximos da resposta que, no contexto dos processos estocásticos, deve ser identificado com o valor médio do valor máximo da resposta das estruturas a um conjunto de ações sísmicas representativas do processo (realizações de um processo estocástico).

Na análise através de processos estocásticos é habitual considerar que as vibrações sísmicas podem ser representadas por um processo estocástico, estacionário e gaussiano, com a densidade espectral de potência da excitação,  $S_a(f)$ , vulgarmente referida como espectro de potência, determinada, para valores positivos de frequência, a partir do espectro de Fourier (Eq.5.10):

$$S_a(f) = 2|A(f, R)|^2 \quad (5.10)$$

Este espectro de potência da excitação relaciona-se com o espectro de potência da resposta através da relação:

$$S_x(f, f_n, \xi) = S_a(f) |H(f, f_n, \xi)|^2 \quad (5.11)$$

sendo  $H(f, f_n, \xi)$  a função de transferência entre a aceleração absoluta na base e o deslocamento relativo, de um sistema linear de um grau de liberdade, com frequência  $f_n$  e amortecimento  $\xi$ , dada por

$$H(f, f_n, \xi) = \frac{1}{(2\pi)^2 [f_n^2 - f^2 + 2i\xi f_n f]} \quad (5.12)$$

Uma vez conhecida a função de densidade de potência correspondente à aceleração do movimento sísmico, e a consequente função de densidade de potência da resposta, calculam-se os seus momentos espectrais de ordem  $i$  (escritos de forma mais simplificada como  $\lambda_i$ )

$$\lambda_i(f, f_n, \xi) = \int_0^\infty (2\pi f)^i S_x(f, f_n, \xi) df \quad (5.13)$$

e obtém-se o espectro médio de resposta, RD, compatível, através do valor médio dos picos de resposta em deslocamentos relativos,  $E[max]$ , num intervalo de duração  $T$ , estimado com a expressão (Vanmarcke, 1975)

$$RD(f, f_n, \xi) = E[max] = \left[ \sqrt{2 \ln(2f_e T)} + \frac{0,577216}{\sqrt{2 \ln(2f_e T)}} \right] \sigma_x \quad (5.14)$$

sendo  $f_e$  a frequência média de passagens ascendentes por zero estatisticamente independentes e dada por

$$f_e = \begin{cases} (1,63 \cdot \delta^{0,45} - 0,38) \cdot f_0 & , \delta < 0,69 \\ f_0 & , \delta \geq 0,69 \end{cases} \quad (5.15)$$

com  $\delta$  a largura de banda e  $f_0$  descritos como

$$\delta = \left( 1 - \frac{\lambda_1^2}{\lambda_0 \cdot \lambda_2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{e} \quad f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.16)$$

### 5.3 Espetros de resposta no substrato rochoso

Tendo em consideração a metodologia acima descrita, a consideração de dois tipos de sismo distintos, sismo próximo e afastado, a ação sísmica é estimada para o centro de Lisboa com base num modelo de perigosidade baseado nas zonas sismogénicas definidas no projeto ERSTA - Estudo do Risco Sísmico e Tsunamis do Algarve (REF), representadas na Figura 5.4. A ação assim determinada para o centro de Lisboa é depois amplificada, tal como descrito na secção seguinte, tendo em conta as características geotécnicas específicas dos locais de implantação das escolas CML. Tal como descrito acima, os espectros de resposta são derivados através de análise com FRFs – Funções de Resposta em Frequência.

Assim, apresentam-se na Figura 5.6 e na Figura 5.7 os espetros de resposta, no substrato rochoso, para o centro de Lisboa e para vários períodos de retorno (em anos). Como se pode verificar, a ação sísmica próxima conduz a acelerações ao nível do substrato rochoso muito mais elevadas que o sismo afastado.

É de salientar que, com recurso a esta metodologia, obter-se-ão espetros não diretamente comparáveis aos espetros regulamentares do EC8. Com efeito, estes espetros resultam de um estudo específico para as escolas AML, recorrendo à informação detalhada disponível no mapa de solos do LNEC.



Figura 5.5 – Localização geográfica para determinação da ação sísmica em Lisboa ao nível do substrato rochoso

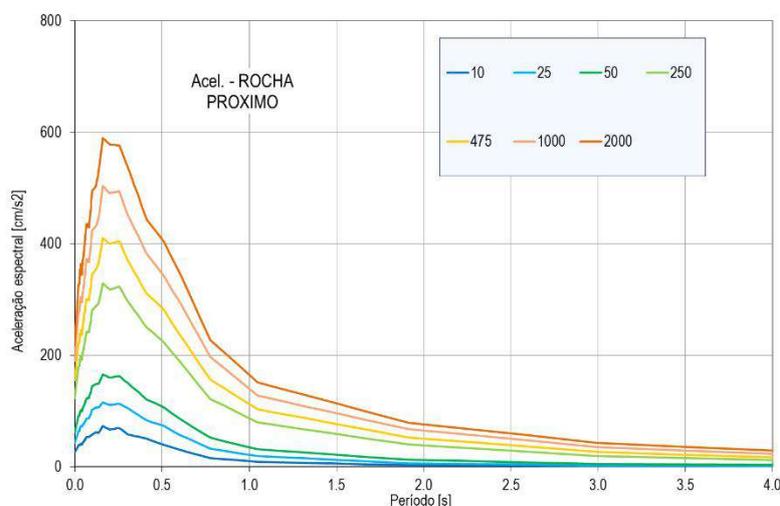


Figura 5.6 – Espetros de resposta para o sismo próximo, no substrato rochoso, em Lisboa

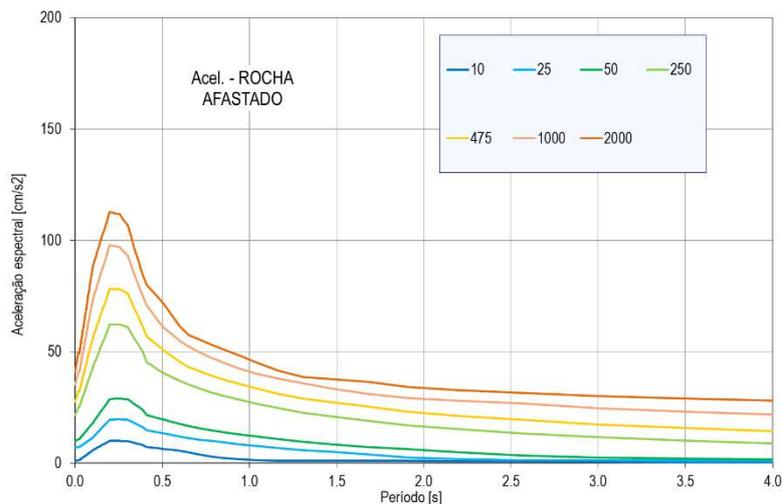


Figura 5.7 – Espectros de resposta para o sismo afastado, no substrato rochoso, em Lisboa

### 5.4 Espectros de resposta da ação sísmica à superfície

Os efeitos locais ou de sítio correspondem ao processo de alteração do conteúdo energético, onde as ondas sísmicas são modificadas enquanto se propagam na camada superficial da crosta até à superfície. Desta forma, é essencial caracterizar o solo do local em estudo. Esta caracterização é possível através do mapa de solos da AML e concelhos limítrofes, que o LNEC dispõe (Figura 5.8). É de referir que a coluna de solo A corresponde a rocha, não havendo pois qualquer amplificação da ação sísmica.

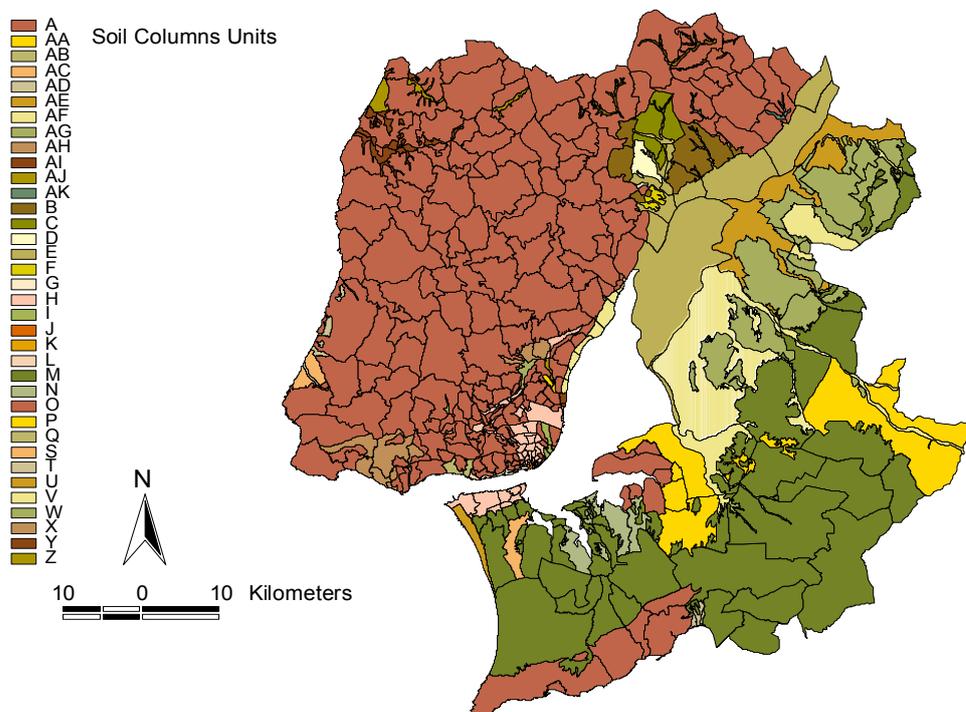


Figura 5.8 – Colunas de solo do LNEC Loss para a AML e concelhos limítrofes

Cruzando a informação relativa aos solos da região de Lisboa com a localização precisa das escolas CML (Figura 1.1) obtém-se a coluna de solo expectável na localização de cada uma das escolas. No caso de na localização da escola constar, no mapa do LNEC, mais do que uma coluna de solo provável, é considerada a pior coluna de solo, sendo a pior aquela que conduz a uma maior amplificação da ação sísmica desde o substrato rochoso até à superfície.

Desta forma, apresenta-se na Tabela 5.1 a classe de solo associada a cada uma das 32 escolas CML. A maioria das escolas encontra-se fundada em solo tipo A (rocha) ou em solo tipo H, tal como se pode verificar na Figura 5.9. Apenas 4 escolas se encontram fundadas em solos diferentes dos dois referidos.

Tabela 5.1 – Solos das escolas CML com base na sua localização e no mapa de solos do LNEC

Nord	Escola	ID	Agrupamento de Escolas	Solo
1	Escola Básica Alto do Lumiar	8	Alto do Lumiar	H
2	Escola Básica Almirante Gago Coutinho	14	Alvalade	H
3	Escola Básica Bairro do Padre Cruz	16	Bairro Padre Cruz	A
4	Escola Secundária José Gomes Ferreira	27	Benfica	H
5	Escola Básica Marvila	30	D.Dinis	I
6	Escola Básica Damião de Góis	36	D.Dinis	A
7	Escola Básica Vasco da Gama	43	Eça de Queiroz	V
8	Escola Básica Fernando Pessoa	47	Fernando Pessoa	H
9	Escola Básica Professor Delfim Santos	68	Laranjeiras	A
10	Escola Básica Luís António Verney	73	Luís António Verney	I
11	Escola Básica Luís de Camões	75	Luís de Camões	H
12	Escola Básica Manuel da Maia	79	Manuel da Maia	A
13	Escola Básica Nuno Gonçalves	92	Nuno Gonçalves	H
14	Escola Secundária Dona Luísa de Gusmão	93	Nuno Gonçalves	H
15	Escola Básica Olaias	97	Olaias	A
16	Escola Básica Patrício Prazeres	108	Patrício Prazeres	I
17	Escola Básica Pintor Almada Negreiros	111	Pintor Almada Negreiros	A
18	Escola Básica Piscinas	116	Piscinas – Olivais	H
19	Escola Básica Professor Lindley Cintra	122	Prof.Lindley Cintra	A
20	Escola Secundária Lumiar	123	Prof.Lindley Cintra	H
21	Escola Básica Quinta de Marrocos	124	Quinta de Marrocos	A
22	Escola Básica Eugénio dos Santos	131	Rainha D.Leonor	H
23	Escola Básica Paula Vicente	138	Restelo	A
24	Escola Secundária Restelo	139	Restelo	A
25	Escola Básica Olivais	143	Santa Maria dos Olivais	H
26	Escola Básica São Vicente – Telheiras	152	Vergílio Ferreira	A
27	Escola Básica Telheiras	147	Vergílio Ferreira	A
28	Escola Artística de Dança do Conservatório Nacional	160	Desagrupada	A
29	Escola Artística Instituto Gregoriano de Lisboa		Desagrupada	H
30	Escola Profissional Ciências Geográficas		Desagrupada	H
31	Escola Secundária Maria Amália Vaz de Carvalho	86	Desagrupada	H
32	Escola Secundária Marquês de Pombal	57	Desagrupada	A

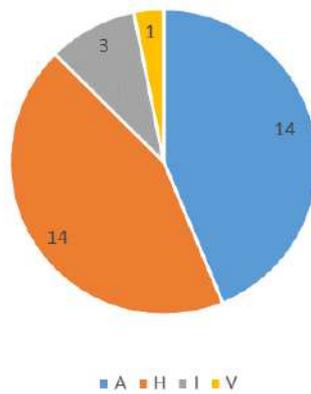


Figura 5.9 – Número de escolas por classe de solo

As propriedades das quatro colunas de solo são representadas graficamente na Figura 5.10, Figura 5.11 e Figura 5.12. A velocidade de propagação das ondas sísmicas  $V_s$  está relacionada com o número corrigido de pancadas do ensaio SPT,  $N_{60}$ , e com a tensão efetiva no solo,  $\sigma'_v$ . A coluna V, existente maioritariamente na zona oriental da cidade, corresponde à coluna de solo com pior capacidade resistência à superfície, amplificando significativamente as acelerações para períodos de vibração altos (ver Figura 5.13).

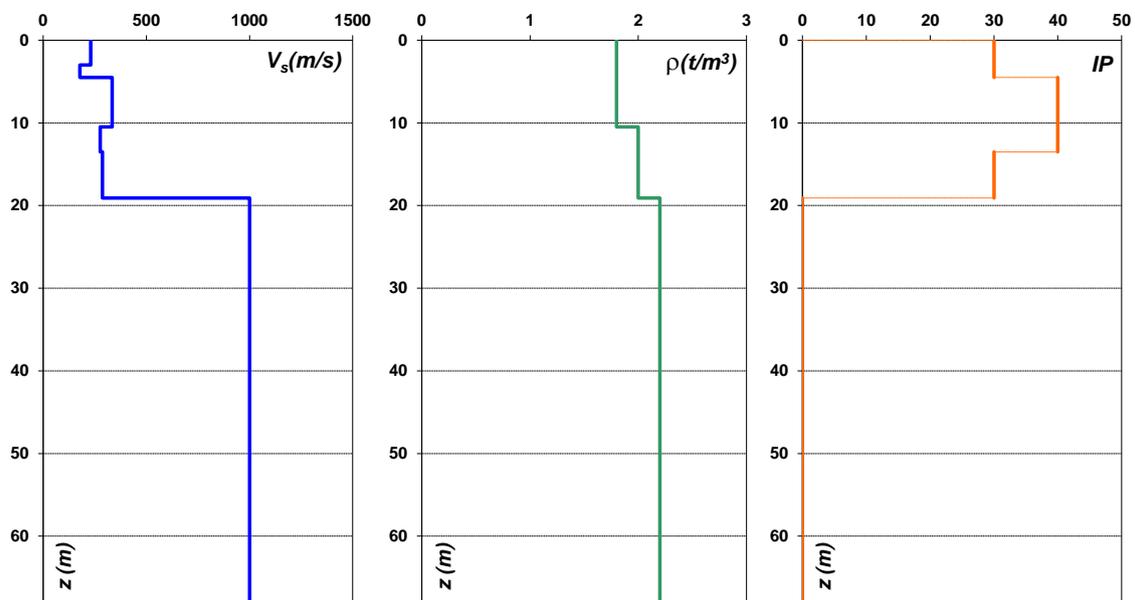


Figura 5.10 – Coluna de solo tipo H do LNECloss

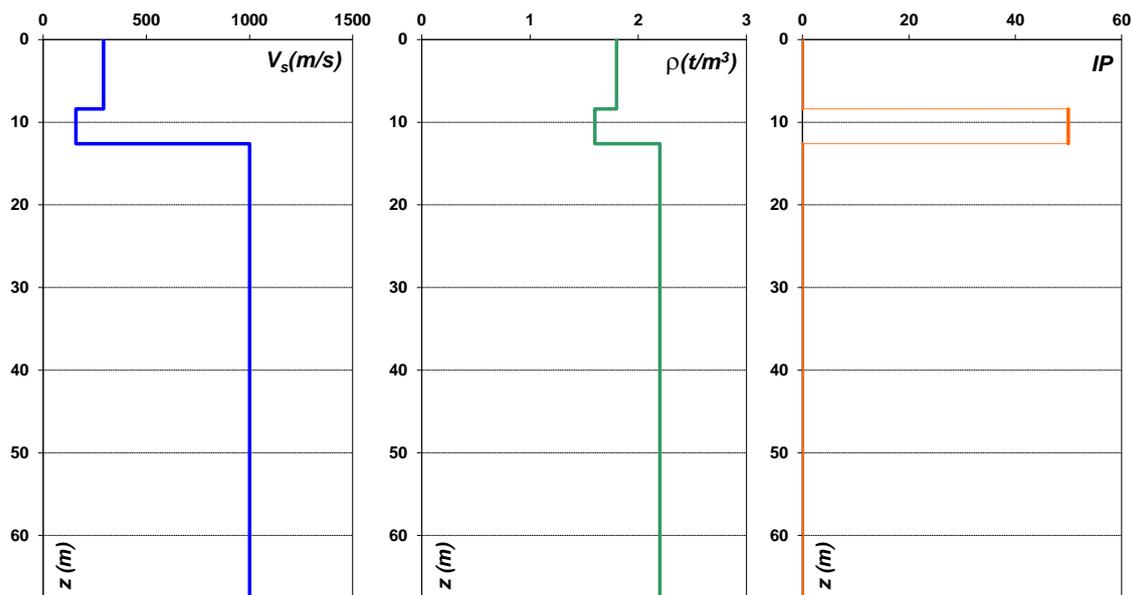


Figura 5.11 – Coluna de solo tipo I do LNECLoss

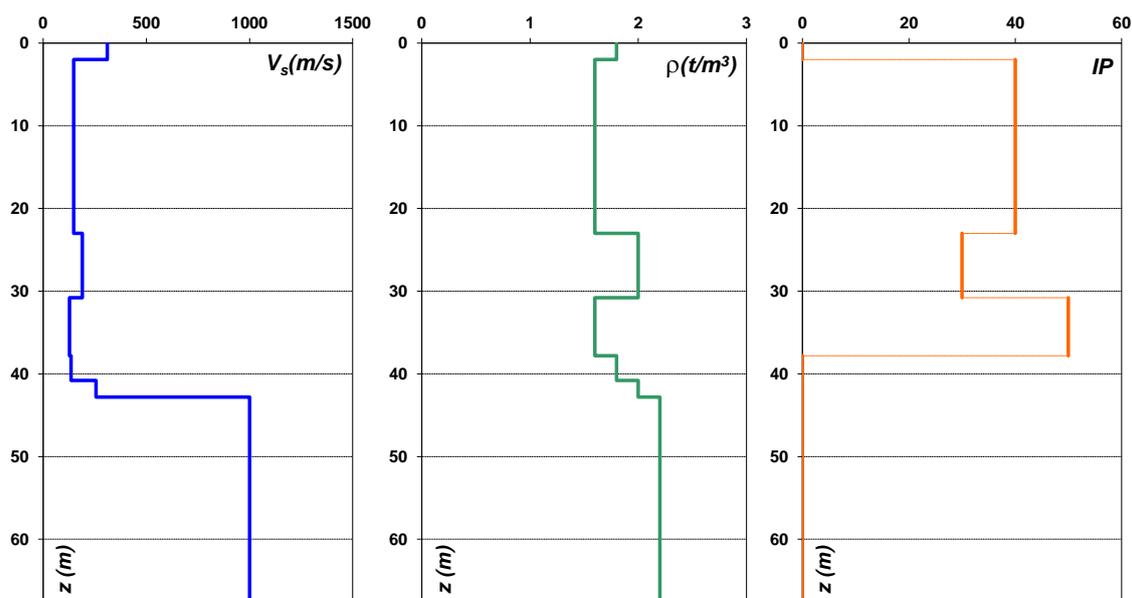


Figura 5.12 – Coluna de solo tipo V do LNECLoss

Com base na coluna de solo associada a cada local, a ação sísmica no substrato rochoso é propagada até á superfície com recurso a análise estocástica não-linear. Detalhes deste procedimento podem ser obtidos em Carvalho (2007). A propagação da ação sísmica na coluna de solo tem como efeito a amplificação das acelerações, agravando a ação sísmica a considerar na análise da estrutura.

Na Figura 5.13 e na Figura 5.14 apresentam-se os espectros de resposta à superfície associados às quatro colunas de solo consideradas, para um período de retorno de 475 anos, e para o sismo próximo e o sismo afastado, respetivamente.

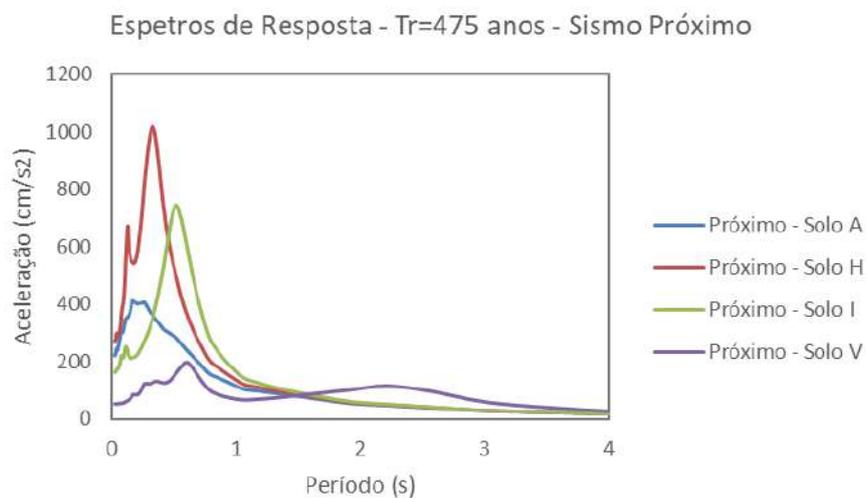


Figura 5.13 – Espectros de resposta à superfície para o sismo próximo

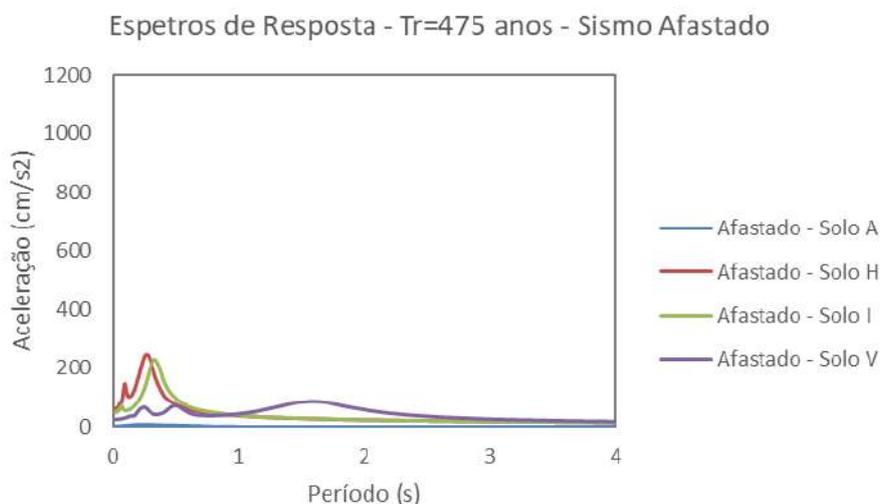


Figura 5.14 – Espectros de resposta à superfície para o sismo afastado

Tendo em conta a comparação entre os espectros de resposta dos dois tipos de sismo próximo e afastado, conclui-se que, para cada período de retorno, a ação sísmica associada ao sismo próximo gera maiores acelerações à superfície, pelo que, no capítulo seguinte, os resultados finais deste estudo serão apenas apresentados para o sismo próximo, sendo estes os condicionantes para a análise da segurança estrutural sísmica das escolas CML.

## 5.5 Cenários sísmicos para os locais em estudo

Para cálculo das perdas e dos indicadores de resiliência descritos na secção 4.5, a avaliação do desempenho das estruturas é feita para diferentes níveis de intensidade da ação sísmica (que está associada a diferentes períodos de retorno). Assim, as roturas da falha foram simuladas para várias magnitudes, correspondendo a diferentes probabilidades de excedência do movimento do solo (isto é, vários períodos de retorno).

Tendo em conta as principais falhas sísmicas apresentadas anteriormente, e considerando a falha mais próxima dos locais e de expressão mais importante, considerou-se para a simulação dos movimentos do solo a falha caracterizada no âmbito do projeto SHARE (Seismic Hazard Harmonization in Europe, [www.share-eu.org](http://www.share-eu.org)), intitulada de FVIT (idêntica à falha VF da Figura 5.2), de 60 km de extensão e 18,7 km de profundidade (plano de falha com uma área de 1150 km<sup>2</sup>), inclinação de 80°, orientação N36°E e uma magnitude máxima expectável de 7.1. Todas as escolas se encontram a menos de 20 km da falha.

A relação de frequência-magnitude que mais se utiliza a nível mundial foi desenvolvida por Gutenberg e Richter (1944). O modelo proposto por estes autores estabelece uma dependência linear entre o logaritmo da frequência de ocorrências de sismos e as suas magnitudes, para uma dada região, que se presume homogénea em termos de sismicidade:

$$\log N(m) = a - bm \Leftrightarrow N(m) = 10^{a-bm} = \exp(\alpha - \beta m) \quad (5.17)$$

em que:

$$\alpha = a \ln 10 \quad e \quad \beta = b \ln 10 \quad (5.18)$$

sendo que  $N(m)$  é a taxa média anual de eventos com magnitude superior a  $m$  que ocorre na região analisada,  $a$  é a atividade sísmica da zona,  $10^a$  é a média anual de sismos de magnitude maior ou igual a zero, e  $b$  é o coeficiente que descreve a taxa relativa de ocorrência entre sismos de maior e menor magnitude em cada zona. Os valores destes parâmetros devem ser ajustados aos dados do catálogo sísmico da região em análise.

Assumindo que: i) as grandezas de eventos sucessivos de uma dada zona são independentes; ii) os sismos com magnitude inferior a  $m_0$  que ocorrem nessa zona não são relevantes para o cálculo da perigosidade sísmica (por exemplo, por não causarem danos estruturais relevantes); e iii) em cada zona existe um valor máximo de magnitude,  $m_{max}$ , que não pode ser ultrapassado, então  $N(m)$  pode escrever-se através da lei, conhecida como lei de Gutenberg-Richter truncada (Araya e Der Kiureghian, 1988):

$$N(m) = \exp(\alpha - \beta m_0) \frac{\exp[-\beta(m-m_0)] - \exp[-\beta(m_{max}-m_0)]}{1 - \exp[-\beta(m_{max}-m_0)]}, m_0 \leq m \leq m_{max} \quad (5.19)$$

O inverso da taxa média anual de eventos com magnitude superior a  $m$  é comumente conhecido como o período de retorno,  $T_R$ , do sismo de magnitude superior a  $m$  ( $T_R = 1/N(m)$ ).

Assim, estas relações de frequência-magnitude caracterizam o comportamento sísmico da região e são elementos fundamentais para estimar a perigosidade sísmica e os intervalos de recorrência (períodos de retorno) associados a uma dada magnitude.

A partir de vários trabalhos realizados para a região do Vale Inferior do Tejo (Campos Costa *et al.*, 2008; Rodrigues *et al.*, 2009; Carvalho e Campos Costa, 2015; Woessner *et al.*, 2013), estimaram-se as magnitudes (apresentadas na Tabela 5.2) para alguns períodos de retorno considerados para o estudo do desempenho sísmico dos edifícios principais das escolas CML. São estes os sete cenários sísmicos considerados para o cálculo das perdas e dos indicadores de resiliência descritos na secção 4.5.

**Tabela 5.2 – Magnitudes correspondentes a diferentes períodos de retorno**

<b>Cenário</b>	<b>Período de retorno [ano]</b>	<b>Magnitude</b>
1	20	5,3
2	50	5,8
3	100	6,1
4	275	6,6
5	475	6,8
6	1100	7
7	2200	7,1

## 6 | Análise de risco e resiliência das escolas CML

### 6.1 Apresentação e discussão de resultados

#### 6.1.1 Períodos de retorno associados aos estados limite

Da análise da resposta sísmica dos edifícios principais das escolas, considerando os espectros de resposta da ação sísmica derivados do estudo probabilístico da ação sísmica aqui desenvolvido, são obtidos os períodos de retorno da ação sísmica que conduzem à excedência dos quatro estados limite da resposta sísmica das estruturas dos edifícios. Cada um destes quatro estados limite define a fronteira superior do respetivo nível de desempenho: completamente operacional, operacional, salvaguarda de vida e próximo do colapso. Os períodos de retorno da ação sísmica associados a cada um dos estados limite, podem ser comparados com os valores de referência definidos no Capítulo 2.

Na Tabela 6.1 apresentam-se os valores dos períodos de retorno da ação sísmica associados à excedência dos estados limite da resposta sísmica dos edifícios principais das escolas. Os períodos de retorno encontram-se truncados nos 10000 anos, uma vez que se considera que não há nenhuma ação sísmica com ocorrência expectável em Lisboa, com período de retorno superior a este valor, pelo que nestes casos considera-se como inverosímil a ocorrência de tal estado limite.

As cores que se podem observar estão relacionadas com a comparação dos períodos de retorno obtidos com os períodos de retorno de referência. Nesta comparação direta entre períodos de retorno considerou-se uma margem de incerteza, conservativa, dos períodos de retorno estimados relativamente aos períodos de retorno objetivo. Assim, a verde apresentam-se os períodos de retorno que se encontram pelo menos 20% acima dos períodos de retorno objetivo dos estados limite 1 e 2, e 10% acima dos períodos de retorno objetivo dos estados limite 3 e 4. Portanto, a verde encontram-se os casos nos quais se verifica um desempenho sísmico que respeita os objetivos definidos. Recordar-se que maiores períodos de retorno correspondem a ação sísmica mais intensa e, como tal, com menor probabilidade de ocorrência. Desta forma, é desejável que os períodos de retorno associados à excedência dos estados limite sejam os maiores possível, o que significa que para determinado estado limite da resposta sísmica ser excedido seria necessária uma ação sísmica muito intensa e, conseqüentemente, pouco provável. Por outro lado, a vermelho apresentam-se os períodos de retorno que se encontram pelo menos 20% abaixo dos valores objetivo dos estados limite 1 e 2, e 10% abaixo dos valores objetivo dos estados limite 3 e 4, estando por isso associados a um desempenho sísmico que não satisfaz os objetivos de desempenho estabelecidos. Por último, a amarelo encontram-se os períodos de retorno semelhantes (intervalo de 20% e 10%, acima e abaixo do valor de referência, para os estados limite 1-2 e 3-4, respetivamente) dos períodos de retorno de referência, respeitando assim os objetivos de desempenho definidos, dentro de um intervalo de confiança.

Da leitura da Tabela 6.1 pode concluir-se que a larga maioria das escolas cumpre os objetivos de desempenho relacionados com a resistência última da estrutura, ou seja, cumpre os objetivos

relacionados com os dois últimos estados limite (estados limite 3 e 4 – salvaguarda de vida e próximo do colapso). Com efeito, apenas a EB Luís de Camões, a EB Almirante Gago Coutinho e a EB Patrício Prazeres não cumprem o objetivo de desempenho associado ao estado limite 4 (próximo do colapso). No que toca ao estado limite 3 (salvaguarda de vida), além da EB Luís de Camões e da EB Almirante Gago Coutinho, também a EB Nuno Gonçalves e a EB Eugénio dos Santos não cumprem o objetivo de desempenho definido.

No entanto, no que concerne aos dois primeiros estados limite, relacionados com a operacionalidade dos edifícios principais (completamente operacional e operacional), um número muito significativo de 11 e 19 escolas não respeitam os objetivos de desempenho associados aos estados limite 1 e 2, respetivamente. Tal observação permite concluir que, pese embora, a generalidade dos edifícios apresente uma sobrecapacidade resistente face aos níveis de desempenho mais gravosos e, conseqüentemente, não ser verosímil que se encontrem próximos do colapso face à ação sísmica expectável em Lisboa, uma parte muito significativa destes edifícios apresentará danos pós-sismo, para eventos de menor intensidade, que limitarão seriamente a sua operacionalidade, levando ao seu encerramento e, conseqüentemente, à interrupção da sua atividade e ao impedimento do seu uso com outros fins (abrigo temporário, por exemplo).

**Tabela 6.1 – Períodos de retorno da ação sísmica associados à excedência dos estados limite da resposta sísmica dos edifícios principais das escolas**

Nord	Escola	ID	Tipologia	Acob (m <sup>2</sup> )	Nº alunos	TR (EL1)	TR (EL2)	TR (EL3)	TR (EL4)
1	Escola Básica Alto do Lumiar	8	3x3	2405	535	504	2138	>10000	>10000
6	Escola Básica Damião de Góis	36	3x3	4800	365	547	2470	>10000	>10000
9	Escola Básica Professor Delfim Santos	68	3x3	7221	1040	547	2470	>10000	>10000
15	Escola Básica Oiaias	97	3x3	3200	585	547	2470	>10000	>10000
18	Escola Básica Piscinas	116	3x3	1500	680	502	2133	>10000	>10000
20	Escola Secundária Lumiar	123	3x3	6625	725	502	2133	>10000	>10000
24	Escola Secundária Restelo	139	3x3	3683	1100	547	2470	>10000	>10000
17	Escola Básica Pintor Almada Negreiros	111	VR	4086	520	129	328	>10000	>10000
27	Escola Básica Telheiras	147	VR	3500	595	129	328	>10000	>10000
26	Escola Básica São Vicente – Telheiras	152	VR	3950	730	44	67	>10000	>10000
5	Escola Básica Marvila	30	C24T	2810	330	94	190	>10000	>10000
19	Escola Básica Professor Lindley Cintra	122	C24T	2683	530	122	285	>10000	>10000
25	Escola Básica Olivais	143	C24T	3000	535	108	238	>10000	>10000
3	Escola Básica Bairro do Padre Cruz	16	BA	2785	350	333	1334	>10000	>10000
4	Escola Secundária José Gomes Ferreira	27	BA	9028	1000	61	109	>10000	>10000
8	Escola Básica Fernando Pessoa	47	BA	5086	800	30	43	>10000	>10000
32	Escola Secundária Marquês de Pombal	57	BA	14571	400	40	62	>10000	>10000
10	Escola Básica Luís António Verney	73	BA	5784	420	22	33	>10000	>10000
11	Escola Básica Luís de Camões	75	BA	5796	500	29	48	293	495
12	Escola Básica Manuel da Maia	79	BA	1615	365	58	95	>10000	>10000
21	Escola Básica Quinta de Marrocos	124	BA	2785	585	626	1425	>10000	>10000
2	Escola Básica Almirante Gago Coutinho	14	Mista BA	2264	450	53	62	371	941
14	Escola Secundária Dona Luísa de Gusmão	93	Mista BA	2662	990	88	181	3110	>10000
23	Escola Básica Paula Vicente	138	Mista BA	2230	430	6	14	4085	8415
13	Escola Básica Nuno Gonçalves	92	Mista AB	3209	910	25	29	254	4282
16	Escola Básica Patrício Prazeres	108	Mista AB	1858	475	17	90	1199	1238
22	Escola Básica Eugénio dos Santos	131	Mista AB	3475	830	24	29	244	4010
29	Escola Artística Instituto Gregoriano de Lisboa	-	Mista AB	259	475	45	57	829	2549
7	Escola Básica Vasco da Gama	43	BA						
28	Escola Artística de Dança do Conservatório Nacional	160	Mista AB						
30	Escola Profissional Ciências Geográficas		Mista AB						
31	Escola Secundária Maria Amália Vaz de Carvalho	86	Mista AB						
			total:	112870	17250				

O período de retorno é, por definição, o intervalo estimado entre ocorrências de igual intensidade ou com iguais conseqüências (neste caso, estado limite da resposta estrutural), pelo que o seu inverso é igual à frequência anual de excedência desse mesmo estado limite ou, dito de outra forma, é igual à probabilidade anual de excedência desse estado limite. Na Tabela 6.2 apresentam-se assim as

probabilidades anuais de excedência dos estados limite da resposta sísmica dos edifícios principais das escolas, que serão utilizadas nas secções seguintes.

**Tabela 6.2 – Probabilidades anuais de excedência dos estados limite da resposta sísmica dos edifícios principais das escolas**

Nord	Escola	ID	Tipologia	$A_{cob}$ (m <sup>2</sup> )	P(EL1)	P(EL2)	P(EL3)	P(EL4)
1	Escola Básica Alto do Lumiar	8	3x3	2405	1.984E-03	4.678E-04	0.000E+00	0.000E+00
6	Escola Básica Damião de Góis	36	3x3	4800	1.827E-03	4.049E-04	0.000E+00	0.000E+00
9	Escola Básica Professor Delfim Santos	68	3x3	7221	1.827E-03	4.049E-04	0.000E+00	0.000E+00
15	Escola Básica Orlaia	97	3x3	3200	1.827E-03	4.049E-04	0.000E+00	0.000E+00
18	Escola Básica Piscinas	116	3x3	1500	1.993E-03	4.689E-04	0.000E+00	0.000E+00
20	Escola Secundária Lumiar	123	3x3	6625	1.993E-03	4.689E-04	0.000E+00	0.000E+00
24	Escola Secundária Restelo	139	3x3	3683	1.827E-03	4.049E-04	0.000E+00	0.000E+00
17	Escola Básica Pintor Almada Negreiros	111	VR	4086	7.759E-03	3.051E-03	0.000E+00	0.000E+00
27	Escola Básica Telheiras	147	VR	3500	7.759E-03	3.051E-03	0.000E+00	0.000E+00
26	Escola Básica São Vicente – Telheiras	152	VR	3950	2.277E-02	1.504E-02	0.000E+00	0.000E+00
5	Escola Básica Marvila	30	C24T	2810	1.068E-02	5.263E-03	0.000E+00	0.000E+00
19	Escola Básica Professor Lindley Cintra	122	C24T	2683	8.170E-03	3.509E-03	0.000E+00	0.000E+00
25	Escola Básica Olivais	143	C24T	3000	9.259E-03	4.211E-03	0.000E+00	0.000E+00
3	Escola Básica Bairro do Padre Cruz	16	BA	2785	3.003E-03	7.496E-04	0.000E+00	0.000E+00
4	Escola Secundária José Gomes Ferreira	27	BA	9028	1.634E-02	9.153E-03	0.000E+00	0.000E+00
8	Escola Básica Fernando Pessoa	47	BA	5086	3.307E-02	2.339E-02	0.000E+00	0.000E+00
32	Escola Secundária Marquês de Pombal	57	BA	14571	2.480E-02	1.619E-02	0.000E+00	0.000E+00
10	Escola Básica Luís António Verney	73	BA	5784	4.480E-02	3.008E-02	0.000E+00	0.000E+00
11	Escola Básica Luís de Camões	75	BA	5796	3.472E-02	2.105E-02	3.419E-03	2.020E-03
12	Escola Básica Manuel da Maia	79	BA	1615	1.736E-02	1.053E-02	0.000E+00	0.000E+00
21	Escola Básica Quinta de Marrocos	124	BA	2785	1.596E-03	7.018E-04	0.000E+00	0.000E+00
2	Escola Básica Almirante Gago Coutinho	14	Mista BA	2264	1.877E-02	1.619E-02	2.699E-03	1.063E-03
14	Escola Secundária Dona Luísa de Gusmão	93	Mista BA	2662	1.138E-02	5.540E-03	3.215E-04	0.000E+00
23	Escola Básica Paula Vicente	138	Mista BA	2230	1.736E-01	7.018E-02	2.448E-04	1.188E-04
13	Escola Básica Nuno Gonçalves	92	Mista AB	3209	3.968E-02	3.509E-02	3.945E-03	2.335E-04
16	Escola Básica Patrício Prazeres	108	Mista AB	1858	5.787E-02	1.108E-02	8.339E-04	8.081E-04
22	Escola Básica Eugénio dos Santos	131	Mista AB	3475	4.209E-02	3.509E-02	4.103E-03	2.494E-04
29	Escola Artística Instituto Gregoriano de Lisboa	-	Mista AB	259	2.205E-02	1.754E-02	1.207E-03	3.923E-04

### 6.1.2 Cálculo das perdas esperadas

Com base nas probabilidades anuais de excedência dos vários estados limite é possível calcular as perdas esperadas por ano devido à ação sísmica. Para tal são considerados os fatores de dano apresentados no Capítulo 4, que correspondem à perda expectável, em percentagem da área coberta do edifício ( $A_{cob}$ ), dado que a estrutura regista determinado nível de desempenho. Assim, da soma do produto das probabilidades anuais de excedência de cada estado limite, que define a fronteira superior de cada nível de desempenho, pelos fatores de dano correspondentes obtém-se a perda anual esperada (AEL) para cada escola. Estes valores são apresentados na Tabela 6.3 em percentagem da área de cada escola.

As perdas esperadas podem também ser calculadas ao longo de um período de tempo específico. Tal é útil no sentido de se perceber quais as perdas esperadas ao longo da “vida útil” de um edifício entendido, no presente contexto, como um período de tempo de interesse que se assume como sendo de 50 anos. O valor total de perdas esperadas ao longo de 50 anos (TEL) é também apresentado na Tabela 6.3, em percentagem e em metros quadrados, em função da área coberta de cada escola. Salienta-se que a área coberta não é necessariamente igual à área dos edifícios principais. No entanto, dado que os edifícios principais representam grande parte da área coberta das escolas, considera-se

que a utilização da área coberta para cálculo das perdas é aceitável dado que, sendo o edifício principal afetado, a utilização de toda a escola fica comprometida.

Para facilitar a leitura dos resultados, apresentam-se na Figura 6.1 e na Figura 6.2 os valores das perdas em 50 anos, em percentagem e em área coberta das escolas, ordenados por ordem decrescente do seu valor.

Tabela 6.3 – Perdas esperadas anuais (AEL) e perdas esperadas em 50 anos (TEL) em função da área coberta das escolas

Nord	Escola	ID	Tipologia	A <sub>cob</sub> (m <sup>2</sup> )	AEL (%)	AEL (m <sup>2</sup> )	TEL (%)	TEL (m <sup>2</sup> )	
1	Escola Básica Alto do Lumiar	8	3x3	2405	0.01	0	0.33	8	
6	Escola Básica Damião de Góis	36	3x3	4800	0.01	0	0.29	14	
9	Escola Básica Professor Delfim Santos	68	3x3	7221	0.01	0	0.29	21	
15	Escola Básica Orlaia	97	3x3	3200	0.01	0	0.29	9	
18	Escola Básica Piscinas	116	3x3	1500	0.01	0	0.33	5	
20	Escola Secundária Lumiar	123	3x3	6625	0.01	0	0.33	22	
24	Escola Secundária Restelo	139	3x3	3683	0.01	0	0.29	11	
17	Escola Básica Pintor Almada Negreiros	111	VR	4086	0.04	2	1.74	71	
27	Escola Básica Telheiras	147	VR	3500	0.04	1	1.74	61	
26	Escola Básica São Vicente – Telheiras	152	VR	3950	0.17	7	6.00	237	
5	Escola Básica Marvila	30	C24T	2810	0.06	2	2.73	77	
19	Escola Básica Professor Lindley Cintra	122	C24T	2683	0.04	1	1.95	52	
25	Escola Básica Olivais	143	C24T	3000	0.05	2	2.27	68	
3	Escola Básica Bairro do Padre Cruz	16	BA	2785	0.01	0	0.51	14	
4	Escola Secundária José Gomes Ferreira	27	BA	9028	0.11	10	4.25	383	
8	Escola Básica Fernando Pessoa	47	BA	5086	0.27	14	7.75	394	
32	Escola Secundária Marquês de Pombal	57	BA	14571	0.19	27	6.29	917	
10	Escola Básica Luís António Verney	73	BA	5784	0.35	20	8.73	505	
11	Escola Básica Luís de Camões	75	BA	5796	0.70	41	28.80	1669	
12	Escola Básica Manuel da Maia	79	BA	1615	0.12	2	4.69	76	
21	Escola Básica Quinta de Marrocos	124	BA	2785	0.01	0	0.42	12	
2	Escola Básica Almirante Gago Coutinho	14	Mista BA	2264	0.49	11	20.85	472	
14	Escola Secundária Dona Luísa de Gusmão	93	Mista BA	2662	0.09	2	4.06	108	
23	Escola Básica Paula Vicente	138	Mista BA	2230	0.91	20	12.24	273	
13	Escola Básica Nuno Gonçalves	92	Mista AB	3209	0.71	23	23.80	764	
16	Escola Básica Patrício Prazeres	108	Mista AB	1858	0.31	6	12.25	228	
22	Escola Básica Eugénio dos Santos	131	Mista AB	3475	0.73	25	24.38	847	
29	Escola Artística Instituto Gregoriano de Lisboa	-	Mista AB	259	0.33	1	12.88	33	
				A <sub>cob</sub> .total(m2)=	112870	AEL <sub>total</sub> (m <sup>2</sup> )=	218	TEL <sub>total</sub> (m <sup>2</sup> )=	7350
						Ip/ano =	0.2%	Ip/50anos=	6.5%

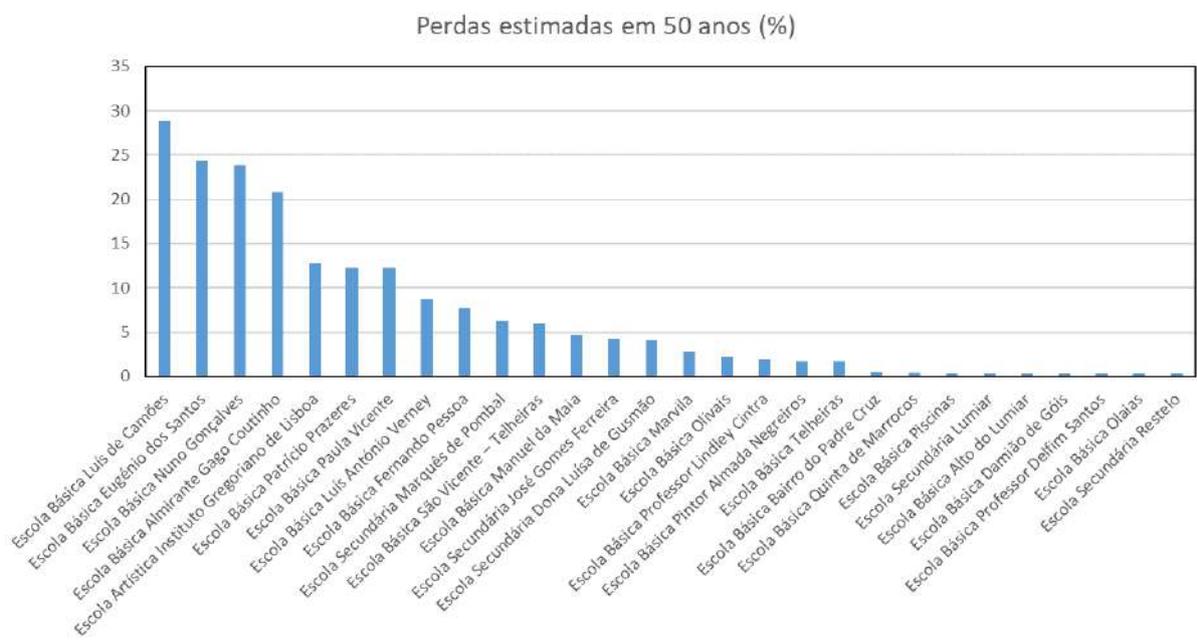


Figura 6.1 – Perdas esperadas em 50 anos (TEL) em percentagem de área coberta das escolas

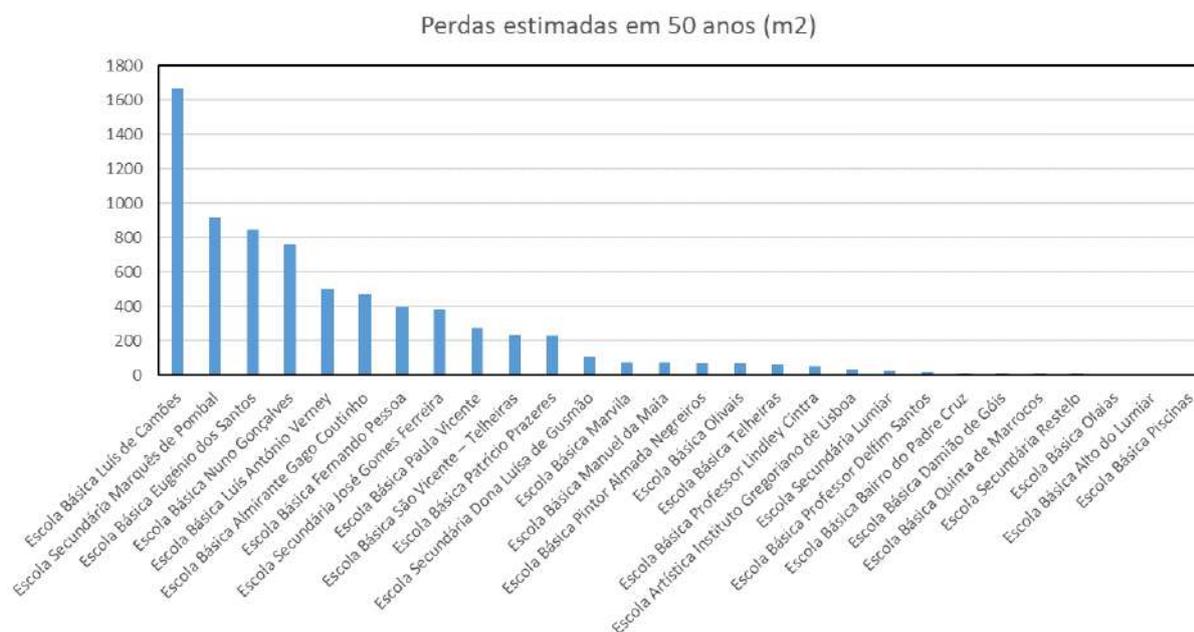


Figura 6.2 – Perdas esperadas em 50 anos (TEL) em área coberta das escolas

Da análise da tabela e das figuras referidas é possível verificar que 4 escolas registam perdas esperadas em 50 anos superiores a 20% da sua área coberta, enquanto que outras três escolas registam perdas esperadas superiores a 10%. Estas escolas são maioritariamente de tipologia mista AB ou BA. A exceção é a EB Luís de Camões que é uma escola de betão armado com um sistema estrutural deficitário para fazer face à ação sísmica. Quanto às escolas de tipologia mista, o seu sistema construtivo, inevitavelmente mais frágil que as escolas em betão armado, faz com que os estados limite sejam atingidos para sismos menos intensos e, como tal, as perdas esperadas são superiores. É de salientar, ainda assim, que maior parte destas escolas de tipologia mista foram construídas antes da entrada em vigor dos regulamentos estruturais que consideram a ação sísmica no dimensionamento, pelo que o seu comportamento esperado deve ser enquadrado nesses pressupostos. Considera-se que estas 7 escolas em particular têm um nível de perdas esperadas elevado ( $AEL=0.7\%$ ), valor este mais de três vezes superior ao valor do parque habitacional em geral (Sousa *et al.*, 2010), que é de 0.2%. Desta forma, recomenda-se que sejam consideradas prioritárias no âmbito de um processo de avaliação estrutural detalhada e de mitigação do risco sísmico. Por outro lado, considerando o total das 28 escolas, o nível de perdas anuais esperadas é de 0.2%, valor igual ao valor do parque habitacional em geral. Além disso, este valor está em linha com os valores referidos na literatura, nomeadamente para o parque escolar italiano (Carofilis *et al.*, 2020).

No que toca à área coberta perdida (Tabela 6.3 e Figura 6.2), são de salientar a ES Marquês de Pombal e a EB Luís António Verney que, embora com perda percentual mais baixa, apresentam valores de área perdida muito significativos devido às suas elevadas dimensões, o que deverá ser tido em consideração no desenvolvimento de um plano de intervenção.

A soma das áreas perdidas nas várias escolas (ver Tabela 6.3) permite obter um indicador global do risco. Tal indicador corresponde à perda esperada em 50 anos em relação à área total coberta das escolas. Desta forma:

$$I_p(50 \text{ anos}) = \frac{7350}{112870} = 6.5\%$$

Tal resultado significa que, mantendo as atuais condições, é expectável uma perda de 6,5% do valor da área total coberta das 28 escolas em análise. É de referir que este cálculo assume que ao longo de 50 anos o estado atual das escolas é, pelo menos, mantido por ações de reabilitação/recuperação.

Tais perdas podem ser reduzidas por medidas de mitigação do risco sísmico, como é o caso do reforço estrutural dos edifícios o que necessariamente diminuirá a probabilidade dos níveis de desempenho mais graves serem atingidos ou, dito de outra forma, aumentará os períodos de retorno associados a tais estados limite.

Ainda que uma perda de 6,5% do total da rede escolar em análise não possa ser negligenciável, este não é um valor muito elevado. Tal observação está relacionada com o facto de a larga maioria das escolas ter um comportamento adequado face aos estados limite 3 e 4, cujas perdas são substanciais. Assim, este valor de perda encontra-se concentrado num número de escolas relativamente pequeno. Acresce o facto de a sismicidade expectável em Lisboa ser de intensidade moderada, o que conduz a que a probabilidade de excedência dos estados limite mais gravosos seja relativamente baixa.

Ainda assim, o potencial disruptivo da ação sísmica não se resume às perdas diretas devido ao dano estrutural. Com efeito, a perda de operacionalidade é igualmente um problema grave associado e com perdas económicas e sociais potencialmente grandes, como demonstrado na secção seguinte.

### 6.1.3 Cálculo do tempo de encerramento de escolas e alunos deslocados

No que concerne a edifícios essenciais, como é o caso dos edifícios escolares, é fundamental aferir da sua operacionalidade pós-sismo, verificando assim que as mesmas podem ser utilizadas sem interrupção.

Nesta secção é apresentada a estimativa do número de dias em que cada escola estará encerrada devido à ação sísmica, quer em termos anuais quer ao longo de 50 anos, assim como o correspondente número de alunos deslocados. O cálculo do número de dias de encerramento de cada escola é feito de forma semelhante ao cálculo das perdas esperadas. Assim, com base nas probabilidades anuais de excedência dos vários estados limite é possível calcular o número de dias de encerramento de cada escola por ano devido à ação sísmica. Para tal são considerados os dias de encerramento/interrupção de serviço, dado que a estrutura excedeu um determinado estado limite, apresentados no Capítulo 4. Assim, da soma do produto das probabilidades anuais de excedência de cada estado limite pelos dias de encerramento correspondentes obtém-se o número de dias encerramento (AEI) para cada escola. Estes valores são apresentados na Tabela 6.4.

O número total de dias de encerramento pode ser calculado ao longo de um período de tempo específico, neste caso considerado como sendo de 50 anos. O total de dias de encerramento das escolas (TEI) ao longo de 50 anos é também apresentado na Tabela 6.4. Multiplicando o número total de dias de encerramento de cada escola pelo número de alunos respetivo (e dividindo por 30), obtém-se um indicador útil no planeamento da resposta a um evento sísmico, que corresponde ao produto (alunos deslocados\*mês) (SMI), isto é, ao número de meses em que haverá alunos deslocados devido à ação sísmica, nos próximos 50 anos.

Tabela 6.4 – Número de dias de encerramento das escolas por ano (AEI) e total de dias de encerramento esperado em 50 anos (TEL)

Nord	Escola	ID	Tipologia	Nº alunos	AEI (dias)	TEI (dias)	SMD (alunos*mês)
1	Escola Básica Alto do Lumiar	8	3x3	535	0.03	1.5	26
6	Escola Básica Damião de Góis	36	3x3	365	0.03	1.3	16
9	Escola Básica Professor Delfim Santos	68	3x3	1040	0.03	1.3	45
15	Escola Básica Olaias	97	3x3	585	0.03	1.3	25
18	Escola Básica Piscinas	116	3x3	680	0.03	1.5	34
20	Escola Secundária Lumiar	123	3x3	725	0.03	1.5	36
24	Escola Secundária Restelo	139	3x3	1100	0.03	1.3	47
17	Escola Básica Pintor Almada Negreiros	111	VR	520	0.19	8.8	153
27	Escola Básica Telheiras	147	VR	595	0.19	8.8	175
26	Escola Básica São Vicente – Telheiras	152	VR	730	0.93	32.6	792
5	Escola Básica Marvila	30	C24T	330	0.33	14.3	158
19	Escola Básica Professor Lindley Cintra	122	C24T	530	0.22	10.0	177
25	Escola Básica Olivais	143	C24T	535	0.26	11.8	210
3	Escola Básica Bairro do Padre Cruz	16	BA	350	0.05	2.3	27
4	Escola Secundária José Gomes Ferreira	27	BA	1000	0.57	22.7	756
8	Escola Básica Fernando Pessoa	47	BA	800	1.44	42.4	1132
32	Escola Secundária Marquês de Pombal	57	BA	400	1.00	34.2	456
10	Escola Básica Luís António Verney	73	BA	420	1.85	47.9	670
11	Escola Básica Luís de Camões	75	BA	500	3.57	147.1	2452
12	Escola Básica Manuel da Maia	79	BA	365	0.65	25.2	307
21	Escola Básica Quinta de Marrocos	124	BA	585	0.04	2.1	42
2	Escola Básica Almirante Gago Coutinho	14	Mista BA	450	2.40	101.7	1526
14	Escola Secundária Dona Luísa de Gusmão	93	Mista BA	990	0.42	18.8	621
23	Escola Básica Paula Vicente	138	Mista BA	430	4.53	66.6	955
13	Escola Básica Nuno Gonçalves	92	Mista AB	910	3.26	102.2	3100
16	Escola Básica Patrício Prazeres	108	Mista AB	475	1.50	64.9	1028
22	Escola Básica Eugénio dos Santos	131	Mista AB	830	3.31	104.3	2887
29	Escola Artística Instituto Gregoriano de Lisboa	-	Mista AB	475	1.65	64.0	1013

Nalunos,totall= 17250

Para facilitar a leitura dos resultados, apresentam-se na Figura 6.3 e na Figura 6.4 os valores do número de dias de encerramento das escolas e os alunos\*mês esperados em 50 anos, por ordem decrescente dos valores respetivos.

Da análise da tabela e das figuras referidas é possível verificar que é estimado que 4 escolas terão tempos de encerramento superiores a 3 meses em 50 anos e outras 3 escolas estarão fechadas mais do que 2 meses em 50 anos. Relativamente ao fator alunos\*mês deslocados, 3 escolas têm um número de alunos\*mês deslocados em 50 anos superior a 2400.

Os valores aqui apresentados podem servir de base ao desenvolvimento de um plano de resposta para a ação sísmica ao nível municipal. Não obstante, na secção seguinte são apresentados os resultados de uma análise de resiliência que consiste na estimativa das perdas e na análise do número de escolas encerradas e correspondente número de alunos deslocados para um conjunto de cenários sísmicos, definidos com recurso ao estudo probabilístico da ação sísmica apresentado no Capítulo 5.

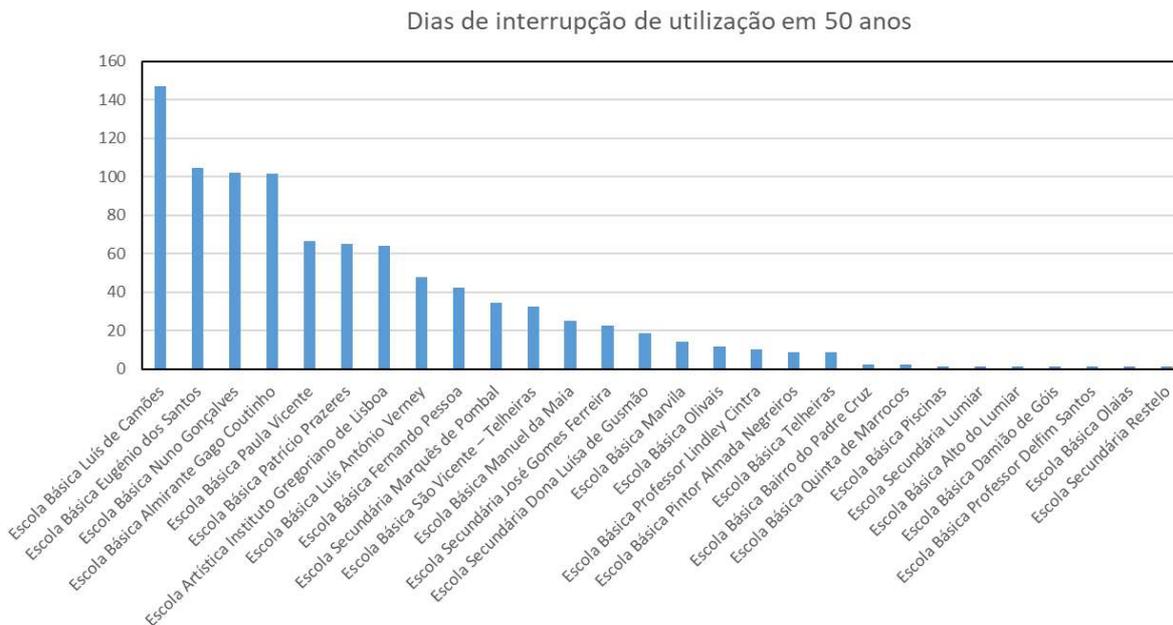


Figura 6.3 – Número de dias de encerramento das escolas em 50 anos (TEI)

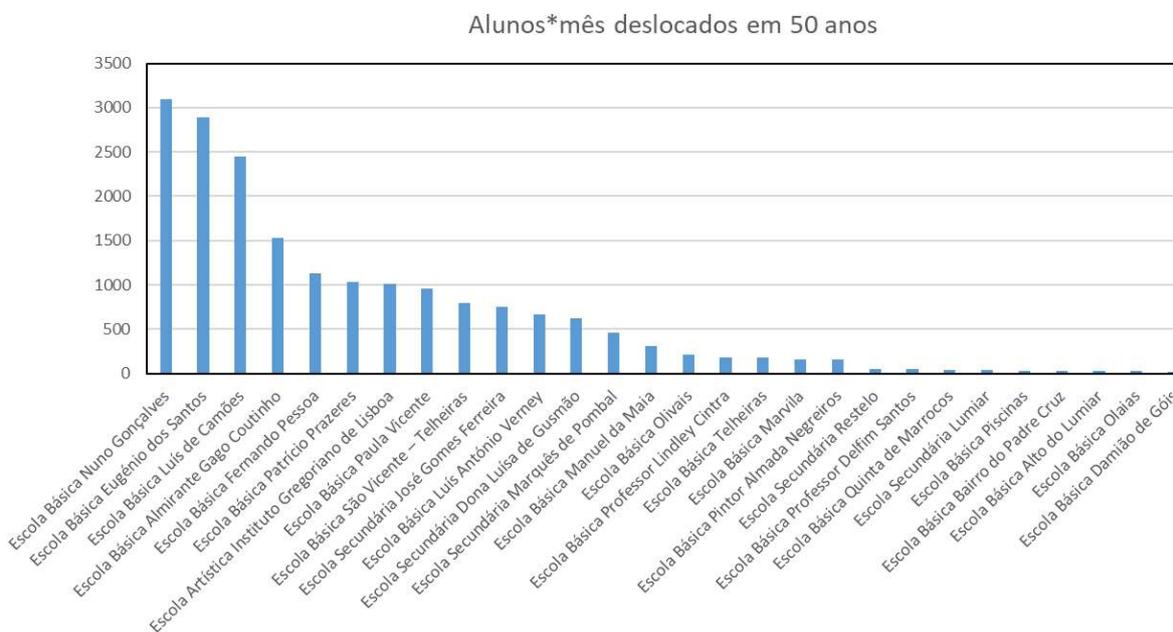


Figura 6.4 – Número de alunos\*mês deslocados em 50 anos (SMI)

### 6.1.4 Análise de perdas e resiliência para cenários sísmicos

Os cenários sísmicos considerados neste estudo variam, em magnitude, entre 5,3 e 7,1. Para cada cenário, além da estimativa das perdas económicas diretas em função dos danos nos edifícios principais, é estimada a evolução do número de escolas encerradas e do correspondente número de alunos deslocados ao longo do tempo, até toda a rede escolar estar novamente operacional.

O cálculo das perdas corresponde, para cada cenário, à verificação do nível de desempenho atingido por cada edifício principal para o período de retorno associado ao cenário em questão. Uma vez determinado o nível de desempenho atingido para tal cenário, as perdas totais correspondem à soma das perdas de cada escola dada a ocorrência do cenário sísmico em análise. Na Tabela 6.5 são apresentadas as perdas esperadas para cada cenário sísmico. Como se pode observar para um sismo com magnitude 6,6 e período de retorno de 275 anos, as perdas esperadas são aproximadamente 9,9%, enquanto para um sismo com magnitude 7,1 (período de retorno de 2200 anos) as perdas esperadas ascendem a 20,4% da totalidade da área coberta das escolas. Recorde-se que estes valores correspondem apenas a perdas diretas em função dos danos induzidos pela ação sísmica nas estruturas e não contemplam perdas indiretas.

Tabela 6.5 – Perdas esperadas para cada cenário sísmico

Cenário		Ip (%)
Mag	Tr (anos)	
5,3	20	0,2%
5,8	50	2,4%
6,1	100	4,6%
6,6	275	9,9%
6,8	475	15,4%
7,0	1100	17,6%
7,1	2200	20,4%

Por outro lado, a análise da resiliência pós-sismo é feita calculando o número de dias que cada escola permanecerá encerrada dada a ocorrência do cenário sísmico em análise. Assim, para cada cenário, será novamente verificado o nível de desempenho atingido por cada edifício principal e o número de dias de encerramento associado e, consequentemente, de interrupção de atividade. Desta forma é possível verificar o número de escolas encerradas em função do tempo após o sismo, que se representa na Figura 6.5.

É possível verificar que para o cenário 1, o menos intenso dos 7 cenários considerados, apenas 7% das escolas estarão encerradas no dia após o sismo (para inspeção e eventual planeamento e execução da intervenção de limpeza, reabilitação ou reforço). As restantes escolas não ultrapassaram o primeiro estado limite (completamente operacional) pelo que não é necessária qualquer inspeção e poderão continuar em funcionamento logo após o sismo. Ao longo do tempo, as escolas vão sendo incrementalmente reabertas, por reunirem as condições para tal ou devido a ações de reabilitação, até todas as escolas estarem novamente operacionais, que se considera ocorrem ao fim de dois anos.

Por outro lado, para os cenários 6 e 7, os mais intensos que são considerados, todas as 28 escolas estarão encerradas pelo menos 1 dia. Ainda assim, após 240 dias, apenas cerca de 20% das escolas continuarão encerradas.

É de referir que tais estimativas assumem que todos os recursos necessários serão alocados, sem qualquer limitação, isto é, assume-se que as intervenções necessárias avançam em simultâneo em todas as escolas e que demoram o tempo estritamente necessário, estimado com base na literatura, para repor o estado pré-sismo, pelo que a leitura destas estimativas deve ser enquadrada nestas considerações. A conjuntura económica, social e política terá necessariamente de ser ponderada numa situação pós-sismo, podendo afetar as estimativas aqui apresentadas.

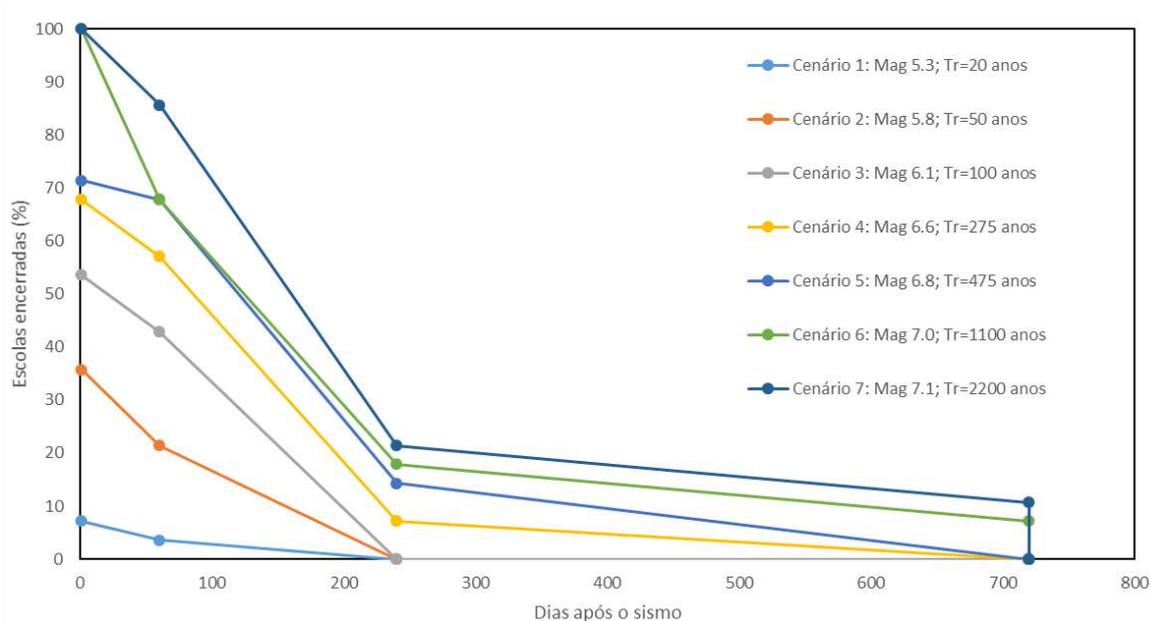


Figura 6.5 – Escolas encerradas em função do tempo pós-sismo para vários cenários sísmicos (total: 28 escolas)

Com base na informação das escolas encerradas após o sismo é possível calcular o número de alunos deslocados, corresponde à soma dos alunos das escolas que se encontram encerradas. Salienta-se que se considera, por simplificação, que as escolas encerram na sua totalidade, não sendo possível utilizar qualquer parte da mesma, inclusive para colocação de abrigos temporários. Desta forma, as estimativas apresentadas permitem aferir da necessidade expectável em termos de alunos que será necessário alocar a outras escolas ou a instalações provisórias para vários cenários sísmicos de referência.

Na Figura 6.6 apresenta-se então a percentagem de alunos deslocados em função do tempo pós-sismo. É possível verificar que para um sismo com magnitude 5.8, um valor moderado de intensidade sísmica, pelo menos 20% dos alunos destas escolas necessitarão de ser deslocados durante pelo menos 2 meses (60 dias). Além disso, para sismos com magnitudes de 7.0 e 7.1, pelo

menos 20% dos alunos destas escolas necessitarão de ser deslocados durante pelo menos 8 meses (240 dias).

Estes indicadores de resiliência permitem desenvolver planos de resposta e emergência para a ação sísmica, com o objetivo de minimizar as perdas e recuperar o mais rapidamente possível a operacionalidade da rede escolar, quer através da reabilitação dos edifícios escolares, quer através de alternativas temporárias que permitam minimizar os efeitos dos danos no edificado.

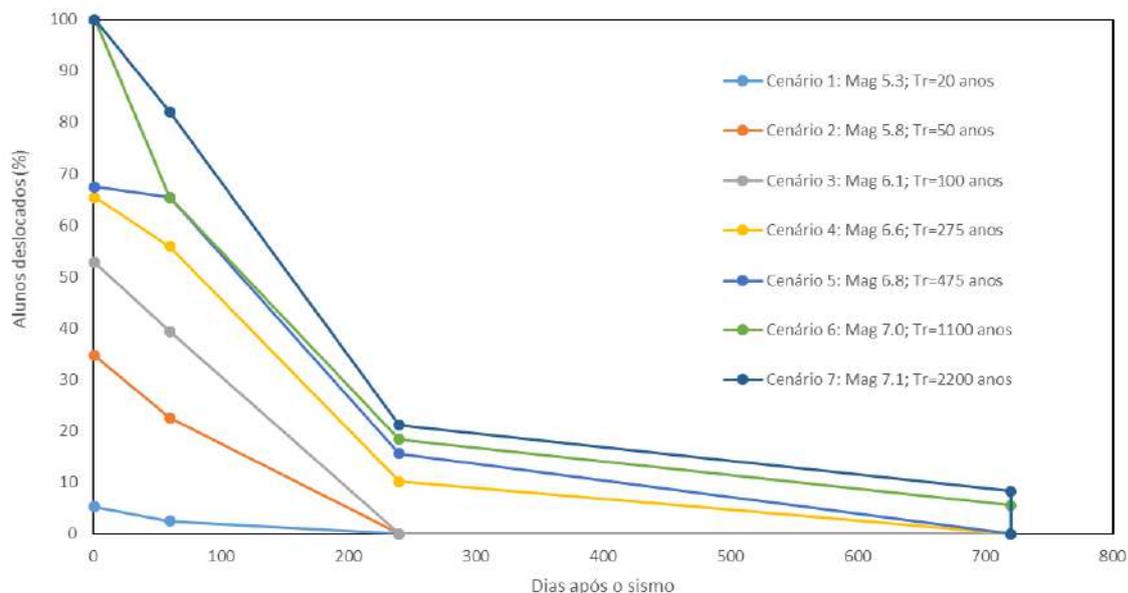


Figura 6.6 – Alunos deslocados em função do tempo pós-sismo para vários cenários sísmicos (total: 17250 alunos)

## 6.2 Diretrizes para inspeção estrutural detalhada dos edifícios principais excluídos deste estudo

O levantamento e caracterização dos edifícios principais das escolas CML cuja informação disponível à data de elaboração deste estudo é insuficiente para desenvolvimento de uma análise do seu comportamento sísmico deve seguir os passos fundamentais que de seguida se indicam. Salienta-se que estes passos fundamentais não constituem um caderno de encargos, podendo, ainda assim, ser utilizadas na elaboração das cláusulas e especificações técnicas de tal documento.

O objetivo desta inspeção estrutural passa por dotar a gestão do edifício de dados de informação que possibilite a avaliação do atual estado de segurança do mesmo, assim como suportar projetos de intervenção futura que venham a ser desenvolvidos. A título demonstrativo apresentam-se duas fotografias de uma inspeção estrutural realizada pelo LNEC, com o objetivo de caracterizar os materiais estruturais e o comportamento dinâmico da estrutura (identificação dinâmica).

Assim, a inspeção estrutural a realizar deve basear-se em cinco passos fundamentais:

- Levantamento arquitetónico e elaboração de plantas, alçados e cortes dos edifícios em formato digital.
- Identificação do sistema construtivo da estrutura dos edifícios originais e posteriores intervenções realizadas ao longo do tempo. Caracterização geométrica e material dos diversos elementos estruturais dos edifícios, nomeadamente no que respeita aos elementos estruturais que compõem as paredes, pisos e coberturas. Elaboração de plantas estruturais em formato digital dos edifícios, englobando cortes estruturais.
- Avaliação do estado de conservação dos elementos estruturais e ligações estruturais. Levantamento das anomalias estruturais e não estruturais.
- Caracterização mecânica, com recurso a ensaios *in situ* (por exemplo ensaios de macacos planos para paredes de alvenaria) ou recolha de provetes para análise laboratorial, de betões, elementos metálicos, paredes de alvenaria e elementos de madeira com função estrutural, como é o caso das treliças de cobertura.
- Realização de ensaios *in situ* para caracterização do comportamento dinâmico do edifício, nomeadamente através de ensaios de identificação dinâmica dos modos de vibração dos edifícios.

Na Figura 6.7 e na Figura 6.8 apresentam-se fotografias de inspeção estrutural realizada pelo LNEC.



Figura 6.7 – Extração de provete de betão para ensaio laboratorial



Figura 6.8 – Medições de recobrimento (esq.); abertura de janelas em pilares e paredes (centro); medição com esclerómetro em pilares e paredes resistentes (dir.)

Relativamente à caracterização dinâmica dos edifícios, os seus principais objetivos assentam na de identificação das características dinâmicas de vibração dos edifícios, o que possibilita estimar as propriedades da estrutura e caracterizar o tipo de ligações, no que concerne à sua rigidez, das ligações entre elementos estruturais e, eventualmente, com edifícios adjacentes. Além disso, a caracterização dinâmica fornece dados que são fundamentais na calibração dos modelos numéricos usados na análise estrutural do edifício, permitindo assim o desenvolvimento de análises muito mais representativas e sustentadas nos dados quantitativos recolhidos.

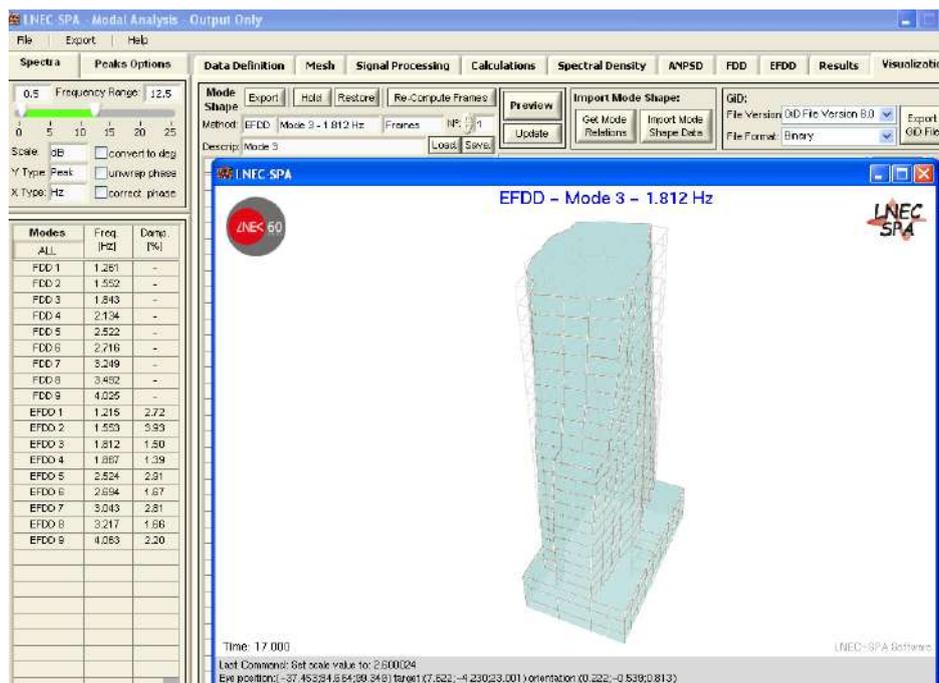


Figura 6.9 – Interface gráfica do módulo *Modal Analysis-Output Only* – Visualização de Resultados

É possível recorrer a duas metodologias de identificação dinâmica: com aplicação de excitação ou, em alternativa, sem aplicação de excitação (para além da vibração existente no meio ambiente). Na primeira metodologia a estrutura é excitada com recurso a um aparelho em que se controla a ação (força) a aplicar (e.g. vibrador de massa excêntrica, martelo de impacto, etc.). Esta técnica tem a vantagem de geralmente produzir sinais de maior qualidade, devido à maior amplitude das vibrações. No entanto, necessita de uma maior preparação, é mais dispendiosa e frequentemente é necessário introduzir condicionamentos ao funcionamento das instalações, devido às vibrações produzidas.

Na segunda metodologia, *output-only* como é vulgarmente designada na literatura anglo-saxónica, é utilizada a excitação originada pelo vento, tráfego, etc., geralmente de muito baixa amplitude, sendo necessário recorrer a registos de longa duração e a equipamento de medição extremamente sensível. Algumas desvantagens podem ser apontadas a este tipo de ensaios: i) poder existir alguma divergência com a resposta às ações sísmicas, em virtude do nível excitação ser várias ordens de grandeza inferior; ii) poder provocar excitação desigual dos vários modos de vibração, fazendo com que alguns deles

sobressaiam enquanto outros podem passar praticamente indetetados; e iii) o facto de induzir baixas relações sinal/ruído. No entanto, tem a vantagem de não ser necessário impor restrições ao funcionamento do edifício, para além da não utilização de equipamento pesado, que introduza vibrações que contaminem os sinais da estrutura (e.g. martelos de excitação, geradores de vibrações de massas excêntricas).

Na Figura 6.10 apresentam-se fotografias de uma campanha de identificação dinâmica realizada pelo Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas (NESDE) do LNEC.



Figura 6.10 – Sistema de aquisição de dados em ensaio de identificação dinâmica (esq.); vista de dois acelerómetros num pilar, para uma das configurações de ensaio (dir.)

## 7 | Conclusões

Este estudo centra-se na avaliação da vulnerabilidade sísmica dos edifícios principais de 32 escolas do 2.º e 3.º ciclos e ensino secundário, que passarão para a gestão do Departamento de Educação (DE) da Câmara Municipal de Lisboa. Os edifícios principais são aqueles onde se localizam as salas de aula e/ou serviços administrativos, precisamente aqueles onde a exposição é maior. Considera-se ainda que estes edifícios são representativos da resposta sísmica de cada uma das escolas.

Os resultados finais do estudo são a definição, para cada escola, de uma matriz de desempenho que representa de forma gráfica o cumprimento ou incumprimento de objetivos de desempenho sísmico estabelecidos para vários níveis de intensidade da ação sísmica, incluídos em fichas individuais que sumarizam a análise de cada escola (em anexo). Além disso, são estimados parâmetros de risco sísmico, nomeadamente perdas estimadas em função da área das escolas e número de dias de encerramento, que permitem ter uma visão global dos efeitos da ação sísmica sobre o parque escolar e também hierarquizar as escolas em função das perdas esperadas devido à ação sísmica. Tais estimativas são feitas anualmente e para um período de 50 anos. Adicionalmente, é desenvolvida uma análise de resiliência que consiste na estimativa das perdas e do número de escolas encerradas (e correspondente número de alunos deslocados) para um conjunto de cenários sísmicos, definidos probabilisticamente.

A avaliação da vulnerabilidade sísmica dos edifícios principais teve por base a análise de toda a informação disponível sobre a estrutura dos mesmos, nomeadamente a análise dos documentos fornecidos pelo DE da CML, a recolha e análise de documentos provenientes de outras fontes, assim como a realização de várias visitas às escolas para inspeção visual. Salienta-se que a reduzida informação disponível para várias das escolas incluídas neste estudo implica que os resultados obtidos sejam encarados como estimativas da resposta estrutural sísmica e não como uma análise detalhada do desempenho sísmico do edifício, cujo desenvolvimento apenas seria exequível com um conjunto muito mais aprofundado de dados. Salienta-se ainda que as análises aqui desenvolvidas consideram a ação sísmica expectável para a região de Lisboa, com base num estudo probabilístico da ação sísmica. Como tal, qualquer análise a fazer aos resultados obtidos deverá ter em atenção que os valores finais apresentados não sendo, de todo, determinísticos, são resultados expectáveis de base probabilística.

As conclusões do estudo são sistematizadas nos seguintes pontos, divididos entre uma apreciação geral e comentários específicos, relativos aos resultados obtidos.

### **Comentários gerais:**

- Das visitas realizadas verifica-se que o estado de conservação estrutural é razoável, não se tendo verificado patologias estruturais significativas que possam comprometer o desempenho das estruturas. Além disso, salvo raras exceções, não se verificaram alterações às estruturas que coloquem em causa o desempenho sísmico das mesmas, tal como foram concebidas.

- De uma forma global, o comportamento sísmico das escolas está em linha com o comportamento sísmico do parque habitacional em geral da cidade de Lisboa. Com efeito, a maior parte das escolas apresenta uma sobrecapacidade resistente considerável para fazer face à perigosidade sísmica, que se traduz numa baixa probabilidade de serem excedidos os estados limite de resistência (colapso) das estruturas, para a ação sísmica expectável para a região de Lisboa.
- As escolas modulares, nomeadamente das tipologias 3x3, C24T e Vale Rosal, assim como a maior parte das restantes escolas de betão armado apresentam um comportamento sísmico satisfatório, respeitando os objetivos de desempenho estabelecidos. Não é alheio a este facto a entrada em vigor dos regulamentos estruturais que consideram a ação sísmica no dimensionamento, utilizados nos projetos de dimensionamento da maioria delas.
- As escolas de tipologia mista apresentam um comportamento globalmente menos satisfatório. O sistema construtivo e as exigências atuais em termos de desempenho sísmico fazem com que os objetivos de desempenho não sejam atingidos para a maior parte destas escolas. É de salientar, ainda assim, que a maior parte delas foram construídas antes da entrada em vigor dos regulamentos estruturais que consideram a ação sísmica no dimensionamento.
- Não obstante o comportamento globalmente aceitável das escolas, nomeadamente no que à resistência ao colapso diz respeito, é de salientar que muitas delas não satisfazem os objetivos de desempenho relacionados com a operacionalidade pós-sismo. Tal repercute-se num número muito elevado de escolas encerradas após a ocorrência de um sismo e, conseqüentemente, de um elevado número de alunos deslocados durante um período de tempo significativo.
- No geral, verificou-se um desconhecimento elevado da parte da gestão das escolas sobre o comportamento a adotar em caso de sismo e, em vários casos, a inexistência de planos de emergência específicos para a ação sísmica.
- A gestão integrada da rede escolar é fundamental, em particular no que concerne à definição de uma estratégia global para a mitigação do risco sísmico, incluindo a intervenção nas escolas mais vulneráveis e a definição de planos de emergência individuais e um plano de resposta e emergência integrado que contemple a necessidade de alocação de alunos em caso de evento sísmico. Este relatório fornece dados quantitativos que podem auxiliar no desenvolvimento de tais planos.

#### **Comentários aos resultados obtidos:**

- A EB Luís de Camões, a EB Almirante Gago Coutinho e a EB Patrício Prazeres são as escolas que não cumprem o objetivo de desempenho do estado limite 4, relacionado com a resistência ao colapso, pelo que devem ser alvo de um estudo detalhado para planeamento de uma possível intervenção de reforço.
- No que toca ao estado limite 3 (salvaguarda de vida), além da EB Luís de Camões e da EB Almirante Gago Coutinho, também a EB Nuno Gonçalves e a EB Eugénio dos Santos não

cumprem o objetivo de desempenho definido para este estado limite, sendo igualmente recomendável o desenvolvimento de um estudo detalhado destas escolas.

- No que concerne aos dois primeiros estados limite, relacionados com a operacionalidade dos edifícios principais (completamente operacional e operacional), um número muito significativo de 11 e 19 escolas não respeitam os objetivos de desempenho associados aos estados limite 1 e 2, respetivamente.
- As observações anteriores permitem concluir que, pese embora a generalidade dos edifícios apresente uma sobrecapacidade resistente face aos estados limite mais gravosos e, conseqüentemente, não ser verosímil que se encontrem próximos do colapso face à ação sísmica expectável em Lisboa, uma parte muito significativa destes edifícios apresentará danos pós-sismo que limitarão seriamente a sua operacionalidade, levando ao seu encerramento e, conseqüentemente, à interrupção da sua atividade e ao impedimento do seu uso com outros fins (abrigo temporário, por exemplo).
- Quatro escolas registam perdas esperadas em 50 anos superiores a 20% da sua área coberta, enquanto que outras três escolas registam perdas esperadas superiores a 10%. Estas escolas são maioritariamente de tipologia mista.
- Considera-se que estas 7 escolas em particular têm um nível de perdas esperadas elevado ( $AEL=0.7\%$ ), valor este mais de três vezes superior ao valor do parque habitacional em geral, que é de 0.2%. Desta forma, recomenda-se que sejam consideradas prioritárias no âmbito de um processo de avaliação estrutural detalhada e de mitigação do risco sísmico. Por outro lado, considerando o total das 28 escolas, o nível de perdas anuais esperadas é de 0.2%, valor igual ao valor do parque habitacional em geral. Além disso, este valor está em linha com os valores referidos na literatura, nomeadamente para o parque escolar italiano.
- Mantendo as atuais condições, é expectável a perda de 6.5% do valor do total das 28 escolas em análise ao longo de 50 anos. É de referir que este cálculo assume que ao longo deste período o estado atual das escolas é, pelo menos, mantido por ações de reabilitação/recuperação.
- Ainda que uma perda de 6.5% do total da rede escolar em análise não possa ser negligenciável, este não é um valor muito elevado. Tal observação está relacionada com o facto de a larga maioria das escolas ter um comportamento adequado face aos estados limite 3 e 4, nos quais as perdas são substanciais. Assim, este valor de perda encontra-se concentrado num número de escolas relativamente pequeno.
- A ES Marquês de Pombal e a EB Luís António Verney, embora registem perdas percentuais relativamente baixas, apresentam valores de área perdida muito significativos devido à sua elevada dimensão, o que deverá ser tido em consideração no desenvolvimento de um plano de intervenção.
- É estimado que 4 escolas terão tempos de encerramento superiores a 3 meses em 50 anos e outras 3 escolas estarão fechadas mais do que 2 meses em 50 anos. Relativamente ao fator alunos\*mês deslocados, 3 escolas têm um número de alunos\*mês deslocados em 50 anos superior a 2400.

- Relativamente à análise de cenários sísmicos, para um sismo com magnitude 6.6 e período de retorno de 275 anos, as perdas esperadas são aproximadamente 9.9%, enquanto para um sismo com magnitude 7.1 (período de retorno de 2200 anos) as perdas esperadas ascendem a 20.4% da totalidade da área coberta das escolas.
- Adicionalmente, estima-se que para um sismo com magnitude 5.8, um valor moderado de intensidade sísmica, pelo menos 20% dos alunos destas escolas necessitarão de ser deslocados durante pelo menos 2 meses (60 dias). Além disso, para sismos com magnitudes de 7.0 e 7.1, pelo menos 20% dos alunos destas escolas necessitarão de ser deslocados durante pelo menos 8 meses (240 dias).

Lisboa, LNEC, setembro de 2021

VISTO

O Diretor do Departamento de Estruturas



José Manuel Catarino

AUTORIA



Filipe Luís Ribeiro

Doutorado



Paulo Xavier Candeias

Investigador Auxiliar



Alfredo Campos Costa

Investigador Principal

Chefe do Núcleo de Engenharia Sísmica e  
Dinâmica de Estruturas

## Referências bibliográficas

- ALEGRE, A.; HEITOR, T. (Editoras), 2019 – **Arquitetura Escolar em Portugal: Educação, Património e Desafios**; Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos, Lisboa.
- AMBRASEYS, N. N.; SIMPSON, K. A.; BOMMER, J. J., 1996 – **Prediction of horizontal response spectra in Europe**, EESD 1996; 25, pp. 371-400.
- AINUDDIN, S.; ROUTHAY, J. K., 2012 – **Institutional framework, key stakeholders and community preparedness for earthquake induced disaster management in Balochistan**, Disaster Prevention and Management: An International Journal, vol. 21, no. 1, pp. 22–36.
- ARAYA, R.; DER KIUREGHIAN, A., 1988 – **Seismic hazard analysis improved models. Uncertainties and sensitivities**. Report UCB/EERC 90/11. Universidade da Califórnia, Berkeley, EUA.
- ATC-40, 1996 – **Applied Technology Council, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings**, Volume 1, California Seismic Safety Commission, California.
- BEZZEGHOUD, M.; CALDEIRA, B.; BORGES, J.F., 2016 – **O impacto dos grandes sismos em Portugal**. 6ª Conferência Nacional de Avaliação de Impactes (CNAI16), Évora.
- BRUNEAU, M.; CHANG, S. E.; EGUCHI, R. T.; LEE, G. C.; O'ROURKE, T. D.; Reinhorn, A.M.; Shinozuka, M.; Tierney, K.; Wallace, W. A.; Von Winterfeldt, D., 2003 – **A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities**, Earthquake Spectra, vol. 19, no. 4, pp. 733–752.
- CAMPOS COSTA, A.; SOUSA, M.L.; CARVALHO, A., 2008 – **Seismic Zonation for Portuguese National Annex of Eurocode 8**, 14th World Conference on Earthquake Engineering, Outubro, Beijing, China.
- CAROFILIS, W.; PERRONE, D.; O'REILLY, G.; MONTEIRO, R.; FILIATRAULT, A., 2020 – **Seismic retrofit of existing school buildings in Italy: Performance evaluation and loss estimation**, Engineering Structures, Volume 225.
- CARRILHO, F.; PENA, J.A.; NUNES, J.C., 2010 – **Sismicidade**. Capítulo 3 em Estudos do risco sísmico e tsunamis no Algarve, Edição: Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC), ISBN: 978-989-8343-06-2, pp. 28 – 43.
- CARVALHO, A., 2007 – **Modelação estocástica da acção sísmica em Portugal Continental**. Dissertação de doutoramento; IST; Lisboa.
- CARVALHO, A.; CAMPOS COSTA, A., 2015 – **Impact of seismicity assumptions on seismic hazard for Portugal mainland**. LNEC - Proc. 0305/121/19265. Relatório 20/2015 – DE/NESDE.
- CANSADO CARVALHO, E., 2007 – **Anexo nacional do Eurocódigo 8. Consequências para o dimensionamento sísmico em Portugal**, Livro de actas do 7º Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica, pp. 47-62, Porto, Portugal.

- FEMA, 2004 – **Non-structural earthquake mitigation** – Guidance Manual, Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington.
- FERREIRA, M.A.; OLIVEIRA, C.S.; MOTA DE SÁ, F.; LOPES, M.; PAIS, I., 2018 – **KnowRISK Portfolio of solutions: for the reduction of seismic risk through non-structural elements**. KnowRISK project (FCT), Lisbon.
- Ferreira, M.A.; O’NEILL, H.; SOLARINO, S.; MUSACCHIO, G.; OLIVEIRA, C.S.; LOPES, M.; VICENTE, M., 2017 – **KnowRISK Guia Prático: Prepare a sua casa para um terramoto**. KnowRISK project (FCT), Lisbon.
- GUTENBERG, B.; RICHTER, C.F., 1944 – **Frequency of Earthquakes in California**, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 34, no. 4, pp. 185 - 188.
- HAZUS, 2012 – **Earthquake loss estimation methodology**. HAZUS® MH 2.1, Advanced Engineering Building Module. Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington DC, EUA.
- HAZUS, 2019 – **Earthquake loss estimation methodology**. HAZUS® MH 4.3, Advanced Engineering Building Module. Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington DC, EUA.
- HOME, J. F.; ORR, J. E., 1997 – **Assessing behaviors that create resilient organizations**, Employment Relations Today, vol. 24, no. 4, pp. 29–39.
- INE, 2011 – **Estatísticas da Construção e Habitação 2010**; Edição 2011; Instituto Nacional de Estatística, I.P.; ISSN 0377-2225.
- IPQ, 2010a – NP EN 1998-1:2010. **Eurocódigo 8 – Projeto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, ações sísmicas e regras para edifícios**. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.
- IPQ, 2017 – NP EN 1998-3:2017: **Eurocódigo 8 – Projeto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 3: Avaliação e reabilitação de edifícios**. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.
- LONGSTAFF, P. H.; ARMSTRONG, N. J.; PERRIN, K.; PARKER, W.; HIDEK, M., 2010 – **Building Resilient Communities: A Preliminary Framework for Assessment**. Monterey, CA.: Naval Postgraduate School; Center for Homeland Defense and Security.
- MCGUIRE, R. K., 1976 – **EQRISK, Evaluation of Earthquake Risk to Site**, Open File Report 76-67. United States Department of the Interior Geological Survey. USA.
- MURPHY, P., 2005 – **Building performance during recent earthquakes in the Iberian Peninsula and surrounding regions**, 250th Anniversary of The 1755 Lisbon Earthquake.
- RSA, 1983 – **Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes**, Decreto-lei nº 235/83, Imprensa Nacional; Casa da Moeda, Lisboa.
- RODRIGUES, I.; SOUSA, M.L.; CARVALHO, A.; CARRILHO, F., 2009 – **Parâmetros das leis de frequência-magnitude para as novas zonas de sismogénese delineadas para a região do Algarve**. APMG 2009, 6º Simpósio de Meteorologia e Geofísica / 10º Encontro Luso-Espanhol de Meteorologia, Costa da Caparica, Portugal.

- SANTOS, A., 2015 – **Similaridades e singularidades na reabilitação arquitetónica do parque escolar**; Dissertação de Doutoramento; FAUP; Porto.
- SOUSA, M.L.; CAMPOS COSTA, A.; CALDEIRA, L., 2010 – **Apreciação do risco sísmico em Lisboa**. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, n.º 8, pp. 25 a 41, dezembro 2010. LNEC, Lisboa. [http://rpee.lnec.pt/Ficheiros/rpee\\_n8/pag25.pdf](http://rpee.lnec.pt/Ficheiros/rpee_n8/pag25.pdf).
- SOUSA, M.L.; CAMPOS COSTA, A., 2016 – **Evolution of earthquake losses in Portuguese residential building stock**. Bulletin of Earthquake Engineering, 14, 2009–2029. <https://doi.org/10.1007/s10518-015-9809-z>.
- SOUSA, M.L.; OLIVEIRA, R.C. E OLIVEIRA, C.S., 1997 – **Análise Probabilística da Casualidade Sísmica em Portugal Continental**, artigo apresentado no 7º Congresso da APDIO (Associação Portuguesa para o Desenvolvimento da Investigação Operacional), Aveiro, publicado na revista Investigação Operacional, vol. 17, pp. 3-21, Lisboa.
- TEVES-COSTA, P.; BATLLÓ, J., 2010 – **The 23rd April 1909 Benavente earthquake (Portugal): macroseismic field revision**. Journal of Seismology, DOI 10.1007/s10950-010-9207-6.
- VILANOVA, S.; FONSECA, J., 2004 – **Seismic hazard impact of the Lower Tagus Valley Fault Zone (SW Iberia)**. Journal of Seismology, Vol. 8, pp.331-345.
- VISION 2000 – SEAOC, 1995 – **Vision 2000 – Part 1. Performance based seismic engineering of buildings**. California Office of Emergency Services. Final report. Structural Engineers Association of California Vision 2000 Committee, April, 1995.
- WILDAVSKY, A., 1991 – **Searching for Safety**. New Brunswick, NJ: Transaction Publishers.
- WOESSNER, J.; LAURENTIU, D.; GIARDINI, D.; CROWLEY, H. *et al.*, 2013 – **The 2013 European Seismic Hazard Model: key components and results**. Bull. Earthq. Eng., Vol. 13, pp. 3553-3596.



ANEXO  
Fichas Resumo Individuais

## ANEXO – Fichas Resumo Individuais

Escola Básica Alto do Lumiar.....	103
Escola Básica Almirante Gago Coutinho.....	110
Escola Básica Bairro do Padre Cruz .....	121
Escola Secundária José Gomes Ferreira .....	133
Escola Básica Marvila .....	145
Escola Básica Damião de Góis .....	153
Escola Básica Fernando Pessoa .....	160
Escola Básica Professor Delfim Santos .....	172
Escola Básica Luís António Verney.....	179
Escola Básica Luís de Camões.....	194
Escola Básica Manuel da Maia .....	202
Escola Básica Nuno Gonçalves .....	212
Escola Secundária Dona Luísa de Gusmão.....	224
Escola Básica Olaias .....	236
Escola Básica Patrício Prazeres .....	243
Escola Básica Pintor Almada Negreiros.....	256
Escola Básica Piscinas .....	270
Escola Básica Professor Lindley Cintra.....	277
Escola Secundária Lumiar .....	286
Escola Básica Quinta de Marrocos .....	294
Escola Básica Eugénio dos Santos.....	306
Escola Básica Paula Vicente.....	319
Escola Secundária Restelo .....	329
Escola Básica Olivais.....	337
Escola Básica São Vicente / Telheiras.....	347
Escola Básica Telheiras.....	359
Escola Artística Instituto Gregoriano de Lisboa.....	372
Escola Secundária Marquês de Pombal .....	378



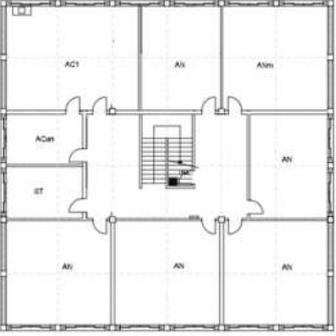
# Escola Básica Alto do Lumiar

ID Escola: 8

Escola	Agrupamento	Área coberta
Escola Básica Alto do Lumiar	Alto do Lumiar	2405 m <sup>2</sup>

Nível de ensino	Número de alunos
Básica com 2º e 3º ciclos	535 alunos

Descrição geral	
<p>A escola localiza-se na freguesia do Lumiar, numa zona predominantemente residencial. Os acessos à escola são amplos e sem presença de outras estruturas junto aos limites do seu terreno, não existindo, portanto, a possibilidade de interação sísmica com outras estruturas.</p> <p>Os vários blocos com compõem a escola estão afastados, funcionando de forma independente. Existe espaço, dentro da escola e nas imediações, para evacuação e encontro em caso de ocorrência de evento sísmico.</p>	 <p><i>Imagem aérea do Google Earth</i></p>

Informação de base
<p>Estão disponíveis desenhos de levantamento arquitetónico fornecidos pela CML, que resultam do projeto tipo das escolas de pavilhões “3x3”. Não foram realizadas alterações ao levantamento fornecido, apesar de se considerar nesta análise a informação acrescida recolhida após a inspeção visual levada a cabo pelo Departamento de Edifícios do LNEC.</p>
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-end;"> <div style="text-align: center;">  <p>PLANTA DO 1º PISO</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>PLANTA DO 2º PISO EXISTENTE</p> </div> </div> <p><i>Levantamento arquitetónico do bloco tipo “3x3”</i></p>

### Caracterização estrutural

Escola tipo “3x3”, com estrutura porticada em betão armado. Os blocos têm quatro pilares ao centro, definindo três vãos (“3x3”) nas duas direções. No perímetro os vãos têm metade do comprimento, relativamente aos alinhamentos interiores. Existem 3 blocos com laje vigada, com 2 pisos, e um bloco, com apenas 1 piso, que integra o refeitório. Há ainda um edifício de balneários junto ao campo de jogos exterior.

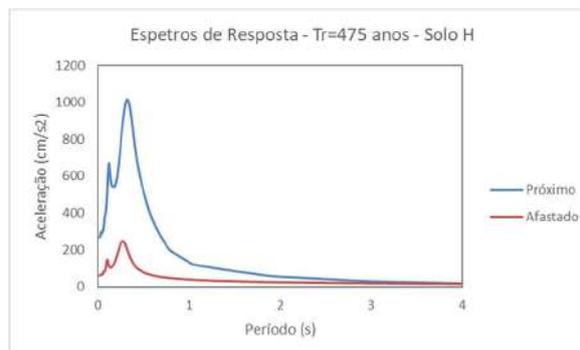
Não há informação sobre o projeto de estruturas da escola que permita recolher dados sobre o seu dimensionamento da escola, nomeadamente no que diz respeito a materiais, ações consideradas, dimensões de elementos estruturais, armaduras colocadas, entre outros pormenores construtivos. Assim, a análise aqui desenvolvida é baseada no projeto de outra escola de semelhante tipologia e naquilo que se presume ser a prática construtiva e os materiais da época de construção da escola. Com efeito, assumem-se materiais e restantes características da estrutura de acordo com outras escolas de tipologias e época construtiva semelhante, como é o caso da tipologia “Vale Rosal”. Assim, considera-se:

- Materiais: B25(C25/30) + A400
- Dimensões dos elementos estruturais:
  - Pilares: 0.35x0.35 [mxm] (contínuos em altura)
  - Laje vigada:
    - Laje maciça: 15.0cm
    - Vigas interiores: 0.35x0.65 [mxm]
    - Vigas perímetro: 0.35x0.40 [mxm]

É de salientar que, na ausência de informação sobre o projeto de estruturas da escola, que permita recolher dados sobre o seu dimensionamento, nomeadamente no que diz respeito a materiais, ações consideradas, dimensões de elementos estruturais, armaduras colocadas, entre outros pormenores construtivos, estes resultados devem ser encarados como indicadores do comportamento expectável e não como uma avaliação detalhada do comportamento sísmico da estrutura.

### Caracterização geotécnica

Com base na carta de solos de que o LNEC dispõe (Ver relatório), a EB Alto do Lumiar encontra-se fundada em solo do tipo H, pelo que se considera a amplificação da ação calculada ao nível do substrato rochoso com base na coluna de solo respetiva (coluna H). Os espectros de resposta, que resultam de um estudo probabilístico de perigosidade sísmica desenvolvido especificamente no âmbito deste projeto, associados a um período de retorno de 475 anos, encontram-se na figura à direita.



**Modelo numérico**

Atendendo ao exposto acima, desenvolve-se a análise de vulnerabilidade sísmica dos blocos de 2 pisos, por se considerarem condicionantes na resposta sísmica da escola.

O modelo de cálculo, desenvolvido no programa SeismoStruct, é composto por elementos de barra (*frame*) de plasticidade distribuída com formulação em força. Cada secção destes elementos é definida através de fibras com comportamento uniaxial, associadas a aço ou a betão. Os elementos finitos são definidos tendo em consideração as dimensões acima apresentadas e as armaduras que foram sistematizadas com base no projeto de execução da tipologia “Vale Rosal”. As armaduras dos pilares são:

Arm. Long; Arm. Transv.	Centrais	Perímetro	Canto
<b>1º piso</b>	12Φ25+4Φ20; Φ8//0.15	12Φ25; Φ8//0.15	4Φ25+8Φ20; Φ8//0.15
<b>2º Piso</b>	4Φ25; Φ8//0.15	8Φ25; Φ8//0.15	4Φ25; Φ8//0.15

Relativamente às vigas, as armaduras são:

Arm. Long; Arm. Transv.	Local	Extremidades	Sob pilares interiores	Meio-vão
<b>1º piso</b>	Vigas interiores	inf 4Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 4Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 3Φ20+4Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.20
	Vigas perímetro	inf 3Φ20+3Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 2Φ20+3Φ16; sup 2Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 3Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.10
<b>2º Piso</b>	Vigas interiores	inf 3Φ16; sup 2Φ20+3Φ16; Φ6//0.10	inf 3Φ16; sup 2Φ20+3Φ16; Φ6//0.10	inf 2Φ20+3Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.25
	Vigas perímetro	inf 6Φ12; sup 3Φ16+3Φ12; Φ6//0.10	inf 4Φ12; sup 3Φ16+3Φ12; Φ6//0.10	inf 4Φ12; sup 3Φ12; Φ6//0.20

As lajes maciças são armadas com Φ10//0.125 em ambas as faces. As cargas atuantes nas lajes são automaticamente distribuídas pela malha de vigas, enquanto que a sua rigidez é simulada através do cálculo da largura efetiva do banzo das vigas em “T”, o que é feito também de forma automática pelo programa de cálculo.

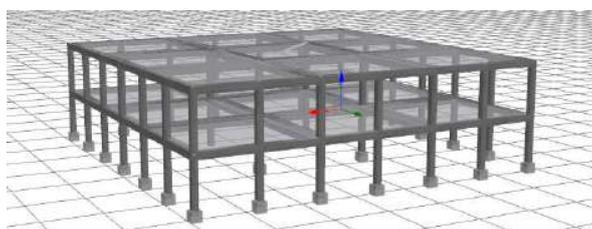
As fibras uniaxiais que definem o comportamento do betão são definidas através do modelo de *Mander et al.*, enquanto que as fibras de aço são definidas através do modelo de comportamento de *Menegotto-Pinto*.

Consideram-se as bases dos pilares com restrições aos deslocamentos e libertas às rotações, simulando assim uma fundação flexível, de acordo com a conceção de sapatas isoladas que caracteriza a fundação da estrutura.

Relativamente às cargas atuantes, adotaram-se as cargas definidas de acordo com a norma portuguesa em vigor (NP EN1991-1-1), para o tipo de edifício em questão. Assim, as cargas permanentes e sobrecargas a considerar na análise são:

<b>Carga</b>	<b>1º Piso</b>	<b>Cobertura</b>
<b>Pavimento (RCP)</b>	1.5 kN/m <sup>2</sup>	2.5 kN/m <sup>2</sup>
<b>Paredes (RCP)</b>	Divisórias: 1.75 kN/m <sup>2</sup> (aplicada na laje do 1º piso) Exteriores: 7.8 kN/m (aplicada nas vigas exteriores do 1º piso)	-
<b>Sobrecarga</b>	Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>	Cobertura não acessível: 0.4 kN/m <sup>2</sup>

Após a aplicação das cargas gravíticas é executada uma análise estática não-linear com controlo de deslocamentos (*pushover*).

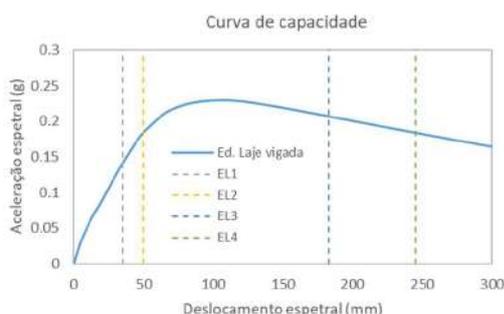


Modelo numérico do bloco tipo da escola no programa SeismoStruct

Os períodos de vibração da estrutura, obtidos através do modelo numérico, são:

Períodos de vibração	
1º modo (X)	0.72 s
2º modo (Y)	0.72 s
3º modo (Torção)	0.62 s

### Curva de capacidade

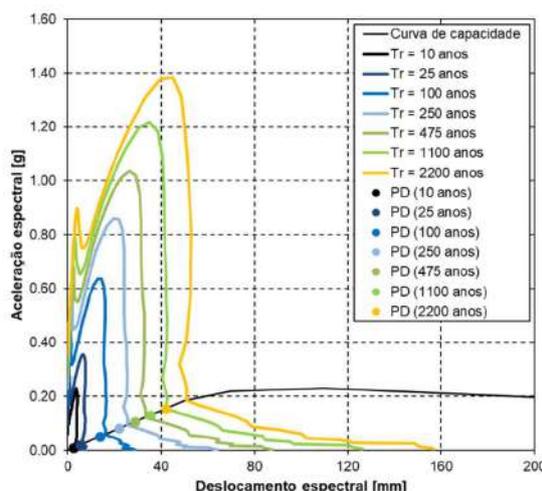


Os estados limite de cada um dos edifícios encontram-se descritos, em termos de deslocamento do topo na seguinte tabela:

Estado limite	Deslocamento do topo
Completamente Operacional	D= 35 mm
Operacional	D= 50 mm
Salvaguarda de Vida	D= 184 mm
Próximo do Colapso	D= 245 mm

### Pontos de desempenho

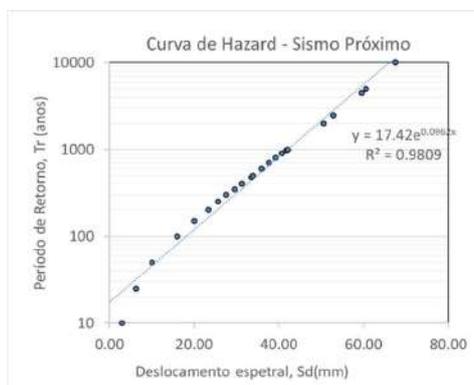
Determinação dos pontos de desempenho através do método do espectro de capacidade, para os sismos próximo e afastado e 25 períodos de retorno distintos.



Pontos de desempenho para 7 períodos de retorno da ação sísmica: Sismo próximo

**Curva de Hazard e períodos de retorno**

A curva de *hazard*, para sismo próximo (condicionante), é a que se apresenta de seguida.



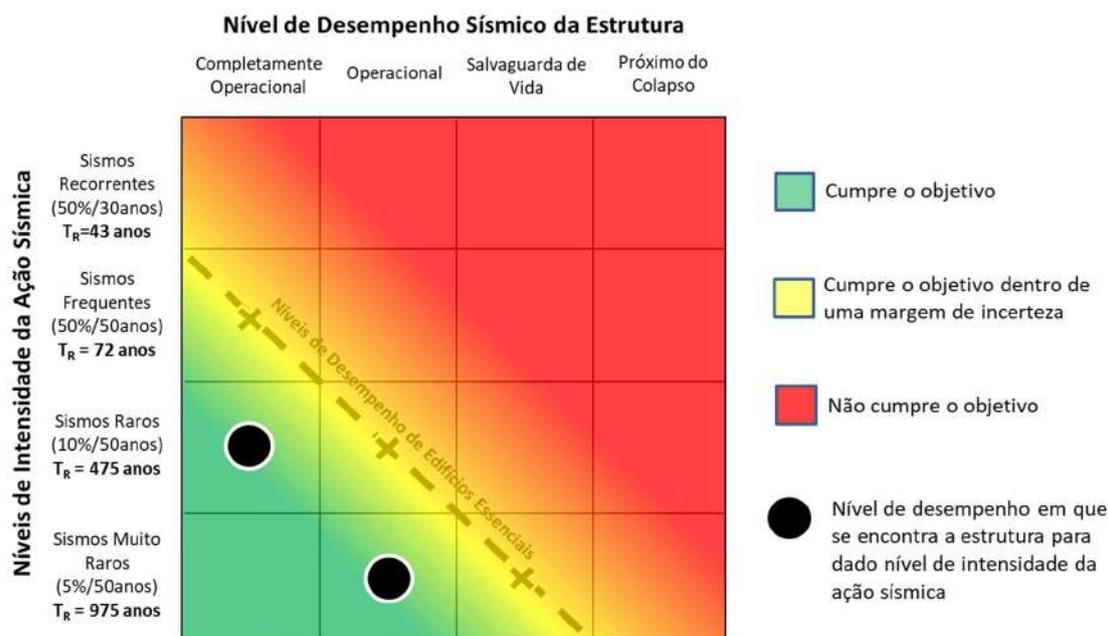
Curva de Hazard: Sismo próximo

Os períodos de retorno associados aos estados limite definidos são:

	Período de retorno	Sismo Próximo	Sismo Afastado
Estado limite	Completamente Operacional	505	>10000
	Operacional	2138	>10000
	Salvaguarda de Vida	>10000	>10000
	Próximo do Colapso	>10000	>10000

### Matriz de desempenho sísmico

A matriz de desempenho sísmico, que descreve o comportamento da estrutura de cada um dos edifícios que constituem a escola relativamente aos níveis e objetivos de desempenho definidos, é apresentada abaixo.



### Conclusão

Verifica-se que o comportamento da estrutura de cada um dos edifícios que constituem a escola (edifício com laje vigada e laje fungiforme) relativamente aos níveis e objetivos de desempenho sísmico definidos é satisfatório.

Com efeito, verifica-se que para sismos com probabilidade de ocorrência iguais ou superiores a 10% em 50 anos a estrutura se encontra num nível de desempenho *completamente operacional*, respeitando assim o objetivo de desempenho estabelecido para este tipo de edifícios. Além disso, para um sismo com probabilidade de ocorrência de 5% em 50 anos (*sismo muito raro*) a estrutura encontra-se num nível de desempenho *operacional*, pelo que respeita o objetivo estabelecido para este nível de intensidade sísmica, que corresponde ao nível de desempenho *salvaguarda de vida*. Para este tipo de edifícios não é verosímil que a estrutura se encontre próxima do colapso para nenhum destes níveis de intensidade da ação sísmica.



# Escola Básica Almirante Gago Coutinho

ID Escola: 14

Escola	Agrupamento	Área coberta
Escola Básica Almirante Gago Coutinho	Alvalade	2264 m <sup>2</sup>

Nível de ensino	Número de alunos
Básico com 2º e 3º ciclo	450 alunos

Descrição geral
<p>A escola localiza-se na freguesia de Alvalade, numa zona residencial. Nas imediações os edifícios existentes são maioritariamente moradias, embora existam 2 prédios com 8 pisos. Ainda assim, atendendo à distância a que os edifícios mais próximos se encontram, não é previsível qualquer interação sísmica com os mesmos.</p> <p>A escola, construída na década de 1950, é composta por um edifício principal, um conjunto de edifícios auxiliares, com estrutura de madeira, e um ginásio. O edifício principal tem 2 pisos, ainda que desnivelados ao longo do comprimento do edifício.</p> <p>Os acessos à escola são amplos. Além disso, existe espaço, dentro dos limites da escola, para evacuação e encontro em caso de ocorrência de evento sísmico.</p>



*Imagem aérea da escola*

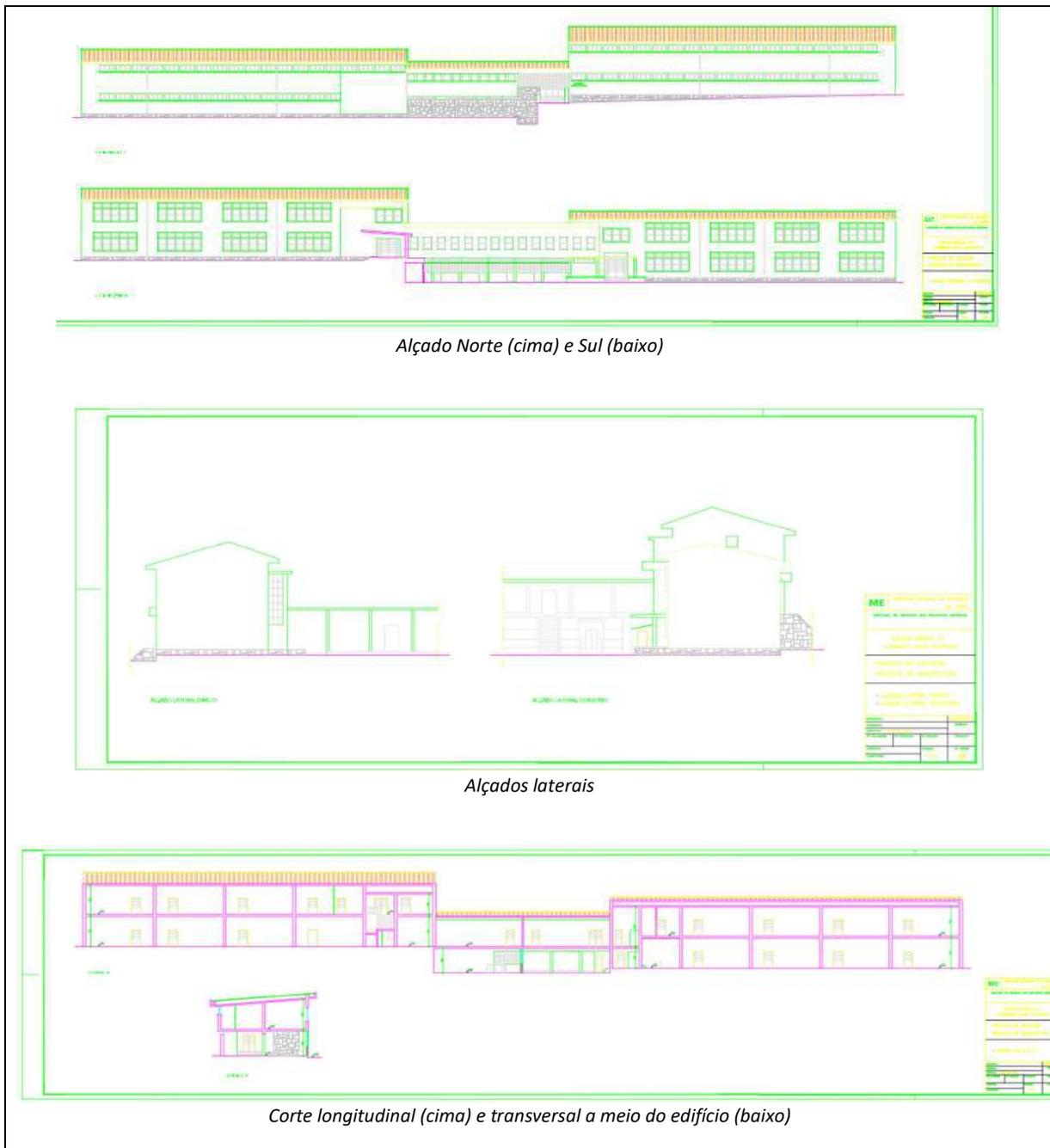


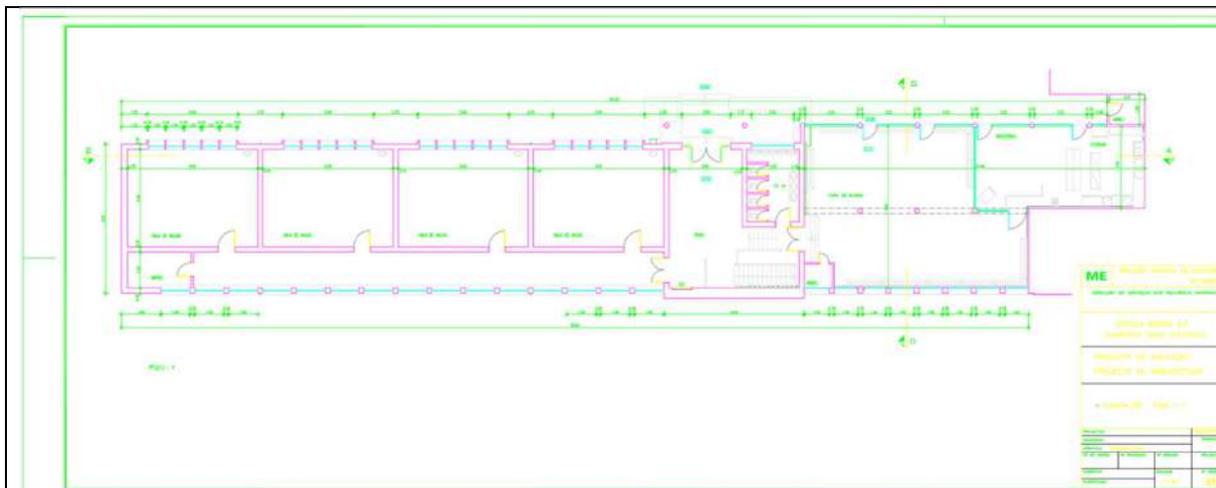
*Fachada do edifício principal na zona do campo de jogos*

Informação de base
<p>Estão apenas disponíveis desenhos de levantamento arquitetónico fornecidos pela CML. É com base nestes desenhos de levantamento e na informação recolhida na visita à escola realizada pelo Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas (NESDE) do LNEC, que este estudo se baseia.</p>

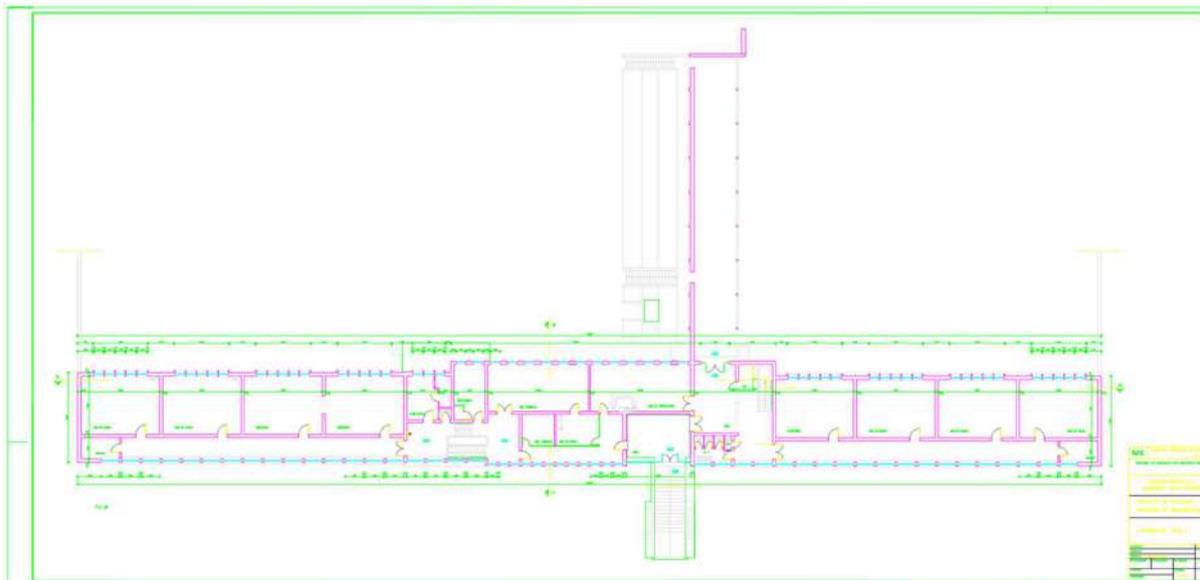


*Identificação dos alinhamentos do pórtico na fachada do edifício, com recurso a furação*

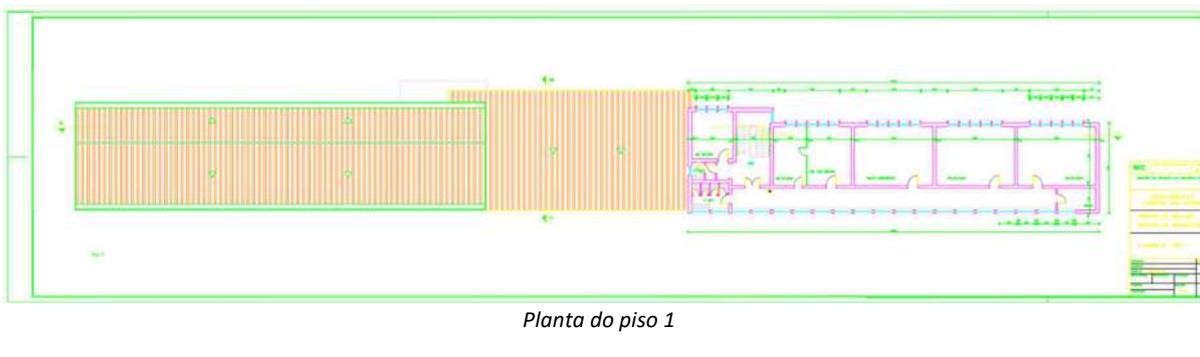




Planta do piso -1



Planta do piso 0



Planta do piso 1

**Caracterização estrutural**

A análise a desenvolver é focada no edifício principal da escola.

A descrição que de seguida se apresenta é baseada na informação visual recolhida pelo NESDE na visita efetuada à escola. Com efeito, a informação de base não é suficiente para caracterizar convenientemente o sistema estrutural. Assim, a análise aqui desenvolvida é baseada na referida informação e naquilo que se presume ser a prática construtiva e os materiais da época de construção da escola.

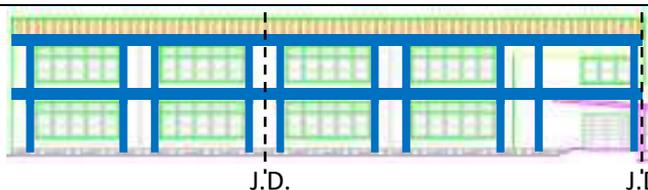
O edifício principal da escola é caracterizado por uma banda única de salas de aula, ligadas por um corredor lateral que se desenvolve em todo o comprimento do edifício. O edifício é constituído por cinco corpos independentes, no que concerne ao comportamento sísmico, tal como se pode verificar pela figura abaixo. Nos corpos A1 a A4, o sistema estrutural é semelhante e constituído por pórticos de betão armado ao longo dos alinhamentos A e B. No alinhamento C não existe qualquer elemento resistente em betão armado, pelo que a laje do corredor descarrega, de um dos lados, no pórtico do alinhamento A e, do outro lado, numa parede de alvenaria de tijolo, que transporta a carga do corredor até à fundação. A laje é formada por vigotas pré-fabricadas de betão armado, de acordo com o observado na visita à escola efetuada pelo NESDE (ver fotografia abaixo). Esta tipologia de laje não garante um adequado comportamento de diafragma, não garantindo que os pórticos dos alinhamentos A e B respondam de forma solidária. Com efeito, a utilização deste tipo de laje em edifícios localizados em zonas sísmicas não é aconselhável.

A zona assinalada a vermelho na figura abaixo corresponde à zona das escadas, que integra uma consola que nasce do pórtico do alinhamento A. A zona em consola apresenta uma tendência de rotação muito elevada, com deformação significativas que provocaram fissuração de grande dimensão, como se pode ver pela fotografia abaixo. Esta situação, embora não diretamente relacionada com a vulnerabilidade sísmica da escola, deverá ser analisada e solucionada com urgência.

Relativamente ao corpo B do edifício principal, corresponde a uma zona de ligação que integra a zona de entrada da escola, sala de professores e o refeitório no piso -1. Ao contrário dos corpos A1 a A4, o corpo B tem uma cobertura com apenas uma água (ver figura acima) e o sistema estrutural é significativamente diferente dos restantes. Neste caso o sistema porticado é tridimensional, existindo vigas ligam os pórticos dos alinhamentos A e B.



*Corte longitudinal (cima) e planta (baixo) do piso 2 com identificação dos alinhamentos estruturais do edifício principal*



Alçado Sul dos corpos A1 e A2 com representação dos pórticos (a azul) dos alinhamentos A e B



Fotografia do teto do piso 0, com vigotas pré-fabricadas visíveis na laje



Fotografia da zona das escadas, no corpo A2, com fissuração elevada na zona em consola: vista geral (esq.); fissuração junto ao teto (dir.)

Relativamente ao edifício principal da escola, as dimensões dos elementos estruturais dos pórticos dos alinhamentos A e B, aferidas através da visita efetuada pelo NESDE, são apresentadas nas tabelas seguintes. A laje tem uma espessura de 25.0cm, medida no limpo.

Pilares [m x m]	
Alinhamento A (interior)	0.25x0.25
Alinhamento B (fachada)	0.30x0.30

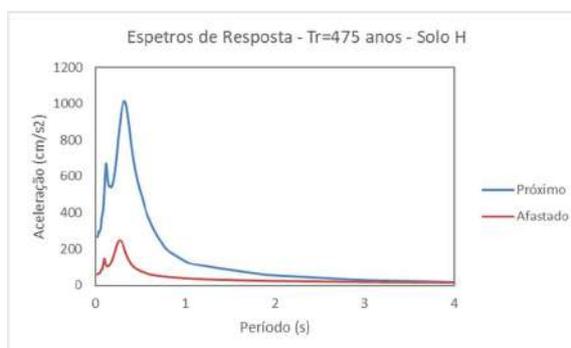
Vigas [m x m]	
Alinhamento A (interior)	0.25x0.65
Alinhamento B (fachada)	0.30x0.65

Não existindo informação de base para caracterizar convenientemente os materiais e outros pormenores construtivos da escola, consideram-se materiais característicos da época de construção da escola. Em particular, considera-se um betão de classe C16/20 e aço do tipo A250.

É de salientar que na ausência de informação sobre o projeto de estruturas da escola que permita recolher dados sobre o seu dimensionamento, nomeadamente no que diz respeito a materiais, ações consideradas, dimensões de elementos estruturais, armaduras colocadas, entre outros pormenores construtivos, estes resultados devem ser encarados como indicadores do comportamento expectável e não como uma avaliação detalhada do comportamento sísmico da estrutura.

### Caracterização geotécnica

Com base na carta de solos de que o LNEC dispõe (Ver relatório), a EB Almirante Gago Coutinho encontra-se fundada em solo do tipo H, pelo que se considera a amplificação da ação calculada ao nível do substrato rochoso com base na coluna de solo respetiva (coluna H). Os espectros de resposta, que resultam de um estudo probabilístico de perigosidade sísmica desenvolvido especificamente no âmbito deste projeto, associados a um período de retorno de 475 anos, encontram-se na figura à direita.



### Modelo numérico

Atendendo às características estruturais da escola, considera-se que as zonas mais vulneráveis são os corpos A1 a A4, pelo que serão essas as zonas consideradas na análise. Tendo em consideração a configuração do edifício, a análise centra-se num dos pórticos dos alinhamentos A e B, solicitados para fora do seu plano. Uma vez que a laje de vigotas pré-fabricadas não confere comportamento de diafragma, considera-se que os dois pórticos não respondem de forma solidária e, como tal, a resposta é apenas condicionada pelo comportamento para fora do plano dos pórticos. Nesse sentido, revela-se condicionante o comportamento do pórtico do alinhamento A, uma vez que os pilares deste pórtico têm menores dimensões do que os pilares do pórtico do alinhamento B (ver acima). É aplicada a este pórtico metade da carga aplicada na laje das salas e metade da carga aplicada na laje do corredor.

O modelo de cálculo, desenvolvido no programa SeismoStruct, é composto por elementos de barra (*frame*) de plasticidade distribuída com formulação em força. Cada secção destes elementos é definida através de fibras com comportamento uniaxial, associadas a aço ou a betão. Os elementos finitos são definidos tendo em consideração as dimensões acima apresentadas e as armaduras que foram calculadas tendo por base taxas regulamentares de armadura mínimas de 1% (para pilares) e 0.28% (armadura de tração para vigas, tendo em conta a utilização de aço A250 e betão C16/20).

Arm. Long; Arm. Transv.	<b>Alinhamento A</b>	<b>Alinhamento B</b>
<b>1º e 2º pisos</b>	8Φ12; Φ8//0.20	8Φ16; Φ8//0.20

Relativamente às vigas, as armaduras são:

Arm. Long; Arm. Transv.	<b>Sob pilares interiores</b>	<b>Meio-vão</b>
<b>Alinhamento A</b>	inf 2Φ16; sup 3Φ16; Φ8//0.15	inf 4Φ16; sup 2Φ16; Φ8//0.15
<b>Alinhamento B</b>	inf 2Φ16; sup 3Φ16; Φ8//0.15	inf 3Φ16; sup 2Φ16; Φ8//0.15

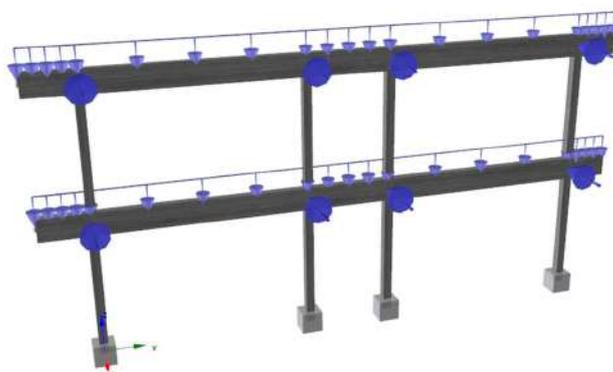
As fibras uniaxiais que definem o comportamento do betão são definidas através do modelo de *Mander et al.*, enquanto que as fibras de aço são definidas através do modelo de comportamento de *Menegotto-Pinto*.

Consideram-se as bases dos pilares com restrições aos deslocamentos e às rotações, simulando assim um encastramento perfeito na fundação da estrutura.

Relativamente às cargas atuantes, adotaram-se as cargas definidas de acordo com a norma portuguesa em vigor (NP EN1991-1-1), para o tipo de edifício em questão. Assim, as cargas permanentes e sobrecargas a considerar na análise são:

Carga	Pisos intermédios	Cobertura (laje esteira)
<b>Pavimento (RCP)</b>	1.5 kN/m <sup>2</sup>	2.5 kN/m <sup>2</sup>
<b>Paredes (RCP)</b>	<u>Divisórias:</u> 1.75 kN/m <sup>2</sup> <u>Exteriores:</u> 7.8 kN/m (aplicada nas vigas exteriores)	
<b>Sobrecarga</b>	Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>	Cobertura não acessível: 0.4 kN/m <sup>2</sup>

Após a aplicação das cargas gravíticas é executada uma análise estática não-linear com controlo de deslocamentos (*pushover*).

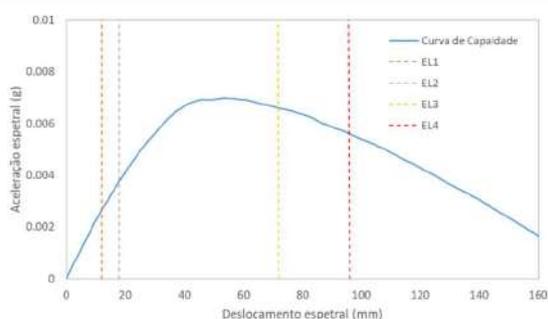


Modelo numérico do pórtico do alinhamento A no programa SeismoStruct

Os períodos de vibração da estrutura, obtidos através do modelo numérico, são:

Períodos de vibração	Dir. transversal (fora do plano)
1º modo	3.17 s
2º modo	1.67 s
3º modo	0.91 s

**Curva de capacidade**



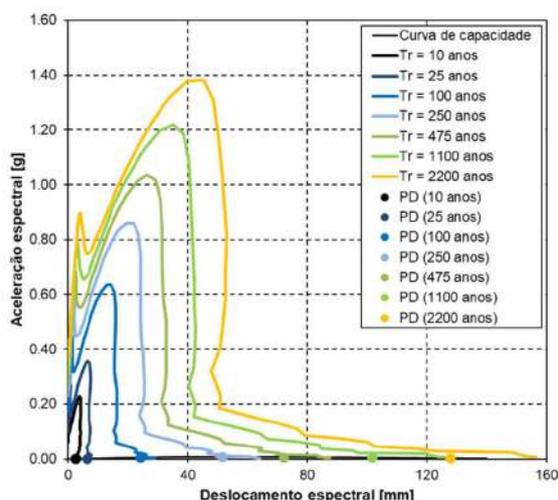
Os valores dos deslocamentos do topo associados aos estados limite são:

Estado limite	Ed. Principal
Completamente Operacional	D=12.6 mm
Operacional	D= 18.0 mm
Salvaguarda de Vida	D= 72.2 mm
Próximo do Colapso	D= 96.3 mm

**Pontos de desempenho**

Determinação dos pontos de desempenho através do método do espectro de capacidade, para os sismos próximo e afastado e 25 períodos de retorno distintos.

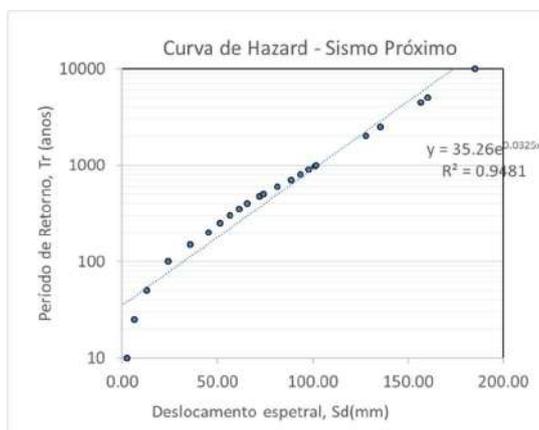
Na figura abaixo apresentam-se apenas 7 dos 25 espectros de resposta considerados, para sismo próximo.



Pontos de desempenho: Sismo próximo

**Curva de Hazard e períodos de retorno**

A curva de hazard, para sismo próximo podem assim ser determinadas sendo apresentadas de seguida.



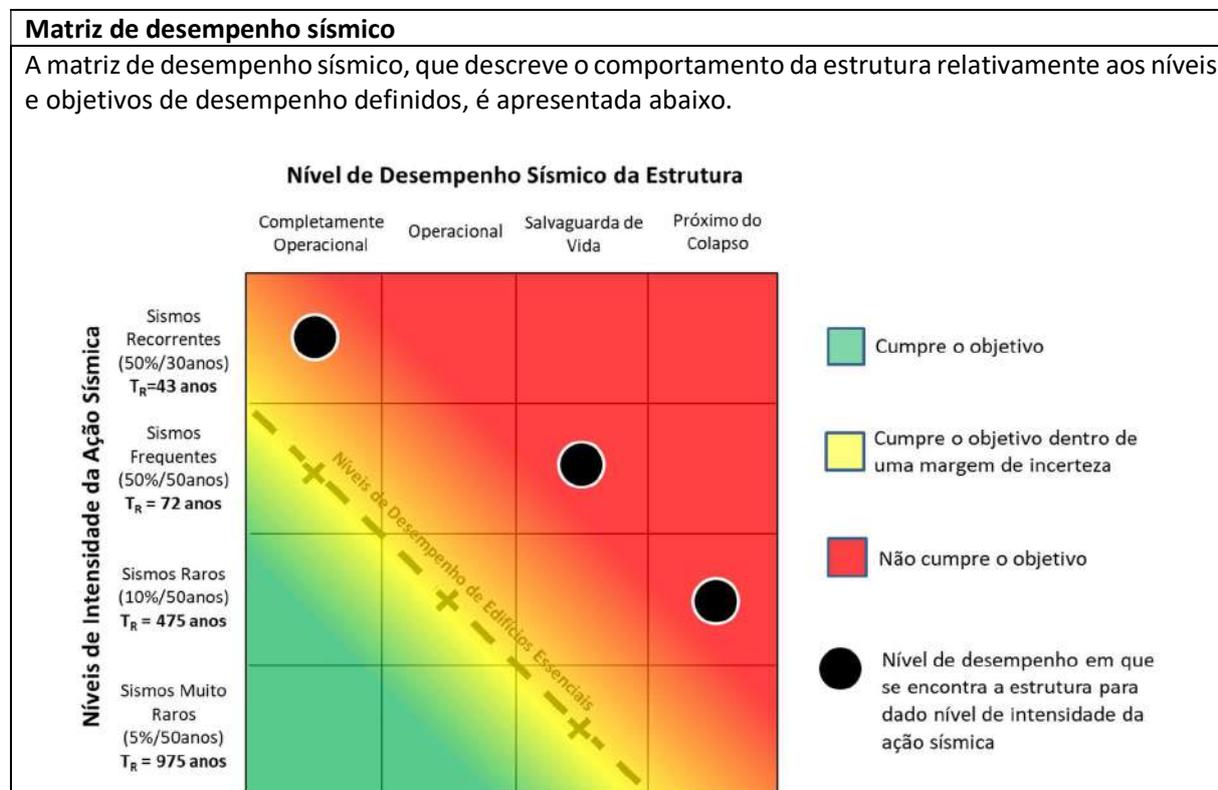
Curva de Hazard para sismo próximo (condicionante)

Os períodos de retorno associados aos estados limite definidos são:

	Período de retorno	Sismo Próximo	Sismo Afastado
Estado limite	Completamente Operacional	53	73
	Operacional	63	86
	Salvaguarda de Vida	369	441
	Próximo do Colapso	806	909

**Matriz de desempenho sísmico**

A matriz de desempenho sísmico, que descreve o comportamento da estrutura relativamente aos níveis e objetivos de desempenho definidos, é apresentada abaixo.



### Conclusão

A análise aqui desenvolvida é baseada na prática construtiva e os materiais da época de construção da escola e um conjunto de dados recolhidos na visita à escola efetuada pelo NESDE. O sistema estrutural da escola é constituído por pórticos de betão armado e lajes de vigotas pré-fabricadas. Num dos alinhamentos da fachada não foram identificados elementos de betão armado, pelo que se presume que a laje do corredor descarrega, de um dos lados, numa parede de alvenaria de tijolo, que transporta parte da carga do corredor até à fundação. Além disso, esta tipologia de laje não garante um adequado comportamento de diafragma, não garantindo que os pórticos de betão armado respondam de forma solidária. Com efeito, a utilização deste tipo de laje em edifícios localizados em zonas sísmicas não é aconselhável.

Da análise efetuada conclui-se que o comportamento da estrutura da escola (estrutura de betão armado com laje de vigotas pré-fabricadas) relativamente aos níveis e objetivos de desempenho sísmico definidos é insatisfatório.

Com efeito, verifica-se que para um sismo com probabilidade de ocorrência de 50% em 50 anos a estrutura se encontra num nível de desempenho *salvaguarda de vida* (seria expectável que se encontrasse no nível de desempenho *completamente operacional*). Além disso, verifica-se que para um sismo com probabilidade de ocorrência de 10% em 50 anos a estrutura se encontra num nível de desempenho *próximo do colapso* (seria expectável que se encontrasse no nível de desempenho *operacional*). Por último, verifica-se que para um sismo com probabilidade de ocorrência de 5% em 50 anos a estrutura ultrapassa o nível de desempenho *próximo do colapso*.

Assim, recomenda-se que a escola seja alvo de uma inspeção estrutural detalhada que sirva de base para um eventual projeto de reforço que vise mitigar as atuais insuficiências em termos de resistência sísmica.



# Escola Básica Bairro do Padre Cruz

ID Escola: 16

Escola	Agrupamento	Área coberta
Escola Básica Bairro do Padre Cruz	Bairro do Padre Cruz	2785 m <sup>2</sup>

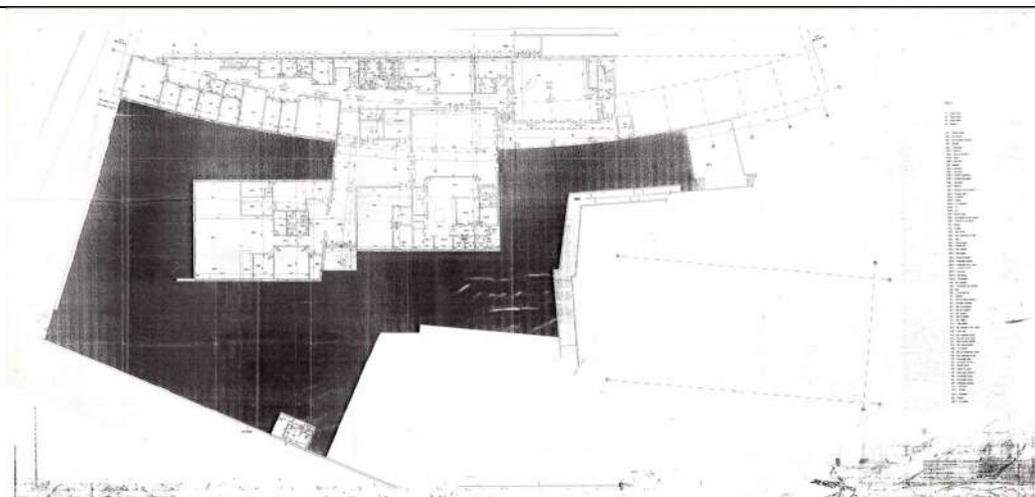
Nível de ensino	Número de alunos
Básico - 2º e 3º ciclos	350 alunos

Descrição geral
<p>A escola, construída no final da década de 1990, localiza-se na freguesia de Carnide, com entrada pela Rua Professor Arsénio Nunes. É composta por um edifício principal, que se subdivide em vários corpos, e um campo de jogos com uma cobertura constituída por pilares de betão e uma treliça metálica. Junto ao campo de jogos existe também um pequeno edifício com balneários. O edifício principal é formado por cinco (A-E) corpos, dos quais três constituem o bloco com três pisos que é visível na imagem ao lado, enquanto que os outros dois corpos formam o bloco com apenas um piso que se encontra em frente à entrada da escola.</p> <p>A zona envolvente da escola é residencial, não existindo edifícios suficientemente próximos de modo que não é previsível qualquer interação sísmica com outras construções. Existe espaço, nas imediações da escola e dentro dos limites da mesma, para evacuação e encontro em caso de ocorrência de evento sísmico.</p>

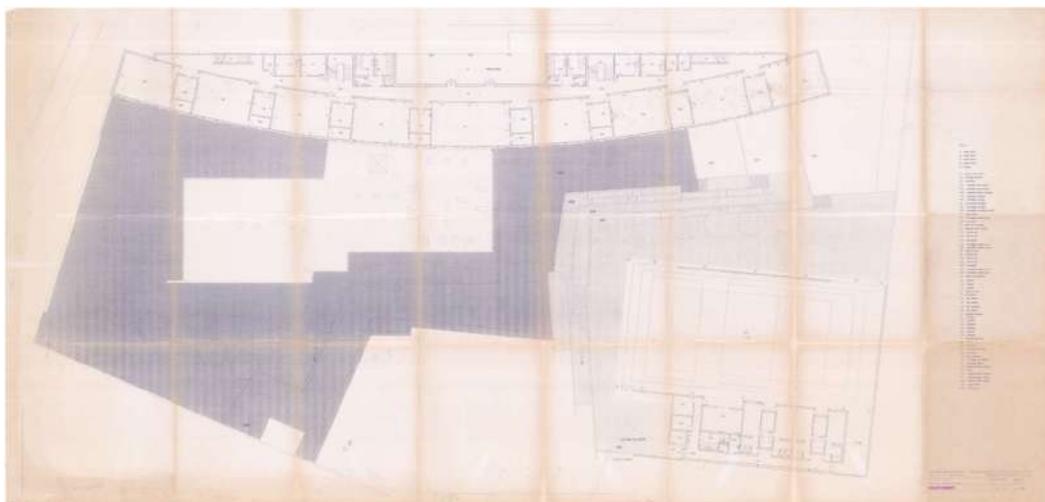


Imagem aérea do Google Earth

Informação de base
<p>A CML disponibilizou alguns desenhos do projeto da escola, nomeadamente desenhos de arquitetura e especialidades, entre as quais estruturas. Embora os desenhos de estruturas não contenham a coleção completa de desenhos do projeto (faltam, por exemplo, desenhos das vigas de fundação, pormenores das lajes maciças ou das zonas de ligação entre elementos estruturais) estes desenhos são suficientes para se desenvolver uma análise relativamente detalhada da escola. Nas figuras seguintes apresentam-se alguns dos desenhos disponibilizados.</p>



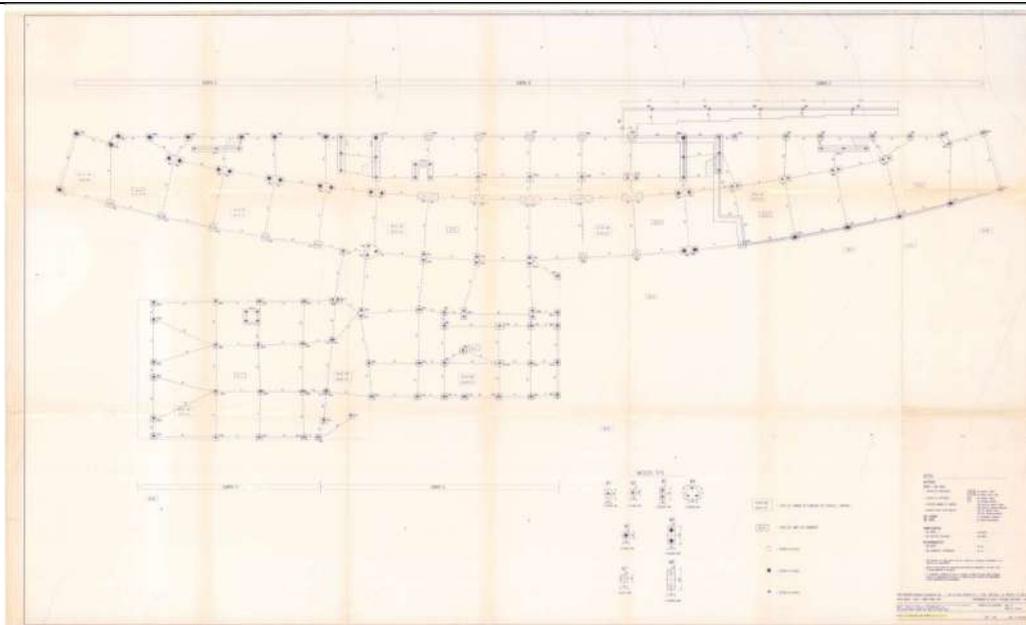
*Planta do piso 0 do edifício principal*



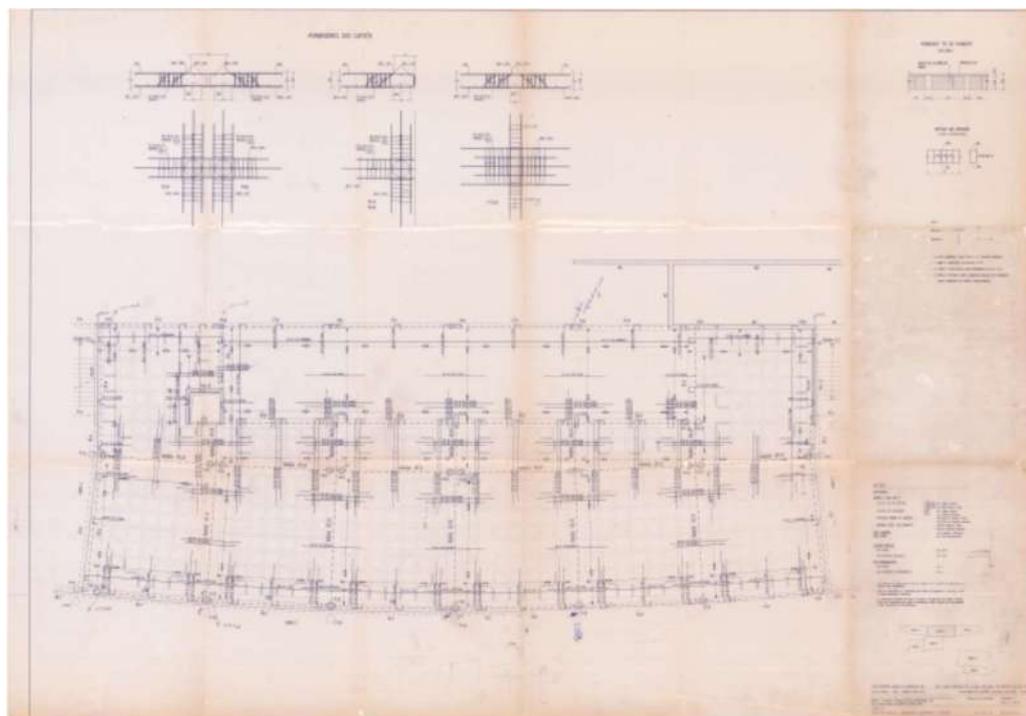
*Planta do piso 1 do edifício principal*



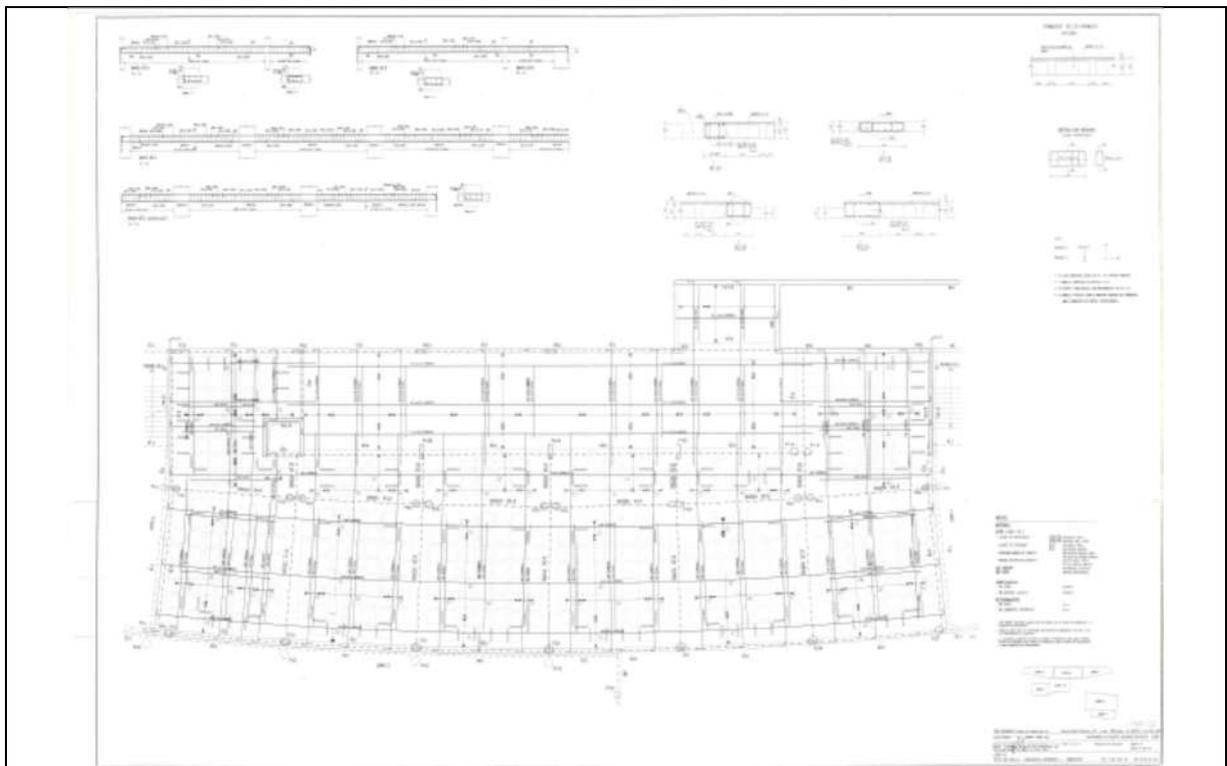
*Planta do piso 2 do edifício principal*



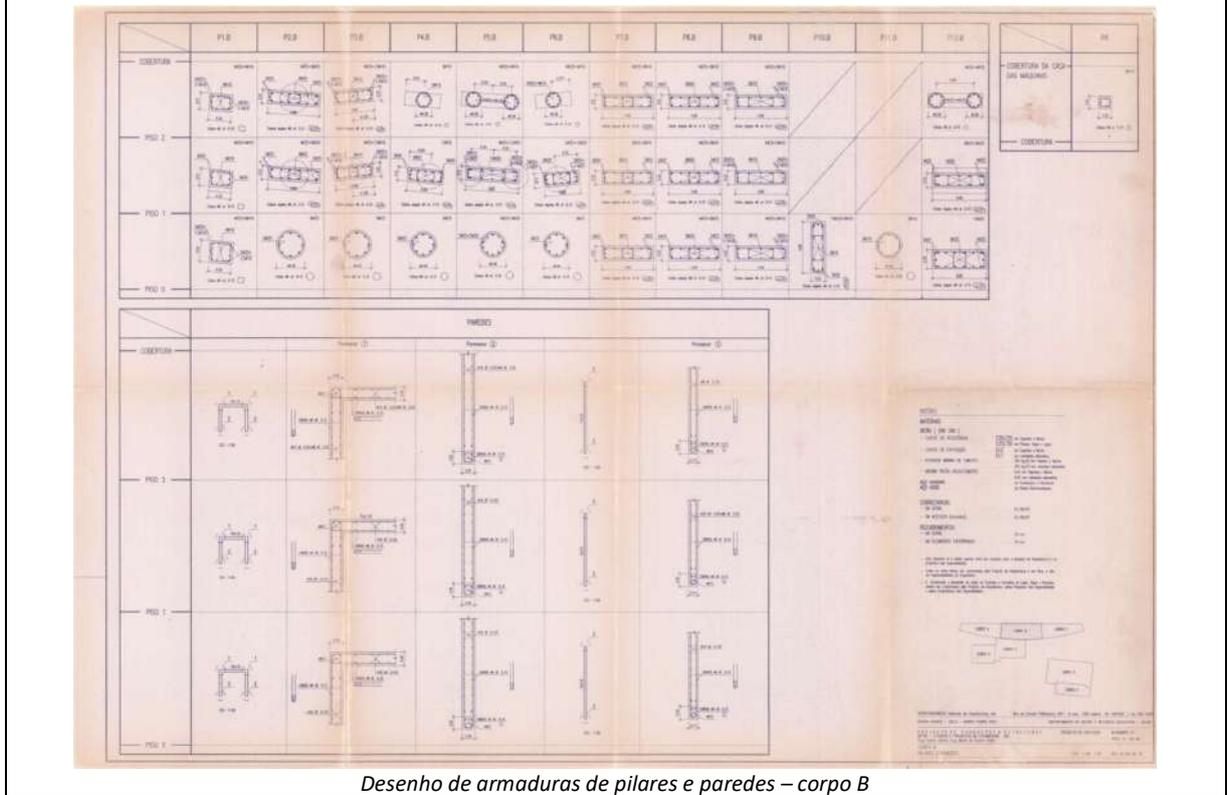
*Planta de fundações do edifício principal*



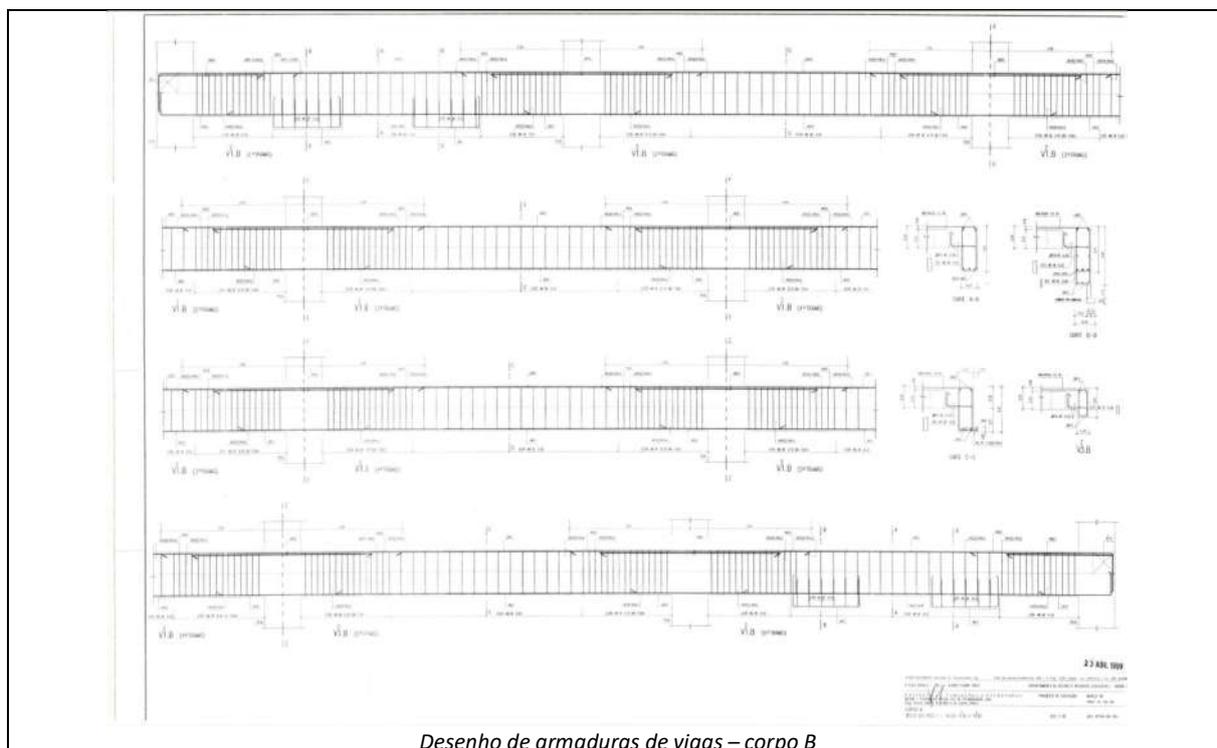
*Desenho da armadura superior da laje e dos capitéis dos pilares do piso 1 – teto do piso 0: Corpo B*



Desenho da armadura inferior da laje do piso 1 – teto do piso 0: Corpo B

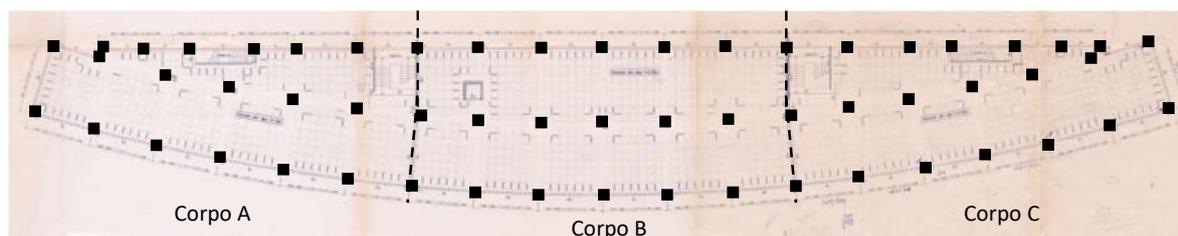


Desenho de armaduras de pilares e paredes – corpo B



### Caracterização estrutural

A estrutura é de betão armado, fundada numa grelha de estacas, cujos maciços de encabelamento são unidos por vigas de fundação (ver planta de fundações acima). O edifício principal da escola, com um total de 3 pisos, é constituído por vários blocos, três dos quais com 3 pisos e dois blocos com apenas 1 piso. Tendo em conta este enquadramento, serão considerados neste estudo os blocos de três pisos do edifício principal, uma vez que se apresentam como os mais suscetíveis à ação sísmica. Na figura abaixo apresenta-se uma planta com os blocos com 3 pisos do edifício principal.



Planta com identificação dos corpos e dos alinhamentos estruturais do edifício principal

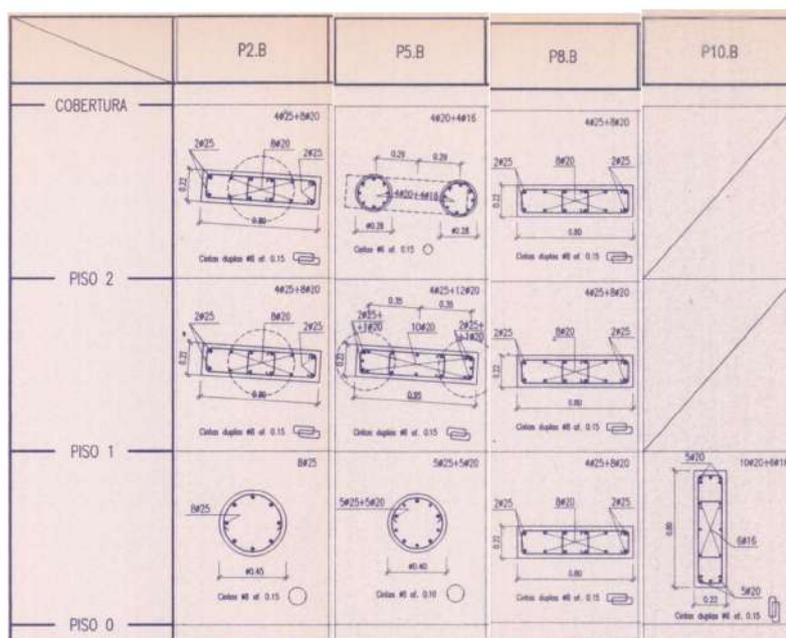
O corpo C está parcialmente enterrado de um dos lados, pelo que apenas dois pisos são aparentes do lado da fachada retilínea. É de referir que ao nível do piso térreo, existem pilares intermédios entre os pilares do alinhamento central e os pilares do alinhamento da fachada retilínea.

As lajes são fungiformes, aligeiradas com blocos de betão leve, à exceção do piso 1 na zona compreendida entre os pilares do alinhamento central e os pilares do alinhamento da fachada retilínea, existindo nessa zona uma laje maciça com 20.0cm de espessura. As lajes fungiformes aligeiradas possuem bandas maciças com 90.0cm de largura nos alinhamentos entre pilares. A espessura total das

lajes aligeiradas é de 38.0cm. Os blocos de betão leve têm 75.0cm de largura e 32.0cm de altura. Entre cada dois blocos, existem nervuras com largura de 15.0cm. No topo, a lâmina maciça de betão é de 6.0cm. Na envolvente dos pilares existem capitéis, onde se verifica um reforço muito significativo de armadura, nomeadamente armaduras de esforço transverso, ainda que a altura da secção de betão armado seja a mesma da restante laje (38.0cm). No perímetro do edifício existem vigas de bordadura em betão armado.

Desta forma, na direção longitudinal o comportamento em pórtico é assegurado pelas vigas que unem todos os pilares, enquanto que na direção transversal o comportamento em pórtico deve ser garantido pelas bandas maciças das lajes, que funcionam como vigas deitadas.

A estrutura apresenta uma elevada irregularidade estrutural em altura, com os pilares a apresentarem grandes variações de secção entre pisos consecutivos, como se pode ver pelo desenho dos pilares que integram o corpo B do edifício (ver abaixo). Tal irregularidade é explicitamente considerada no modelo numérico desenvolvido para a escola.

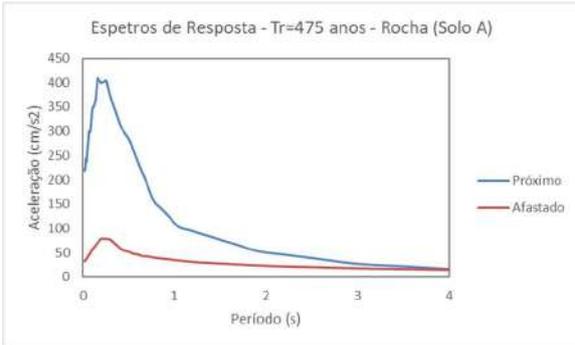


Desenho de armaduras dos pilares do corpo B do edifício principal

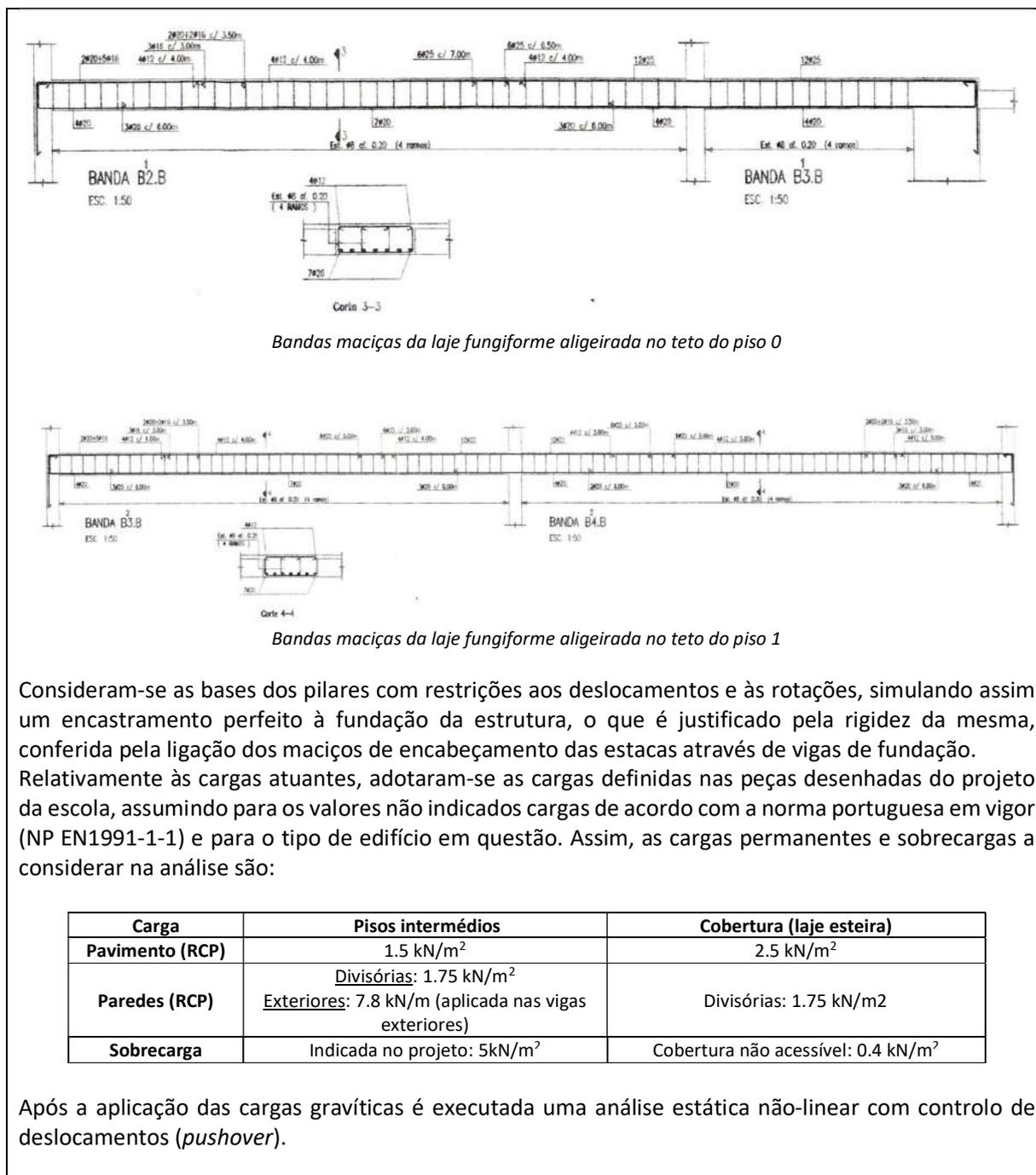
Os materiais considerados na análise são os indicados nas peças desenhadas, ou seja, betão C25/30 em pilares, vigas e lajes e aço A400NR em varões de elementos de betão armado. O recobrimento especificado para os elementos estruturais é de 3.0cm.

Na visita à escola, realizada por elementos do LNEC, foi possível observar algumas patologias construtivas, como é o caso da termofurese que se vê na fotografia abaixo, ainda que tais patologias não representem nenhum perigo aparente para a segurança estrutural do edifício.



<p><b>Caracterização geotécnica</b></p> <p>Com base na carta de solos de que o LNEC dispõe a EB Bairro do Padre Cruz encontra-se fundada em rocha (solo do tipo A), pelo que não se considera qualquer amplificação da ação calculada no estudo probabilístico de perigosidade sísmica desenvolvido especificamente no âmbito deste projeto.</p> <p>Os espectros de resposta, para sismo próximo e sismo afastado, associados a um período de retorno de 475 anos, encontram-se na figura à direita.</p>	
--	---

<p><b>Modelo numérico</b></p> <p>Tendo em conta que a métrica de pilares se mantém em todo o alinhamento do edifício, a zona mais vulnerável é a zona do corpo B, uma vez que é a zona que possui maiores vãos, pelo que a análise aqui desenvolvida é centrada na análise dos pórticos resistentes na direção transversal do edifício. Os pórticos transversais estão afastados aproximadamente 7.20m, medidos na fachada curva, e 6.90m, medidos na fachada retilínea. Os pisos têm uma altura de 3.43m.</p> <p>O modelo de cálculo, desenvolvido no programa SeismoStruct, é composto por elementos de barra (<i>frame</i>) de plasticidade distribuída com formulação em força. Cada secção destes elementos é definida através de fibras com comportamento uniaxial, associadas a aço ou a betão. As fibras uniaxiais que definem o comportamento do betão são definidas através do modelo de <i>Mander et al.</i>, enquanto que as fibras de aço são definidas através do modelo de comportamento de <i>Menegotto-Pinto</i>.</p> <p>Os elementos finitos são definidos tendo em consideração a geometria e as armaduras que constam das peças desenhadas disponibilizadas. As armaduras dos pilares constam da figura apresentada na secção “Caracterização Estrutural”. Relativamente às armaduras das bandas maciças, que funcionam como “vigas deitadas” na direção transversal, são as que se apresentam nas figuras abaixo. Os blocos de betão leve são modelados com um peso volúmico de 6 kN/m<sup>3</sup>.</p>
--



*Modelo numérico do pórtico transversal tipo da escola no programa SeismoStruct:*

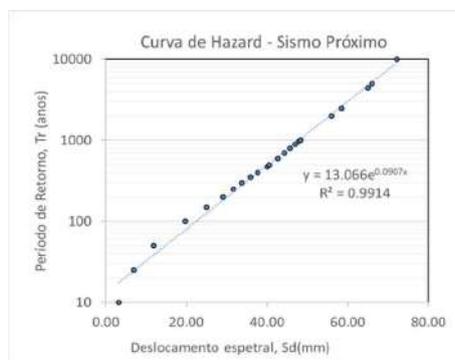
Os períodos de vibração da estrutura, obtidos através do modelo numérico, são:

Períodos de vibração	
1º modo	0.87 s
2º modo	0.31 s
3º modo	0.17 s

Curva de capacidade	Pontos de desempenho										
<p>Os valores dos deslocamentos do topo associados aos estados limite são:</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Estado limite</th> <th>Deslocamento do topo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Completamente Operacional</td> <td>D= 35.7 mm</td> </tr> <tr> <td>Operacional</td> <td>D= 51.0 mm</td> </tr> <tr> <td>Salvaguarda de Vida</td> <td>D= 135.0 mm</td> </tr> <tr> <td>Próximo do Colapso</td> <td>D= 320.0 mm</td> </tr> </tbody> </table>	Estado limite	Deslocamento do topo	Completamente Operacional	D= 35.7 mm	Operacional	D= 51.0 mm	Salvaguarda de Vida	D= 135.0 mm	Próximo do Colapso	D= 320.0 mm	<p>Determinação dos pontos de desempenho através do método do espectro de capacidade, para os sismos próximo e afastado e 25 períodos de retorno distintos.</p> <p>Na figura abaixo apresentam-se apenas 7 dos 25 espectros de resposta considerados, para sismo próximo.</p> <p style="text-align: center;"><i>Pontos de desempenho: Sismo próximo</i></p>
Estado limite	Deslocamento do topo										
Completamente Operacional	D= 35.7 mm										
Operacional	D= 51.0 mm										
Salvaguarda de Vida	D= 135.0 mm										
Próximo do Colapso	D= 320.0 mm										

**Curva de Hazard e períodos de retorno**

A curva de hazard, para sismo próximo pode assim ser determinada sendo apresentada de seguida.



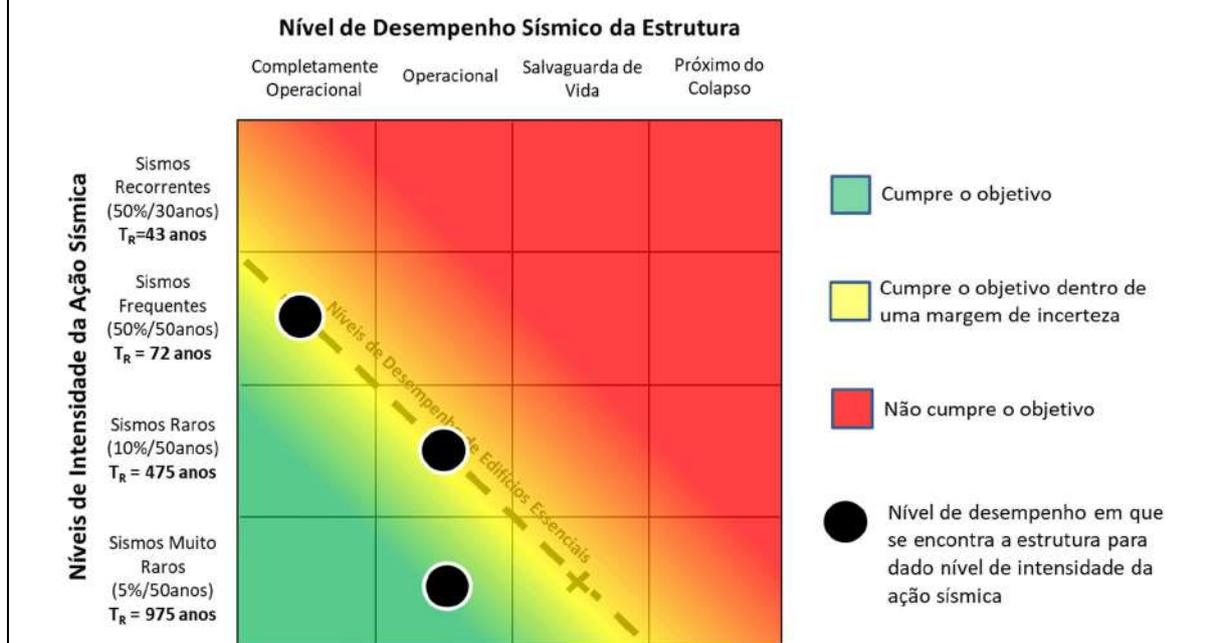
Curva de Hazard: Sismo próximo

Os períodos de retorno associados aos estados limite definidos são:

Estado limite	Sismo próximo	Sismo afastado
Completamente Operacional	333	>10000
Operacional	1334	>10000
Salvaguarda de Vida	>10000	>10000
Próximo do Colapso	>10000	>10000

**Matriz de desempenho sísmico**

A matriz de desempenho sísmico, que descreve o comportamento da estrutura relativamente aos níveis e objetivos de desempenho definidos, é apresentada abaixo.



### **Conclusão**

A análise aqui desenvolvida é baseada em peças desenhadas do projeto de estruturas do edifício que foi disponibilizado pela CML.

Verificou-se o comportamento da estrutura do edifício principal da escola, com estrutura em betão armado com laje fungiforme aligeirada, é satisfatório para os níveis e objetivos de desempenho sísmico definidos.

Com efeito, para sismos com probabilidade de ocorrência igual ou superior a 50% em 50 anos a estrutura encontra-se num nível de desempenho *completamente* operacional, respeitando os objetivos de desempenho estabelecidos. Além disso, para sismos com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 10% em 50 anos, a estrutura encontra-se num nível de desempenho *operacional*, respeitando os objetivos de desempenho estabelecidos.

Não é verosímil que a estrutura se encontre próxima do colapso para nenhum destes níveis de intensidade da ação sísmica e o seu nível de operacionalidade pós-sismo estima-se que seja satisfatório.



# Escola Secundária José Gomes Ferreira

ID Escola: 27

Escola	Agrupamento	Área coberta
Escola Secundária José Gomes Ferreira	Benfica	9028 m <sup>2</sup>

Nível de ensino	Número de alunos
Secundário + 3º ciclo	1000 alunos

### Descrição geral

A escola localiza-se em Benfica, com entrada pela Rua Professor José Sebastião e Silva, e possui 6 edifícios independentes: 5 blocos (A a E) e 1 edifício que alberga o ginásio e o refeitório. O terreno da escola é grande, existindo muito espaço não construído e suficientemente afastado de qualquer construção para garantir, dentro da própria área da escola, pontos seguros para evacuação e encontro em caso de ocorrência de evento sísmico. Além disso, não existem edifícios junto aos limites do terreno, não existindo, portanto, a possibilidade de interação sísmica com outras estruturas.

Os vários blocos que compõem a escola estão afastados, funcionando de forma independente. Não obstante, entre os blocos que compõem a escola formam-se estreitos corredores (ver figura ao lado) que poderão constituir-se como locais críticos em caso de evento sísmico, pelas razões que se descrevem abaixo, na secção "Caracterização Estrutural".



Imagem aérea do Google Earth

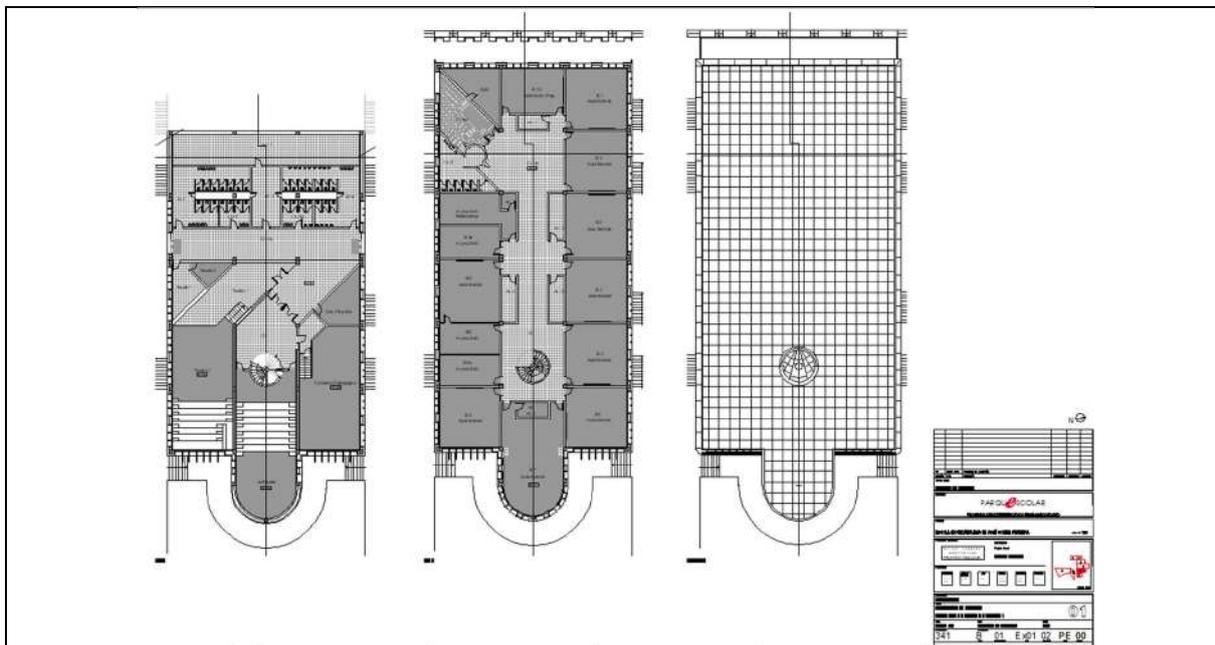


Corredor entre os blocos A e B

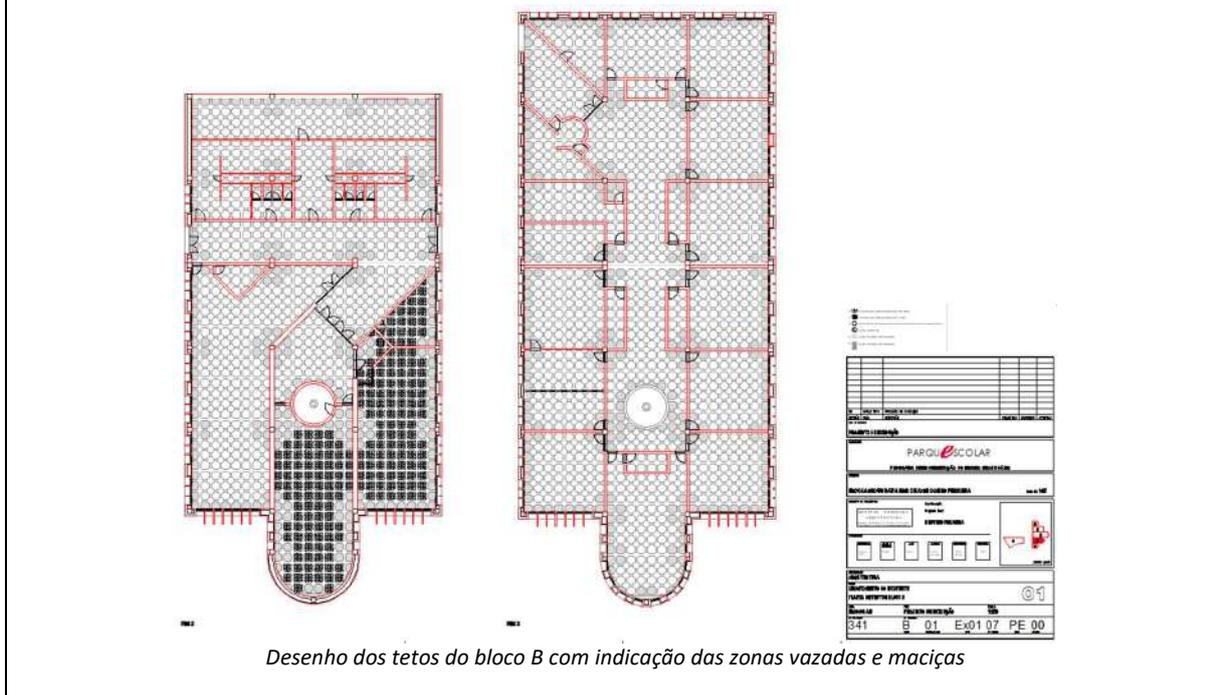
### Informação de base

Foram disponibilizados desenhos de levantamento arquitetónico, fornecidos pela CML, nomeadamente plantas, cortes e alçados. O conjunto de desenhos inclui também desenhos dos tetos, com indicação dos blocos de laje vazada e das zonas maciças (capitéis dos pilares). No caso desta escola, o *Atlas of School Architecture in Portugal* não contém nenhuma informação adicional relativamente aos desenhos de levantamento arquitetónico disponibilizados.

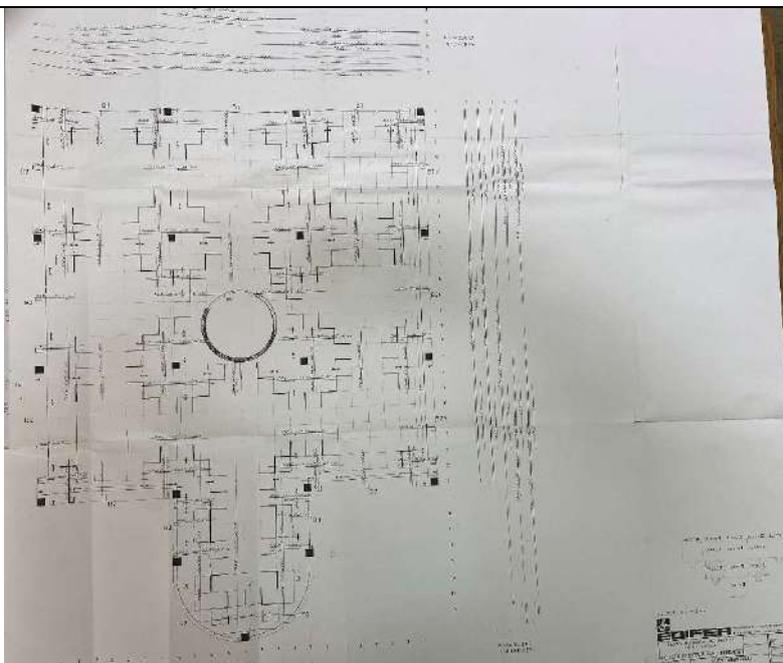
O Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas do LNEC realizou uma visita à escola, na qual foi possível recolher informação adicional através de desenhos de estruturas que constam do arquivo da escola e também através de inspeção visual à estrutura.



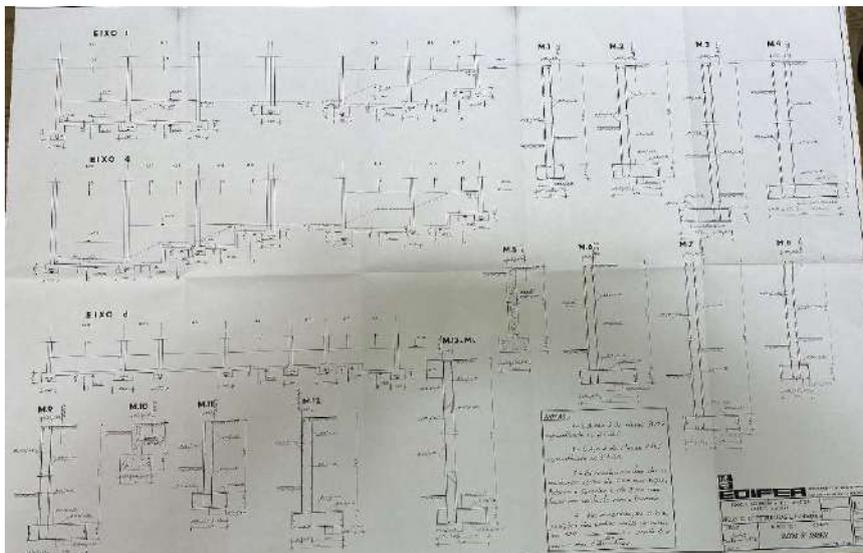
Plantas do bloco B com indicação dos pilares e juntas de dilatação



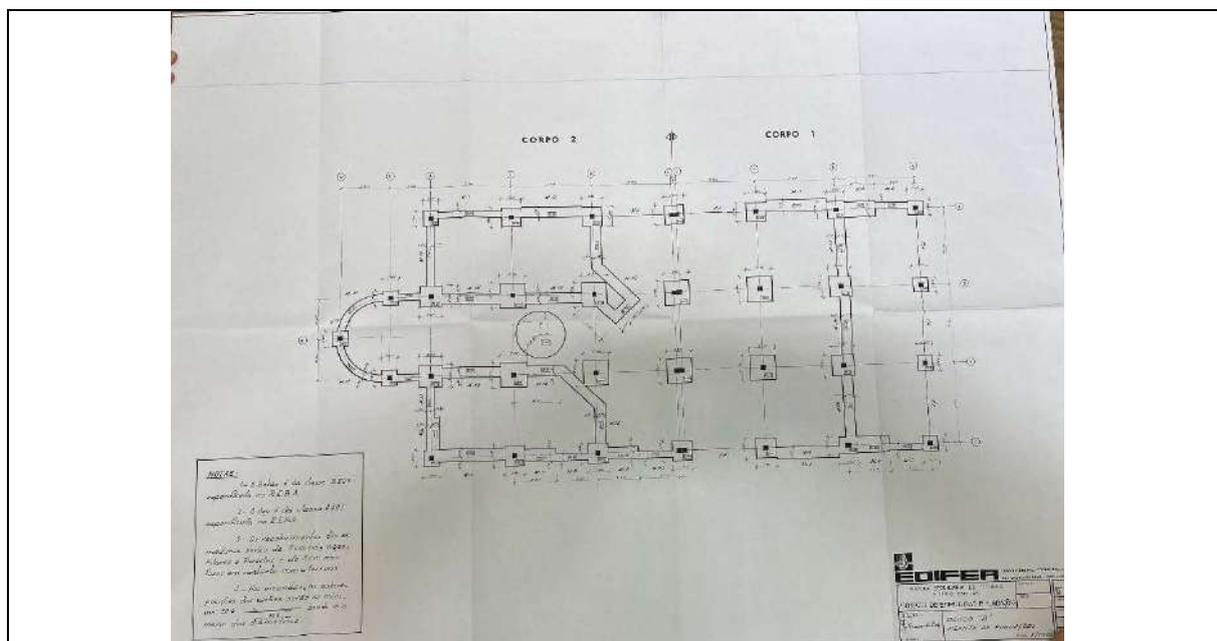
Desenho dos tetos do bloco B com indicação das zonas vazadas e maciças



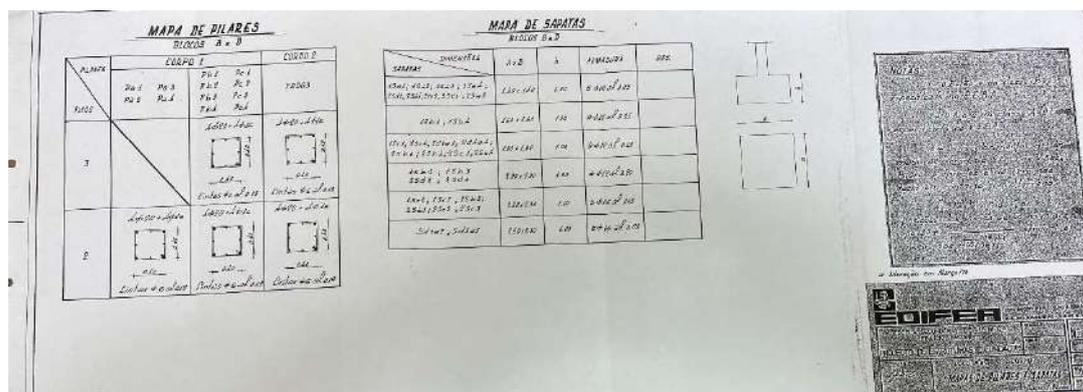
*Desenho de armaduras inferiores das lajes dos blocos B e D*



*Desenho de betão armado dos muros de contenção*



Planta de fundações do bloco B



Mapa de pilares e sapatas

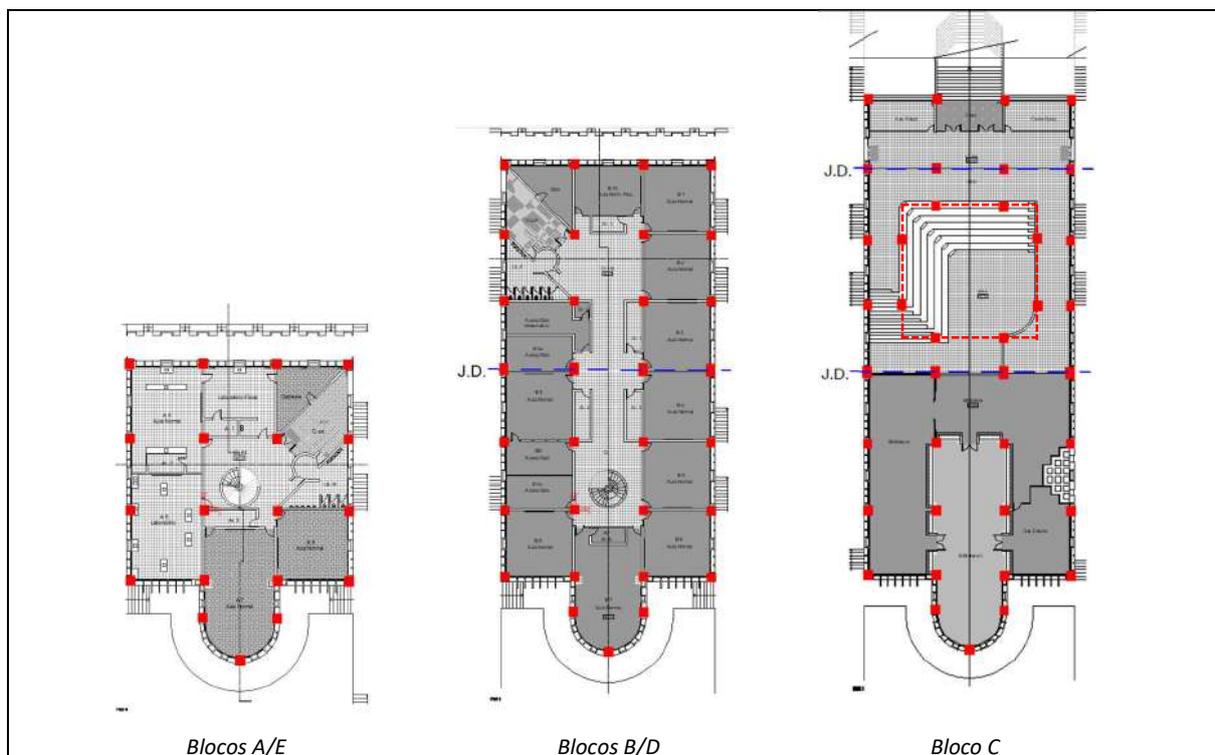
**Caracterização estrutural**

Os blocos que constituem a escola são caracterizados por uma estrutura em betão armado, semelhante à tipologia das escolas “3x3”. Com efeito, os blocos são caracterizados por três vãos nas duas direções (“3x3”) e quatro pilares ao centro (ver figuras abaixo). Na direção longitudinal, a cada três vãos existe uma junta de dilatação, com duplicação dos pilares.

Ao contrário da tipologia “3x3”, os vãos interiores (que incluem os pilares centrais) são iguais aos vãos exteriores (na tipologia “3x3” os vãos exteriores correspondem a metade dos vãos interiores).

A laje de todos os blocos é uma laje fungiforme aligeirada com zonas maciças (capitéis) na zona dos pilares.

Os blocos que constituem a escola são caracterizados nas figuras seguintes no que concerne à posição dos pilares que constituem a estrutura de betão armado e às juntas de dilatação.



Como se pode verificar pela figura acima, os blocos apresentam uma malha de pilares regular, à exceção do corpo intermédio do bloco C que, devido à necessidade de aumentar os vãos centrais, passa a conter 8 pilares centrais. Estes 8 pilares são unidos por uma viga, representada a vermelho na figura acima, com secção transversal de 0.50x1.15 [mxm]. As dimensões dos pilares são indicadas na tabela seguinte.

Bloco	Pilares centrais [mxm]	Pilares exteriores [mxm]
A/B/D/E	0.40x0.40	0.40x0.40
C	0.50x0.50	0.40x0.40

Relativamente às lajes, a altura total é de 42.5cm, que corresponde a 32.5cm de altura dos vazios e 10.0cm de altura da lâmina superior de betão. Cada vazio tem uma largura de 83.5cm. Entre vazios as nervuras (zonas maciças de betão armado) têm uma largura de 13.0cm. Como tal, a distância entre o centro de cada duas nervuras é de 90.0cm.

As escadas são constituídas por uma parede circular com 21cm de espessura.

Os materiais indicados nos desenhos de estruturas consultados na visita à escola são adotados nesta análise, em particular um betão B225 e um aço A40T, especificados no R.E.B.A.

Na visita à escola foi possível observar algumas patologias estruturais que, pese embora não integradas no presente estudo, importa referir e analisar futuramente. De entre as patologias identificadas são de destacar os problemas associados a infiltrações e humidades nos elementos de betão armado, que se evidenciam pelo aparecimento de bolores e corrosão de armaduras que são já visíveis em algumas zonas (ver figuras abaixo). Com efeito, os problemas de humidade são generalizados nos vários blocos que compõem a escola.

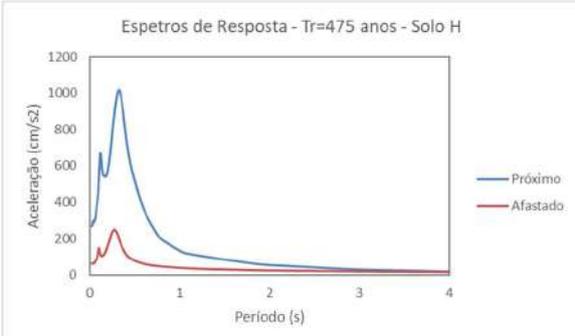


*Zonas com degradação visível nas lajes provocadas por corrosão nas armaduras: armaduras expostas nas nervuras (esq.);  
destacamento na zona maciça junto a um pilar (dir.)*

Outra questão que importa referir está relacionada com o sistema de revestimento das fachadas. Este sistema é constituído por painéis de betão pré-fabricados, justapostos e fixos à base através de um sistema de fixação, previsivelmente metálico. A análise deste sistema não-estrutural não faz parte do presente estudo. No entanto, a análise do comportamento sísmico deste sistema de revestimento que, no caso de colapsar totalmente ou em parte, pode provocar sérios danos materiais e humanos, é muito importante numa futura intervenção na escola. No imediato, é recomendação do LNEC que as rotas de evacuação em caso de evento sísmico não incluam os corredores entre edifícios devido à possibilidade de queda destes painéis de revestimento.



*Sistema de revestimento das fachadas dos blocos da escola com recurso a painéis de betão pré-fabricados*

<p><b>Caracterização geotécnica</b></p>	
<p>Com base na carta de solos de que o LNEC dispõe (Ver relatório), a ES José Gomes Ferreira encontra-se fundada em solo do tipo H, pelo que se considera a amplificação da ação calculada ao nível do substrato rochoso com base na coluna de solo respetiva (coluna H). Os espectros de resposta, que resultam de um estudo probabilístico de perigosidade sísmica desenvolvido especificamente no âmbito deste projeto, associados a um período de retorno de 475 anos, encontram-se na figura à direita.</p>	

<p><b>Modelo numérico</b></p>											
<p>O modelo de cálculo, desenvolvido no programa SeismoStruct, é composto por elementos de barra (<i>frame</i>) de plasticidade distribuída com formulação em força. Cada secção destes elementos é definida através de fibras com comportamento uniaxial, associadas a aço ou a betão. Os elementos finitos são definidos tendo em consideração as dimensões acima apresentadas e as armaduras indicadas nos desenhos de estruturas que constam do arquivo da escola. Assim, as armaduras dos pilares são:</p>											
<table border="1"> <tr> <td>Arm. Long; Arm. Transv.</td> <td><b>Centrais (0.40x0.40)</b></td> <td><b>Centrais (0.50x0.50)</b></td> <td><b>Perímetro</b></td> </tr> <tr> <td><b>Todos os pisos</b></td> <td>4Φ20+4Φ16; Φ6//0.20</td> <td>4Φ20+8Φ16; Φ6//0.20</td> <td>4Φ20+4Φ16; Φ6//0.20</td> </tr> </table>	Arm. Long; Arm. Transv.	<b>Centrais (0.40x0.40)</b>	<b>Centrais (0.50x0.50)</b>	<b>Perímetro</b>	<b>Todos os pisos</b>	4Φ20+4Φ16; Φ6//0.20	4Φ20+8Φ16; Φ6//0.20	4Φ20+4Φ16; Φ6//0.20			
Arm. Long; Arm. Transv.	<b>Centrais (0.40x0.40)</b>	<b>Centrais (0.50x0.50)</b>	<b>Perímetro</b>								
<b>Todos os pisos</b>	4Φ20+4Φ16; Φ6//0.20	4Φ20+8Φ16; Φ6//0.20	4Φ20+4Φ16; Φ6//0.20								
<p>A lâmina maciça das lajes é armada com varões Φ10//0.20 em ambas as direções, enquanto que as nervuras têm armadura de 2Φ12 junto à face inferior. As zonas de capitel, com espessura igual à espessura total da laje, estão armadas com varões Φ16//0.20 em ambas as direções.</p>											
<p>As lajes fungiformes aligeiradas foram modeladas, no SeismoStruct, com elementos distintos na zona corrente e nas zonas maciças (em redor dos elementos verticais e junto à bordadura. A secção maciça, com 0.425m de espessura e a secção aligeirada com uma espessura de membrana <math>t_m=0,142m</math>, que corresponde à área de secção transversal equivalente num metro de laje fungiforme, e uma espessura para a flexão de <math>t_f=0,245m</math>, correspondente à inércia de um metro linear de laje. A rigidez da laje, assim como a carga a esta aplicada, é distribuída pela malha de “vigas fictícias” que une os pilares, criando assim uma estrutura reticulada equivalente com pilares e vigas em “T”, o que é feito de forma automática pelo programa de cálculo.</p>											
<p>As fibras uniaxiais que definem o comportamento do betão são definidas através do modelo de <i>Mander et al.</i>, enquanto que as fibras de aço são definidas através do modelo de comportamento de <i>Menegotto-Pinto</i>.</p>											
<p>Consideram-se as bases dos pilares com restrições aos deslocamentos e às rotações, simulando assim uma fundação rígida, o que constitui uma simplificação que se considera aceitável face à planta de fundações que se obteve.</p>											
<p>Relativamente às cargas atuantes, adotaram-se as cargas definidas de acordo com a norma portuguesa em vigor (NP EN1991-1-1), para o tipo de edifício em questão. Assim, as cargas permanentes e sobrecargas a considerar na análise são:</p>											

Carga	1º Piso	Cobertura
Pavimento (RCP)	1.5 kN/m <sup>2</sup>	2.5 kN/m <sup>2</sup>
Paredes (RCP)	Divisórias: 1.75 kN/m <sup>2</sup> (aplicada na laje do 1º piso) Exteriores: 7.8 kN/m (aplicada nas vigas exteriores do 1º piso)	-
Sobrecarga	Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>	Cobertura acessível: Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>

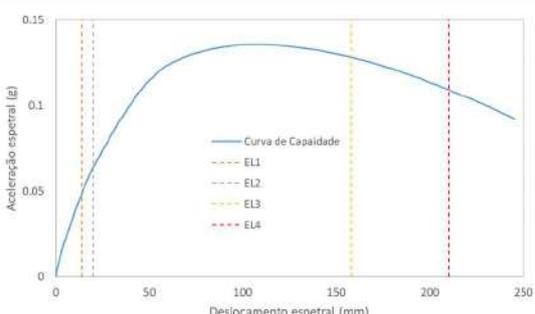
Tendo em consideração a caracterização estrutural, procede-se à análise de um dos blocos que constituem os edifícios da escola. Dada a regularidade estrutural e o comportamento dinâmico expectável, a análise de um dos blocos é considerada representativa e suficientemente detalhada para se poder caracterizar a resposta sísmica dos vários edifícios e, conseqüentemente da escola na sua globalidade. Desta forma, após a aplicação das cargas gravíticas é executada uma análise estática não-linear com controlo de deslocamentos (*pushover*) de um dos pórticos que constituem o “bloco tipo” da escola.

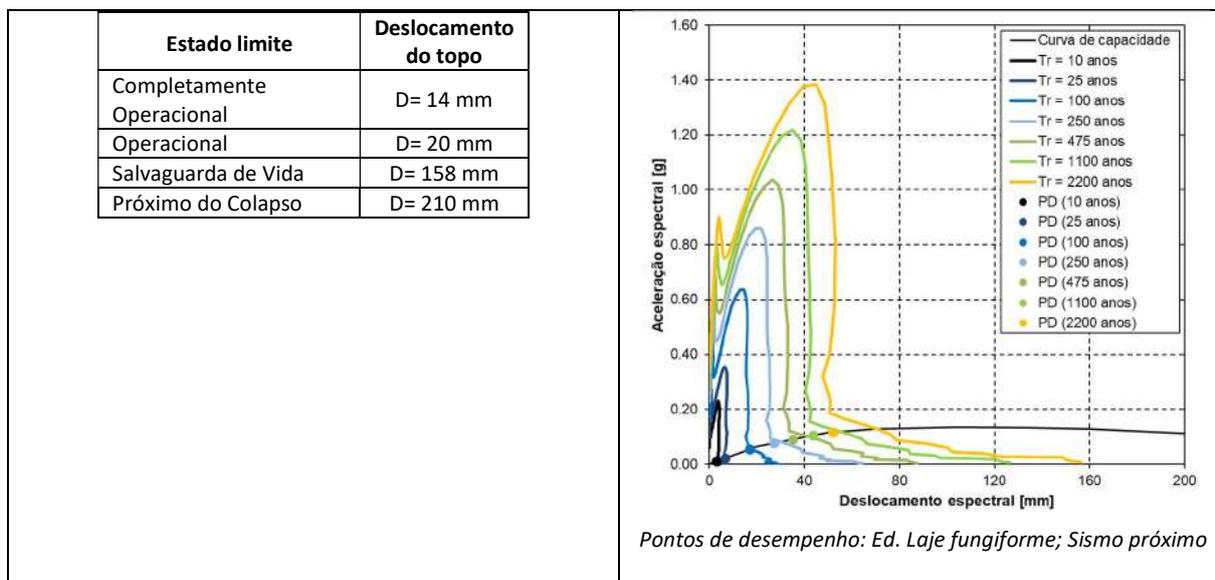


Modelo numérico do bloco tipo da escola no programa SeismoStruct

Os períodos de vibração da estrutura, obtidos através do modelo numérico, são:

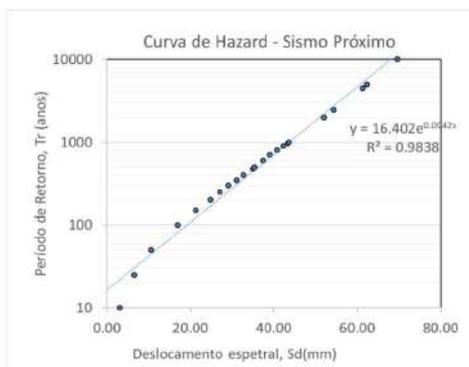
Períodos de vibração	
1º modo (X)	0.73 s
2º modo (Y)	0.73 s
3º modo (Torção)	0.68 s

Curva de capacidade	Pontos de desempenho
 <p>Os estados limite de cada um dos edifícios encontram-se descritos, em termos de deslocamento do topo na seguinte tabela:</p>	<p>Determinação dos pontos de desempenho através do método do espectro de capacidade, para os sismos próximo e afastado e 25 períodos de retorno distintos. Nas figuras abaixo apresentam-se apenas 7 dos 25 espectros de resposta considerados, para o sismo próximo.</p>



**Curva de Hazard e períodos de retorno**

A curva de hazard, para sismo próximo pode assim ser determinada sendo apresentada de seguida.



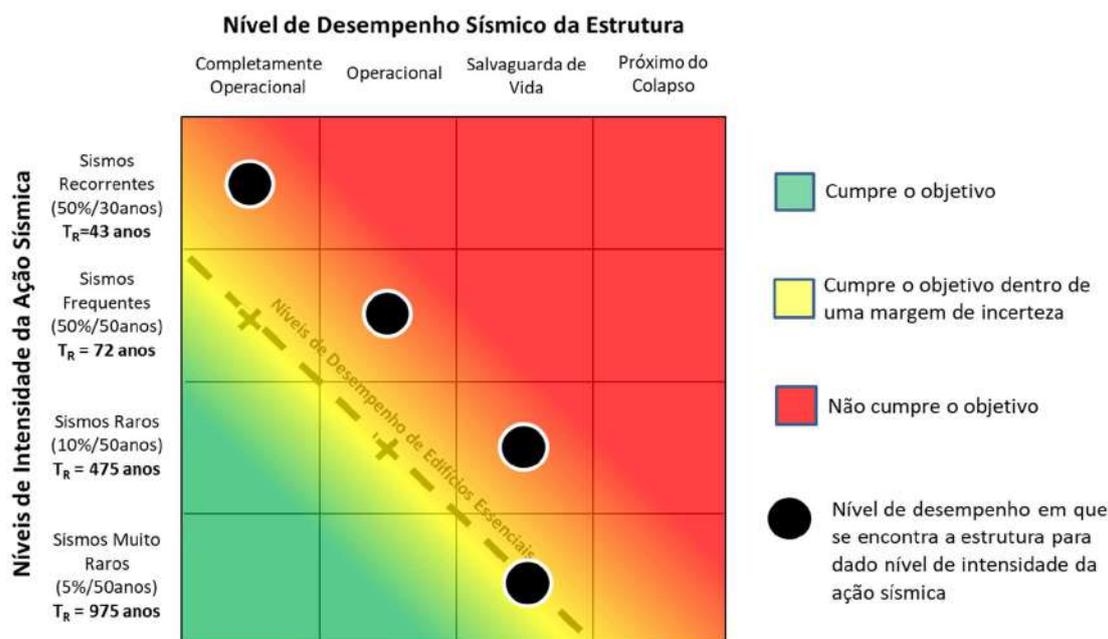
Curva de Hazard: Sismo próximo

Os períodos de retorno associados aos estados limite definidos são:

		Período de retorno	Sismo Próximo	Sismo Afastado
Estado limite	Completamente Operacional		61	1697
	Operacional		105	>10000
	Salvaguarda de Vida		>10000	>10000
	Próximo do Colapso		>10000	>10000

### Matriz de desempenho sísmico

A matriz de desempenho sísmico, que descreve o comportamento da estrutura de cada um dos edifícios que constituem a escola relativamente aos níveis e objetivos de desempenho definidos, é apresentada abaixo.



### Conclusão

Verifica-se que o comportamento da estrutura dos edifícios que constituem a escola (edifício porticado em betão armado com laje fungiforme aligeirada) relativamente aos níveis e objetivos de desempenho sísmico definidos é satisfatório para sismos muito raros (com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 5% em 50 anos). No entanto, o comportamento sísmico é insatisfatório para sismos com probabilidade de ocorrência igual ou superior a 5% em 50 anos, tal como se pode observar pela matriz de desempenho que se apresenta acima.

Com efeito, verifica-se que para um sismo com probabilidade de ocorrência de 50% em 50 anos a estrutura se encontra num nível de desempenho *operacional*, quando seria expectável que se encontrasse num nível de desempenho *completamente operacional*. Além disso, para um sismo com probabilidade de ocorrência de 10% em 50 anos a estrutura encontra-se num nível de desempenho *salvaguarda de vida*, quando seria expectável que se encontrasse num nível de desempenho *operacional*. Desta forma, não são respeitados os objetivos de desempenho estabelecidos para estes níveis de intensidade da ação sísmica. Não obstante, para o nível de intensidade mais elevado que é considerado (i.e., sismos muito raros com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 5% em 50 anos) a estrutura encontra-se no nível de desempenho *salvaguarda de vida*, o que é satisfatório para este tipo de edifícios.

Verifica-se também que não é verosímil que a estrutura se encontre próxima do colapso para nenhum destes níveis de intensidade da ação sísmica.

Salienta-se, ainda assim, que o comportamento sísmico da estrutura seria satisfatório caso se tratasse de uma estrutura corrente. Nesse caso a linha tracejada dos objetivos de desempenho encontrar-se-ia na diagonal principal da matriz. No entanto, a sua classificação como edifício essencial implica que objetivos de desempenho mais exigentes sejam considerados nesta análise.

Tendo por base estas conclusões, é recomendado que a estrutura seja reforçada, nomeadamente no que diz respeito a elementos não estruturais que podem ser afetados por sismos de intensidade moderada a baixa, e que podem limitar a sua operacionalidade e causar perdas económicas elevadas.



# Escola Básica Marvila

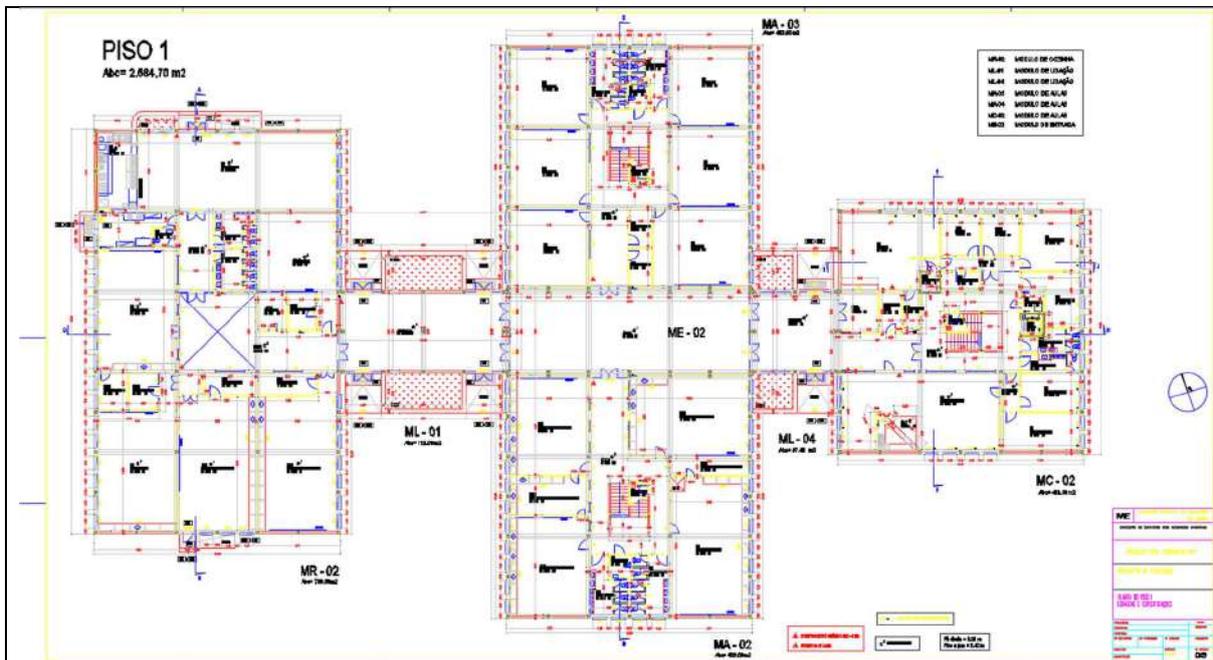
ID Escola: 30

Escola	Agrupamento	Área coberta
Escola Básica Marvila	D. Dinis	2810 m <sup>2</sup>

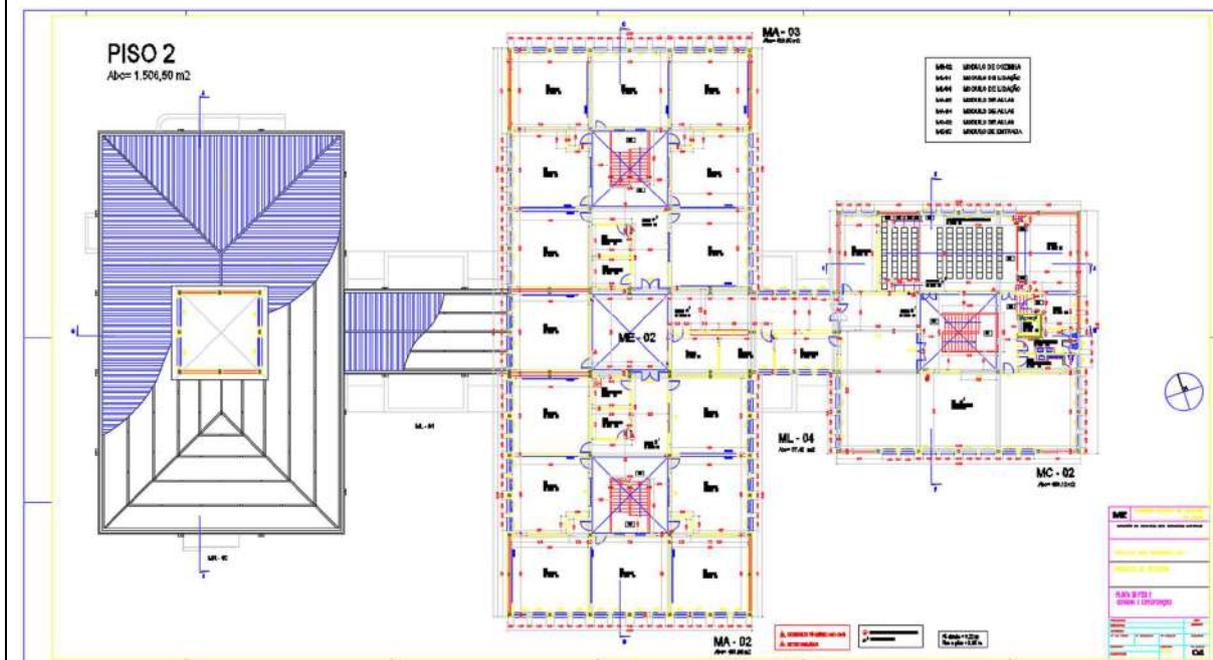
Nível de ensino	Número de alunos
Básico com 2º e 3º ciclos	330 alunos

Descrição geral	
<p>A escola localiza-se na freguesia de Marvila, com acessos largos e sem presença de outras estruturas junto aos limites do seu terreno, não existindo, portanto, a possibilidade de interação sísmica com outras estruturas.</p> <p>Existe espaço, dentro da escola e nas imediações, para evacuação e encontro em caso de ocorrência de evento sísmico.</p>	 <p><i>Imagem aérea do Google Earth</i></p>

Informação de base
<p>Estão apenas disponíveis desenhos de levantamento arquitetónico fornecidos pela CML, que resultam do projeto tipo das escolas de pavilhões “COMPACTO_24T”. Não foram realizadas alterações ao levantamento fornecido, apesar de se considerar nesta análise a informação acrescida recolhida após a inspeção visual levada a cabo pelo Departamento de Edifícios do LNEC. Foram também consideradas informações relativas a outras escolas com semelhante tipologia, tal como é o caso da EB Olivais, que dispõe de alguns desenhos de engenharia no <i>Atlas of Scholl Architecture in Portugal</i>, os quais foram considerados no desenvolvimento desta análise.</p>



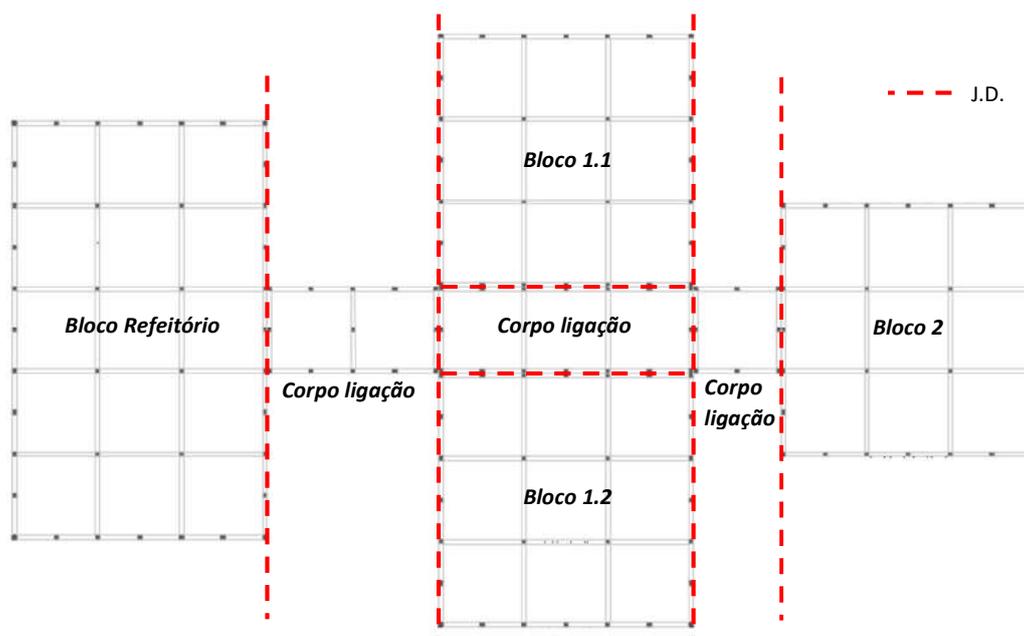
Levantamento arquitetónico do bloco tipo "C24T" – Piso 1



Levantamento arquitetónico do bloco tipo "C24T" – Piso 2

### Caracterização estrutural

Escola tipo “COMPACTO 24T” (“C24T”), com estrutura porticada em betão armado. Os blocos têm várias juntas de dilatação que os separam os corpos semelhantes aos blocos “3x3” unidos por pórticos com apenas um vão (ver figura abaixo). A exceção é o corpo do refeitório, que tem apenas 1 piso, e é mais comprido (tem mais dois vãos, i.e. mais um alinhamento de pilares interiores) que o bloco de “3x3”.



Planta com identificação das juntas de dilatação e dos pilares

Os blocos tipo “3x3” têm quatro pilares ao centro, definindo três vãos nas duas direções. No perímetro os vãos têm metade do comprimento, relativamente aos alinhamentos interiores. Existem vigas de bordadura em todo o perímetro dos blocos e quatro vigas que passam nos quatro pilares interiores. As lajes são maciças com 15.0cm de espessura.

Não existem informações sobre o projeto de estruturas do edifício principal da escola que permita recolher dados sobre o seu dimensionamento da escola, nomeadamente no que diz respeito a ações consideradas, dimensões de elementos estruturais, armaduras colocadas, entre outros pormenores construtivos. Assim sendo, a análise aqui desenvolvida é baseada nos projetos de outras escolas de tipologias e época construtiva semelhante, como é o caso da tipologia “Vale Rosal”, assim como no dimensionamento do edifício de ginásio. Assim, considera-se:

- Materiais: B25(C25/30) + A400
- Dimensões dos elementos estruturais:
  - Pilares: 0.35x0.35 [mxm] (contínuos em altura)
  - Vigas interiores: 0.35x0.65 [mxm]
  - Vigas bordadura: 0.35x0.40 [mxm]
  - Laje maciça: 0.15m

É de salientar que, na ausência de informação sobre o projeto de estruturas da escola, que permita recolher dados sobre o seu dimensionamento, nomeadamente no que diz respeito a dimensões de elementos estruturais, armaduras colocadas, entre outros pormenores construtivos, estes resultados devem ser encarados como indicadores do comportamento expectável e não como uma avaliação detalhada do comportamento sísmico da estrutura.

Caracterização geotécnica	
<p>Com base na carta de solos de que o LNEC dispõe (ver relatório), a EB Marvila encontra-se fundada em solo do tipo I, pelo que se considera a amplificação da ação calculada ao nível do substrato rochoso com base na coluna de solo respetiva (coluna I). Os espectros de resposta, que resultam de um estudo probabilístico de perigosidade sísmica desenvolvido especificamente no âmbito deste projeto, associados a um período de retorno de 475 anos, encontram-se na figura à direita.</p>	

Modelo numérico			
<p>O modelo de cálculo, desenvolvido no programa SeismoStruct, é composto por elementos de barra (<i>frame</i>) de plasticidade distribuída com formulação em força. Cada secção destes elementos é definida através de fibras com comportamento uniaxial, associadas a aço ou a betão. Os elementos finitos são definidos tendo em consideração as dimensões acima apresentadas e as armaduras que foram sistematizadas com base no projeto de execução da tipologia “Vale Rosal” e adaptados tendo em consideração os desenhos de pormenor do edifício do ginásio da EB Olivais, cuja tipologia é semelhante à desta escola. As armaduras dos pilares são:</p>			
Arm. Long; Arm. Transv.		Centrais	
1º piso		8Φ16; Φ6//0.15	
2º Piso		8Φ16; Φ6//0.20	
Relativamente às vigas, as armaduras são:			
Arm. Long; Arm. Transv.	Local	Extremidades/ Sob pilares interiores	Meio-vão
Todos os pisos		inf 4Φ12; sup 2Φ16+3Φ12; Φ6//0.10	inf 4Φ16+3Φ12; sup 3Φ12; Φ6//0.20
		inf 4Φ12; sup 4Φ12; Φ6//0.20	inf 4Φ12; sup 4Φ12; Φ6//0.20
<p>As lajes maciças são armadas com Φ8//0.10 junto à face inferior, em ambas as direções, e com Φ8//0.15 junto à face superior, em ambas as direções. As cargas atuantes nas lajes são automaticamente distribuídas pela malha de vigas, enquanto que a sua rigidez é simulada através do</p>			

cálculo da largura efetiva do banzo das vigas em “T”, o que é feito também de forma automática pelo programa de cálculo.

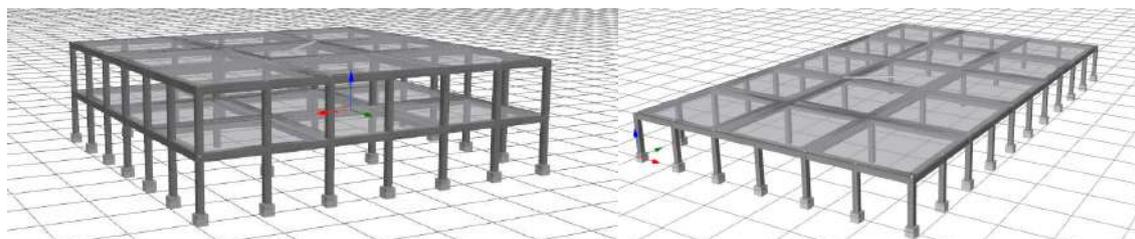
As fibras uniaxiais que definem o comportamento do betão são definidas através do modelo de *Mander et al.*, enquanto que as fibras de aço são definidas através do modelo de comportamento de *Menegotto-Pinto*.

Consideram-se as bases dos pilares com restrições aos deslocamentos e às rotações.

Relativamente às cargas atuantes, adotaram-se as cargas definidas de acordo com a norma portuguesa em vigor (NP EN1991-1-1), para o tipo de edifício em questão. Assim, as cargas permanentes e sobrecargas a considerar na análise são:

Carga	1º Piso	Cobertura
Pavimento (RCP)	1.5 kN/m <sup>2</sup>	2.5 kN/m <sup>2</sup>
Paredes (RCP)	Divisórias: 1.75 kN/m <sup>2</sup> (aplicada na laje do 1º piso) Exteriores: 7.8 kN/m (aplicada nas vigas exteriores do 1º piso)	-
Sobrecarga	Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>	Cobertura não acessível: 0.4 kN/m <sup>2</sup>

Após a aplicação das cargas gravíticas é executada uma análise estática não-linear com controlo de deslocamentos (*pushover*).

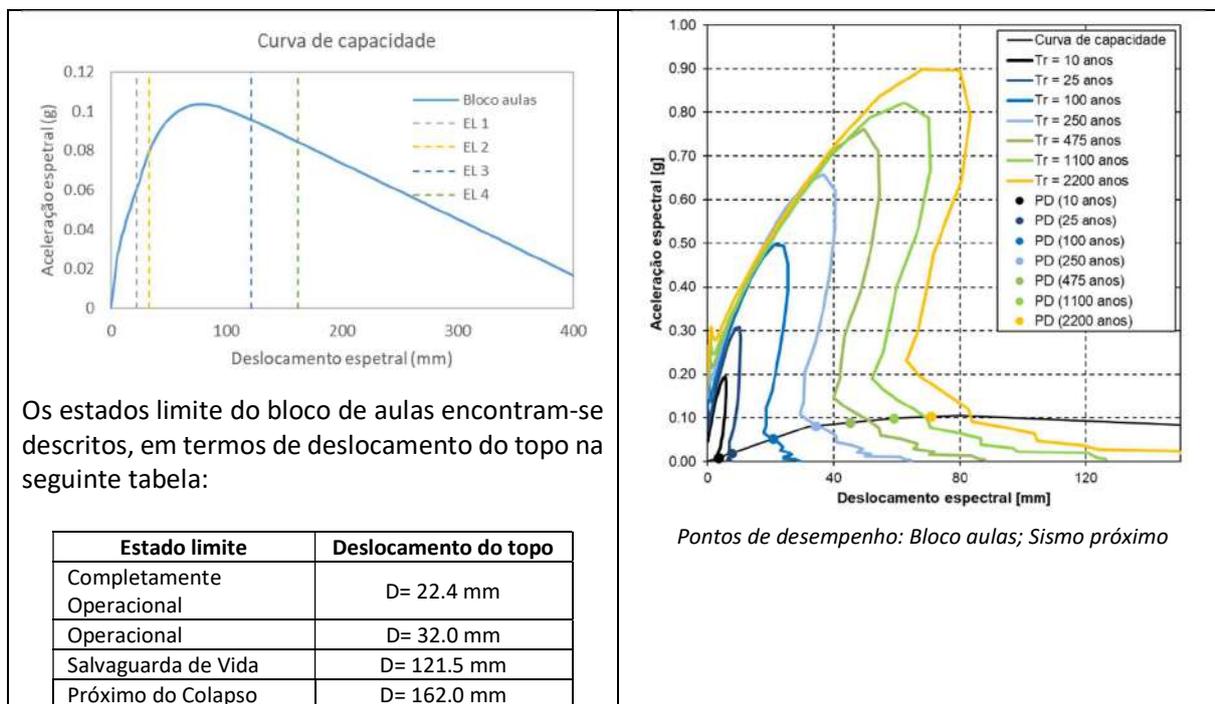


Modelo numérico do bloco tipo da escola no programa SeismoStruct: bloco de aulas (esq.); bloco de refeitório (dir.)

Os períodos de vibração da estrutura, obtidos através do modelo numérico, são:

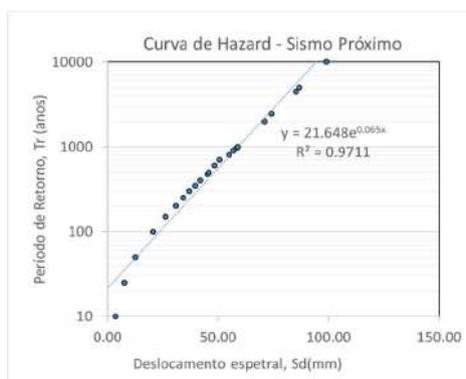
Períodos de vibração	Bloco aulas	Bloco refeitório
1º modo (X)	0.44 s	0.27 s
2º modo (Y)	0.44 s	0.26 s
3º modo (Torção)	0.36 s	0.21 s

Curva de capacidade	Pontos de desempenho
A curva de capacidade do bloco de aulas encontra-se representada abaixo. O bloco do refeitório por não ser condicionante, devido ao facto de ter apenas 1 piso e, conseqüentemente, menos massa, não é considerado na análise subsequente.	Determinação dos pontos de desempenho através do método do espectro de capacidade, para os sismos próximo e afastado e 25 períodos de retorno distintos. Nas figuras abaixo apresentam-se apenas 7 dos 25 espectros de resposta considerados, para sismo próximo.



### Curva de Hazard e períodos de retorno

A curva de hazard, para sismo próximo (condicionante), é a que se apresenta de seguida.

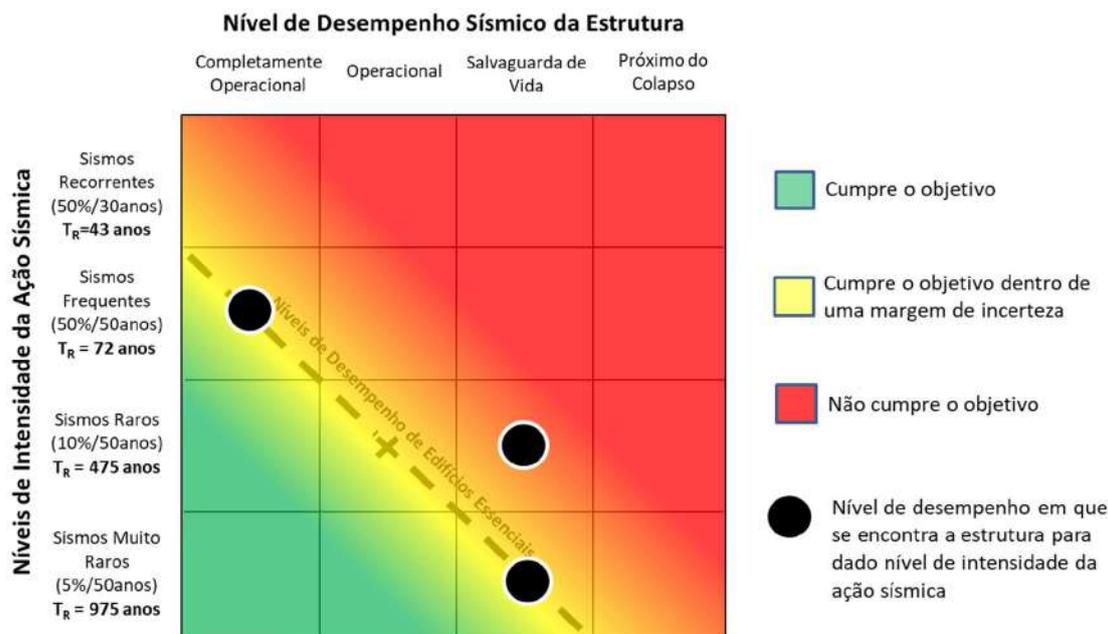


Os períodos de retorno associados aos estados limite definidos são:

Estado limite	Período de retorno	Sismo Próximo	Sismo Afastado
	Completamente Operacional	93	9198
Operacional	173	>10000	
Salvaguarda de Vida	>10000	>10000	
Próximo do Colapso	>10000	>10000	

### Matriz de desempenho sísmico

A matriz de desempenho sísmico, que descreve o comportamento da estrutura de cada um dos blocos que constituem a escola relativamente aos níveis e objetivos de desempenho definidos, é apresentada abaixo.



### Conclusão

Verifica-se que o comportamento da estrutura do edifício principal da escola (edifício com estrutura porticada de betão armado e laje vigada) relativamente aos níveis e objetivos de desempenho sísmico definidos é satisfatório para sismos frequentes e muitos raros. No entanto, para um patamar intermédio correspondente a sismos raros, o edifício regista um nível de dano acima do expectável para o nível de desempenho associado a edifícios essenciais.

Com efeito, verifica-se que para um sismo com probabilidade de ocorrência iguais ou superiores a 50% em 50 anos (*sismos frequentes e recorrentes*) a estrutura se encontra num nível de desempenho *completamente operacional*, respeitando assim o objetivo de desempenho estabelecido para este tipo de edifícios. Além disso, para um sismo com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a de 5% em 50 anos (*sismos muito raros*) a estrutura encontra-se num nível de desempenho *salvaguarda de vida*, pelo que respeita o nível de desempenho admissível para este nível de intensidade sísmica. No entanto, para níveis de intensidade sísmica entre os dois patamares acima referidos, a estrutura encontra-se num nível de desempenho *salvaguarda de vida*, o que não respeita os objetivos de desempenho definidos para este nível de intensidade sísmica e que corresponde ao nível de desempenho *operacional*.

Desta forma, é expectável que para sismos com período de retorno de aproximadamente 475 anos, existam danos significativos na estrutura que impeçam a sua operacionalidade pós-sismo. Não obstante, conclui-se que para este tipo de edifícios não é verosímil que a estrutura se encontre próxima do colapso para nenhum destes níveis de intensidade da ação sísmica.



# Escola Básica Damião de Góis

ID Escola: 36

Escola	Agrupamento	Área coberta
Escola Básica Damião de Góis	D. Dinis	4800 m <sup>2</sup>

Nível de ensino	Número de alunos
Básico com 2º e 3º ciclos	365 alunos

Descrição geral
<p>A escola localiza-se na freguesia de Marvila, em zona predominantemente residencial, com entrada pela Rua Cassiano Branco. Os vários blocos com compõem a escola estão separados, pelo que a sua resposta sísmica é independente. Existe um telheiro que faz a ligação entre os vários blocos.</p> <p>Os edifícios mais próximos da escola encontram-se suficientemente distantes para que se não se considere a possibilidade de interação sísmica com estas estruturas. Não obstante, a zona da entrada da escola encontra-se muito próxima de dois edifícios com 7 pisos. No caso de ocorrência de evento sísmico é de evitar a circulação junto de fachadas de edifícios altos ou varandas, pelo que se recomenda que o planeamento de emergência contemple uma zona de evacuação e ponto de encontro dentro dos limites da escola, existindo espaço suficiente para tal, nomeadamente na zona do campo de jogos.</p>

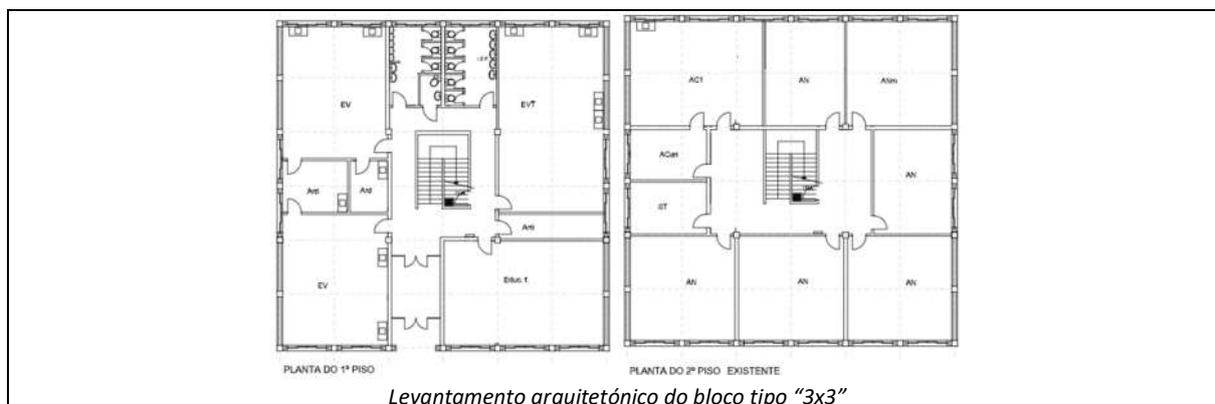


Imagem aérea do Google Earth



Zona da entrada da escola

Informação de base
<p>Estão apenas disponíveis desenhos de levantamento arquitetónico fornecidos pela CML, que resultam do projeto tipo das escolas de pavilhões “3x3”. Não foram realizadas alterações ao levantamento fornecido, apesar de se considerar nesta análise a informação acrescida recolhida após a inspeção visual levada a cabo pelo Departamento de Edifícios do LNEC.</p>



### Caracterização estrutural

Escola tipo “3x3”, com estrutura porticada em betão armado. Os blocos têm quatro pilares ao centro, definindo três vãos (“3x3”) nas duas direções. No perímetro os vãos têm metade do comprimento, relativamente aos alinhamentos interiores. A escola é constituída por 4 blocos: 3 blocos de aulas com 2 pisos, um bloco refeitório com apenas 1 piso e um pavilhão gimnodesportivo com balneários integrados. Os blocos de aulas possuem lajes vigadas (ver fotografia abaixo).



Fotografia da zona de biblioteca com viga aparente no alinhamento central do bloco

Não há informação sobre o projeto de estruturas da escola que permita recolher dados sobre o seu dimensionamento da escola, nomeadamente no que diz respeito a materiais, ações consideradas, dimensões de elementos estruturais, armaduras colocadas, entre outros pormenores construtivos. Assim, a análise aqui desenvolvida é baseada naquilo que se presume ser a prática construtiva e os materiais da época de construção da escola. Com efeito, assumem-se materiais e restantes características da estrutura de acordo com outras escolas de tipologias e época construtiva semelhante, como é o caso da tipologia “Vale Rosal”. Assim, considera-se:

- Materiais: B25(C25/30) + A400
- Dimensões dos elementos estruturais:
  - Pilares: 0.35x0.35 [mxm] (contínuos em altura)

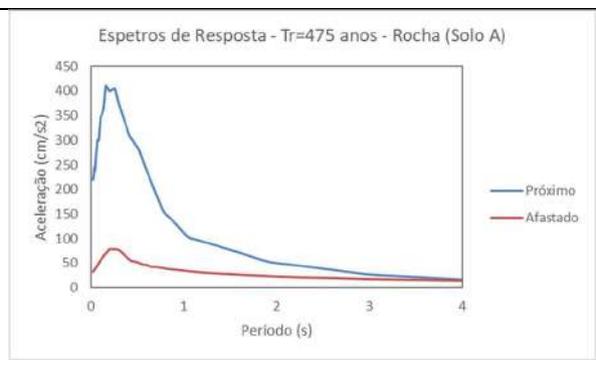
- Laje vigada:

- Laje maciça: 15.0cm
- Vigas interiores: 0.35x0.65 [mxm]
- Vigas perímetro: 0.35x0.40 [mxm]

É de salientar que, na ausência de informação sobre o projeto de estruturas da escola, que permita recolher dados sobre o seu dimensionamento, nomeadamente no que diz respeito a materiais, ações consideradas, dimensões de elementos estruturais, armaduras colocadas, entre outros pormenores construtivos, estes resultados devem ser encarados como indicadores do comportamento expectável e não como uma avaliação detalhada do comportamento sísmico da estrutura.

### Caracterização geotécnica

Com base na carta de solos de que o LNEC dispõe (Ver relatório), a EB Damião de Góis encontra-se fundada em rocha (solo do tipo A), pelo que não se considera amplificação da ação calculada ao nível do substrato rochoso. Os espectros de resposta em rocha, que resultam de um estudo probabilístico de perigosidade sísmica desenvolvido especificamente no âmbito deste projeto, associados a um período de retorno de 475 anos, encontram-se na figura à direita.



### Modelo numérico

O modelo de cálculo, desenvolvido no programa SeismoStruct, é composto por elementos de barra (*frame*) de plasticidade distribuída com formulação em força. Cada secção destes elementos é definida através de fibras com comportamento uniaxial, associadas a aço ou a betão. Os elementos finitos são definidos tendo em consideração as dimensões acima apresentadas e as armaduras que foram sistematizadas com base no projeto de execução da tipologia “Vale Rosal”. As armaduras dos pilares são:

Arm. Long; Arm. Transv.	Centrais	Perímetro	Canto
1º piso	12Φ25+4Φ20; Φ8//0.15	12Φ25; Φ8//0.15	4Φ25+8Φ20; Φ8//0.15
2º Piso	4Φ25; Φ8//0.15	8Φ25; Φ8//0.15	4Φ25; Φ8//0.15

Relativamente às vigas, as armaduras são:

Arm. Long; Arm. Transv.	Local	Extremidades	Sob pilares interiores	Meio-vão
1º piso	Vigas interiores	inf 4Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 4Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 3Φ20+4Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.20
	Vigas perímetro	inf 3Φ20+3Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 2Φ20+3Φ16; sup 2Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 3Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.10

2º Piso	Vigas interiores	inf 3Φ16; sup 2Φ20+3Φ16; Φ6//0.10	inf 3Φ16; sup 2Φ20+3Φ16; Φ6//0.10	inf 2Φ20+3Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.25
	Vigas perímetro	inf 6Φ12; sup 3Φ16+3Φ12; Φ6//0.10	inf 4Φ12; sup 3Φ16+3Φ12; Φ6//0.10	inf 4Φ12; sup 3Φ12; Φ6//0.20

As lajes maciças são armadas com Φ10//0.125 em ambas as faces. As cargas atuantes nas lajes são automaticamente distribuídas pela malha de vigas, enquanto que a sua rigidez é simulada através do cálculo da largura efetiva do banzo das vigas em “T”, o que é feito também de forma automática pelo programa de cálculo.

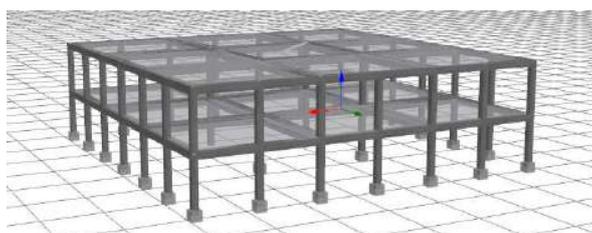
As fibras uniaxiais que definem o comportamento do betão são definidas através do modelo de *Mander et al.*, enquanto que as fibras de aço são definidas através do modelo de comportamento de *Menegotto-Pinto*.

Consideram-se as bases dos pilares com restrições aos deslocamentos e libertas às rotações, simulando assim uma fundação flexível, de acordo com a conceção de sapatas isoladas que caracteriza a fundação da estrutura.

Relativamente às cargas atuantes, adotaram-se as cargas definidas de acordo com a norma portuguesa em vigor (NP EN1991-1-1), para o tipo de edifício em questão. Assim, as cargas permanentes e sobrecargas a considerar na análise são:

Carga	1º Piso	Cobertura
Pavimento (RCP)	1.5 kN/m <sup>2</sup>	2.5 kN/m <sup>2</sup>
Paredes (RCP)	<u>Divisórias</u> : 1.75 kN/m <sup>2</sup> (aplicada na laje do 1º piso) <u>Exteriores</u> : 7.8 kN/m (aplicada nas vigas exteriores do 1º piso)	-
Sobrecarga	Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>	Cobertura não acessível: 0.4 kN/m <sup>2</sup>

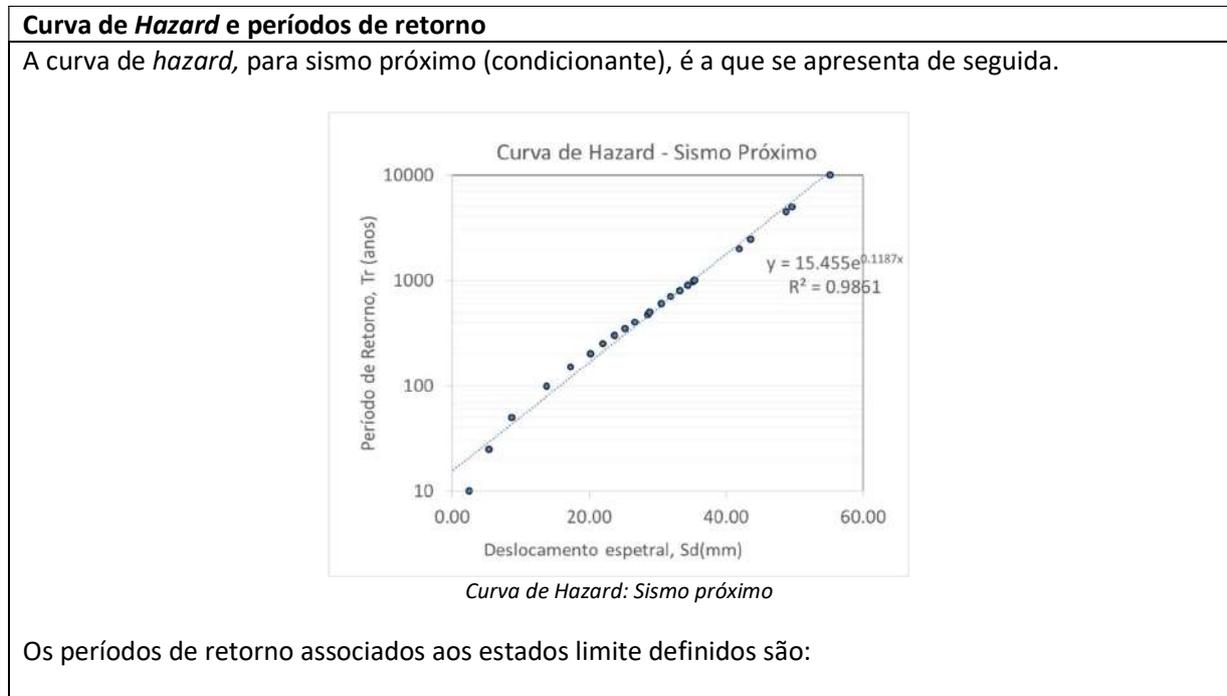
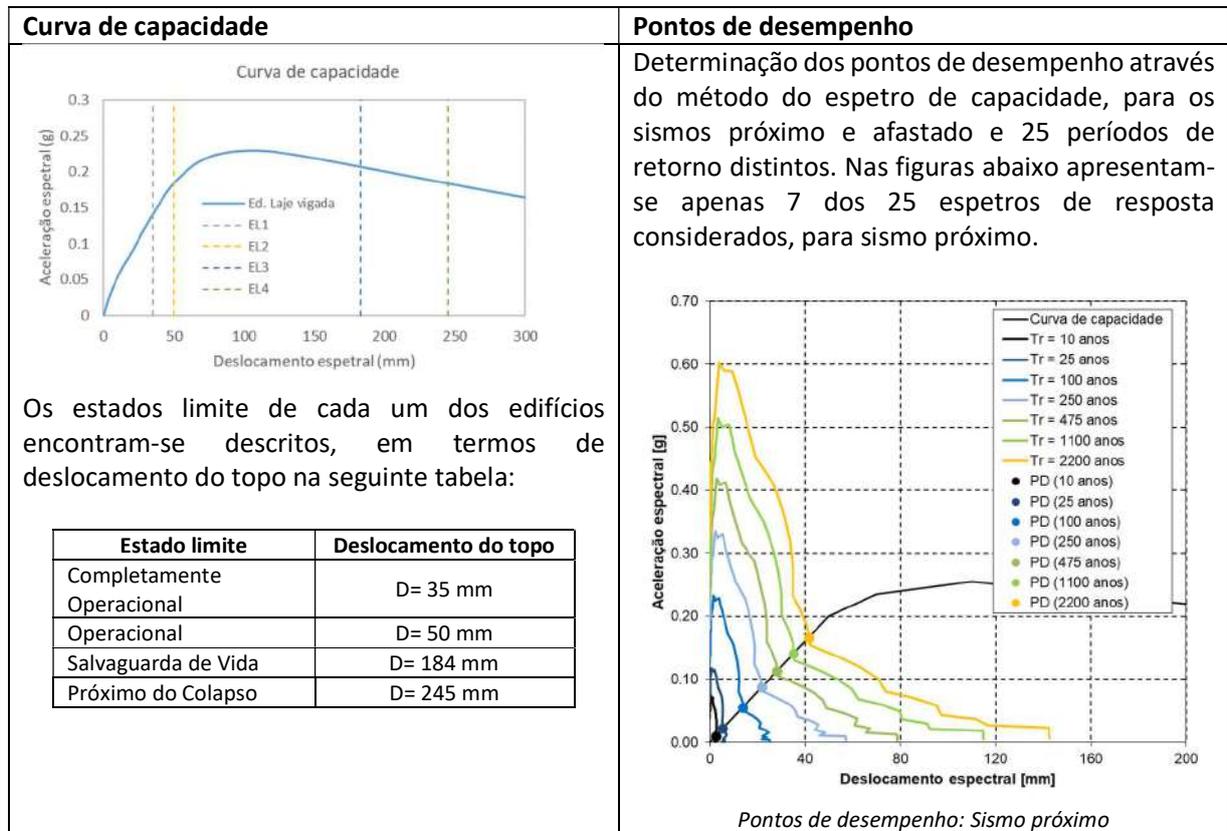
Após a aplicação das cargas gravíticas é executada uma análise estática não-linear com controlo de deslocamentos (*pushover*).



Modelo numérico do bloco tipo da escola no programa SeismoStruct

Os períodos de vibração da estrutura, obtidos através do modelo numérico, são:

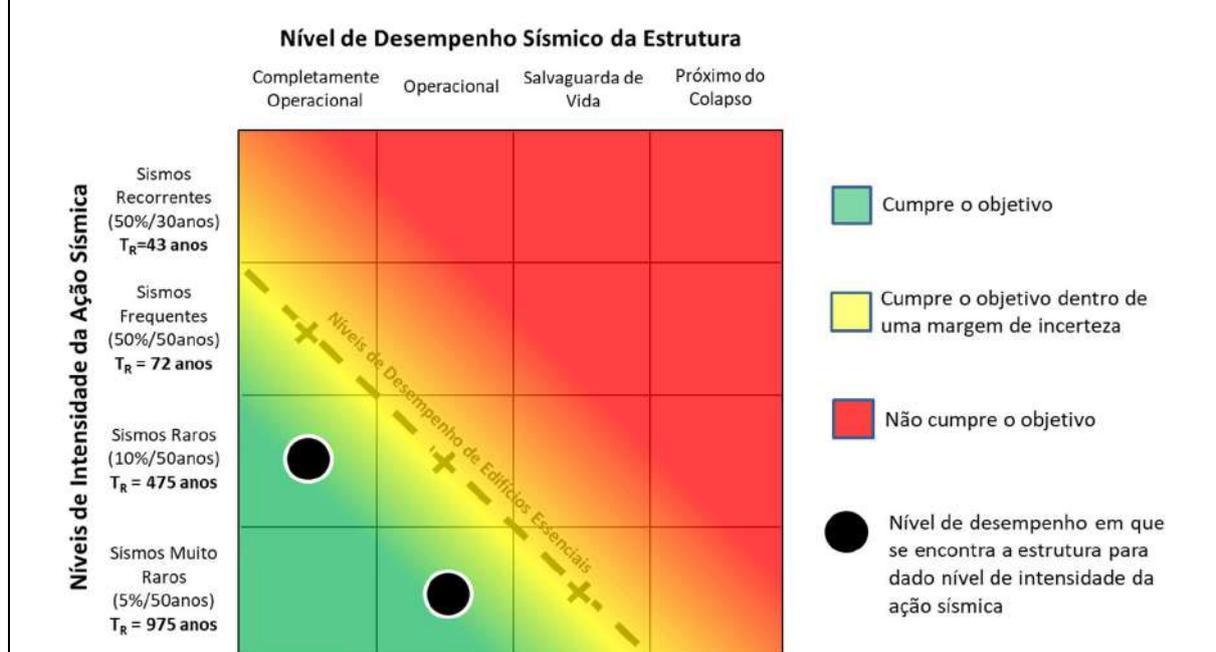
Períodos de vibração	
1º modo (X)	0.72 s
2º modo (Y)	0.72 s
3º modo (Torção)	0.62 s



		Período de retorno	Sismo Próximo	Sismo Afastado
Estado limite	Completamente Operacional		544	>10000
	Operacional		2471	>10000
	Salvaguarda de Vida		>10000	>10000
	Próximo do Colapso		>10000	>10000

### Matriz de desempenho sísmico

A matriz de desempenho sísmico, que descreve o comportamento da estrutura de cada um dos edifícios que constituem a escola (edifício com laje vigada e laje fungiforme) relativamente aos níveis e objetivos de desempenho definidos, é apresentada abaixo.



### Conclusão

Verifica-se que o comportamento da estrutura de cada um dos edifícios que constituem a escola (edifício com laje vigada e laje fungiforme) relativamente aos níveis e objetivos de desempenho sísmico definidos é satisfatório.

Com efeito, verifica-se que para sismos com probabilidade de ocorrência igual ou superior a 10% em 50 anos a estrutura se encontra num nível de desempenho *completamente operacional*, respeitando assim o objetivo de desempenho estabelecido para este tipo de edifícios. Além disso, para um sismo com probabilidade de ocorrência de 5% em 50 anos (*sismo muito raro*) a estrutura encontra-se num nível de desempenho *operacional*, pelo que respeita o nível de desempenho admissível para este nível de intensidade sísmica, que corresponde ao nível de desempenho *salvaguarda de vida*. Para este tipo de edifícios não é verosímil que a estrutura se encontre próxima do colapso para nenhum destes níveis de intensidade da ação sísmica.



# Escola Básica Fernando Pessoa

ID Escola: 47

Escola	Agrupamento	Área coberta
Escola Básica Fernando Pessoa	Fernando Pessoa	5086 m <sup>2</sup>

Nível de ensino	Número de alunos
Básico com 2º e 3º ciclo	800 alunos

Descrição geral
<p>A escola, construída no início da década de 1970, localiza-se na freguesia dos Olivais, com entrada pela Rua Cidade de Carmona. O local onde a escola se insere é predominantemente residencial. Nas imediações existem edifícios com número de pisos compreendido entre 4 e 14. Estes edifícios aparentam ser de betão armado, sendo que a distância entre os mesmos e a escola não permite antever qualquer interação em termos de resposta sísmica da estrutura. Não obstante, no planeamento de emergência para eventos sísmicos deverão ser evitados pontos de encontro junto às extremidades Norte e Este da escola, devido à proximidade aos edifícios adjacentes que poderão sofrer danos. Existe espaço, dentro da escola e nas imediações, para evacuação e encontro em caso de ocorrência de evento sísmico.</p>

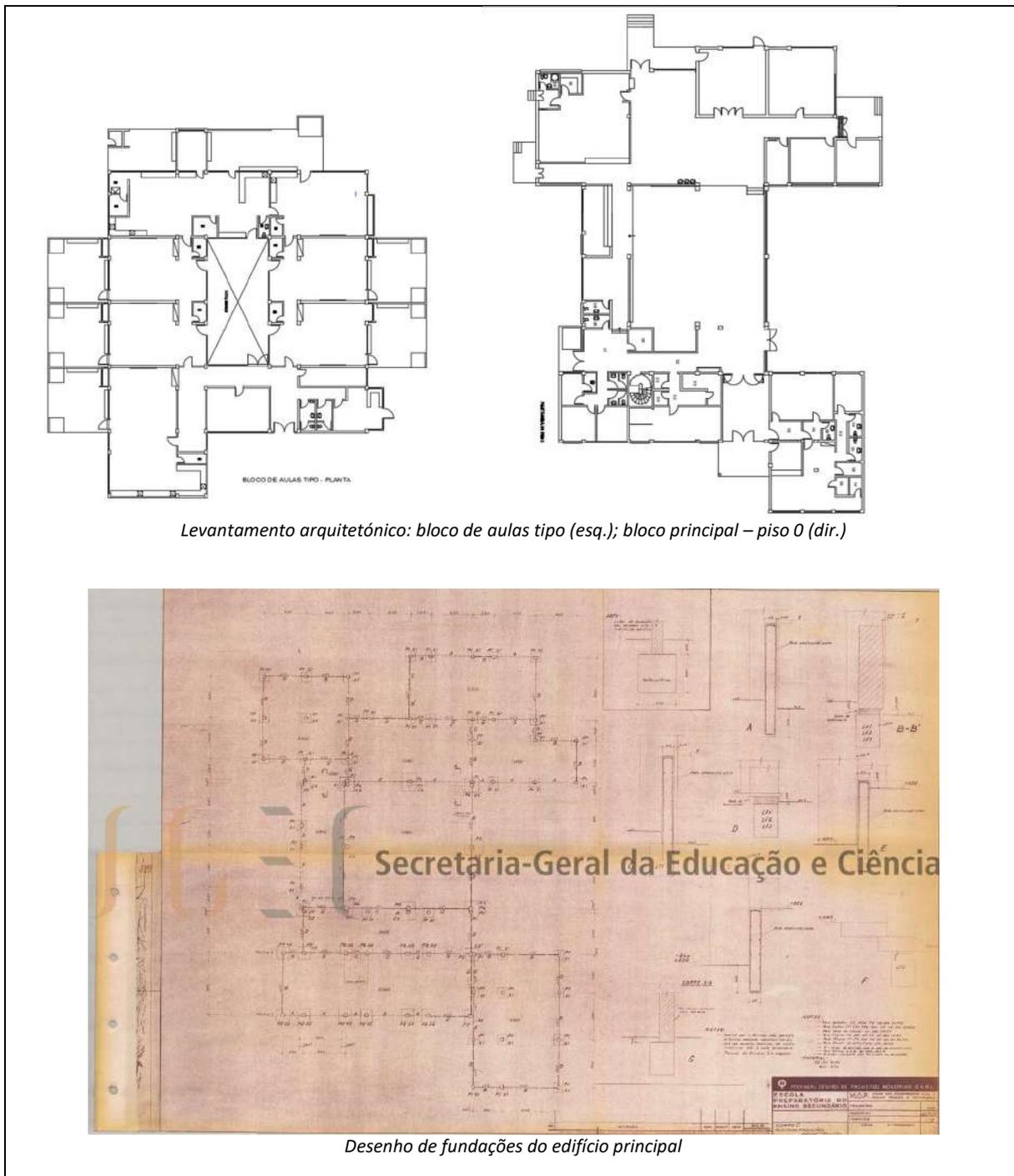


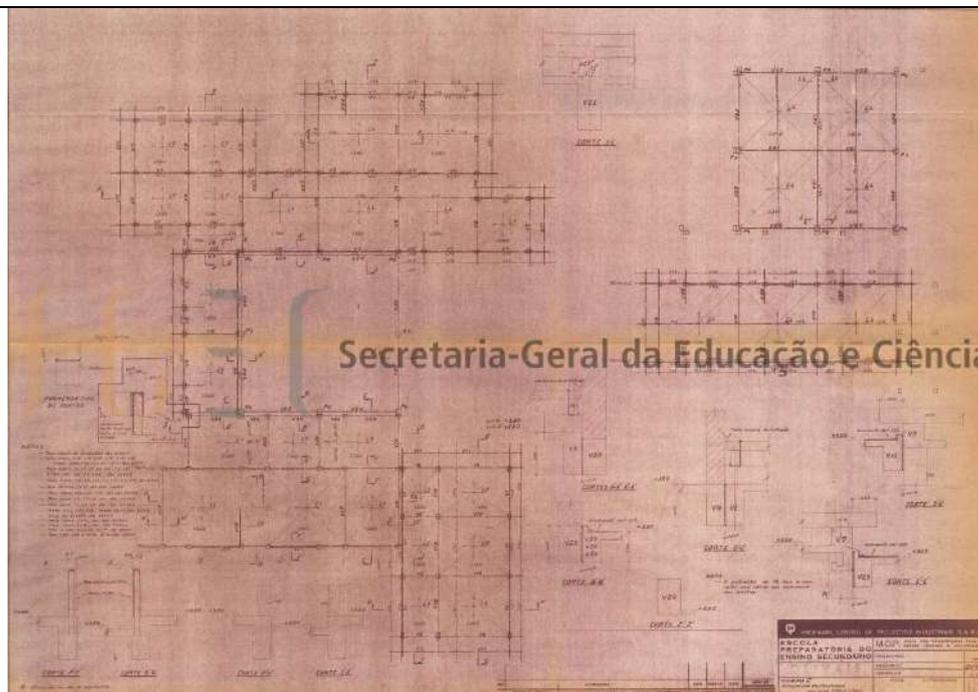
Imagem aérea da escola



Imagem aérea do edifício principal

Informação de base
<p>Estão disponíveis desenhos de levantamento arquitetónico fornecidos pela CML, assim como desenhos de arquitetura e engenharia do <b>Atlas of School Architecture in Portugal</b>, que contém desenhos de pormenorização estrutural que servem de base à análise aqui desenvolvida. Não foram realizadas alterações aos desenhos obtidos, apesar de se considerar nesta análise a informação acrescida recolhida após a inspeção visual levada a cabo pelo Departamento de Edifícios do LNEC.</p>

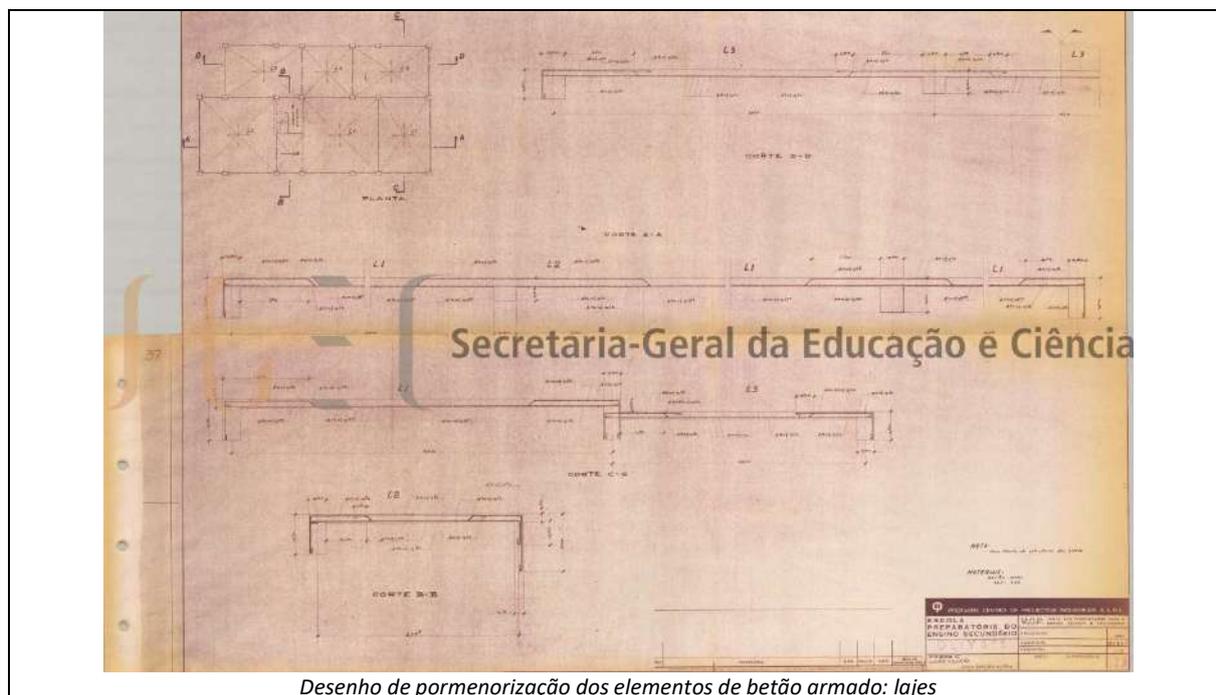




*Desenho de estruturas do edifício principal com identificação dos pilares, vigas e lajes*



*Desenho de pormenorização dos elementos de betão armado: pórtico do edifício principal – zona com 2 pisos*



*Desenho de pormenorização dos elementos de betão armado: lajes*

### Caracterização estrutural

A escola é constituída por 7 blocos independentes. Todos os blocos têm apenas 1 piso, à exceção do bloco principal, que tem uma zona com 2 pisos:

- 1 Bloco administrativo – bloco C – 2 pisos (apenas num dos corpos que o constitui).
- 4 Blocos de aulas – blocos A1 a A4 – 1 piso.
- 1 Bloco de oficinas – bloco A5 – 1 piso.
- Bloco G – Ginásio.

Neste estudo será analisado o edifício principal da escola. Neste caso, é expectável que este edifício seja o mais vulnerável à ação sísmica, tendo em conta os vãos e a altura do mesmo. Não obstante, para os blocos com 1 piso é fundamental garantir que os elementos não estruturais cumprem com as regras de segurança sísmica são cumpridas.

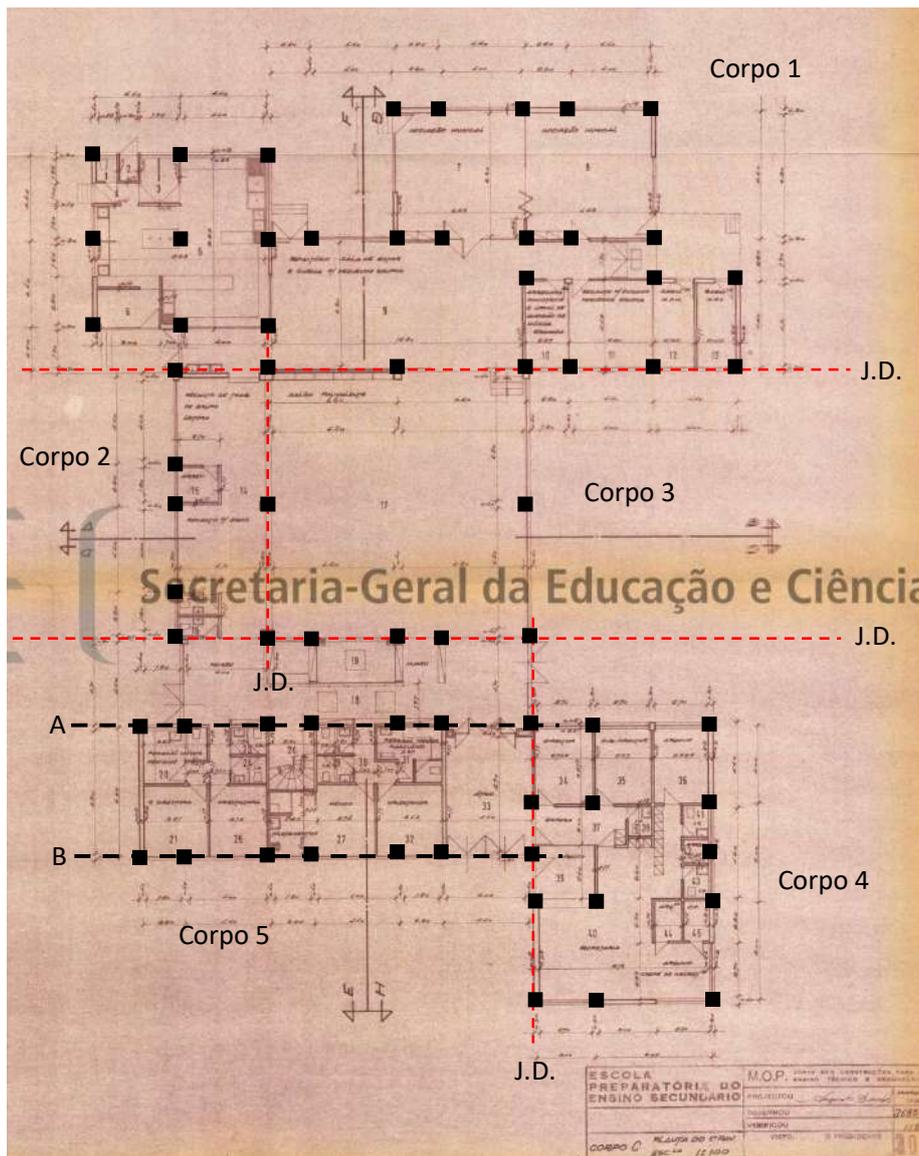
Todos os blocos são constituídos por uma estrutura porticada em betão armado. Os pilares das fachadas são aparentes pelo exterior. As lajes são vigadas.

O edifício principal divide-se, através de juntas de dilatação (ver figura abaixo), em 5 corpos. Os corpos 1 a 4 apenas possuem um piso, embora o pé-direito do corpo 3 seja maior (ver corte do edifício abaixo). O corpo 5 do edifício é o único que possui 2 pisos (entre os alinhamentos A e B representados abaixo). Os blocos 1 a 4 são constituídos por uma malha de pilares e vigas, ortogonais, que unem os topos dos pilares e recebem a estrutura da cobertura. Os pilares têm dimensões 40.0x30.0 [cm], à exceção dos pilares do corpo 3, que têm dimensão 40.0x40.0 [cm].

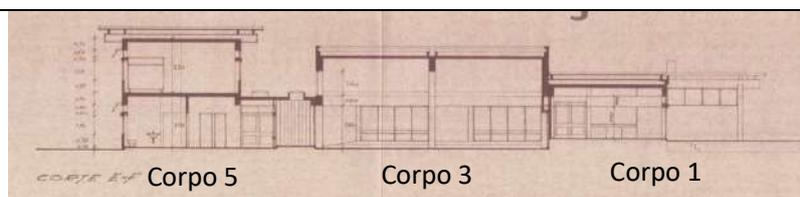
Relativamente ao corpo 5, este é constituído por pórticos de betão armado nos alinhamentos A e B, representados na figura abaixo, e por vigas transversais que unem os dois pórticos referidos. Os pórticos são constituídos por pilares com secção de 40.0x30.0 [cm] e vigas com 30.0x70.0 [cm]. As vigas transversais que unem os pórticos têm secções de 40.0x60.0 ou 40.0x50.0 [cm].

As lajes são maciças com 15.0cm de espessura e são armadas nas duas direções.

Os vários corpos que constituem este edifício interagem durante a ocorrência de um sismo. Ainda assim, não é de descartar a hipótese dos corpos extremos, nomeadamente o corpo 1, 4 e 5, responderem de forma “desligada dos restantes”, em particular no sentido “para fora” do edifício. No que diz respeito a materiais, foram considerados os materiais indicados no projeto de estruturas, isto é, betão B180 e aço A24.



Planta com identificação dos vários corpos do edifício principal, juntas de dilatação e pilares



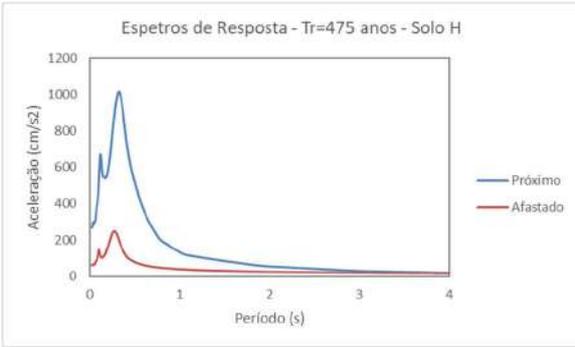
*Corte do edifício principal*



*Fotografia do Corpo 3 do edifício principal*

Na visita realizada por elementos do LNEC, foram detetadas várias patologias, sendo de destacar, neste âmbito, as fissuras longitudinais em elementos estruturais, nomeadamente vigas, o que indicia problemas que podem estar relacionados com erros construtivos ou de projeto. Não sendo expectável que as mesmas constituam um problema estrutural a curto prazo é, ainda assim, fundamental aferir da integridade dos varões metálicos, avaliando a eventual corrosão dos mesmos, assim como problemas de carbonatação do betão. Esta avaliação deverá contribuir para planear uma intervenção atempada, no sentido de impedir que o problema tome proporções irreversíveis.



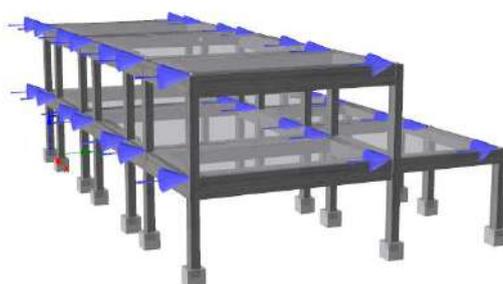
<p><b>Caracterização geotécnica</b></p> <p>Com base na carta de solos de que o LNEC dispõe (Ver relatório), a EB Fernando Pessoa encontra-se fundada em solo do tipo H, pelo que se considera a amplificação da ação calculada ao nível do substrato rochoso com base na coluna de solo respetiva (coluna H). Os espetros de resposta, que resultam de um estudo probabilístico de perigosidade sísmica desenvolvido especificamente no âmbito deste projeto, associados a um período de retorno de 475 anos, encontram-se na figura à direita.</p>	
---	---

<p><b>Modelo numérico</b></p> <p>Atendendo à caracterização da estrutura e ao comportamento sísmico expectável, a zona mais suscetível a movimentos da base é a zona correspondente ao corpo 5, devido à distribuição de massa em altura. Os restantes blocos que constituem a escola e os restantes corpos do edifício principal são caracterizados por pilares e vigas que suportam uma cobertura com massa significativamente baixa, o que torna estas estruturas pouco vulneráveis à ação sísmica, ainda que devam ser cumpridas as boas práticas de proteção e prevenção para elementos não estruturais face à ação dos sismos. Em conclusão, a zona a ser analisada neste estudo, que corresponde à zona mais vulnerável, corresponde ao corpo 5 do edifício principal.</p> <p>O modelo de cálculo, desenvolvido no programa SeismoStruct, é composto por elementos de barra (<i>frame</i>) de plasticidade distribuída com formulação em força. Cada secção destes elementos é definida através de fibras com comportamento uniaxial, associadas a aço ou a betão. Os elementos finitos são definidos tendo em consideração as dimensões acima apresentadas e as armaduras que foram sistematizadas com base no projeto de estruturas que consta do <i>Altas of School Architecture in Portugal</i>.</p>
---

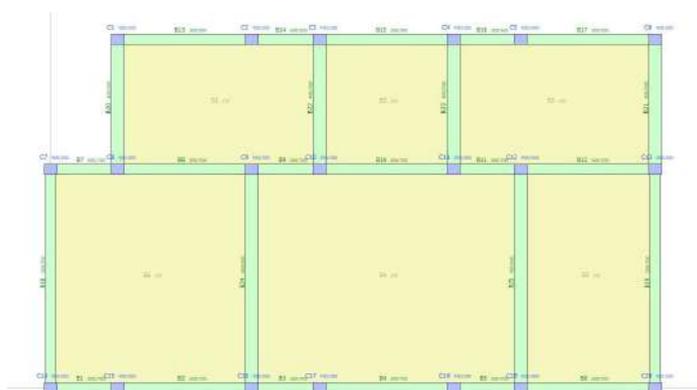
As cargas atuantes nas lajes são automaticamente distribuídas pela malha de vigas, enquanto que a sua rigidez é simulada através do cálculo da largura efetiva do banzo das vigas em “T”, o que é feito também de forma automática pelo programa de cálculo.

As fibras uniaxiais que definem o comportamento do betão são definidas através do modelo de *Mander et al.*, enquanto que as fibras de aço são definidas através do modelo de comportamento de *Menegotto-Pinto*.

Consideram-se as bases dos pilares com restrições aos deslocamentos e libertas às rotações, simulando assim uma fundação flexível, de acordo com a conceção de sapatas isoladas que caracteriza a fundação da estrutura.



Modelo numérico do corpo 5 do edifício principal da escola no programa SeismoStruct



Planta do modelo numérico do corpo 5 do edifício principal da escola no programa SeismoStruct ( piso 1)

Relativamente às cargas atuantes, adotaram-se as cargas definidas de acordo com a norma portuguesa em vigor (NP EN1991-1-1), para o tipo de edifício em questão. Assim, as cargas permanentes e sobrecargas a considerar na análise são:

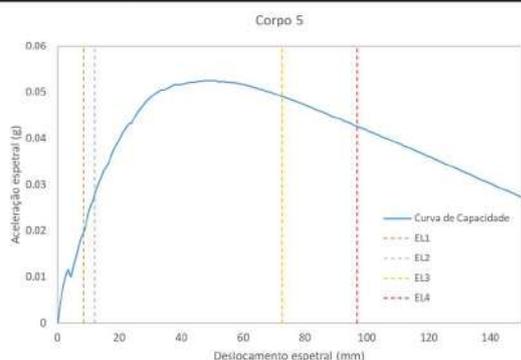
Carga	1º Piso	Cobertura
Pavimento (RCP)	1.5 kN/m	2.5 kN/m
Paredes (RCP)	Divisórias: 1.75 kN/m (aplicada na laje do 1º piso) Exteriores: 7.8 kN/m (aplicada nas vigas exteriores do 1º piso)	-
Sobrecarga	Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>	Cobertura não acessível: 0.4 kN/m <sup>2</sup>

Os períodos de vibração da estrutura, obtidos através do modelo numérico, são:

Períodos de vibração	
1º modo (X)	0.65 s
2º modo (Y)	0.53 s
3º modo (Torção)	0.44 s

Após a aplicação das cargas gravíticas é executada uma análise estática não-linear com controlo de deslocamentos (*pushover*).

### Curva de capacidade

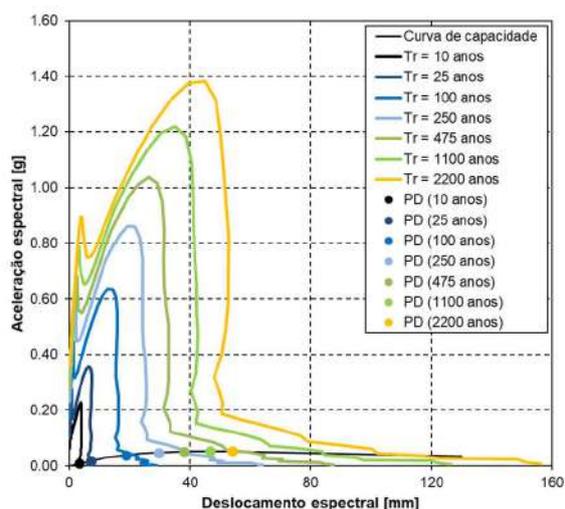


Os estados limite de cada um dos edifícios encontram-se descritos, em termos de deslocamento do topo na seguinte tabela:

Estado limite	Deslocamento do topo
Completamente Operacional	D= 8.4 mm
Operacional	D= 12.0 mm
Salvaguarda de Vida	D= 72.8 mm
Próximo do Colapso	D= 97.0 mm

### Pontos de desempenho

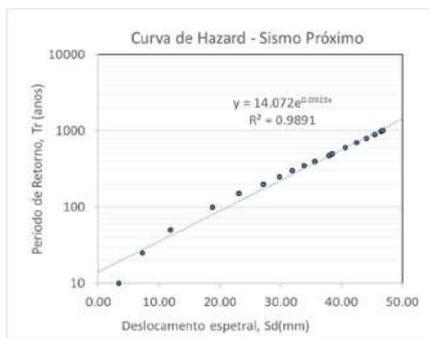
Determinação dos pontos de desempenho através do método do espectro de capacidade, para os sismos próximo e afastado e 25 períodos de retorno distintos. Nas figuras abaixo apresentam-se apenas 7 dos 25 espectros de resposta considerados.



Pontos de desempenho: Sismo próximo

**Curva de Hazard e períodos de retorno**

A curva de hazard, para sismo próximo (condicionante), é a que se apresenta de seguida.



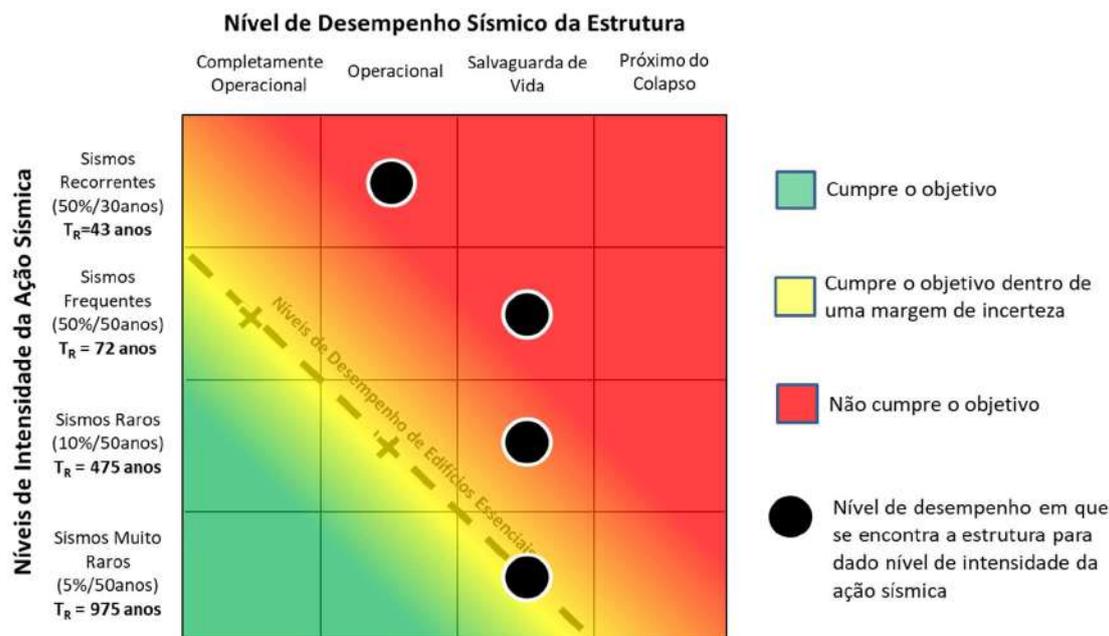
Curva de Hazard: Sismo próximo

Os períodos de retorno associados aos estados limite definidos são:

	Período de retorno	Sismo Próximo	Sismo Afastado
Estado limite	Completamente Operacional	31	143
	Operacional	43	443
	Salvaguarda de Vida	>10000	>10000
	Próximo do Colapso	>10000	>10000

### Matriz de desempenho sísmico

A matriz de desempenho sísmico, que descreve o comportamento da estrutura do corpo 5 do edifício principal da escola (corpo condicionante) relativamente aos níveis e objetivos de desempenho definidos, é apresentada abaixo.



### Conclusão

Verifica-se que o comportamento da estrutura de cada um dos edifícios que constituem a escola (edifício com laje vigada e laje fungiforme) relativamente aos níveis e objetivos de desempenho sísmico definidos é insatisfatório.

Com efeito, verifica-se que para sismos com probabilidade de ocorrência igual a 50% em 30 anos (sismos recorrentes) a estrutura se encontra num nível de desempenho *operacional*, quando seria expectável que se encontrasse num nível de desempenho *completamente operacional*, desrespeitando assim o objetivo de desempenho estabelecido para este tipo de edifícios. Além disso, para sismos com probabilidade de ocorrência iguais ou inferiores a 50% em 50 anos a estrutura encontra-se num nível de desempenho *salvaguarda de vida*, apenas cumprindo com o objetivo de desempenho estabelecido para sismos muito raros (probabilidade de ocorrência de 5% em 50 anos) uma vez que para sismos frequentes e raros seria expectável que a estrutura se encontrasse, no máximo, no nível de desempenho *operacional*.

Conclui-se que não é verosímil que a estrutura se encontre próxima do colapso para nenhum destes níveis de intensidade da ação sísmica. Não obstante, são expectáveis danos, nomeadamente em elementos não estruturais, para níveis de intensidade moderados e baixos, pelo que importa intervir no sentido de mitigar o risco neste contexto.



# Escola Básica Professor Delfim Santos

ID Escola: 68

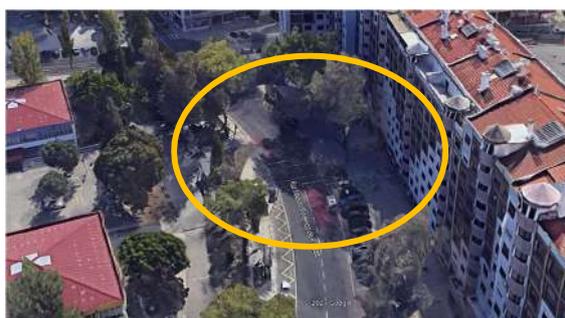
Escola	Agrupamento	Área coberta
Escola Básica Professor Delfim Santos	Laranjeiras	7221 m <sup>2</sup>

Nível de ensino	Número de alunos
Básico com 2º e 3º ciclos	1040 alunos

Descrição geral
<p>A escola, construída no início da década de 1980, localiza-se na freguesia de São Domingos de Benfica, estando limitada, a Norte, pela Avenida Lusíada, e a Sul pela Rua Maestro Frederico de Freitas, rua pela qual se faz a entrada na escola. Os vários blocos com compõem a escola estão separados, funcionando de forma independente no que à resposta sísmica diz respeito. Não se prevê qualquer interação, a nível sísmico, com estruturas nas imediações.</p> <p>Existe espaço, dentro da escola, nomeadamente na zona do campo de jogos para evacuação e ponto de encontro em caso de ocorrência de evento sísmico. O planeamento de emergência deverá ter em consideração que a saída da escola se faz junto a um edifício de grande altura, sendo recomendável o afastamento relativamente ao mesmo, devido ao risco de queda de elementos não estruturais ou objetos suspensos. Assim, a opção pelo ponto de encontro dentro dos limites da escola deverá ser privilegiado.</p>

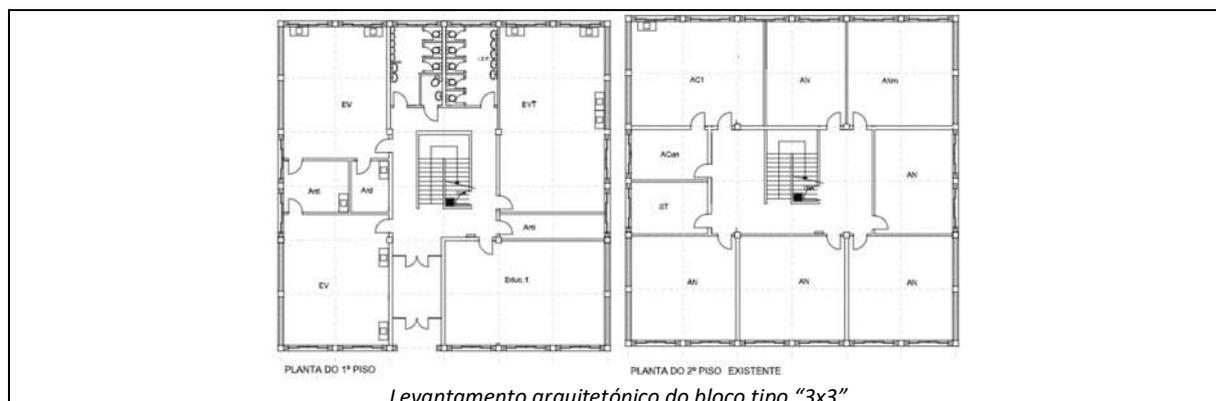


Imagem aérea do Google Earth



Zona da entrada da escola, com pouco espaço para ponto de encontro da comunidade escolar

Informação de base
<p>Estão disponíveis desenhos de levantamento arquitetónico fornecidos pela CML, que resultam do projeto tipo das escolas de pavilhões “3x3”. No <b>Atlas of School Architecture in Portugal</b> foram também obtidos desenhos desta escola, que incluem desenhos de arquitetura e de algumas especialidades de engenharia, nomeadamente iluminação, saneamento, entre outras. Infelizmente não foi possível obter quaisquer desenhos de estruturas. Considerou-se assim a informação constante nos desenhos de levantamento obtidos, apesar de se considerar nesta análise a informação acrescida recolhida após a inspeção visual levada a cabo pelo Departamento de Edifícios do LNEC.</p>



### Caracterização estrutural

Escola tipo “3x3”, com estrutura porticada em betão armado. Os blocos têm quatro pilares ao centro, definindo três vãos (“3x3”) nas duas direções. No perímetro os vãos têm metade do comprimento, relativamente aos alinhamentos interiores.

A escola é constituída por 7 blocos: 4 blocos de aulas com 2 pisos, 1 bloco com 1 piso que integra o refeitório, 1 bloco de oficinas com estrutura de madeira e 1 pavilhão gimnodesportivo com estrutura em betão armado e cobertura em treliça metálica.

Os blocos de aulas e o refeitório são constituídos por pilares e lajes fungiformes aligeirada, onde os alinhamentos dos pilares centrais são amaciçados (ver fotografias abaixo).



Lajes fungiformes com zonas maciças nos alinhamentos centrais: bloco do refeitório (esq.); bloco A (dir.)

Não há informação sobre o projeto de estruturas da escola que permita recolher dados sobre o seu dimensionamento da escola, nomeadamente no que diz respeito a materiais, ações consideradas, dimensões de elementos estruturais, armaduras colocadas, entre outros pormenores construtivos. Assim, a análise aqui desenvolvida é baseada naquilo que se presume ser a prática construtiva e os materiais da época de construção da escola. Com efeito, assumem-se materiais e restantes características da estrutura de acordo com outras escolas de tipologias e época construtiva semelhante, como é o caso da tipologia “Vale Rosal”. Assim, considera-se:

- Materiais: B25(C25/30) + A400
- Dimensões dos elementos estruturais:
  - Pilares: 0.35x0.35 [mxm] (contínuos em altura)
  - Laje fungiforme aligeirada:
    - Altura total: 42.5cm
    - Altura maciça: 10.0cm
    - Largura total: 90.0cm
    - Largura das nervuras: 13.0cm

É de salientar que, na ausência de informação sobre o projeto de estruturas da escola, que permita recolher dados sobre o seu dimensionamento, nomeadamente no que diz respeito a materiais, ações consideradas, dimensões de elementos estruturais, armaduras colocadas, entre outros pormenores construtivos, estes resultados devem ser encarados como indicadores do comportamento expectável e não como uma avaliação detalhada do comportamento sísmico da estrutura.

### Caracterização geotécnica

Com base na carta de solos de que o LNEC dispõe (Ver relatório), a EB Prof. Delfim Santos encontra-se fundada em rocha (solo do tipo A), pelo que não se considera amplificação da ação calculada ao nível do substrato rochoso. Os espectros de resposta em rocha, que resultam de um estudo probabilístico de perigosidade sísmica desenvolvido especificamente no âmbito deste projeto, associados a um período de retorno de 475 anos, encontram-se na figura à direita.



### Modelo numérico

O modelo de cálculo, desenvolvido no programa SeismoStruct, é composto por elementos de barra (*frame*) de plasticidade distribuída com formulação em força. Cada secção destes elementos é definida através de fibras com comportamento uniaxial, associadas a aço ou a betão. Os elementos finitos são definidos tendo em consideração as dimensões acima apresentadas e as armaduras que foram sistematizadas com base no projeto de execução da tipologia “Vale Rosal”. As armaduras dos pilares são:

Arm. Long; Arm. Transv.	Centrais	Perímetro	Canto
<b>1º piso</b>	12Φ25+4Φ20; Φ8//0.15	12Φ25; Φ8//0.15	4Φ25+8Φ20; Φ8//0.15
<b>2º Piso</b>	4Φ25; Φ8//0.15	8Φ25; Φ8//0.15	4Φ25; Φ8//0.15

Relativamente às vigas, as armaduras são:

Arm. Long; Arm. Transv.	Local	Extremidades	Sob pilares interiores	Meio-vão
<b>1º piso</b>	Vigas interiores	inf 4Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 4Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 3Φ20+4Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.20
	Vigas perímetro	inf 3Φ20+3Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 2Φ20+3Φ16; sup 2Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 3Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.10
<b>2º Piso</b>	Vigas interiores	inf 3Φ16; sup 2Φ20+3Φ16; Φ6//0.10	inf 3Φ16; sup 2Φ20+3Φ16; Φ6//0.10	inf 2Φ20+3Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.25
	Vigas perímetro	inf 6Φ12; sup 3Φ16+3Φ12; Φ6//0.10	inf 4Φ12; sup 3Φ16+3Φ12; Φ6//0.10	inf 4Φ12; sup 3Φ12; Φ6//0.20

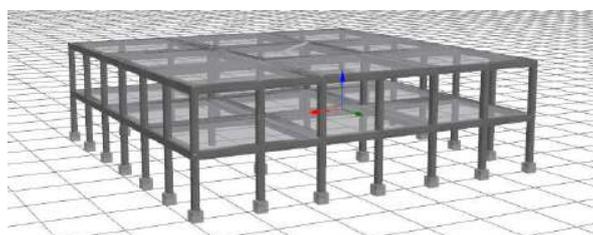
As fibras uniaxiais que definem o comportamento do betão são definidas através do modelo de *Mander et al.*, enquanto que as fibras de aço são definidas através do modelo de comportamento de *Menegotto-Pinto*.

Consideram-se as bases dos pilares com restrições aos deslocamentos e libertas às rotações, simulando assim uma fundação flexível, de acordo com a conceção de sapatas isoladas que caracteriza a fundação da estrutura.

Relativamente às cargas atuantes, adotaram-se as cargas definidas de acordo com a norma portuguesa em vigor (NP EN1991-1-1), para o tipo de edifício em questão. Assim, as cargas permanentes e sobrecargas a considerar na análise são:

Carga	1º Piso	Cobertura
<b>Pavimento (RCP)</b>	1.5 kN/m <sup>2</sup>	2.5 kN/m <sup>2</sup>
<b>Paredes (RCP)</b>	<u>Divisórias</u> : 1.75 kN/m <sup>2</sup> (aplicada na laje do 1º piso) <u>Exteriores</u> : 7.8 kN/m (aplicada nas vigas exteriores do 1º piso)	-
<b>Sobrecarga</b>	Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>	Cobertura não acessível: 0.4 kN/m <sup>2</sup>

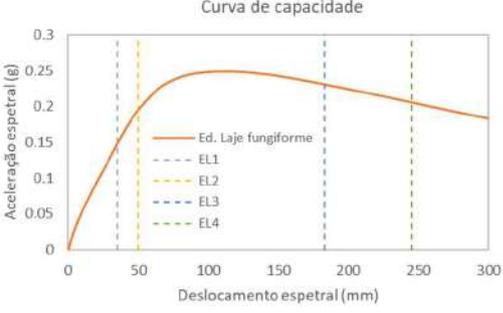
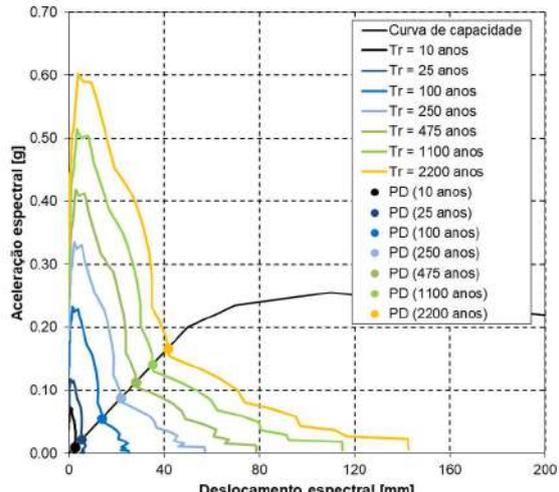
Após a aplicação das cargas gravíticas é executada uma análise estática não-linear com controlo de deslocamentos (*pushover*).

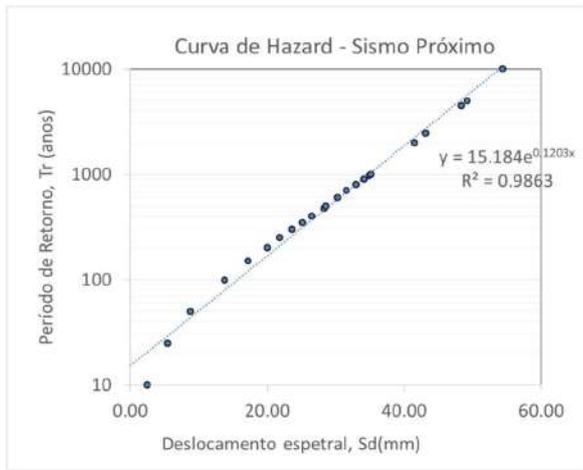


Modelo numérico do bloco tipo da escola no programa SeismoStruct

Os períodos de vibração da estrutura, obtidos através do modelo numérico, são:

Períodos de vibração	
1º modo (X)	0.76 s
2º modo (Y)	0.76 s
3º modo (Torção)	0.62 s

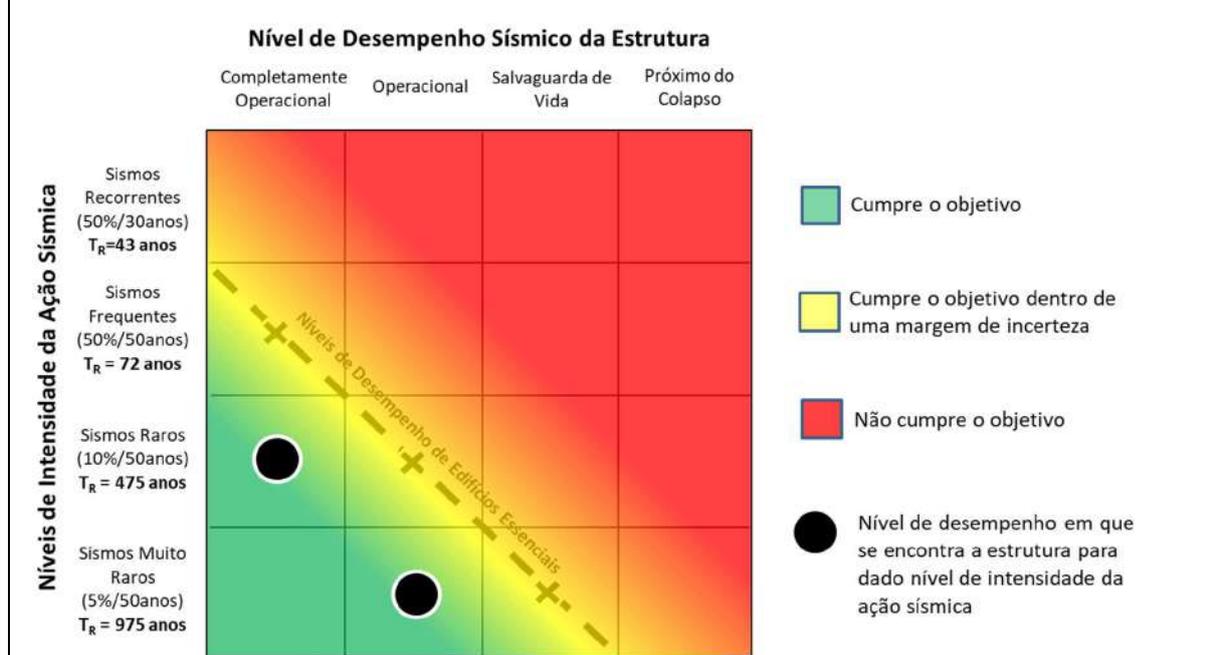
Curva de capacidade	Pontos de desempenho										
 <p>Os estados limite de cada um dos edifícios encontram-se descritos, em termos de deslocamento do topo na seguinte tabela:</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Estado limite</th> <th>Deslocamento do topo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Completamente Operacional</td> <td>D= 35 mm</td> </tr> <tr> <td>Operacional</td> <td>D= 50 mm</td> </tr> <tr> <td>Salvaguada de Vida</td> <td>D= 186 mm</td> </tr> <tr> <td>Próximo do Colapso</td> <td>D= 248 mm</td> </tr> </tbody> </table>	Estado limite	Deslocamento do topo	Completamente Operacional	D= 35 mm	Operacional	D= 50 mm	Salvaguada de Vida	D= 186 mm	Próximo do Colapso	D= 248 mm	<p>Determinação dos pontos de desempenho através do método do espectro de capacidade, para os sismos próximo e afastado e 25 períodos de retorno distintos. Nas figuras abaixo apresentam-se apenas 7 dos 25 espectros de resposta considerados, para sismo próximo.</p>  <p style="text-align: center;">Pontos de desempenho: Sismo próximo</p>
Estado limite	Deslocamento do topo										
Completamente Operacional	D= 35 mm										
Operacional	D= 50 mm										
Salvaguada de Vida	D= 186 mm										
Próximo do Colapso	D= 248 mm										

Curva de Hazard e períodos de retorno
<p>A curva de <i>hazard</i>, para sismo próximo (condicionante), é a que se apresenta de seguida.</p>  <p style="text-align: center;">Curva de Hazard: Sismo próximo</p> <p>Os períodos de retorno associados aos estados limite definidos são:</p>

	Período de retorno		Sismo Próximo	Sismo Afastado
	Estado limite	Completamente Operacional	544	>10000
	Operacional	2471	>10000	
	Salvaguarda de Vida	>10000	>10000	
	Próximo do Colapso	>10000	>10000	

### Matriz de desempenho sísmico

A matriz de desempenho sísmico, que descreve o comportamento da estrutura de cada um dos edifícios que constituem a escola relativamente aos níveis e objetivos de desempenho definidos, é apresentada abaixo.



### Conclusão

Verifica-se que o comportamento da estrutura de cada um dos edifícios que constituem a escola (edifício com laje vigada e laje fungiforme) relativamente aos níveis e objetivos de desempenho sísmico definidos é satisfatório.

Com efeito, verifica-se que para sismos com probabilidade de ocorrência igual ou superior a 10% em 50 anos a estrutura se encontra num nível de desempenho *completamente operacional*, respeitando assim o objetivo de desempenho estabelecido para este tipo de edifícios. Além disso, para um sismo com probabilidade de ocorrência de 5% em 50 anos (*sismo muito raro*) a estrutura encontra-se num nível de desempenho *operacional*, pelo que respeita o nível de desempenho admissível para este nível de intensidade sísmica, que corresponde ao nível de desempenho *salvaguarda de vida*. Para este tipo de edifícios não é verosímil que a estrutura se encontre próxima do colapso para nenhum destes níveis de intensidade da ação sísmica.



# Escola Básica Luís António Verney

ID Escola: 73

Escola	Agrupamento	Área coberta
Escola Básica e Secundária Luís António Verney	Luís António Verney	5784 m <sup>2</sup>

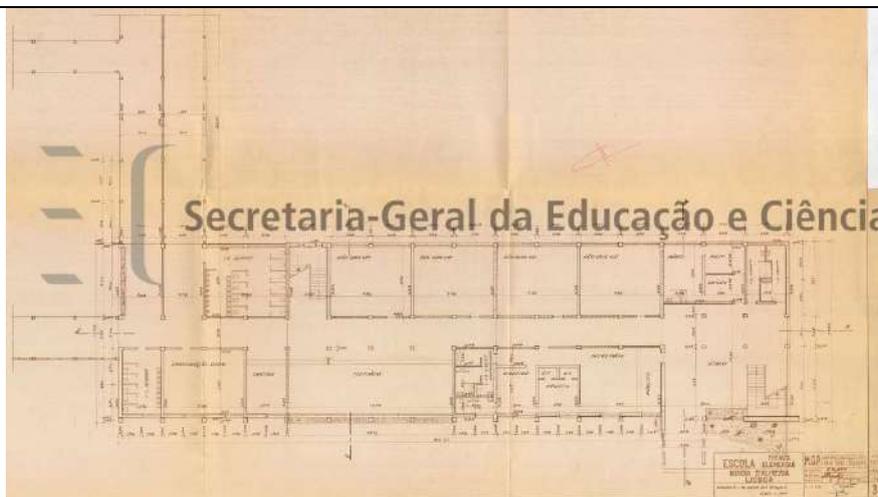
Nível de ensino	Número de alunos
2º e 3º ciclos	420 alunos

Descrição geral
<p>A escola localiza-se na freguesia do Beato, numa zona residencial. A escola, construída na década de 1960, é composta por um edifício principal, com 3 pisos, um conjunto de oficinas (edifícios com 1 piso e cobertura múltipla) e um edifício de ginásio. Estes edifícios são unidos através de um corredor coberto com uma estrutura de betão armado e chapa metálica.</p> <p>Existe espaço, dentro dos limites da escola, para evacuação e encontro em caso de ocorrência de evento sísmico.</p> <p>A escola é circundada por edifícios habitacionais maioritariamente em betão armado. Atendendo à distância a que os mesmos se encontram da escola, não é previsível qualquer interação sísmica.</p>



Imagem aérea do Google Earth

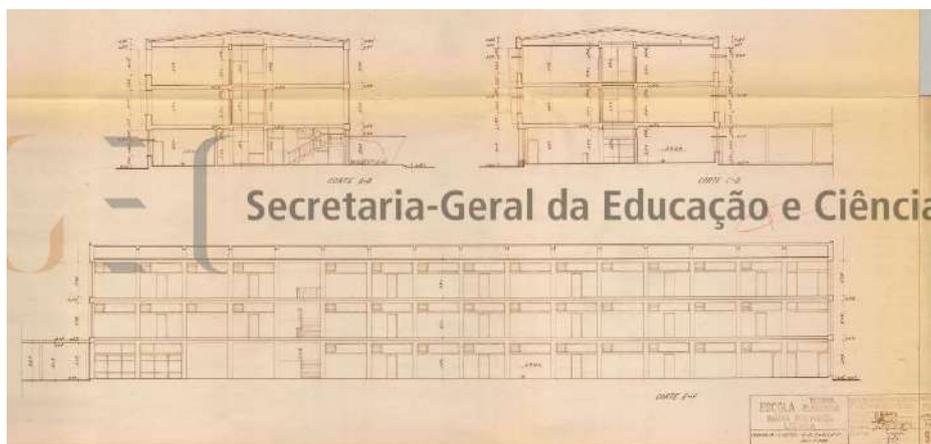
Informação de base
<p>Estão disponíveis desenhos do <i>Atlas of School Architecture in Portugal</i>, que incluem desenhos de levantamento arquitetónico (plantas, cortes e alçados) e desenhos de estruturas, nomeadamente plantas de fundações e desenhos com armaduras de vigas e pilares da estrutura. É com base nestes desenhos que este estudo se baseia.</p>



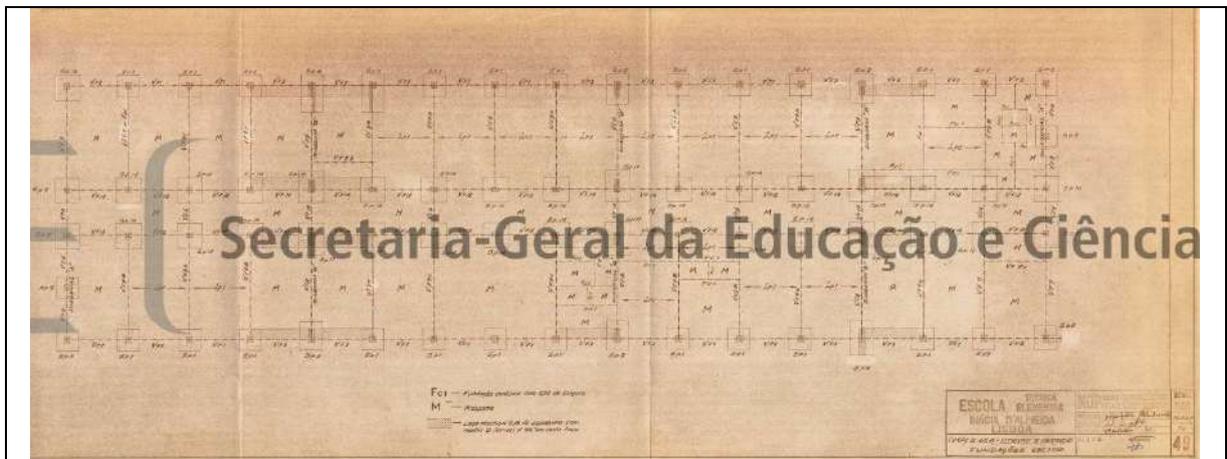
*Planta do 1º piso do edifício principal*



*Planta do 2º e 3º pisos do edifício principal*



*Cortes transversais (cima) e corte longitudinal (baixo) do edifício principal*



Planta de fundações do edifício principal



Alinhamentos estruturais – pilares, vigas e paredes – do 1º piso



Alinhamentos estruturais – pilares, vigas e paredes – do 2º piso



*Alinhamentos estruturais – pilares, vigas e paredes – do 3º piso*



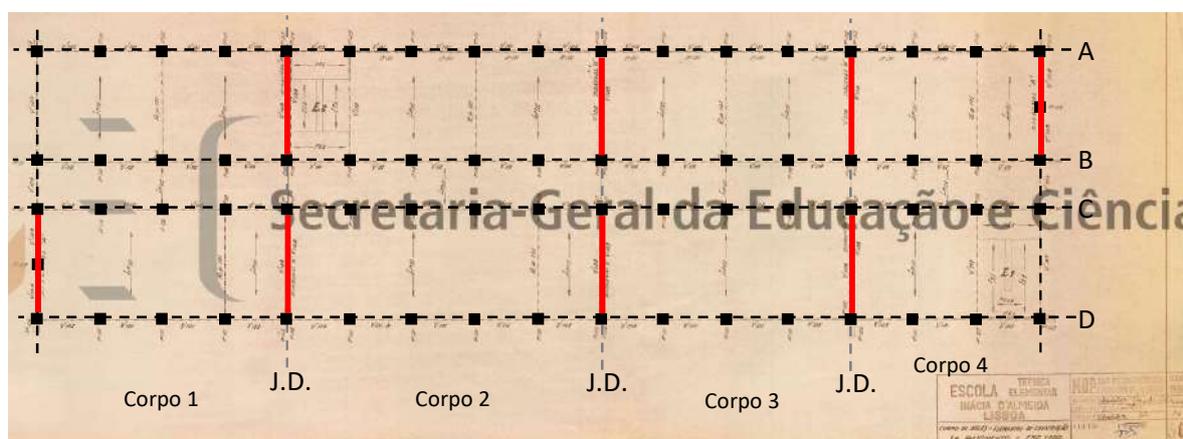
*Desenho de pormenorização de betão armado – vigas longitudinais*



*Desenho de pormenorização de betão armado – pilares interiores*

**Caracterização estrutural**

O edifício principal da escola, com um total de 3 pisos, é constituído por uma estrutura de betão armado, fundada em sapatas ligadas por vigas de fundação (ver planta de fundações acima). O edifício possui três juntas de dilatação, criando assim quatro corpos cujo comportamento na direção transversal é independente. Na direção transversal a rigidez é principalmente conferida por diagonais (representadas a vermelho na figura abaixo), cuja pormenorização se apresenta de seguida, que conferem travamento nesta direção. Nesta direção, a estrutura em pórtico apenas existe na zona das diagonais e nas empenas. Por outro lado, na direção longitudinal, o edifício possui uma estrutura em pórtico, com pilares e vigas em todos os alinhamentos A a D (ver figura abaixo).



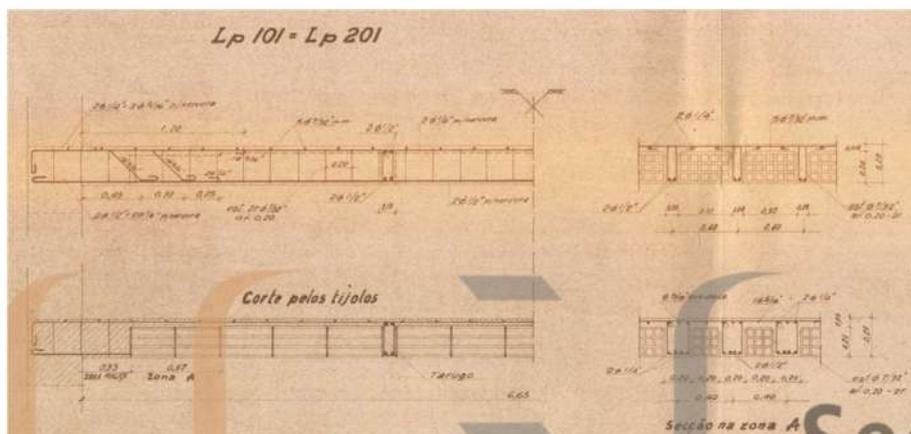
*Planta com identificação dos alinhamentos estruturais do edifício principal*



*Desenhos de pormenorização das diagonais de travamento na direção transversal: diagonais interiores (esq.); diagonais da empena (dir.)*

Os pilares de fachada têm dimensão 40.0x40.0 [cmxcm], enquanto que os pilares interiores têm dimensão 40.0x30.0 [cmxcm]. Os pilares das juntas de dilatação são mais compridos na direção transversal do edifício. Relativamente às lajes, estas são maciças, com 15.0cm de espessura na zona do corredor (entre os alinhamentos B e C) e escadas. Por outro lado, na zona das salas de aula, as lajes são aligeiradas, constituídas por elementos cerâmicos pré-fabricados e nervuras em betão armado (ver figura abaixo). A espessura total destas lajes é de 29.0cm. As nervuras têm uma largura de 8.0cm e as peças cerâmicas uma largura de 32.0cm, pelo que a distância entre o centro de duas nervuras consecutivas é de 40.0cm (na zona corrente). Perpendicularmente às vigas (alinhamentos A a D), a laje contém uma zona maciça com 33.0cm de comprimento, seguida de uma zona em que, mantendo a

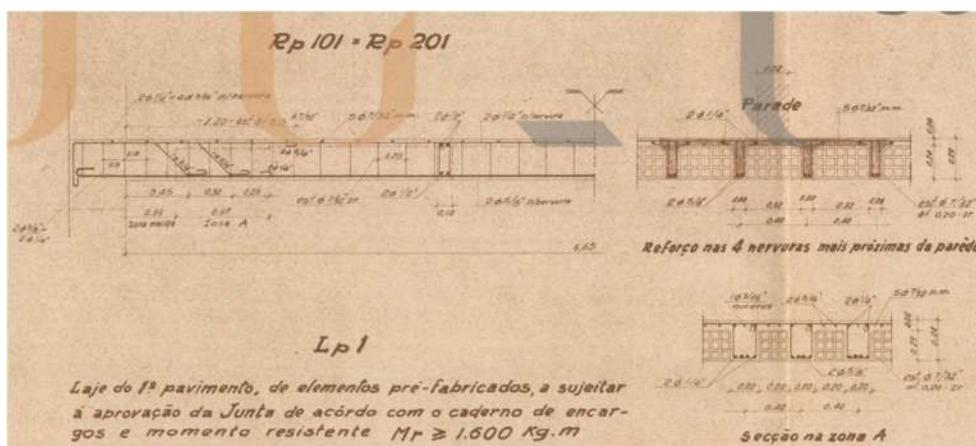
distância de 40.0cm entre o centro de nervuras consecutivas, a largura das nervuras passa a ser de 20.0cm e as peças cerâmicas igualmente de 20.0cm (ver zona A na figura abaixo).



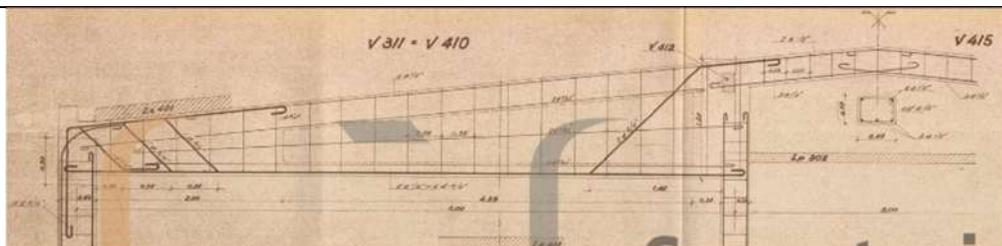
Desenhos de pormenorização das lajes de pavimento

Nas zonas em que existem paredes divisórias assentes sobre a laje, as nervuras são reforçadas no que à armadura diz respeito (ver figura abaixo). A laje de esteira é também constituída por elementos pré-fabricados, existindo abaixo uma laje maciça com 10.0cm de espessura, apenas na zona do corredor. Na zona das salas de aula existe apenas um teto falso abaixo da laje de esteira. Ao nível da cobertura, os alinhamentos das juntas de dilatação e das empenas possuem uma viga de secção variável, que se apresenta abaixo.

Os materiais indicados nos desenhos de estruturas são um betão B225, aço A40T para varões loongitudinais e aço macio para estribos.



Desenhos de pormenorização das lajes de pavimento sob paredes divisórias



Desenho de pormenorização da viga de secção variável da cobertura

Por último, é de referir que o projeto de estruturas desta escola apresenta uma conceção estrutural e um conjunto de disposições construtivas, com enfoque na resistência a ações horizontais, que se afiguram como bastante avançadas para a época construtiva. Exemplos disso são a diminuição de espaçamento de estribos e cintas junto aos nós ou a existência de travamentos diagonais na direção transversal. Estes elementos revelam-se disruptivos para a época e fazem desta escola um caso bastante particular de entre todas as analisadas neste estudo.

**Caracterização geotécnica**

Com base na carta de solos de que o LNEC dispõe (Ver relatório), a ES Luís António Verney encontra-se fundada em solo do tipo I, pelo que a ação a considerar é amplificada relativamente à ação estimada para o substrato rochoso através do estudo de perigosidade, desenvolvido para este trabalho. Assim, os espectros de resposta, que resultam do estudo probabilístico de perigosidade sísmica desenvolvido são amplificados tendo em conta a coluna de solo do tipo I através de uma análise estocástica não-linear de propagação vertical das ondas sísmicas. Os espectros de resposta, associados a um período de retorno de 475 anos, encontram-se na figura à direita.



**Modelo numérico**

Atendendo às características estruturais da escola, considera-se que o sistema resistente condicionante consiste nos corpos 1 e 2, uma vez que são aqueles que apresentam maior rácio entre área de piso e número de elementos de travamento horizontal. Consideram-se as escadas como elemento de travamento horizontal. Assim, a análise aqui desenvolvida centra-se nestes dois corpos como sendo condicionantes da resposta sísmica do edifício principal da escola.

O modelo de cálculo, desenvolvido no programa SeismoStruct, é composto por elementos de barra (*frame*) de plasticidade distribuída com formulação em força. Cada secção destes elementos é definida através de fibras com comportamento uniaxial, associadas a aço ou a betão. Os elementos finitos são definidos tendo em consideração as dimensões e armaduras que foram obtidas tendo por base os desenhos de estruturas do *Atlas of School Architecture in Portugal*.

As lajes aligeiradas são simuladas através de um modelo de grelha (ver figura abaixo), onde são modeladas todas as nervuras e tarugos, sendo o peso dos elementos cerâmicos distribuídos de forma automática pelas nervuras. As lajes maciças são modeladas de forma automática pelo programa, considerando a contribuição da sua rigidez através do cálculo da largura efetiva do banzo em “T” das vigas longitudinais e da consideração do efeito de diafragma nos nós das vigas longitudinais dos alinhamentos B e C (nós que confinam com a zona de laje maciça).  
 As fibras uniaxiais que definem o comportamento do betão são definidas através do modelo de *Mander et al.*, enquanto que as fibras de aço são definidas através do modelo de comportamento de *Menegotto-Pinto*.

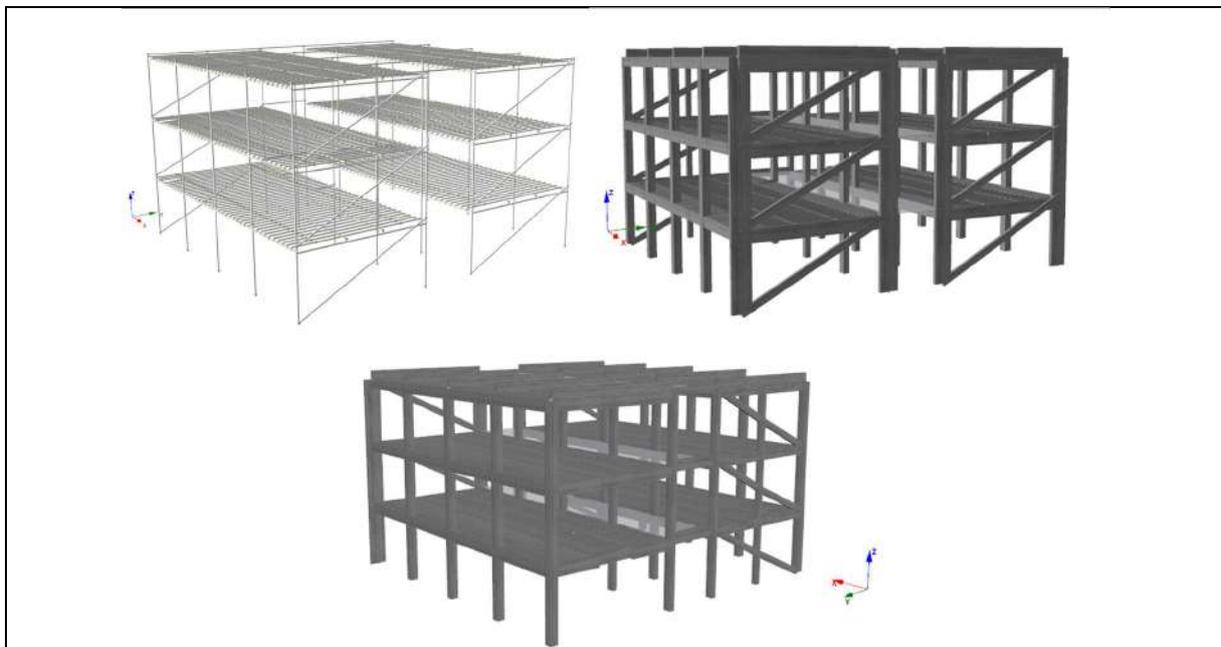


Modelo numérico da grelha (a verde) da laje aligeirada do piso 1 no programa SeismoStruct: corpo 1 (esq.); corpo 2 (dir.)

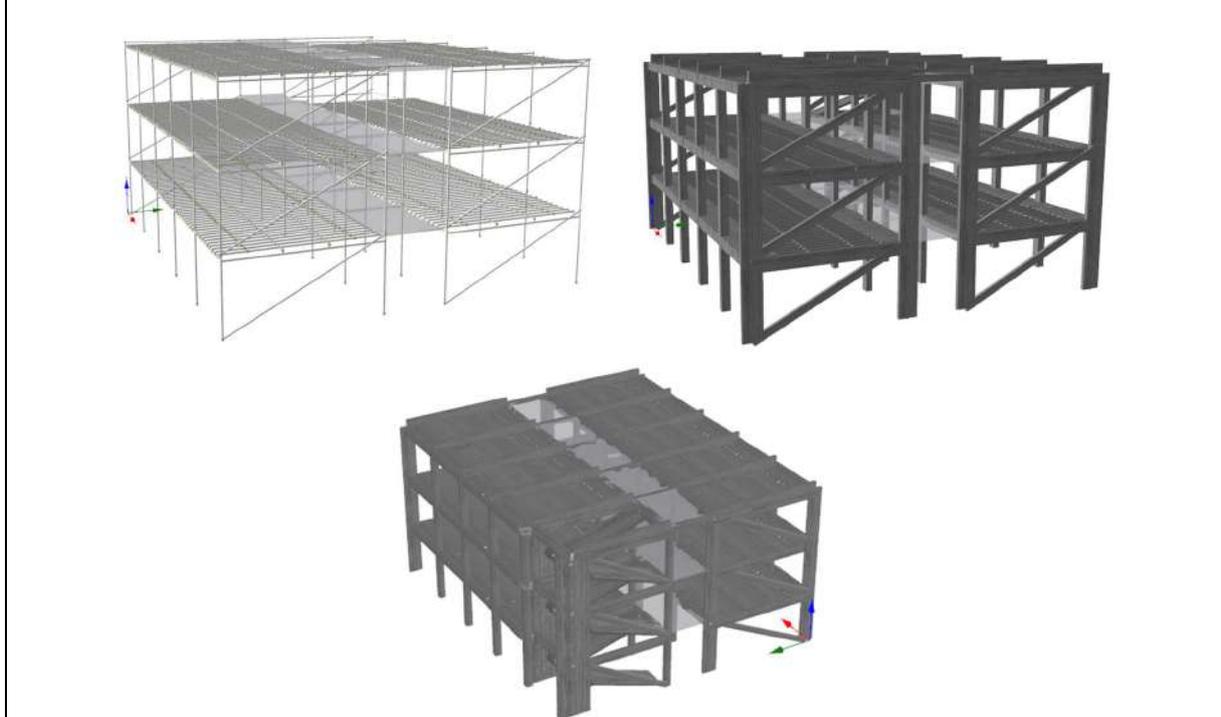
Consideram-se as bases dos pilares com restrições aos deslocamentos e às rotações, simulando assim um encastramento perfeito à fundação da estrutura, o que é justificado pela rigidez da mesma, conferida pela ligação das sapatas através de vigas de fundação de dimensões significativas. Relativamente às cargas atuantes, adotaram-se as cargas definidas de acordo com a norma portuguesa em vigor (NP EN1991-1-1), para o tipo de edifício em questão. Assim, as cargas permanentes e sobrecargas a considerar na análise são:

Carga	Pisos 1 a 3	Piso 4 (laje esteira)
Pavimento (RCP)	1.5 kN/m	2.5 kN/m
Paredes (RCP)	Divisórias: 2.5 kN/m (aplicada nas nervuras reforçadas) Exteriores: 7.8 kN/m (aplicada nas vigas exteriores)	
Sobrecarga	Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>	Cobertura não acessível: 0.40 kN/m <sup>2</sup>

Após a aplicação das cargas gravíticas é executada uma análise estática não-linear com controlo de deslocamentos (*pushover*).



*Modelo numérico do corpo 1 do edifício principal da escola no programa SeismoStruct: vista do lado do corpo 2 (cima);  
vista do topo (baixo)*



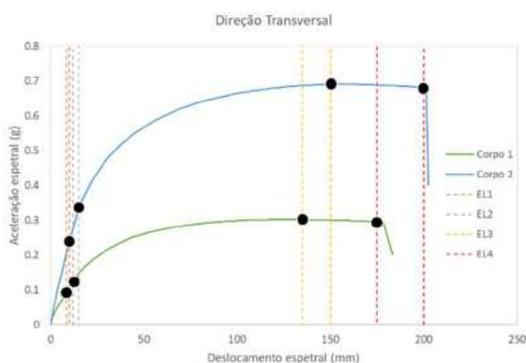
*Modelo numérico do corpo 2 do edifício principal da escola no programa SeismoStruct: vista do lado do corpo 3 (cima);  
vista do lado do corpo 1 (baixo)*

Os períodos de vibração da estrutura, obtidos através do modelo numérico, são:

Períodos de vibração	Corpo 1	Corpo 2
1º modo	0.55 s (longitudinal)	0.56 s (longitudinal)
2º modo	0.38 s (longitudinal)	0.34 s (longitudinal)
3º modo	0.32 s (transversal)	0.29 s (transversal)
4º modo	0.24 s (longitudinal)	0.23 s (longitudinal)

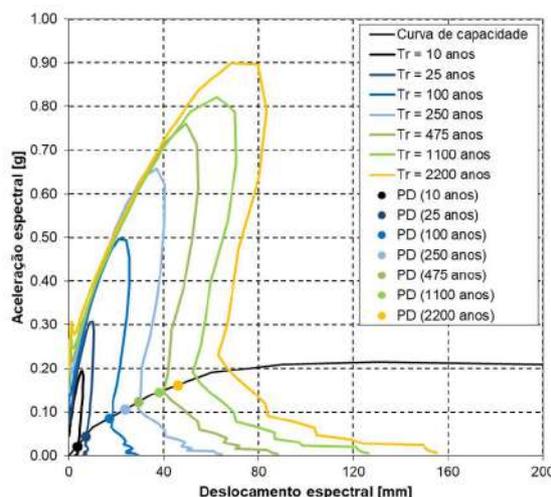
**Curva de capacidade**

Apresentam-se de seguida as curvas de capacidade dos dois corpos analisados. Verifica-se que na direção longitudinal o comportamento dos dois corpos é bastante semelhante, como expectável, devido à semelhança entre os elementos resistentes nessa direção que constituem os dois corpos. Por outro lado, na direção transversal o comportamento é significativamente diferente, salientando-se o facto da rigidez e resistência serem muito superiores nesta direção. O corpo 2 possui uma resistência muito superior ao corpo 1, uma vez que possui elementos, tais como as paredes junto às escadas (e as próprias escadas), com grande rigidez e resistência nesta direção. Ambos os corpos possuem uma ductilidade muito elevada em ambas as direções. É de notar que se desprezou, na direção longitudinal, a interação entre os vários corpos, o que constitui uma consideração conservativa, mas que deverá ser analisada em maior detalhe num eventual estudo individualizado sobre este edifício.

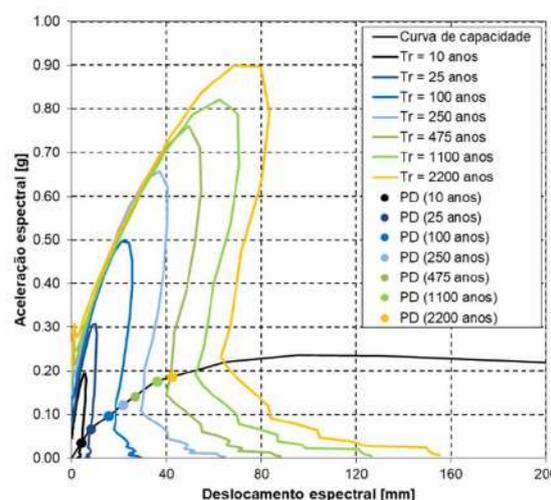


**Pontos de desempenho**

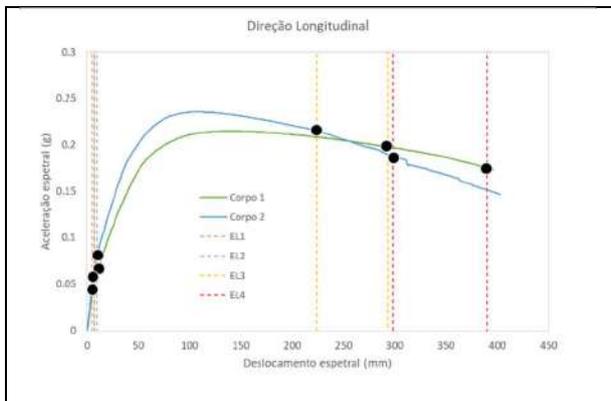
Determinação dos pontos de desempenho através do método do espectro de capacidade, para os sismos próximo e afastado e 25 períodos de retorno distintos.



Pontos de desempenho: Sismo próximo; Corpo 1; direção longitudinal



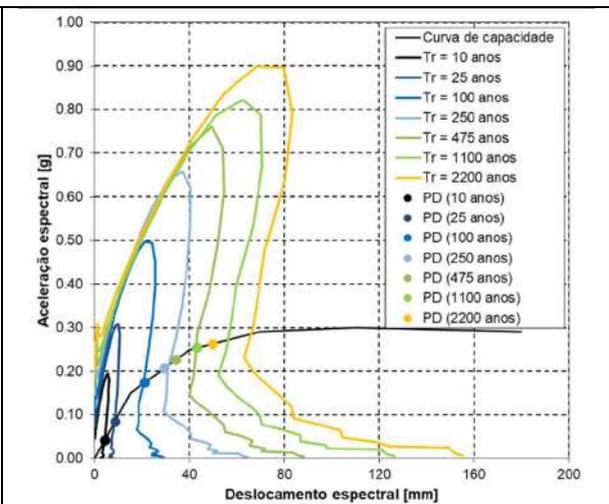
Pontos de desempenho: Sismo próximo; Corpo 2; direção longitudinal



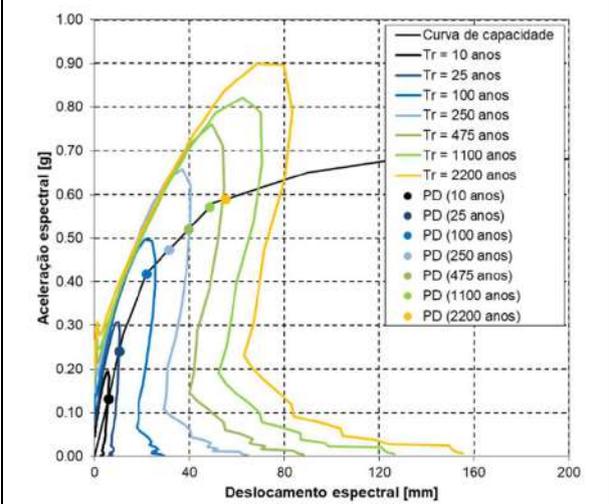
Os valores dos deslocamentos do topo associados aos estados limite são:

Estado limite – Direção transversal	Corpo 1	Corpo 2
Completamente Operacional	D= 10.5 mm	D= 8.4 mm
Operacional	D= 15.0 mm	D= 12.0 mm
Salvaguarda de Vida	D= 135.0 mm	D= 150.0 mm
Próximo do Colapso	D= 180.0 mm	D= 200.0 mm

Estado limite – Direção longitudinal	Corpo 1	Corpo 2
Completamente Operacional	D= 7.0 mm	D= 5.3 mm
Operacional	D= 10.0 mm	D= 7.5 mm
Salvaguarda de Vida	D= 292.5 mm	D= 223.5 mm
Próximo do Colapso	D= 390.0 mm	D= 298.0 mm



Pontos de desempenho: Sismo próximo; Corpo 1; direção transversal

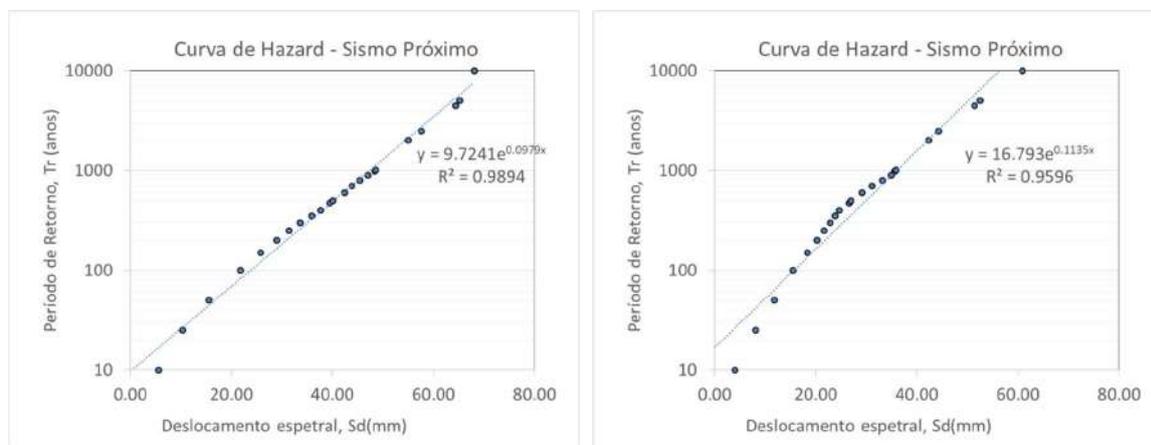


Pontos de desempenho: Sismo próximo; Corpo 2; direção transversal



**Curva de Hazard e períodos de retorno**

A curva de hazard, para sismo próximo pode assim ser determinada sendo apresentada de seguida.



Curva de Hazard: Sismo próximo; Corpo 2: direção transversal (esq.); direção longitudinal (dir.)

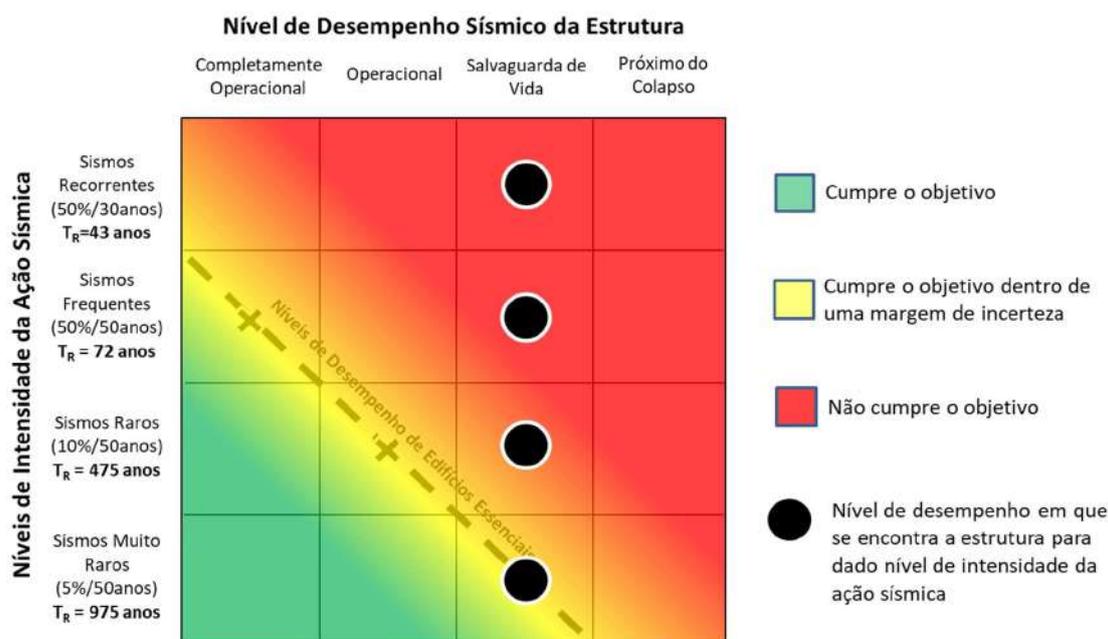
Os períodos de retorno, para o sismo condicionante, associados aos estados limite definidos são apresentados abaixo. Verifica-se que o aumento de rigidez do corpo 2 acaba por conduzir a que sejam mais facilmente atingidos os estados limite relacionados com o comportamento elástico da estrutura. Assim, pese embora este corpo seja mais resistente, no que concerne à operacionalidade pós-sismo, é aquele que mais facilmente é comprometido, o que se traduz por menores períodos de retorno da ação sísmica associados aos vários estados limite.

Período de retorno		Corpo 1	Corpo 2
Direção transversal			
Estado limite	Completamente Operacional	33	22
	Operacional	54	31
	Salvaguarda de Vida	>10000	>10000
	Próximo do Colapso	>10000	>10000

Período de retorno		Corpo 1	Corpo 2
Direção longitudinal			
Estado limite	Completamente Operacional	37	30
	Operacional	50	39
	Salvaguarda de Vida	>10000	>10000
	Próximo do Colapso	>10000	>10000

**Matriz de desempenho sísmico**

A matriz de desempenho sísmico, que descreve o comportamento da estrutura relativamente aos níveis e objetivos de desempenho definidos, é apresentada abaixo.



**Conclusão**

A análise aqui desenvolvida é baseada no projeto de estruturas do edifício que consta do *Atlas of School Architecture in Portugal*.

Verifica-se que o edifício principal da escola se encontra subdividido em vários corpos com comportamento sísmico significativamente diferente. Todos os corpos não constituídos por pórticos longitudinais em betão armado e lajes aligeiradas com tijolos cerâmicos e nervuras de largura variável em comprimento. Na zona do corredor, no entanto, a laje é maciça. Nas juntas de dilatação que separam os corpos do edifício existem vigas e diagonais transversais, em betão armado, que conferem rigidez à estrutura. Esta conceção estrutural é bastante avançada, no que toca às disposições construtivas que dizem respeito à resistência a ações horizontais, tendo em conta a época construtiva da escola.

Não obstante, o comportamento da estrutura do edifício que constitui a escola é insatisfatório para os níveis e objetivos de desempenho sísmico relacionados com a operacionalidade pós-sismo. Isto ocorre para sismos com probabilidade de ocorrência igual ou superior a 10% em 50 anos.

Com efeito, embora a estrutura se encontre salvaguardada relativamente aos níveis de desempenho mais gravosos, é expectável a ocorrência de danos que limitem a sua operacionalidade, mesmo para sismos com moderada a baixa intensidade.



Para sismos mais intensos, com probabilidade de ocorrência superior a 10% em 50 anos, a estrutura tem uma resposta conforme com os objetivos de desempenho definidos, não sendo verosímil que a estrutura se encontre próxima do colapso para nenhum destes níveis de intensidade da ação sísmica.



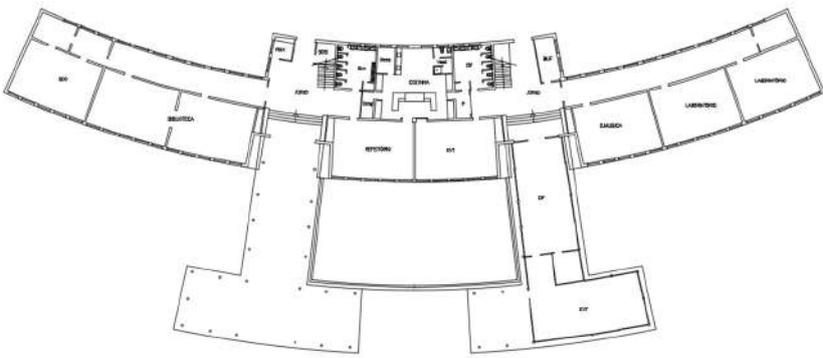
# Escola Básica Luís de Camões

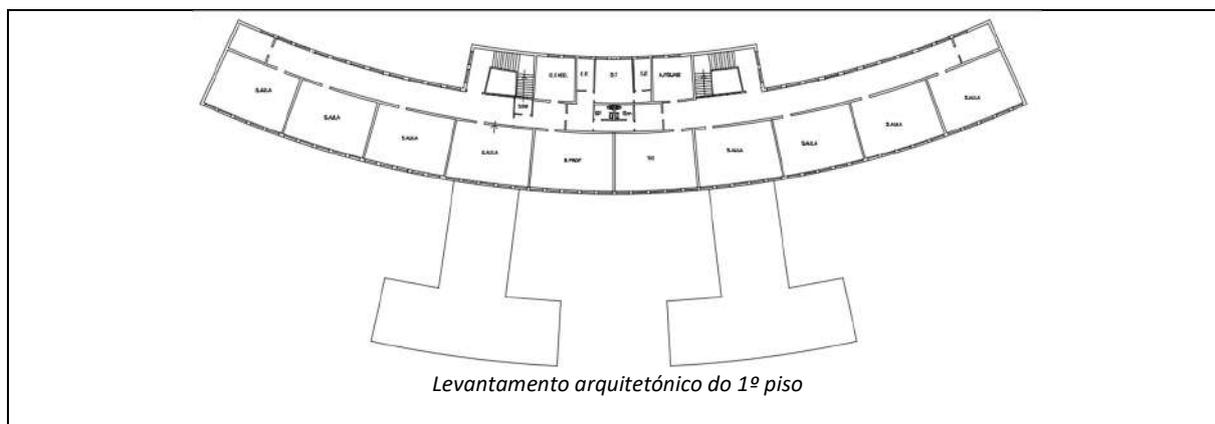
ID Escola: 75

Escola	Agrupamento	Área coberta
Escola Básica Luís de Camões	Luís de Camões	5796 m <sup>2</sup>

Nível de ensino	Número de alunos
2º e 3º ciclos	500 alunos

Descrição geral	
<p>A escola localiza-se junto à Avenida Padre Manuel da Nóbrega, Areiro, e é composta por um edifício único. O acesso à escola é feito através de uma praça, com ocupação predominante de estacionamento automóvel, o que constitui uma limitação relevante e deverá ser tido em consideração no planeamento de evacuação e encontro em caso de ocorrência de evento sísmico. Não obstante, existe espaço, dentro dos limites da escola, para evacuação e encontro em caso de ocorrência de evento sísmico.</p> <p>A escola é circundada por edifícios habitacionais de alvenaria. No entanto, atendendo à distância a que os mesmos se encontram da escola, não é previsível qualquer interação sísmica.</p> <p>Na extremidade Norte da escola encontra-se o túnel do metro, sendo possível sentir as vibrações induzidas por este.</p>	 <p><i>Imagem aérea do Google Earth</i></p>

Informação de base
<p>Estão apenas disponíveis desenhos de levantamento arquitetónico fornecidos pela CML. Não foram realizadas alterações ao levantamento fornecido, apesar de se considerar nesta análise a informação acrescida recolhida na visita à escola realizada pelo Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas (NESDE) do LNEC.</p>
 <p><i>Levantamento arquitetónico do R/C</i></p>



### Caracterização estrutural

A escola é composta por um edifício único que se subdivide em três corpos independentes, no que concerne ao comportamento sísmico. As duas juntas de dilatação encontram-se nas extremidades das duas estruturas em T. A informação de base não é suficiente para caracterizar convenientemente o sistema estrutural. Assim, a análise aqui desenvolvida é baseada naquilo que se presume ser a prática construtiva e os materiais da época de construção da escola. Neste sentido, assume-se que a estrutura é formada por pórticos em betão armado, cujos vãos se encontram preenchidos com alvenaria (ver figura abaixo). As estruturas complementares em T possuem pilares circulares. Uma dessas estruturas é uma cobertura, sobre a entrada da escola. A outra estrutura encontra-se ocupada com uma sala/oficina de trabalho (ver figura abaixo).



*Termoforese reveladora da presença de um sistema reticulado de betão armado e alvenarias de enchimento*



*Sala criada debaixo de um dos T's (a norte)*

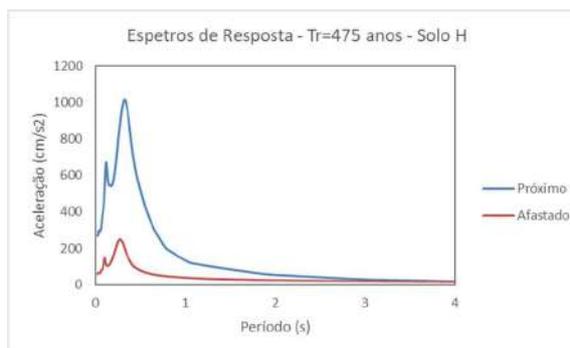
Os pórticos transversais são constituídos por pilares e vigas em betão armado e estão afastados aproximadamente 3.80m. Na ausência de qualquer outra informação, assumiram-se os seguintes materiais e características da estrutura:

- Materiais: C16/20 + A250
- Dimensões dos elementos estruturais:
  - Pilares:
    - 0.35x0.35 [mxm] (perímetro)
    - 0.25x0.25 [mxm] (interiores)
  - Laje vigada:
    - Laje: 15.0cm
    - Vigas interiores: 0.35x0.80 [mxm]
    - Vigas perímetro: 0.35x0.65 [mxm]

É de salientar que na ausência de informação sobre o projeto de estruturas da escola que permita recolher dados sobre o seu dimensionamento, nomeadamente no que diz respeito a materiais, ações consideradas, dimensões de elementos estruturais, armaduras colocadas, entre outros pormenores construtivos, estes resultados devem ser encarados como indicadores do comportamento expectável e não como uma avaliação detalhada do comportamento sísmico da estrutura.

#### Caracterização geotécnica

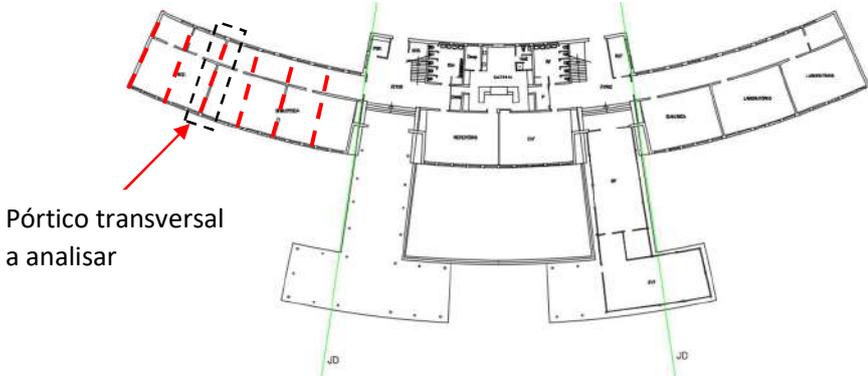
Com base na carta de solos de que o LNEC dispõe (Ver relatório), a EB Luís de Camões encontra-se fundada em solo do tipo H, pelo que se considera a amplificação da ação calculada ao nível do substrato rochoso com base na coluna de solo respetiva (coluna H). Os espectros de resposta, que resultam de um estudo probabilístico de perigosidade sísmica desenvolvido especificamente no âmbito deste projeto, associados a um período de retorno de 475 anos, encontram-se na figura à direita.



#### Modelo numérico

Atendendo às características estruturais da escola, considera-se que as zonas mais vulneráveis são os corpos laterais (entre a junta de dilatação e a extremidade do edifício), pelo que serão essas as zonas consideradas na análise. Tendo em consideração a configuração do edifício, com comprimento muito superior à largura, a análise centra-se num dos pórticos resistentes na direção transversal (representado a vermelho na figura abaixo).

Foi desenvolvido um modelo complementar que admitia que as vigas não garantiam continuidade de momentos por se tratar de um piso constituído por vigotas pré-fabricadas em betão armado. No entanto, os resultados assim obtidos revelaram-se menos gravosos, tendo-se admitido na análise subsequente o comportamento em pórtico acima referido.



Pórtico transversal a analisar

O modelo de cálculo, desenvolvido no programa SeismoStruct, é composto por elementos de barra (*frame*) de plasticidade distribuída com formulação em força. Cada secção destes elementos é definida através de fibras com comportamento uniaxial, associadas a aço ou a betão. Os elementos finitos são definidos tendo em consideração as dimensões acima apresentadas e as armaduras que foram calculadas tendo por base taxas regulamentares de armadura mínimas de 1% (para pilares) e 0.28% (armadura de tração para vigas, tendo em conta a utilização de aço A250 e betão C16/20). As armaduras dos pilares são:

Arm. Long; Arm. Transv.	Interiores	Perímetro
<b>1º e 2º pisos</b>	4Φ20; Φ8//0.20	4Φ20+4Φ16; Φ8//0.20

Relativamente às vigas, as armaduras são:

Arm. Long; Arm. Transv.	Local	Extremidades	Sob pilares interiores	Meio-vão
<b>1º e 2º pisos</b>	Vigas interiores	inf 4Φ25; sup 4Φ16; Φ8//0.15	inf 4Φ25; sup 4Φ25; Φ8//0.15	inf 4Φ25; sup 4Φ25; Φ8//0.15
	Vigas perímetro	inf 3Φ16; sup 2Φ16; Φ8//0.15	inf 3Φ16; sup 3Φ16; Φ8//0.15	inf 3Φ16; sup 3Φ16; Φ8//0.15

As lajes maciças são armadas com Φ10//0.15 em ambas as faces. As cargas atuantes nas lajes são automaticamente distribuídas pela malha de vigas, enquanto que a sua rigidez é simulada através do cálculo da largura efetiva do banzo das vigas em “T”, o que é feito também de forma automática pelo programa de cálculo.

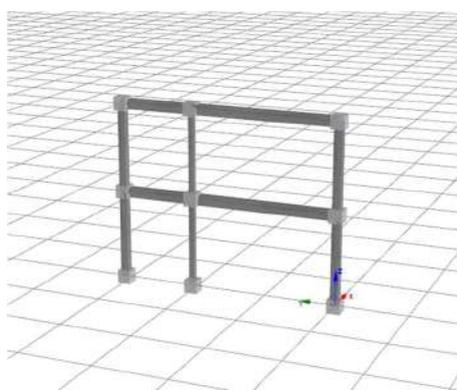
As fibras uniaxiais que definem o comportamento do betão são definidas através do modelo de *Mander et al.*, enquanto que as fibras de aço são definidas através do modelo de comportamento de *Menegotto-Pinto*.

Consideram-se as bases dos pilares com restrições aos deslocamentos e às rotações, simulando assim um encastramento perfeito à fundação da estrutura.

Relativamente às cargas atuantes, adotaram-se as cargas definidas de acordo com a norma portuguesa em vigor (NP EN1991-1-1), para o tipo de edifício em questão. Assim, as cargas permanentes e sobrecargas a considerar na análise são:

Carga	1º Piso	Cobertura
Pavimento (RCP)	1.5 kN/m <sup>2</sup>	2.5 kN/m <sup>2</sup>
Paredes (RCP)	Divisórias: 1.75 kN/m <sup>2</sup> (aplicada na laje do 1º piso) Exteriores: 7.8 kN/m (aplicada nas vigas exteriores do 1º piso)	-
Sobrecarga	Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>	Cobertura não acessível: 0.4 kN/m <sup>2</sup>

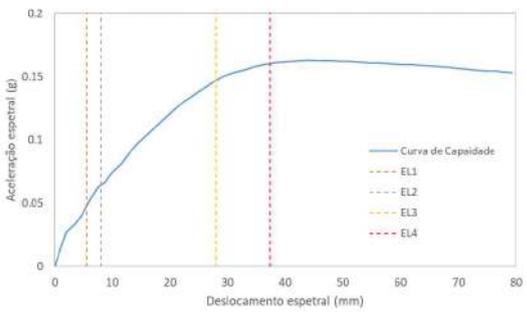
Após a aplicação das cargas gravíticas é executada uma análise estática não-linear com controlo de deslocamentos (*pushover*).



Modelo numérico do pórtico transversal tipo da escola no programa SeismoStruct

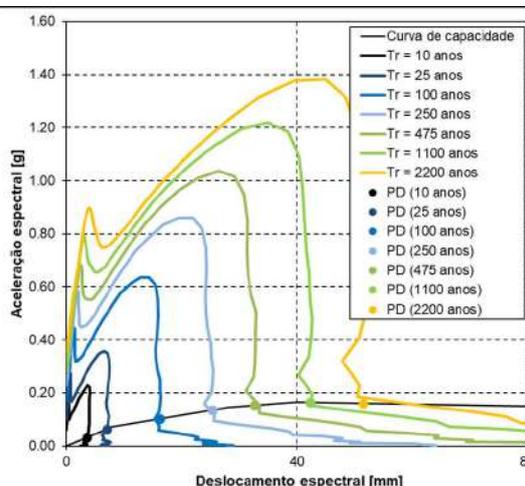
Os períodos de vibração da estrutura, obtidos através do modelo numérico, são:

Períodos de vibração	Direção transversal
1º modo	0.54 s
2º modo	0.21 s
3º modo	0.05 s

Curva de capacidade	Pontos de desempenho
 <p>Os estados limite desta estrutura são condicionados pela rotura ao corte dos elementos, sendo esse o ponto que controla o estado limite de Salvaguarda de Vida. O estado</p>	<p>Determinação dos pontos de desempenho através do método do espectro de capacidade, para os sismos próximo e afastado e 25 períodos de retorno distintos.</p> <p>Considera-se que dada a falta de ductilidade desta estrutura, nomeadamente devido às roturas por corte que se observam, esta estrutura apresenta pouca capacidade de dissipação de energia. Desta forma, na implementação do método do espectro de capacidade considera-se um coeficiente de amortecimento efetivo máximo de 7%.</p> <p>Na figuras abaixo apresentam-se apenas 7 dos 25 espectros de resposta considerados, para sismo próximo.</p>

limite Próximo do Colapso é definido como 4/3 do anterior. Os outros dois estados limite mantêm as definições apresentadas no relatório. Os valores dos deslocamentos do topo associados aos estados limite são:

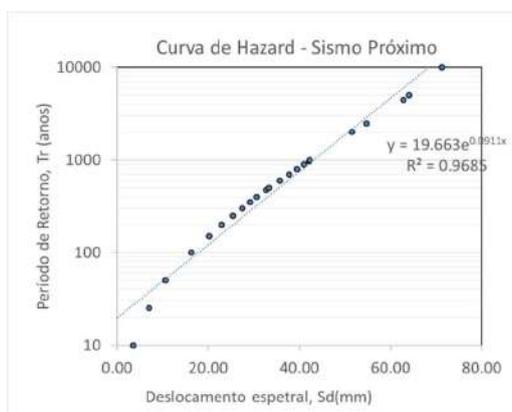
Estado limite	Deslocamento no topo
Completamente Operacional	D= 5.6 mm
Operacional	D= 8.0 mm
Salvaguarda de Vida	D= 28.0 mm
Próximo do Colapso	D= 37.3 mm



Pontos de desempenho: Sismo próximo

### Curva de Hazard e períodos de retorno

A curva de hazard, para sismo próximo pode assim ser determinada sendo apresentada de seguida.



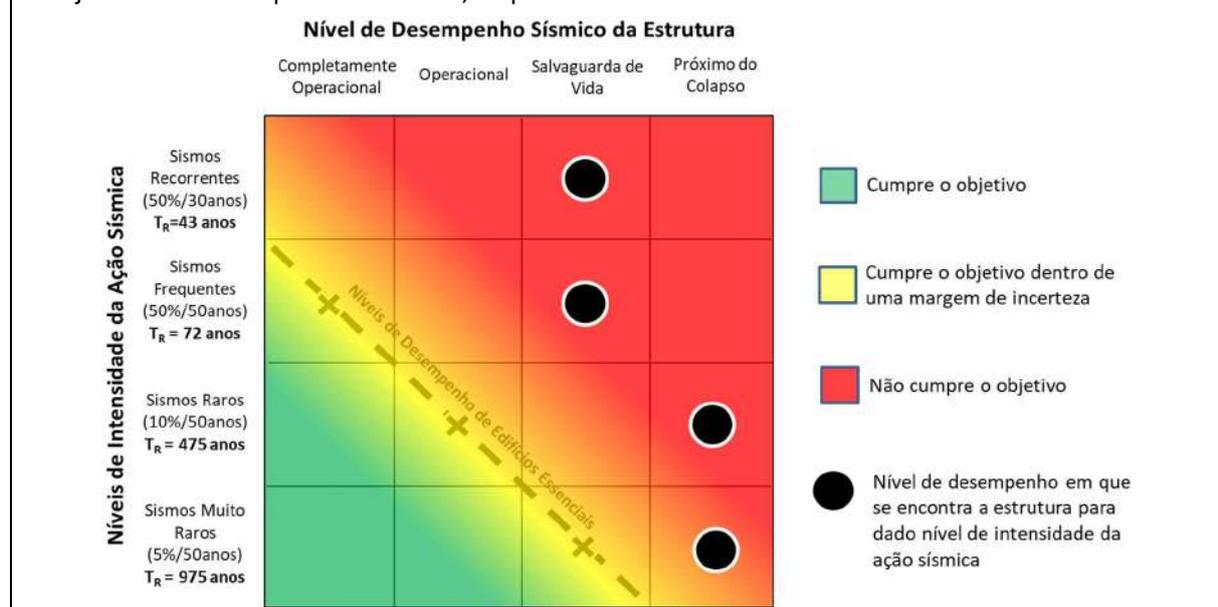
Curva de Hazard: Sismo próximo

Os períodos de retorno associados aos estados limite definidos são:

Estado limite	Período de retorno	Sismo Próximo	Sismo Afastado
	Completamente Operacional	33	377
Operacional	41	1907	
Salvaguarda de Vida	252	>10000	
Próximo do Colapso	590	>10000	

### Matriz de desempenho sísmico

A matriz de desempenho sísmico, que descreve o comportamento da estrutura relativamente aos níveis e objetivos de desempenho definidos, é apresentada abaixo.



### Conclusão

A informação de base não é suficiente para caracterizar convenientemente o sistema estrutural da escola. Assim, a análise aqui desenvolvida é baseada na informação recolhida na visita à escola, na prática construtiva e nos materiais da época de construção da escola, assim como num conjunto de análises complementares que avaliaram possíveis sistemas estruturais, tendo-se adotado aquele que, de entre os sistemas plausíveis, é o menos conservativo.

Verifica-se que o comportamento da estrutura do edifício que constitui a escola (edifício porticado em betão armado) relativamente aos níveis e objetivos de desempenho sísmico definidos é insatisfatório.

Com efeito, verifica-se que para um sismo com probabilidade de ocorrência de 50% em 30 anos a estrutura se encontra num nível de desempenho *operacional* (seria expectável que se encontrasse no nível de desempenho *completamente operacional*). Por outro lado, verifica-se que para um sismo com probabilidade de ocorrência de 50% em 50 anos a estrutura se encontra num nível de desempenho *salvaguarda de vida* (seria expectável que se encontrasse no nível de desempenho *completamente operacional*). Além disso, verifica-se que para um sismo com probabilidade de ocorrência de 10% em 50 anos a estrutura se encontra num nível de desempenho *próximo do colapso* (seria expectável que se encontrasse no nível de desempenho *operacional*). Por último, para um sismo com probabilidade de ocorrência de 5% em 50 anos a estrutura excedeu o nível de desempenho *próximo do colapso* (seria expectável que se encontrasse no nível de desempenho *salvaguarda de vida*).

Assim, recomenda-se que a escola seja alvo de uma inspeção estrutural detalhada que sirva de base para um eventual projeto de reforço que vise mitigar as atuais insuficiências em termos de resistência sísmica.



# Escola Básica Manuel da Maia

ID Escola: 79

Escola	Agrupamento	Área coberta
Escola Básica Manuel da Maia	Manuel da Maia	1615 m <sup>2</sup>

Nível de ensino	Número de alunos
2º e 3º ciclos	365 alunos

### Descrição geral

A escola localiza-se em Campo de Ourique, numa zona maioritariamente residencial, embora com bastante comércio de bairro. A escola, construída na década de 1950, é composta por um edifício principal e um edifício de ginásio (que inclui a cantina), unidos através de um corpo curvo. No piso térreo do edifício principal existem um conjunto de oficinas que estão concessionadas, pelo que importa integrar os seus ocupantes, embora externos à escola, no planeamento de emergência do edifício.

O acesso à escola é feito através de uma praça, com ocupação predominante de estacionamento automóvel, o que constitui uma limitação relevante e deverá ser tido em consideração no planeamento de evacuação e encontro em caso de ocorrência de evento sísmico. Não obstante, existe espaço, dentro dos limites da escola, para evacuação e encontro em caso de ocorrência de evento sísmico.

A escola é circundada por edifícios habitacionais de alvenaria. No entanto, atendendo à distância a que os mesmos se encontram da escola, não é previsível qualquer interação sísmica.

Na extremidade Noroeste o edifício principal da escola encontra-se fundado num talude com elevada inclinação e sem qualquer estrutura de proteção. A estabilidade deste talude, embora não integre o presente estudo, é vital para a integridade estrutural da escola, pelo que a sua análise em futuros estudos detalhados da escola é recomendada.



Imagem aérea do Google Earth

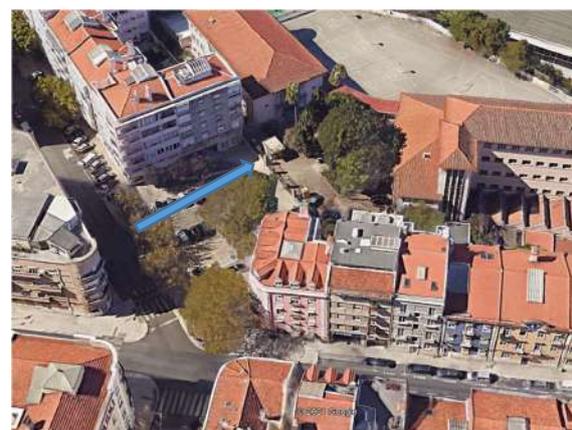


Imagem aérea da entrada da escola, através de praça



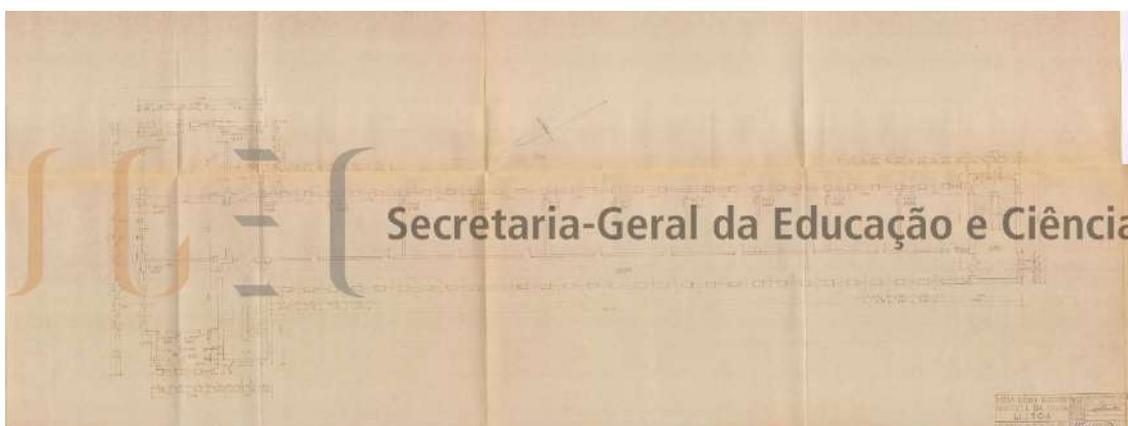
Imagem aérea do talude no limite da escola

**Informação de base**

Estão disponíveis desenhos do *Atlas of School Architecture in Portugal*, que incluem desenhos de levantamento arquitetónico e alguns desenhos de estruturas, nomeadamente plantas de fundações e desenhos com armaduras de vigas e pilares da estrutura. É com base nestes desenhos e na informação recolhida na visita à escola realizada pelo Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas (NESDE) do LNEC, que este estudo se baseia. No entanto, detetaram-se várias incongruências, nos desenhos de estruturas do Atlas, relativamente à estrutura existente. Pelo que, em caso de dúvida, foi adotada uma disposição de elementos estruturais de acordo com o registado na visita realizada pelo NESDE.



*Planta de fundações do edifício principal*



*Levantamento arquitetónico do 3º piso (piso-tipo)*



**Caracterização estrutural**

O edifício principal da escola, com um total de 4 pisos (e sótão sob a cobertura), é constituído por uma estrutura reticulada de betão armado, fundada em sapatas, ligadas por vigas de fundação. Nas traseiras do edifício principal, ao nível do piso térreo, existem oficinas com estrutura de betão armado fundadas numa viga contínua (sem sapatas) e com cobertura com V com múltiplas vertentes. Dada a diferença de rigidez entre a estrutura do edifício principal e a estrutura das oficinas, estas não são consideradas como parte integrante do sistema resistente do edifício principal, deprezando-se assim a sua contribuição para a resistência sísmica.

O edifício principal contém uma zona ampla, sem paredes ao nível do piso térreo (ver fotografia abaixo), sendo que nos pisos superiores os pórticos de betão armado são preenchidos com paredes de alvenaria de tijolo. Esta assimetria em altura poderá originar problemas estruturais que, dado a reduzida informação existente e o âmbito global deste estudo, não foram considerados nesta análise. Este edifício contém duas juntas de dilatação que separam assim a estrutura em três corpos independentes na direção transversal. O edifício é constituído por uma banda de salas ligadas por um corredor que se desenvolve ao longo de todo o comprimento do edifício (ver fotografia abaixo).



*Piso térreo com zona ampla e estrutura reticulada de betão armado aparente (entrada para as oficinas à direita)*

*Corte transversal do edifício principal*

Nos pisos intermédios é possível observar as vigas nos tetos do corredor e das salas de aula. Na laje de esteira, as vigas são invertidas, sendo observadas por cima (no sótão), algo que é usual neste tipo de edifícios (ver fotografias abaixo).

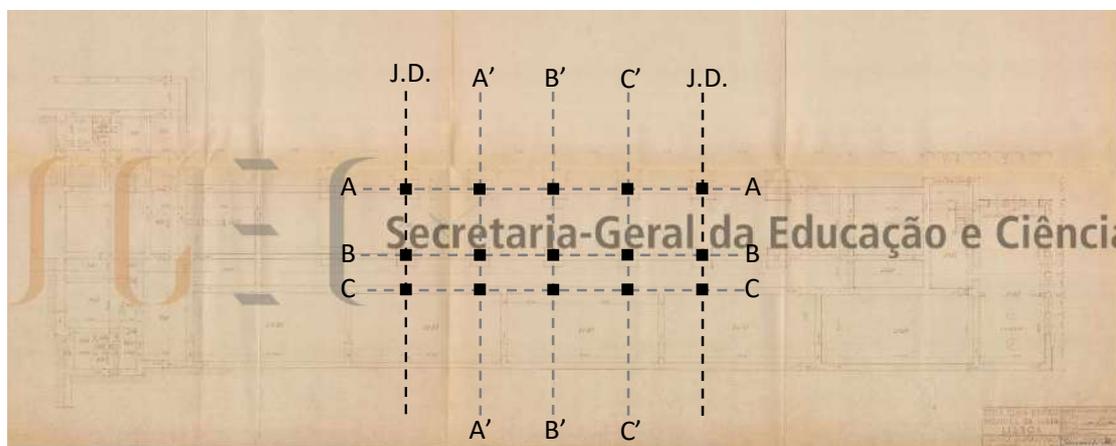


*Corredor no terceiro com vigas aparentes*



*Cobertura com vigas invertidas na laje de esteira*

Tendo em conta o descrito acima, a análise incide no corpo central do edifício principal, localizado entre as duas juntas de dilatação (ver figura abaixo).



*Planta com identificação dos alinhamentos estruturais do edifício*

Não existindo informação de base para caracterizar convenientemente os materiais e outros pormenores construtivos da escola, consideram-se materiais característicos da época de construção da escola. Consideram-se os seguintes materiais e características da estrutura:

- Materiais: C16/20 + A250
- Dimensões dos elementos estruturais:
  - Laje vigada: 20.0cm de espessura

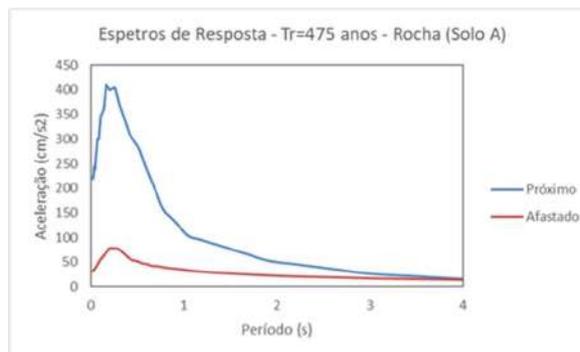
Pilares [cm x cm]	Alinhamento A	Alinhamento B	Alinhamento C
Pisos 1 e 2	76x76	76x76	25x35
Pisos 3 e 4	50x60	25x60	25x35

Vigas dir. transversal [cm x cm]	Entre alinhamentos A e B	Entre alinhamentos B e C
Todos os pisos	25x80	25x55

É de salientar que na ausência de informação coerente sobre o projeto de estruturas da escola que permita recolher dados sobre o seu dimensionamento, nomeadamente no que diz respeito a materiais, ações consideradas, dimensões de elementos estruturais, armaduras colocadas, entre outros pormenores construtivos, estes resultados devem ser encarados como indicadores do comportamento expectável e não como uma avaliação detalhada do comportamento sísmico da estrutura.

### Caracterização geotécnica

Com base na carta de solos de que o LNEC dispõe (Ver relatório), a EB Manuel da Maia encontra-se fundada em solo do tipo A (rocha), pelo que a ação a considerar corresponde diretamente à ação estimada através do estudo de perigosidade desenvolvido para este trabalho (não é necessário considerar qualquer amplificação da ação calculada ao nível do substrato rochoso). Os espetros de resposta, que resultam do estudo probabilístico de perigosidade sísmica desenvolvido especificamente no âmbito deste projeto, associados a um período de retorno de 475 anos, encontram-se na figura à direita.



### Modelo numérico

Atendendo às características estruturais da escola, considera-se que o sistema resistente condicionante consiste no corpo intermédio, localizado entre as juntas de dilatação, pelo que é essa a zona considerada na análise. Assim, a análise centra-se num dos pórticos resistentes na direção transversal (representado por um dos alinhamentos A'-A', B'-B' ou C'-C' na figura acima). A largura de influência dos pórticos transversais é de 7.75m.

O modelo de cálculo, desenvolvido no programa SeismoStruct, é composto por elementos de barra (*frame*) de plasticidade distribuída com formulação em força. Cada secção destes elementos é definida através de fibras com comportamento uniaxial, associadas a aço ou a betão. Os elementos finitos são definidos tendo em consideração as dimensões acima apresentadas e as armaduras que foram estimadas tendo por base os dados constantes nos desenhos de estruturas do **Atlas of School Architecture in Portugal**, devidamente adaptadas tendo em conta as dimensões reais dos elementos medidas na visita efetuada pelo NESDE.

A taxa de armadura de pilares e vigas respeita as taxas regulamentares de armadura mínimas e máximas, tendo em conta a utilização de aço A250 e betão C16/20. As armaduras dos pilares são:

Pilares [long.; cintas]	Alinhamento A	Alinhamento B	Alinhamento C
Pisos 1 e 2	16Φ25; Φ10//0.20	16Φ25; Φ10//0.20	8Φ16; Φ8//0.20
Pisos 3 e 4	12Φ25; Φ10//0.20	10Φ25; Φ10//0.20	8Φ16; Φ8//0.20

Relativamente às vigas, as armaduras são:

Vigas dir. transversal [long.; estribos]	Entre alinhamentos A e B	Entre alinhamentos B e C
Extremidade/sobre pilar interior	Sup: 4Φ20; Inf: 4Φ20; Φ8//0.15	Sup: 3Φ16; Inf: 3Φ16; Φ8//0.15
Meio-vão	Sup: 2Φ20; Inf: 4Φ20; Φ8//0.25	Sup: 3Φ16; Inf: 3Φ16; Φ8//0.25

As lajes maciças são armadas com Φ10//0.15 em ambas as faces. As cargas atuantes nas lajes são automaticamente distribuídas pela malha de vigas, enquanto que a sua rigidez é simulada através do cálculo da largura efetiva do banzo das vigas em “T”, o que é feito também de forma automática pelo programa de cálculo.

As fibras uniaxiais que definem o comportamento do betão são definidas através do modelo de *Mander et al.*, enquanto que as fibras de aço são definidas através do modelo de comportamento de *Menegotto-Pinto*.

Consideram-se as bases dos pilares com restrições aos deslocamentos e às rotações, simulando assim um encastramento perfeito à fundação da estrutura, o que é justificado pela rigidez da mesma, conferida pela ligação das sapatas através de vigas de fundação de dimensões significativas.

Relativamente às cargas atuantes, adotaram-se as cargas definidas de acordo com a norma portuguesa em vigor (NP EN1991-1-1), para o tipo de edifício em questão. Assim, as cargas permanentes e sobrecargas a considerar na análise são:

Carga	Pisos 1 a 3	Piso 4 (laje esteira)
Pavimento (RCP)	1.5 kN/m <sup>2</sup>	2.5 kN/m <sup>2</sup>
Paredes (RCP)	Divisórias: 1.75 kN/m <sup>2</sup> Exteriores: 7.8 kN/m (aplicada nas vigas exteriores)	Divisórias: 1.75 kN/m <sup>2</sup>
Sobrecarga	Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>	Cobertura acessível (sótão) utilizada como armazém – Classe E1 (EC1-1-1) (com ocupação a 50%): 7.5*0.5 = 3.75 kN/m <sup>2</sup>

Após a aplicação das cargas gravíticas é executada uma análise estática não-linear com controlo de deslocamentos (*pushover*).

*Modelo numérico do pórtico transversal tipo da escola no programa SeismoStruct*

Os períodos de vibração da estrutura, obtidos através do modelo numérico, são:

Períodos de vibração	Direção transversal
1º modo	1.09 s
2º modo	0.36 s
3º modo	0.21 s

### Curva de capacidade

Os valores dos deslocamentos do topo associados aos estados limite são:

Estado limite	Deslocamento no topo
Completamente Operacional	D= 16.1 mm
Operacional	D= 23.0 mm
Salvaguarda de Vida	D= 120.0 mm
Próximo do Colapso	D= 160.0 mm

### Pontos de desempenho

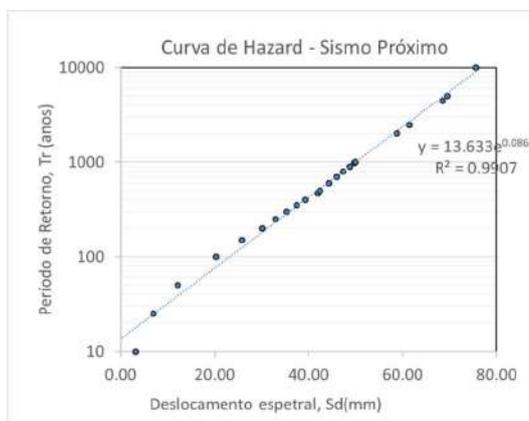
Determinação dos pontos de desempenho através do método do espectro de capacidade, para os sismos próximo e afastado e 25 períodos de retorno distintos.

Na figura abaixo apresentam-se apenas 7 dos 25 espectros de resposta considerados, para sismo próximo.

*Pontos de desempenho: Sismo próximo*

### Curva de Hazard e períodos de retorno

A curva de hazard, para sismo próximo pode assim ser determinada sendo apresentada de seguida.



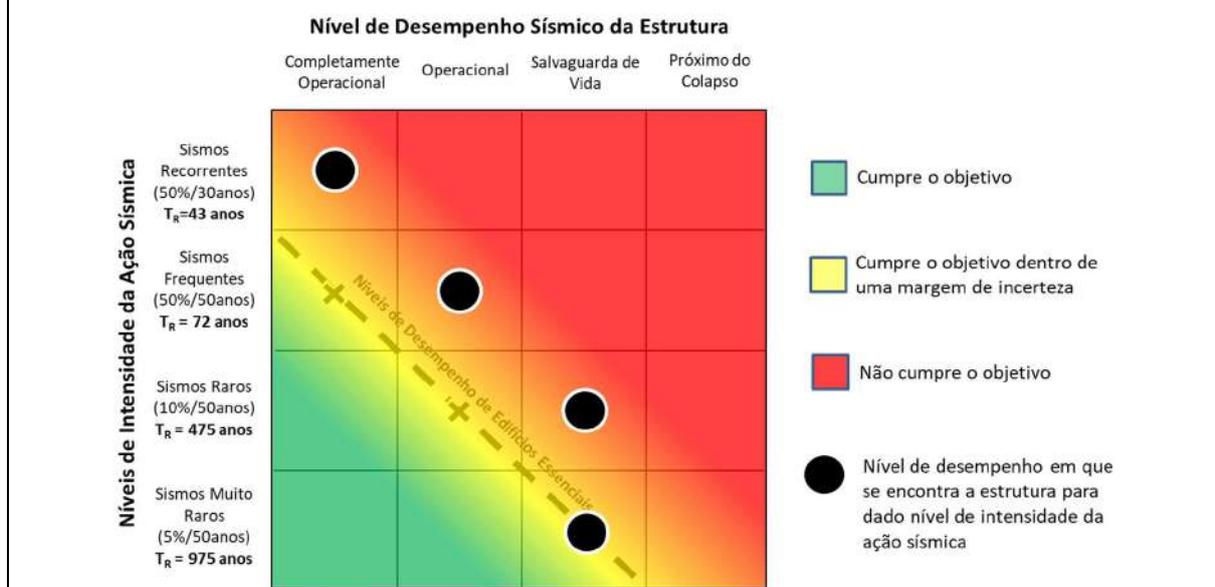
Curva de Hazard: Sismo próximo

Os períodos de retorno associados aos estados limite definidos são:

Período de retorno		Sismo Próximo	Sismo Afastado
Estado limite	Completamente Operacional	54	605
	Operacional	99	3185
	Salvaguarda de Vida	>10000	>10000
	Próximo do Colapso	>10000	>10000

### Matriz de desempenho sísmico

A matriz de desempenho sísmico, que descreve o comportamento da estrutura relativamente aos níveis e objetivos de desempenho definidos, é apresentada abaixo.



### Conclusão

A análise aqui desenvolvida é baseada na prática construtiva e os materiais da época de construção da escola e um conjunto de dados recolhidos dos desenhos de estruturas do *Atlas of School Architecture in Portugal* e de visita à escola efetuada pelo NESDE.

Verifica-se que o comportamento da estrutura do edifício que constitui a escola (edifício porticado em betão armado) relativamente aos níveis e objetivos de desempenho sísmico definidos é insatisfatório, nomeadamente para sismos com probabilidade de ocorrência igual ou superior a 10% em 50 anos. Para sismos mais intensos a estrutura tem uma resposta conforme com os objetivos de desempenho definidos, não sendo verosímil que a estrutura se encontre próxima do colapso para nenhum destes níveis de intensidade da ação sísmica. Não obstante, os danos expectáveis para sismos mais frequentes poderão ser elevados, nomeadamente em elementos não estruturais, e comprometer a operacionalidade da escola.

Com efeito, verifica-se que para um sismo com probabilidade de ocorrência de 50% em 50 anos a estrutura se encontra num nível de desempenho *operacional* (seria expectável que se encontrasse no nível de desempenho *completamente operacional*). Por outro lado, verifica-se que para um sismo com probabilidade de ocorrência de 10% em 50 anos a estrutura se encontra num nível de desempenho *salvaguarda de vida* (seria expectável que se encontrasse no nível de desempenho *operacional*). Por último, para um sismo com probabilidade de ocorrência de 5% em 50 anos a estrutura encontra-se igualmente no nível de desempenho *salvaguarda de vida*, o que respeita (dentro de uma margem de incerteza que advém das limitações de informação desta análise) os objetivos de desempenho definidos. Assim, não é verosímil que a estrutura se encontre próxima do colapso para nenhum destes níveis de intensidade da ação sísmica.

Salienta-se, ainda assim, que o comportamento sísmico da estrutura seria satisfatório caso se tratasse de uma estrutura corrente. Nesse caso a linha tracejada dos objetivos de desempenho encontrar-se-ia na diagonal principal da matriz. No entanto, a sua classificação como edifício essencial implica que objetivos de desempenho mais exigentes sejam considerados nesta análise.

Tendo por base estas conclusões, é recomendado que a estrutura seja reforçada, nomeadamente no que diz respeito a elementos não estruturais que podem ser afetados por sismos de intensidade moderada a baixa, e que podem limitar a sua operacionalidade e causar perdas económicas elevadas.



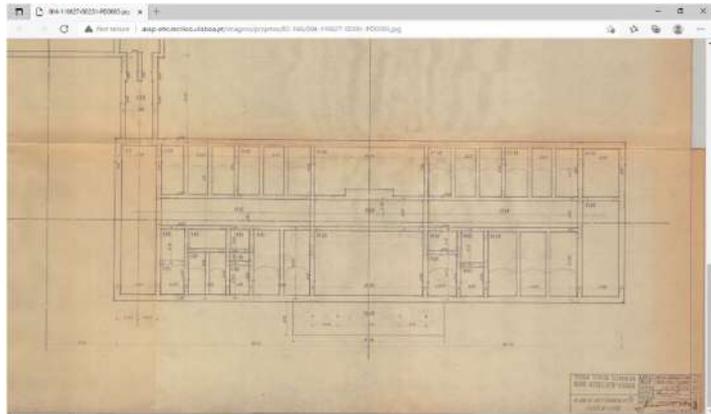
# Escola Básica Nuno Gonçalves

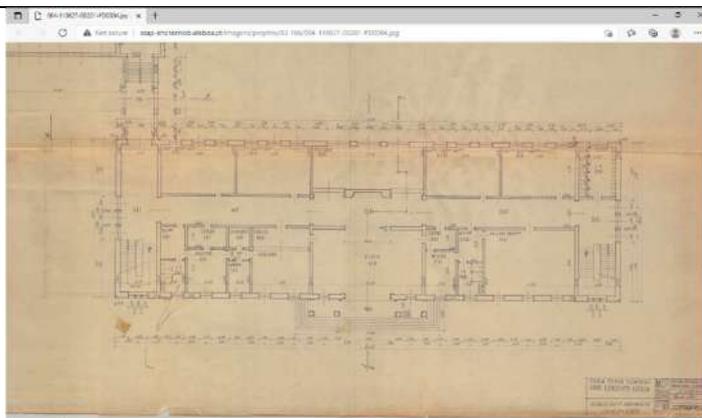
ID Escola: 92

Escola	Agrupamento	Área coberta
Escola Básica Nuno Gonçalves	Nuno Gonçalves	3209 m <sup>2</sup>

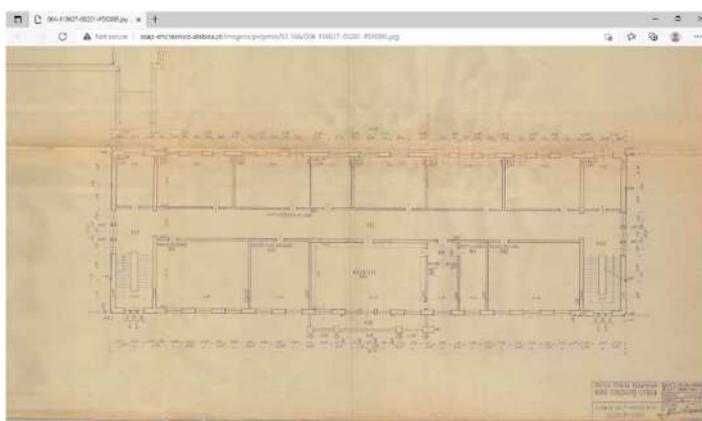
Nível de ensino	Número de alunos
Escola Básica com 2.º e 3.º ciclos	910 alunos

Descrição geral	
<p>A escola está localizada na Avenida General Roçadas e inserida numa zona consolidada de utilização mista (residencial e de comércio e serviços). É composta por três edifícios isolados: um edifício principal com três pisos e cobertura inclinada (corpo A), um ginásio (corpo G) e um edifício de piso térreo onde funcionam as oficinas (corpo O).</p> <p>Os três edifícios estão afastados, funcionando de forma independente. A circulação entre os vários edifícios realiza-se através de uma passagem coberta (R) e/ou através do pátio aberto e campos de desportos. Existe espaço, dentro da escola e nas imediações, para evacuação e encontro em caso de ocorrência de evento sísmico.</p>	 <p><i>Imagem aérea da escola e envolvente edificada (fonte: Google Earth)</i></p>

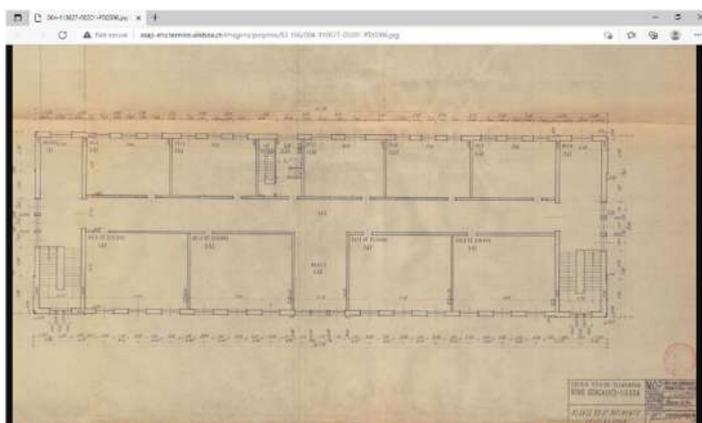
Informação de base
<p>O estudo realizado baseou-se nos documentos disponíveis através do <i>Atlas of School Architecture in Portugal</i>, que incluem desenhos de arquitetura (plantas, cortes e alçados) e desenhos de estrutura (plantas de fundações, pisos e cobertura, pormenores de betão armado) datados de 1950.</p>  <p><i>Planta de arquitetura das fundações do edifício principal</i></p>



*Planta de arquitetura do 1.º piso do edifício principal*



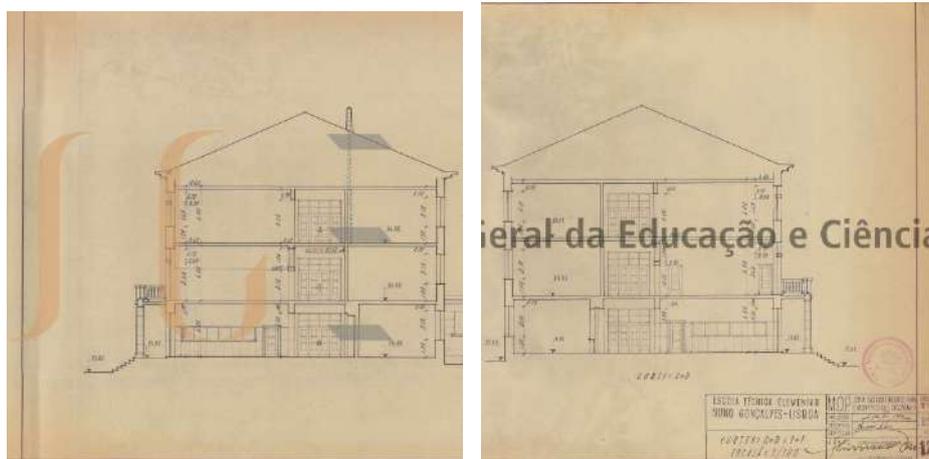
*Planta de arquitetura do 2.º piso do edifício principal*



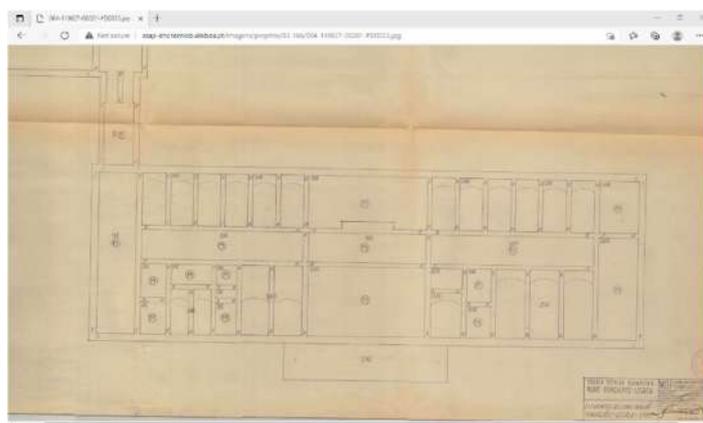
*Planta de arquitetura do 3.º piso do edifício principal*



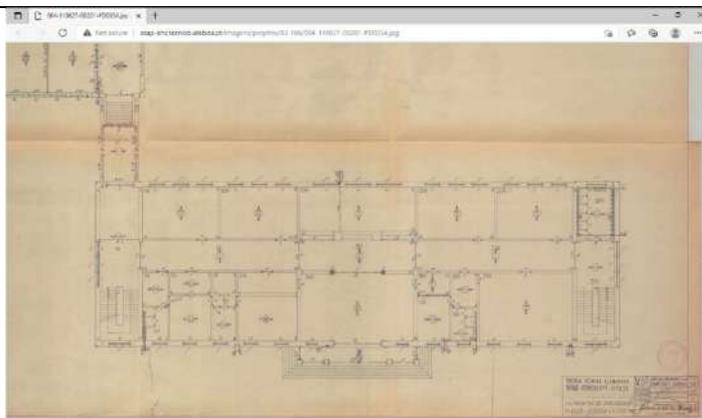
*Alçado principal e lateral do edifício principal*



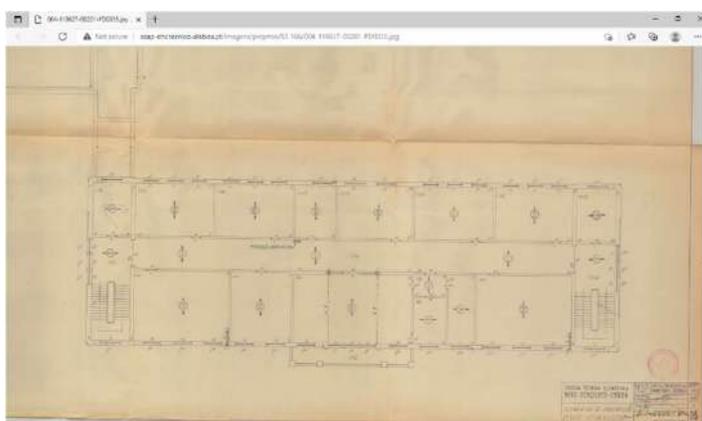
*Cortes transversais do edifício principal*



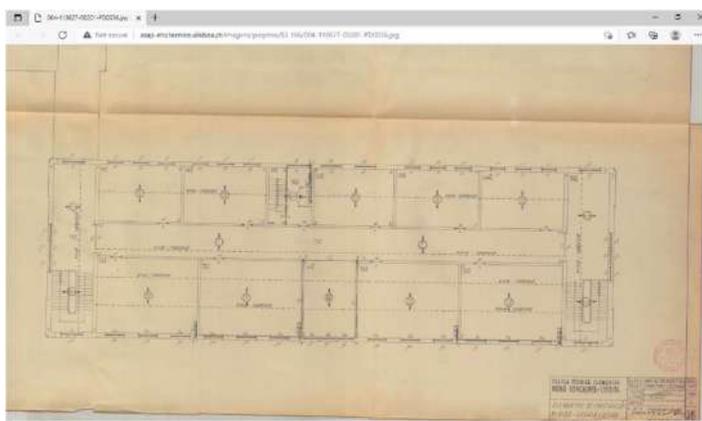
*Planta de estruturas das fundações do edifício principal*



*Planta de estruturas do 1.º piso do edifício principal*



*Planta de estruturas do 2.º piso do edifício principal*



*Planta de estruturas do 3.º piso do edifício principal*



### Caracterização estrutural

O edifício principal é do tipo “placa”, com paredes resistentes em alvenaria e lajes, vigas e dois pilares interiores em betão armado. A planta é retangular, com cerca de 19m por 62m, aproximadamente simétrica em torno do eixo transversal. A altura piso a piso é de 4m.

As fundações são diretas por meio de sapatas corridas sob as paredes de alvenaria e pilares de betão armado. As paredes resistentes desenvolvem-se em duas direções ortogonais, com espessuras de 0,65m, 0,6m, 0,55m e 0,5m nas paredes exteriores e de 0,4m, 0,25m e 0,15m nas paredes interiores. Nas paredes exteriores há uma ligeira redução da espessura entre o segundo e o terceiro piso, as paredes interiores possuem espessura constante em toda a altura. Sobre as aberturas, portas e janelas, foram colocadas vergas em betão armado.

Os pisos são em laje de betão armado com diferentes secções, algumas maciças e outras aligeiradas com tijolos, apoiadas nas paredes resistentes de alvenaria e nas vigas de betão armado, e orientadas maioritariamente na direção transversal do edifício. Por este motivo, as paredes longitudinais estão sujeitas a maior carga vertical quando comparadas com as paredes transversais.

Nos dois extremos do edifício estão localizadas as escadas em betão armado, organizadas em dois núcleos de acessos verticais ladeados por paredes resistentes em alvenaria com espessura compreendidas entre 0,4m e 0,65m.

Nas figuras seguintes apresentam-se os pormenores de betão armado.

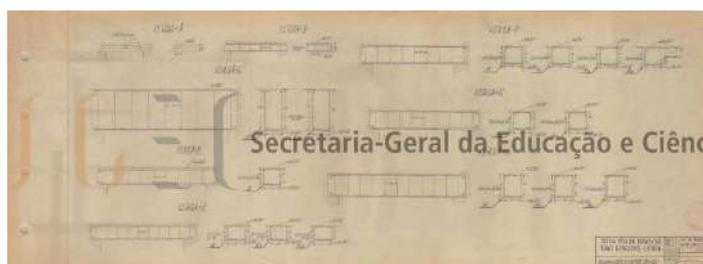




*Pormenores de betão armado das vigas do edifício principal*



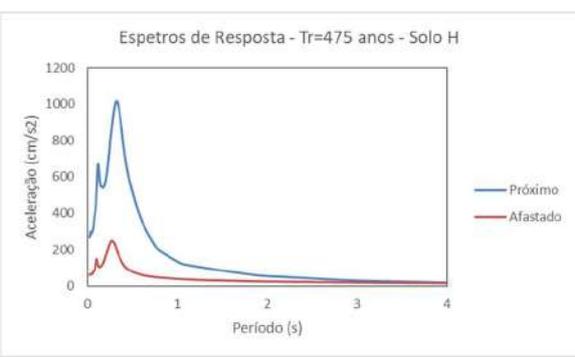
*Pormenores de betão armado das lajes do edifício principal*

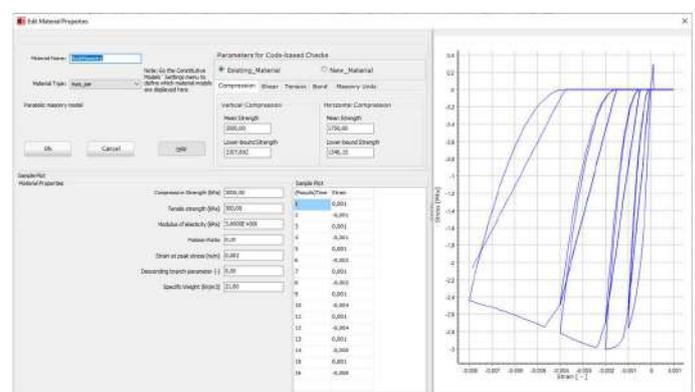


*Pormenores de betão armado das vergas do edifício principal*

A cobertura é inclinada, com quatro águas, suportada por uma estrutura de madeira apoiada em pilares de alvenaria que descarregam em vigas invertidas de secção variável em betão armado localizadas ao nível da laje de esteira.

Não há informação sobre o projeto de estruturas da escola que permita recolher dados sobre o seu dimensionamento, nomeadamente no que diz respeito a materiais e ações consideradas. Na ausência desta informação, e atendendo à época de construção do edifício, assumiu-se uma alvenaria com um peso específico de  $21\text{kN/m}^3$  e uma resistência média à compressão de  $3\text{MPa}$ , um betão C12/16 e um aço A235.

<p><b>Caracterização geotécnica</b></p> <p>Com base na carta de solos de que o LNEC dispõe, a EB Nuno Gonçalves encontra-se fundada em solo do tipo H, pelo que se considera a amplificação da ação calculada ao nível do substrato rochoso com base na coluna de solo respetiva (coluna H). Os espectros de resposta, que resultam de um estudo probabilístico de perigosidade sísmica desenvolvido especificamente no âmbito deste projeto, associados a um período de retorno de 475 anos, encontram-se na figura à direita.</p>	
---	--

<p><b>Modelo numérico</b></p> <p>Atendendo às características estruturais do edifício principal da escola, foi modelado apenas metade do edifício e analisado o seu comportamento apenas na direção transversal, que se considera como sendo condicionante da resposta sísmica do edifício principal da escola. No modelo foram incluídas as paredes resistentes na direção transversal e apenas os troços das paredes longitudinais que contribuem para a resistência na direção transversal.</p> <p>O modelo de cálculo, desenvolvido no programa SeismoStruct, é composto por elementos de barra (<i>frame</i>) que simulam o comportamento no plano de paredes, nembos e lintéis de alvenaria quando sujeitos a forças horizontais (como é o caso dos sismos). Nas fibras uniaxiais que definem o comportamento da alvenaria foi utilizado um modelo uniaxial trilinear com capacidade resistente à tração (<i>mas_par</i>).</p> <div data-bbox="446 1220 1141 1612">  </div> <p><i>Modelo mecânico adotado para a alvenaria estrutural do edifício principal</i></p> <p>As vigas e pilares em betão armado foram simulados com elementos de barra com comportamento elástico linear, sendo as respetivas secções definidas de acordo com os desenhos de pormenor apresentados anteriormente. Nas fibras uniaxiais que definem o comportamento do betão foi utilizado o modelo de comportamento de <i>Mander et al.</i> (<i>com_ma</i>), enquanto nas fibras de aço foi utilizado o modelo de comportamento de <i>Menegotto-Pinto</i> (<i>stl_mp</i>).</p> <p>Os pisos foram simulados como diafragmas indeformáveis no seu próprio plano através da imposição de condições cinemáticas entre os graus de liberdade do próprio piso.</p>
--

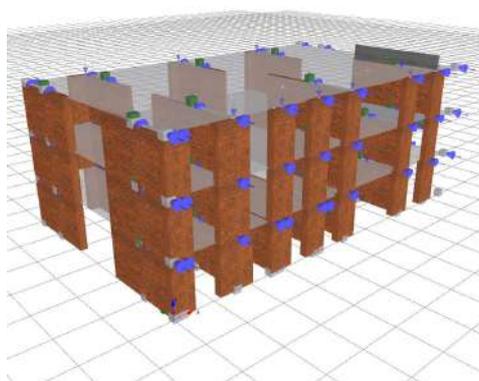
Consideram-se as bases das paredes resistentes e dos pilares com restrições aos deslocamentos e às rotações, simulando assim um encastramento perfeito à fundação da estrutura.

Relativamente às cargas atuantes, adotaram-se as cargas definidas de acordo com a norma portuguesa em vigor (NP EN1991-1-1), para o tipo de edifício em questão. No terceiro piso incluiu-se o peso da cobertura no pavimento e considerou-se a mesma sobrecarga devido ao seu eventual aproveitamento como zona de arquivo. Assim, as cargas permanentes e sobrecargas a considerar na análise são:

	1.º e 2.º Pisos	3.º piso (inclui cobertura)
<b>Pavimento (RCP)</b>	1,5 kN/m <sup>2</sup>	2,5 kN/m <sup>2</sup>
<b>Sobrecarga (SC)</b>	Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>	Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>
<b>Paredes</b>	Exteriores: 34,6 kN/m (20% de aberturas) Interiores: 25,9 kN/m (10% de aberturas)	Exteriores: 21,6 kN/m (metade da altura) Interiores: 14,4 kN/m (metade da altura)

As massas dos elementos estruturais são geradas automaticamente pelo programa. As restantes massas, associadas aos elementos estruturais não incluídos no modelo (troços de paredes longitudinais não representados no modelo, nembos e lintéis de alvenaria, lajes e algumas vigas, escadas e vergas), foram simuladas através de massas localizadas ao nível dos pisos, distribuídas de acordo com áreas de influência.

Uma situação semelhante sucede com as cargas verticais, as quais, para os elementos estruturais não incluídos no modelo, foram distribuídas de acordo com áreas de influência tendo em consideração a forma como os pavimentos descarregam nas paredes resistentes. O modelo numérico resultante está ilustrado na figura seguinte:



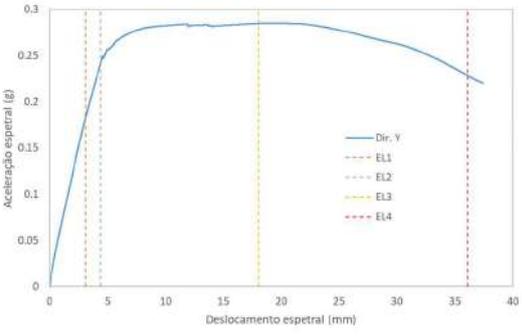
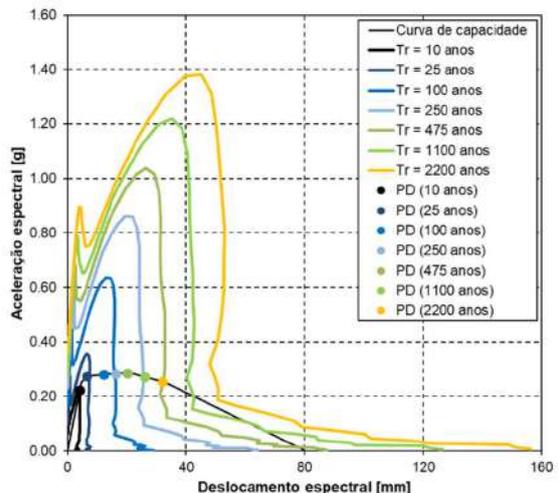
Modelo numérico do edifício principal desenvolvido no programa SeismoStruct

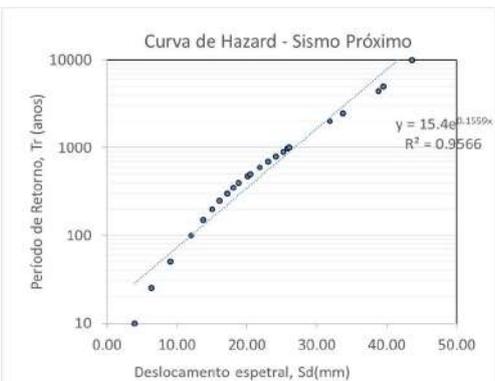
Os períodos de vibração da estrutura, obtidos através do modelo numérico, são:

Períodos de vibração	
1º modo	0.284 s
2º modo	0.094 s
3º modo	0.061 s

Após a aplicação das cargas gravíticas foi realizada uma análise estática não-linear com controlo de deslocamentos (*pushover*) tendo em vista obter a curva de capacidade da estrutura para ações horizontais crescentes.



Curva de capacidade	Pontos de desempenho										
<p>A curva de capacidade, isto é, o gráfico que relaciona a força lateral total (também passível de ser transformada em aceleração espectral) com o deslocamento horizontal da estrutura (deslocamento espectral) encontra-se representada abaixo, considerando as cargas horizontais aplicadas na direção transversal do edifício.</p>  <p>Os estados limite do edifício encontram-se descritos, em termos de deslocamento do topo na seguinte tabela:</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Estado limite</th> <th>Deslocamento do topo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Completamente Operacional</td> <td>D= 3.08 mm</td> </tr> <tr> <td>Operacional</td> <td>D= 4.40 mm</td> </tr> <tr> <td>Salvaguarda de Vida</td> <td>D= 18.0 mm</td> </tr> <tr> <td>Próximo do Colapso</td> <td>D= 36.1 mm</td> </tr> </tbody> </table>	Estado limite	Deslocamento do topo	Completamente Operacional	D= 3.08 mm	Operacional	D= 4.40 mm	Salvaguarda de Vida	D= 18.0 mm	Próximo do Colapso	D= 36.1 mm	<p>Determinação dos pontos de desempenho através do método do espectro de capacidade, para os sismos próximo e afastado e 25 períodos de retorno distintos. Nas figuras abaixo apresentam-se apenas 7 dos 25 espectros de resposta considerados. Foi limitado o amortecimento máximo efetivo a um valor de 7%, tendo em conta a caracterização estrutural do edifício e a expectável capacidade para dissipar energia.</p>  <p style="text-align: center;"><i>Pontos de desempenho: Sismo próximo</i></p>
Estado limite	Deslocamento do topo										
Completamente Operacional	D= 3.08 mm										
Operacional	D= 4.40 mm										
Salvaguarda de Vida	D= 18.0 mm										
Próximo do Colapso	D= 36.1 mm										

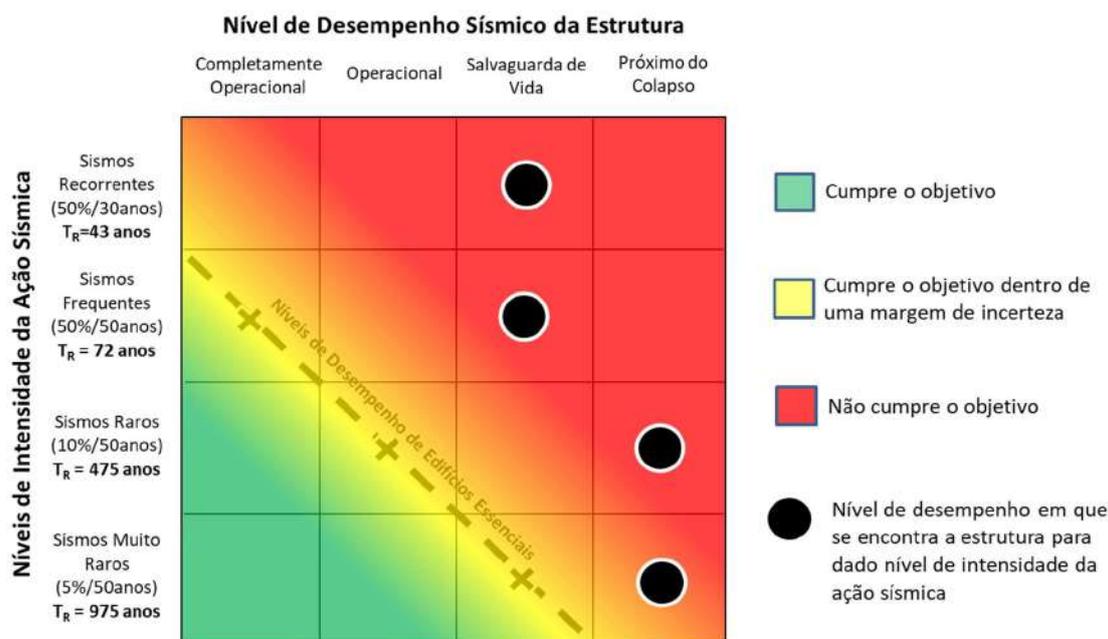
Curva de Hazard e períodos de retorno
<p>A curva de <i>hazard</i>, para sismo próximo (condicionante), é a que se apresenta de seguida.</p>  <p style="text-align: center;"><i>Curva de Hazard: Sismo próximo</i></p>

Os períodos de retorno associados aos estados limite definidos são:

Período de retorno	Sismo Próximo	Sismo Afastado
Completamente Operacional	25	141
Operacional	31	431
Salvaguarda de Vida	255	>10000
Próximo do Colapso	4283	>10000

### Matriz de desempenho sísmico

A matriz de desempenho sísmico, que descreve o comportamento da estrutura do edifício principal da escola (edifício com estrutura mista alvenaria-betão) relativamente aos níveis e objetivos de desempenho definidos, é apresentada abaixo.



### Conclusão

Verifica-se que o comportamento da estrutura do edifício principal da escola (edifício com estrutura mista alvenaria-betão) relativamente aos níveis e objetivos de desempenho sísmico definidos é globalmente insatisfatório.

Com efeito, verifica-se que para um sismo com probabilidade de ocorrência iguais ou superiores a 50% em 50 anos (*sismos frequentes e recorrentes*) a estrutura se encontra num nível de desempenho *salvaguarda de vida*, o que não respeita o objetivo de desempenho estabelecido para este tipo de edifícios, que corresponde ao nível de desempenho *completamente operacional*. Além disso, para sismos com probabilidade de ocorrência de 10% em 50 anos e de 5% em 50 anos (*sismos raros e muito raros*) a estrutura encontra-se num nível de desempenho *próximo do colapso*, o que também não respeita os níveis de desempenho admissíveis para estes níveis de intensidade sísmica, que correspondem aos níveis de desempenho *operacional* e de *salvaguarda de vida*, respetivamente. Para

intensidade sísmica correspondente a uma probabilidade de ocorrência de 2% em 50 anos e período de retorno de 2475 anos (*sismo máximo considerado*), a estrutura encontra-se num estado limite *próximo do colapso*, mas sem ultrapassar este estado limite, o que só ocorre pare um sismo com período de retorno médio de 4283 anos, o que respeita os objetivos de desempenho definidos.

Desta forma, uma intervenção neste edifício deve focar-se no aumento da sua capacidade resistente, de modo a evitar situações que coloquem em causa a sua integridade e a segurança dos seus ocupantes por via da queda de elementos estruturais e situações de colapso iminente. Além disso, deverão também ser tomadas medidas relativamente à manutenção da operacionalidade do edifício no caso de ocorrência de sismos mais frequentes, ou seja, menos intensos.



# Escola Secundária Dona Luísa de Gusmão

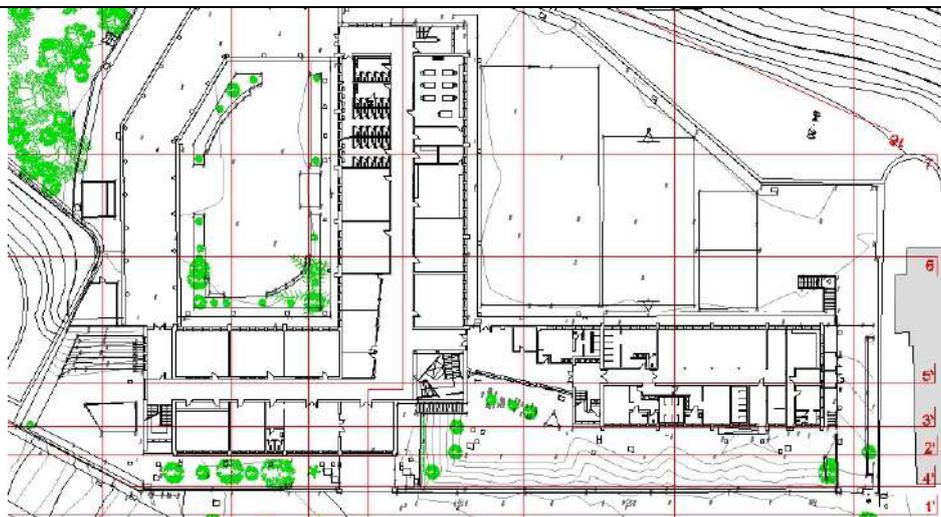
ID Escola: 93

Escola	Agrupamento	Área coberta
Escola Secundária Dona Luísa de Gusmão	Nuno Gonçalves	2662 m <sup>2</sup>

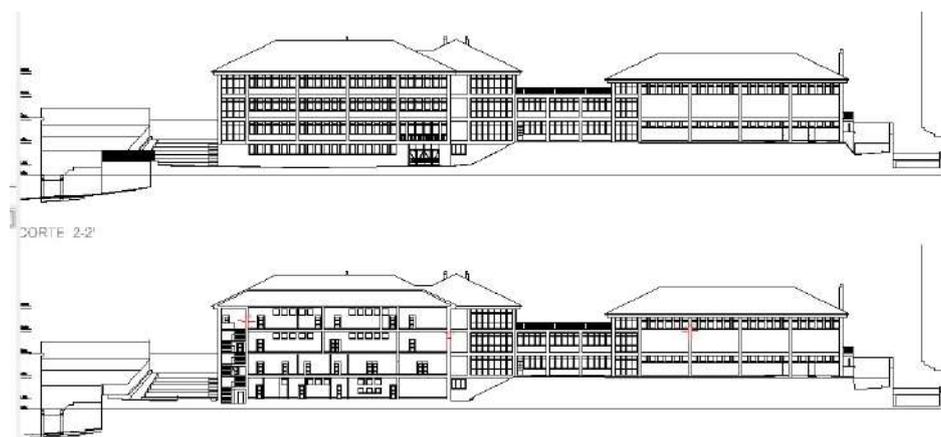
Nível de ensino	Número de alunos
3º Ciclo e Secundário	990 alunos

Descrição geral	
<p>A escola, construída na segunda metade da década de 1950, localiza-se na freguesia de Arroios, com entrada pela Rua Penha de França. É composta por três corpos interligados, dispostos em forma de “T”, dos quais dois constituem o edifício principal, com salas de aula, e o terceiro aloja o ginásio e refeitório. O edifício principal da escola apresenta uma planta em forma de “L”. Possui quatro pisos e sótão.</p> <p>Existe espaço, dentro dos limites da escola, para evacuação e encontro em caso de ocorrência de evento sísmico, recomendando-se para tal a utilização do pátio nas traseiras do ginásio devido à maior distância aos edifícios da escola e aos edifícios contíguos.</p> <p>Atendendo à distância a que os edifícios mais próximos da escola se encontram, não é previsível qualquer interação sísmica com os mesmos.</p>	 <p><i>Imagem aérea do Google Earth</i></p>

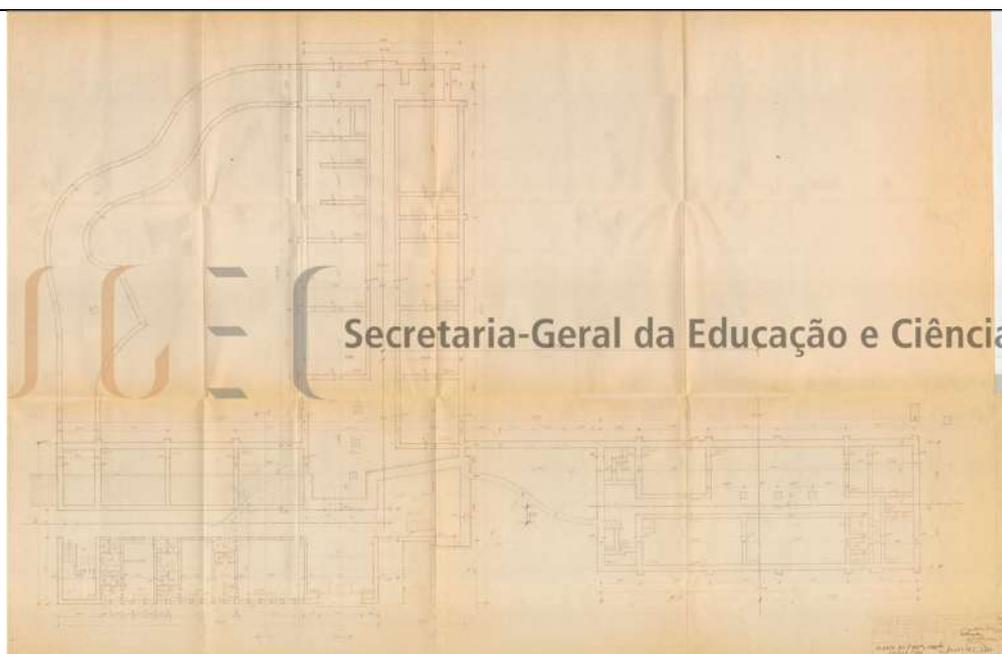
Informação de base
<p>A CML disponibilizou desenhos de levantamento arquitetónico na escola, que contêm também cortes e alçados. Foram também consultados os desenhos do <b>Atlas of School Architecture in Portugal</b>, que incluem desenhos de levantamento arquitetónico (plantas, cortes e alçados) e desenhos de estruturas, nomeadamente plantas de fundações e desenhos com armaduras de vigas e pilares da estrutura. De forma a complementar a informação disponível e a tirar algumas dúvidas sobre a disposição dos elementos construtivos do edifício principal, foi realizada uma visita à escola pelo Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas (NESDE) do LNEC. É com base nesta informação que este estudo se baseia.</p>



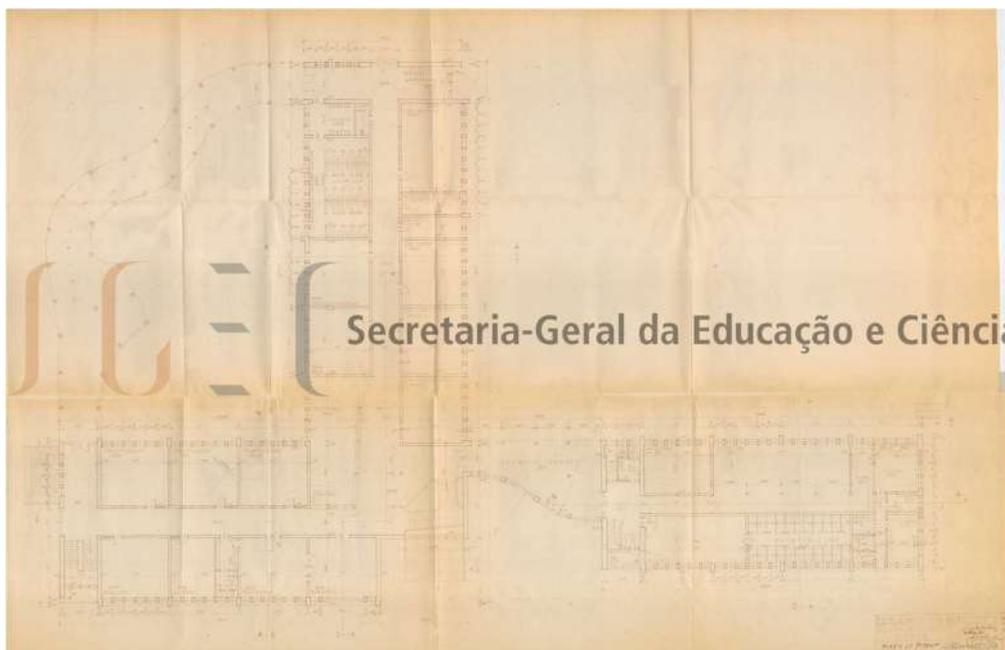
*Levantamento arquitetónico (planta) do 1º piso do edifício principal*



*Alçado (cima) e corte (baixo) do edifício principal e do ginásio*



*Planta de fundações e 1º piso (zona mais baixa)*



*Planta do 2º piso*



*Alinhamentos estruturais – pilares, vigas e paredes – do 2º piso*



*Alinhamentos estruturais – pilares, vigas e paredes – do 3º piso*

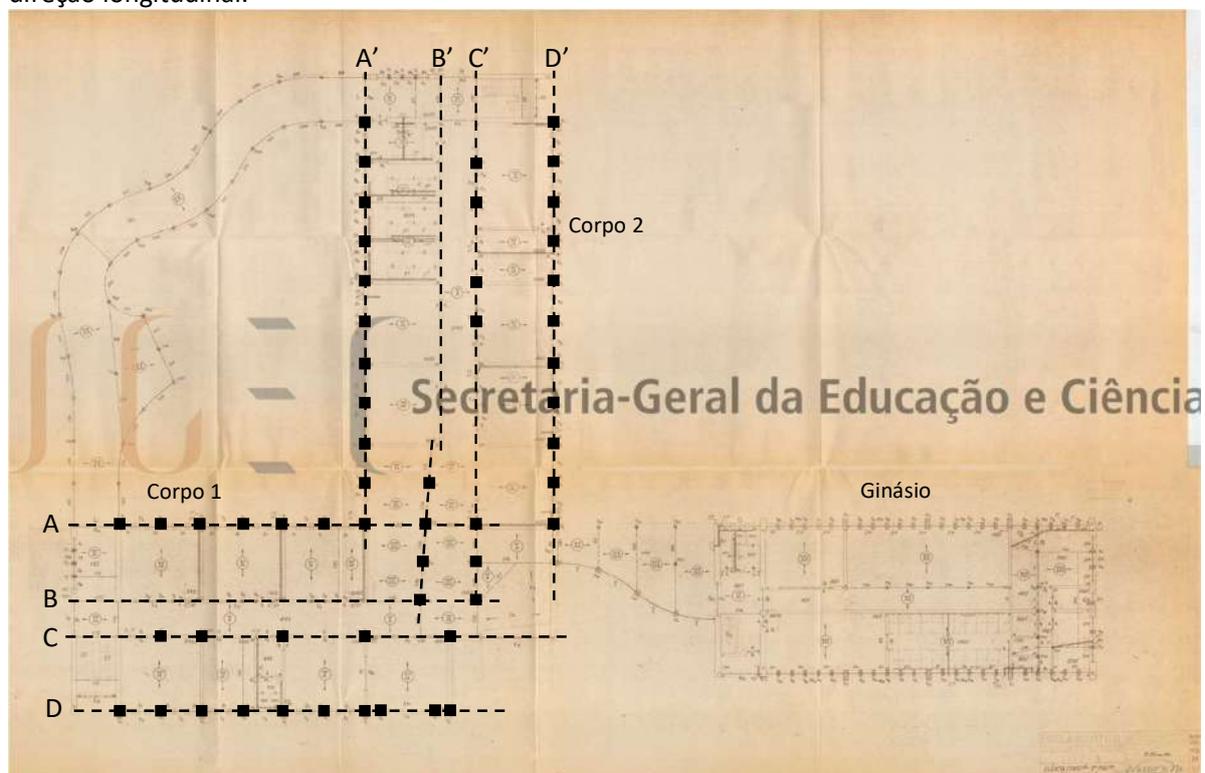


### Caracterização estrutural

O edifício principal da escola apresenta uma planta em forma de “L” e encontra-se dividido em dois corpos (ver figura abaixo). O corpo 1 encontra-se parcialmente enterrado de um dos lados, até ao topo do piso 1, possuindo ainda 3 pisos totalmente aparentes de ambos os lados. O corpo 2 tem um total de 3 pisos, totalmente aparentes. Ambos os corpos possuem também um sótão. A estrutura do edifício principal é mista, com paredes de alvenaria e elementos em betão armado, nomeadamente pilares e vigas, assim como lajes aligeiradas com nervuras de betão armado. Nas extremidades dos dois corpos, assim como na zona de ligação entre eles, existem núcleos de escadas em betão armado que confinam com paredes de alvenaria.

Na direção longitudinal dos dois corpos do edifício principal (i.e. direção dos alinhamentos indicados na figura abaixo), o sistema estrutural é constituído por pórticos de betão armado, com pilares e vigas colineares com os alinhamentos indicados. É de salientar que os alinhamentos B e B’ não possuem elementos de betão armado, sendo a carga gravítica proveniente das lajes descarregada diretamente na parede de alvenaria se encontra ao longo desses alinhamentos. Por outro lado, na direção transversal, na ausência de vigas que garantam o funcionamento em pórtico, são as próprias lajes nervuradas que garantem o funcionamento conjunto dos pilares dos vários alinhamentos. No entanto, a flexibilidade das lajes conduzirá, expectavelmente, a uma maior flexibilidade dos pisos e, consequentemente, ao comportamento dos pilares praticamente como consolas.

As paredes de alvenaria na direção transversal recebem muito pouca carga gravítica, uma vez que as lajes descarregam nos alinhamentos identificados (ver figura abaixo), pelo que têm assim uma contribuição residual na resistência nessa direção. Acresce o facto da alvenaria não ser confinada e, como tal, ter capacidade resistente diminuta face à alvenaria confinada que caracteriza as paredes na direção longitudinal.



Planta com identificação dos alinhamentos estruturais do edifício principal (ao nível do piso 2)

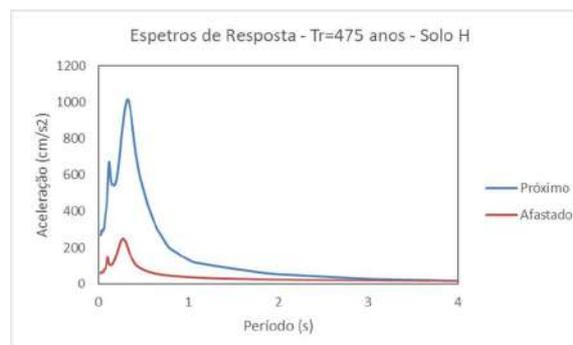


Fotografia do sotão tirada na visita efetuada pelo NESDE

As lajes são aligeiradas, com espessura total de 32.0cm e nervuras com largura de 8.5cm. A distância entre o centro de nervuras consecutivas é de 50.0cm. No topo, a lâmina maciça de betão é de 4.0cm. Os alinhamentos interiores C e C' são constituídos por pilares quadrangulares com 47.0cm de lado. Nos alinhamentos exteriores (à exceção do alinhamento D') os pilares são alternadamente quadrangulares ou retangulares em toda a altura, com dimensões 47.0x47.0 ou 47.0x25.0. No alinhamento D', os pilares são retangulares (47.0x25.0), à exceção do pilares extremo que é de 47.0x47.0. Os pilares estão afastados, na direção dos alinhamentos, de aproximadamente 3.96m. Na ausência de qualquer outra informação, assumiu-se um betão C16/20, aço A250 para varões longitudinais e aço macio para estribos. As vigas longitudinais dos alinhamentos exteriores têm uma dimensão de 47.0x45.0. É de salientar que na ausência de informação mais detalhada relativa ao projeto de estruturas da escola, que permita recolher dados sobre materiais, ações consideradas, entre outros pormenores construtivos, estes resultados devem ser encarados como indicadores do comportamento expectável e não como uma avaliação detalhada do comportamento sísmico da estrutura.

### Caracterização geotécnica

Com base na carta de solos de que o LNEC dispõe, a ES Luísa de Gusmão encontra-se fundada em solo do tipo H, pelo que se considera a amplificação da ação calculada ao nível do substrato rochoso com base na coluna de solo respetiva (coluna H). Os espetros de resposta, que resultam de um estudo probabilístico de perigosidade sísmica desenvolvido especificamente no âmbito deste projeto, associados a um período de retorno de 475 anos, encontram-se na figura à direita.



**Modelo numérico**

Atendendo às características estruturais da escola, considera-se que o mecanismo preponderante na resposta sísmica consiste na resposta na direção transversal dos corpos que constituem o edifício. Nesta direção, as paredes de alvenaria funcionam como apoios simples para a carga gravítica e, como tal, não contribuem para a resistência às ações horizontais. Nesse sentido, as paredes são consideradas num modelo de elementos finitos como elementos bi-articulados, cuja rigidez é calculada tendo em conta a dimensão da parede (estimada com base nos desenhos de arquitetura) e um módulo de elasticidade de 2.0GPa. Salienta-se que esta consideração apenas é válida no caso de as paredes de alvenaria manterem a sua integridade durante o sismo e, conseqüentemente, manterem a resistência relativamente à ação da carga gravítica. Para garantir esta capacidade recomenda-se que as paredes de alvenaria sejam cintadas e, eventualmente, reforçadas no sentido de garantir que o comportamento betão-alvenaria é mantido durante o sismo.

O modelo de cálculo, desenvolvido no programa SeismoStruct, é composto por elementos de barra (*frame*) de plasticidade distribuída com formulação em força. Cada secção destes elementos é definida através de fibras com comportamento uniaxial, associadas a aço ou a betão. Os elementos finitos são definidos tendo em consideração as dimensões acima apresentadas e as armaduras indicadas nos desenhos de estruturas. Os elementos bi-articulados que simulam as paredes de alvenaria têm comportamento elástico.

As nervuras das lajes têm armadura de 2Φ12+2Φ6 junto à face inferior e de 2Φ6 p/m na face superior. Os estribos são varões Φ6 afastados a 0.225.

A laje nervurada foi modelada, no SeismoStruct, através de um modelo de grelha que pretende representar o comportamento das nervuras e a transferência de carga entre laje, vigas e pilares.

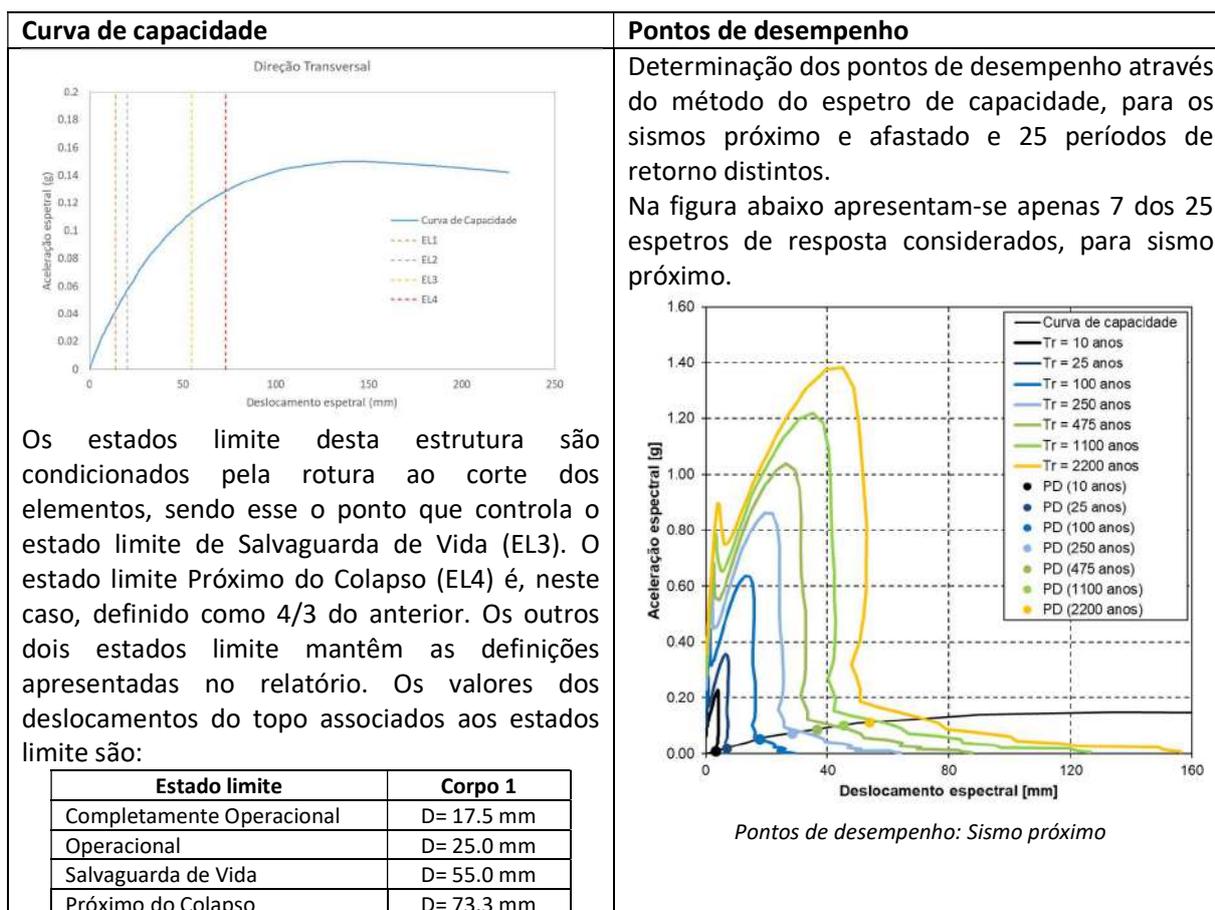
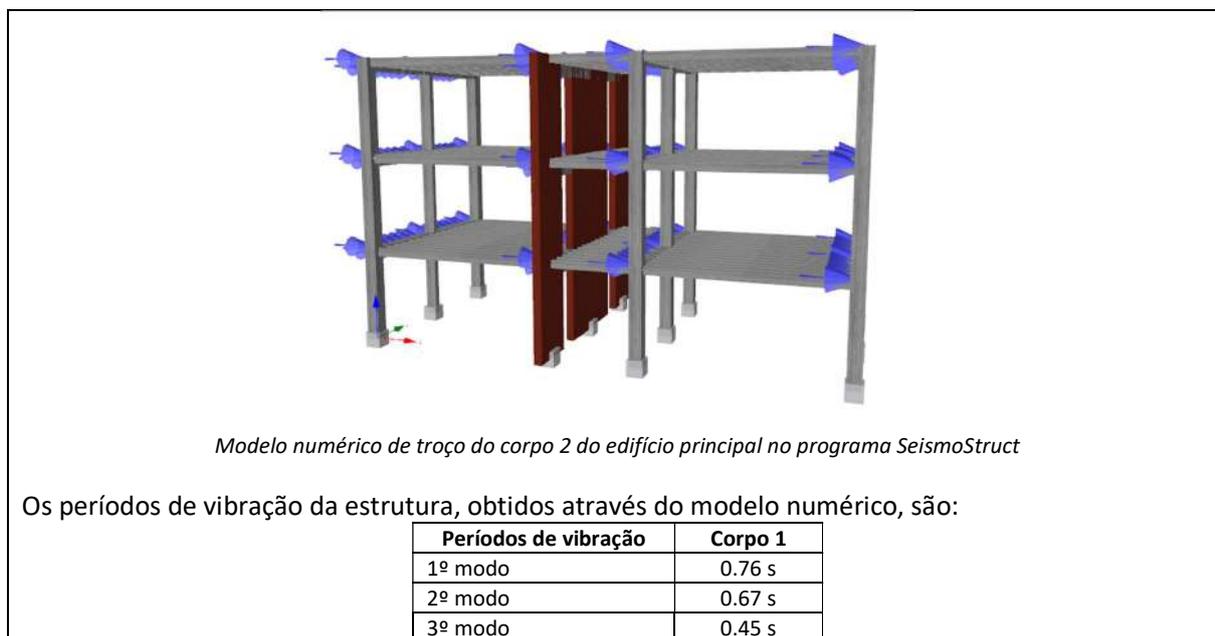
As fibras uniaxiais que definem o comportamento do betão são definidas através do modelo de *Mander et al.*, enquanto que as fibras de aço são definidas através do modelo de comportamento de *Menegotto-Pinto*.

Consideram-se as bases dos pilares com restrições aos deslocamentos e às rotações, simulando assim uma fundação rígida, o que constitui uma simplificação que se considera aceitável face à planta de fundações que se obteve.

Relativamente às cargas atuantes, adotaram-se as cargas definidas de acordo com a norma portuguesa em vigor (NP EN1991-1-1), para o tipo de edifício em questão. Assim, as cargas permanentes e sobrecargas a considerar na análise são:

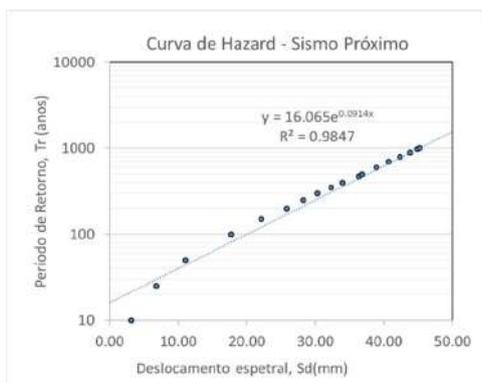
Carga	1º Piso	Cobertura
Pavimento (RCP)	1.5 kN/m <sup>2</sup>	2.5 kN/m <sup>2</sup>
Paredes (RCP)	<u>Divisórias</u> : 1.75 kN/m <sup>2</sup> (aplicada na laje do 1º piso) <u>Exteriores</u> : 7.8 kN/m (aplicada nas vigas exteriores do 1º piso)	-
Sobrecarga	Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>	Cobertura não acessível: 0.4 kN/m <sup>2</sup>

Procede-se à modelação de um troço do corpo 2 do edifício (ver figura abaixo), por se considerar representativo do comportamento global dos corpos do edifício na direção transversal. Após a aplicação das cargas gravíticas é executada uma análise estática não-linear com controlo de deslocamentos (*pushover*).



### Curva de Hazard e períodos de retorno

A curva de hazard, para sismo próximo pode assim ser determinada sendo apresentada de seguida.



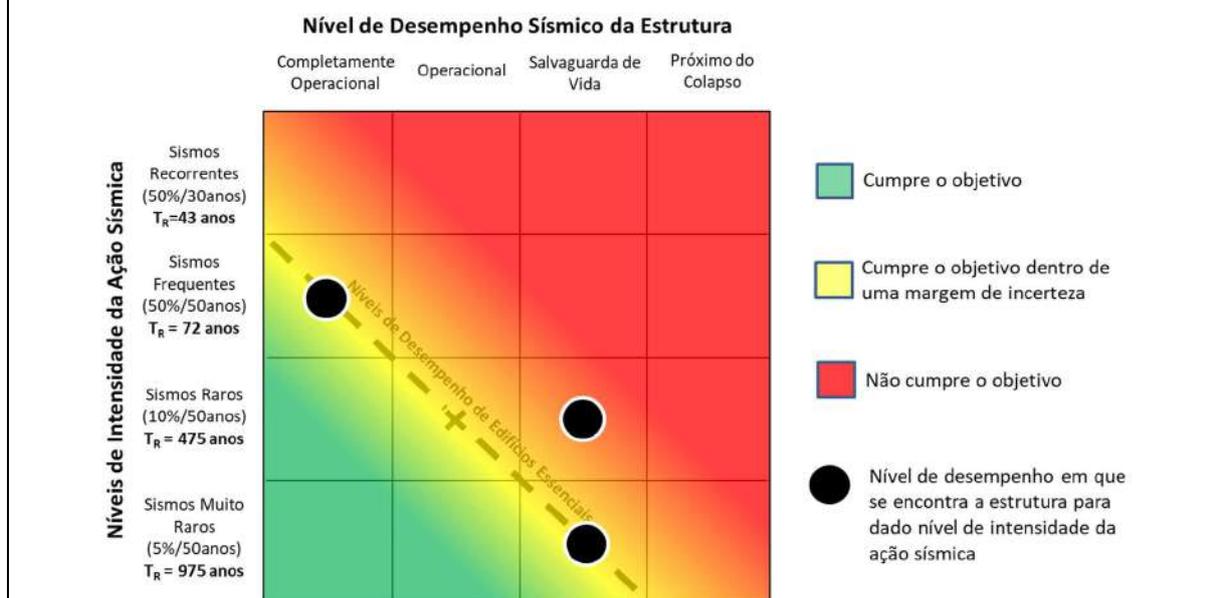
Curva de Hazard: Sismo próximo: corpo 1 (esq.)

Os períodos de retorno associados aos estados limite definidos são:

		Período de retorno	Sismo Próximo	Sismo Afastado
Estado limite	Completamente Operacional		88	6641
	Operacional		179	>10000
	Salvaguarda de Vida		3110	>10000
	Próximo do Colapso		>10000	>10000

### Matriz de desempenho sísmico

A matriz de desempenho sísmico, que descreve o comportamento da estrutura relativamente aos níveis e objetivos de desempenho definidos, é apresentada abaixo.



### Conclusão

A análise aqui desenvolvida é baseada no projeto de estruturas do edifício que consta do *Atlas of School Architecture in Portugal* e na informação recolhida na visita à escola, efetuada pelo Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas do LNEC.

O edifício principal forma um L, sendo constituído por uma estrutura mista de pórticos em betão armado e paredes de alvenaria. As lajes são nervuradas e descarregam nos pórticos de betão e nas paredes de alvenaria.

Foi assumido que as paredes de alvenaria mantêm a sua integridade durante o sismo e, consequentemente, mantêm a resistência relativamente à ação da carga gravítica. Ainda assim, recomenda-se que as paredes de alvenaria sejam cintadas e, eventualmente, reforçadas no sentido de garantir que o comportamento betão-alvenaria é mantido durante o sismo.

Verificou-se o comportamento da estrutura do edifício que constitui a escola é satisfatório para os níveis e objetivos de desempenho sísmico definidos, à exceção dos sismos com probabilidade de ocorrência entre 10% e 50% em 50 anos. Com efeito, para este nível de intensidade sísmica era expectável que a estrutura mantivesse a sua *operacionalidade* (embora com alguns danos aparentes, nomeadamente em elementos não estruturais). No entanto, para esta intensidade sísmica, a estrutura atinge o nível de desempenho *salvaguarda de vida*, pelo que não respeita com o objetivo de desempenho definido.

Para sismos mais intensos, com probabilidade de ocorrência inferior a 10% em 50 anos, a estrutura tem uma resposta conforme com os objetivos de desempenho definidos, não sendo verosímil que a estrutura se encontre próxima do colapso para nenhum destes níveis de intensidade da ação sísmica.

Salienta-se, ainda assim, que o comportamento sísmico da estrutura seria satisfatório caso se tratasse de uma estrutura corrente. Nesse caso a linha tracejada dos objetivos de desempenho encontrar-se-ia na diagonal principal da matriz. No entanto, a sua classificação como edifício essencial implica que objetivos de desempenho mais exigentes sejam considerados nesta análise.

O reforço da estrutura do edifício principal da escola deve visar o aumento da resistência para fazer face a sismos raros. Este reforço, que poderá ser materializado através do reforço das paredes de alvenaria existentes ou através da introdução de diagonais de contraventamento, poderá ser introduzido na direção transversal dos dois corpos que constituem o edifício no sentido de aumentar a rigidez e resistência nesta direção, uma vez que a ligação entre os pórticos longitudinais paralelos é feita apenas através da laje nervurada, cuja rigidez é bastante reduzida.



# Escola Básica Olaias

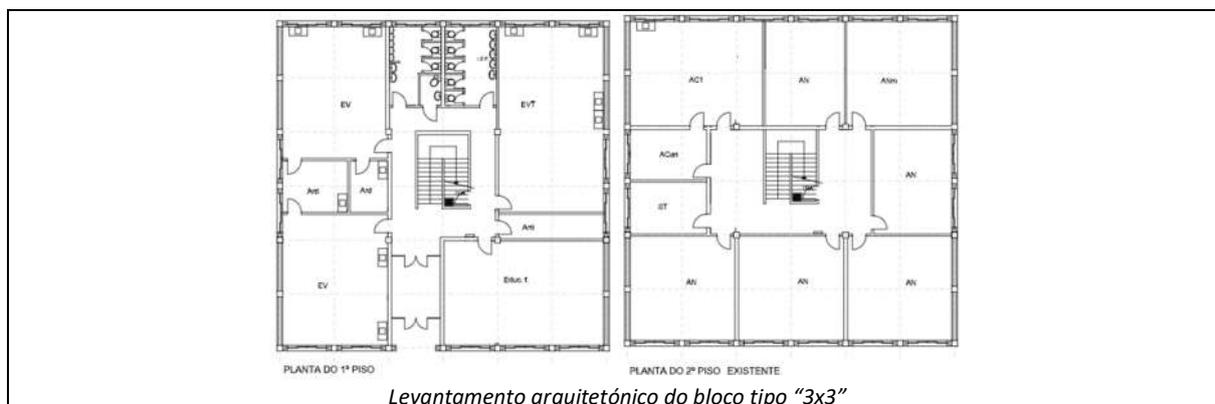
ID Escola: 97

Escola	Agrupamento	Área coberta
Escola Básica Olaias	Olaias	3200 m <sup>2</sup>

Nível de ensino	Número de alunos
Básico com 2º e 3º ciclos	585 alunos

Descrição geral	
<p>A escola localiza-se na freguesia do Beato, com entrada pela Rua Professor Mira Fernandes. Os vários blocos com compõem a escola estão separados, funcionando de forma independente no que à resposta sísmica diz respeito. Não se prevê qualquer interação, a nível sísmico, com estruturas nas imediações.</p> <p>Existe espaço, dentro da escola, nomeadamente na zona do campo de jogos para evacuação e ponto de encontro em caso de ocorrência de evento sísmico. O planeamento de emergência deverá ter em consideração que a saída da escola se faz no entroncamento da Rua Professor Mira Fernandes com a Rua Dr. Faria Vasconcelos, numa zona com passeios relativamente estreitos e com vários edifícios nas proximidades. Assim sendo, é recomendável, devido ao risco de queda de elementos não estruturais ou objetos suspensos, que o ponto de encontro da comunidade escolar no pós-sismo seja definido dentro dos limites da escola.</p>	 <p><i>Imagem aérea do Google Earth</i></p>  <p><i>Zona da entrada da escola, com pouco espaço para ponto de encontro da comunidade escolar</i></p>

Informação de base
<p>Estão disponíveis desenhos de levantamento arquitetónico fornecidos pela CML, que resultam do projeto tipo das escolas de pavilhões “3x3”. Considerou-se assim a informação constante nos desenhos de levantamento obtidos, apesar de se considerar nesta análise a informação acrescida recolhida após a inspeção visual levada a cabo pelo Departamento de Edifícios do LNEC.</p>



**Caracterização estrutural**

Escola tipo “3x3”, com estrutura porticada em betão armado. Os blocos têm quatro pilares ao centro, definindo três vãos (“3x3”) nas duas direções. No perímetro os vãos têm metade do comprimento, relativamente aos alinhamentos interiores.

A escola é constituída por 5 blocos: 3 blocos de aulas com 2 pisos, 1 bloco de refeitório com 1 piso e 1 pavilhão gimnodesportivo.

Os blocos de aulas e o refeitório são constituídos por pilares e lajes fungiformes aligeiradas, onde os alinhamentos dos pilares centrais são amaciçados (ver fotografias abaixo).

Pilar da periferia

Alinhamento maciço



*Lajes fungiformes com zonas maciças nos alinhamentos centrais: zona de multimédia no bloco administrativo*

Não há informação sobre o projeto de estruturas da escola que permita recolher dados sobre o seu dimensionamento da escola, nomeadamente no que diz respeito a materiais, ações consideradas, dimensões de elementos estruturais, armaduras colocadas, entre outros pormenores construtivos. Assim, a análise aqui desenvolvida é baseada naquilo que se presume ser a prática construtiva e os materiais da época de construção da escola. Com efeito, assumem-se materiais e restantes características da estrutura de acordo com outras escolas de tipologias e época construtiva semelhante, como é o caso da tipologia “Vale Rosal”. Assim, considera-se:

- Materiais: B25(C25/30) + A400
- Dimensões dos elementos estruturais:
  - Pilares: 0.35x0.35 [mxm] (contínuos em altura)
  - Laje fungiforme aligeirada:
    - Altura total: 42.5cm
    - Altura maciça: 10.0cm
    - Largura total: 90.0cm
    - Largura das nervuras: 13.0cm

É de salientar que, na ausência de informação sobre o projeto de estruturas da escola, que permita recolher dados sobre o seu dimensionamento, nomeadamente no que diz respeito a materiais, ações consideradas, dimensões de elementos estruturais, armaduras colocadas, entre outros pormenores construtivos, estes resultados devem ser encarados como indicadores do comportamento expectável e não como uma avaliação detalhada do comportamento sísmico da estrutura.

### Caracterização geotécnica

Com base na carta de solos de que o LNEC dispõe (Ver relatório), a EB Olaias encontra-se fundada em rocha (solo do tipo A), pelo que não se considera amplificação da ação calculada ao nível do substrato rochoso. Os espectros de resposta em rocha, que resultam de um estudo probabilístico de perigosidade sísmica desenvolvido especificamente no âmbito deste projeto, associados a um período de retorno de 475 anos, encontram-se na figura à direita.



### Modelo numérico

O modelo de cálculo, desenvolvido no programa SeismoStruct, é composto por elementos de barra (*frame*) de plasticidade distribuída com formulação em força. Cada secção destes elementos é definida através de fibras com comportamento uniaxial, associadas a aço ou a betão. Os elementos finitos são definidos tendo em consideração as dimensões acima apresentadas e as armaduras que foram sistematizadas com base no projeto de execução da tipologia “Vale Rosal”. As armaduras dos pilares são:

Arm. Long; Arm. Transv.	Centrais	Perímetro	Canto
<b>1º piso</b>	12Φ25+4Φ20; Φ8//0.15	12Φ25; Φ8//0.15	4Φ25+8Φ20; Φ8//0.15
<b>2º Piso</b>	4Φ25; Φ8//0.15	8Φ25; Φ8//0.15	4Φ25; Φ8//0.15

Relativamente às vigas, as armaduras são:

Arm. Long; Arm. Transv.	Local	Extremidades	Sob pilares interiores	Meio-vão
<b>1º piso</b>	Vigas interiores	inf 4Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 4Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 3Φ20+4Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.20
	Vigas perímetro	inf 3Φ20+3Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 2Φ20+3Φ16; sup 2Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 3Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.10
<b>2º Piso</b>	Vigas interiores	inf 3Φ16; sup 2Φ20+3Φ16; Φ6//0.10	inf 3Φ16; sup 2Φ20+3Φ16; Φ6//0.10	inf 2Φ20+3Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.25
	Vigas perímetro	inf 6Φ12; sup 3Φ16+3Φ12; Φ6//0.10	inf 4Φ12; sup 3Φ16+3Φ12; Φ6//0.10	inf 4Φ12; sup 3Φ12; Φ6//0.20

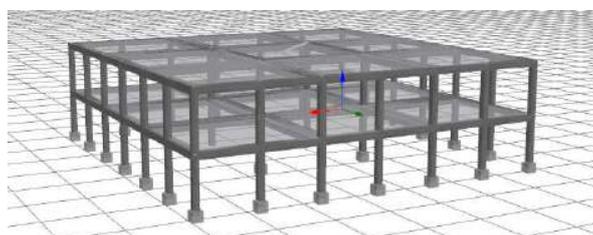
As fibras uniaxiais que definem o comportamento do betão são definidas através do modelo de *Mander et al.*, enquanto que as fibras de aço são definidas através do modelo de comportamento de *Menegotto-Pinto*.

Consideram-se as bases dos pilares com restrições aos deslocamentos e libertas às rotações, simulando assim uma fundação flexível, de acordo com a conceção de sapatas isoladas que caracteriza a fundação da estrutura.

Relativamente às cargas atuantes, adotaram-se as cargas definidas de acordo com a norma portuguesa em vigor (NP EN1991-1-1), para o tipo de edifício em questão. Assim, as cargas permanentes e sobrecargas a considerar na análise são:

Carga	1º Piso	Cobertura
<b>Pavimento (RCP)</b>	1.5 kN/m <sup>2</sup>	2.5 kN/m <sup>2</sup>
<b>Paredes (RCP)</b>	<u>Divisórias</u> : 1.75 kN/m <sup>2</sup> (aplicada na laje do 1º piso) <u>Exteriores</u> : 7.8 kN/m (aplicada nas vigas exteriores do 1º piso)	-
<b>Sobrecarga</b>	Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>	Cobertura não acessível: 0.4 kN/m <sup>2</sup>

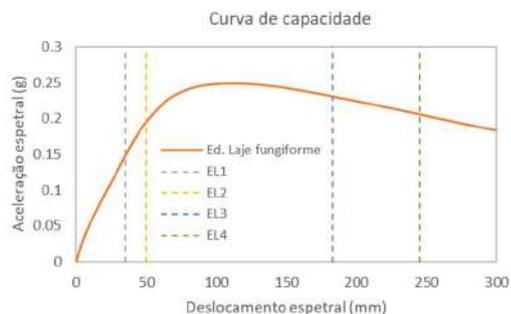
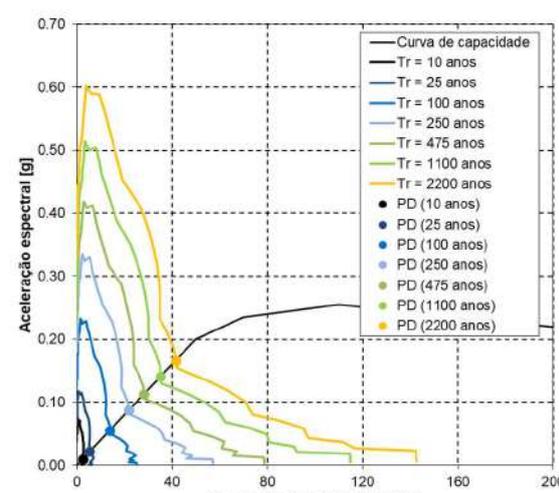
Após a aplicação das cargas gravíticas é executada uma análise estática não-linear com controlo de deslocamentos (*pushover*).

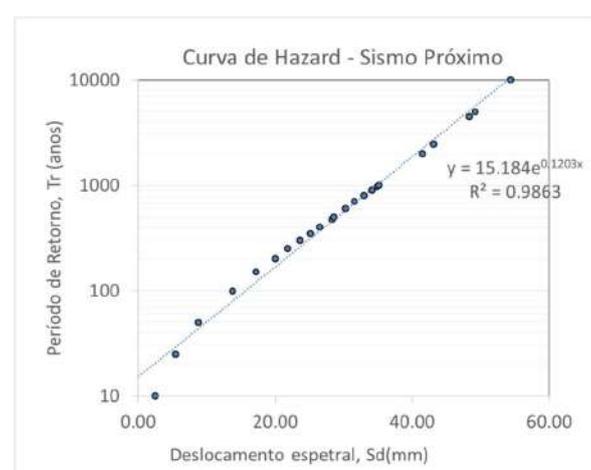


Modelo numérico do bloco tipo da escola no programa SeismoStruct

Os períodos de vibração da estrutura, obtidos através do modelo numérico, são:

Períodos de vibração	
1º modo (X)	0.76 s
2º modo (Y)	0.76 s
3º modo (Torção)	0.62 s

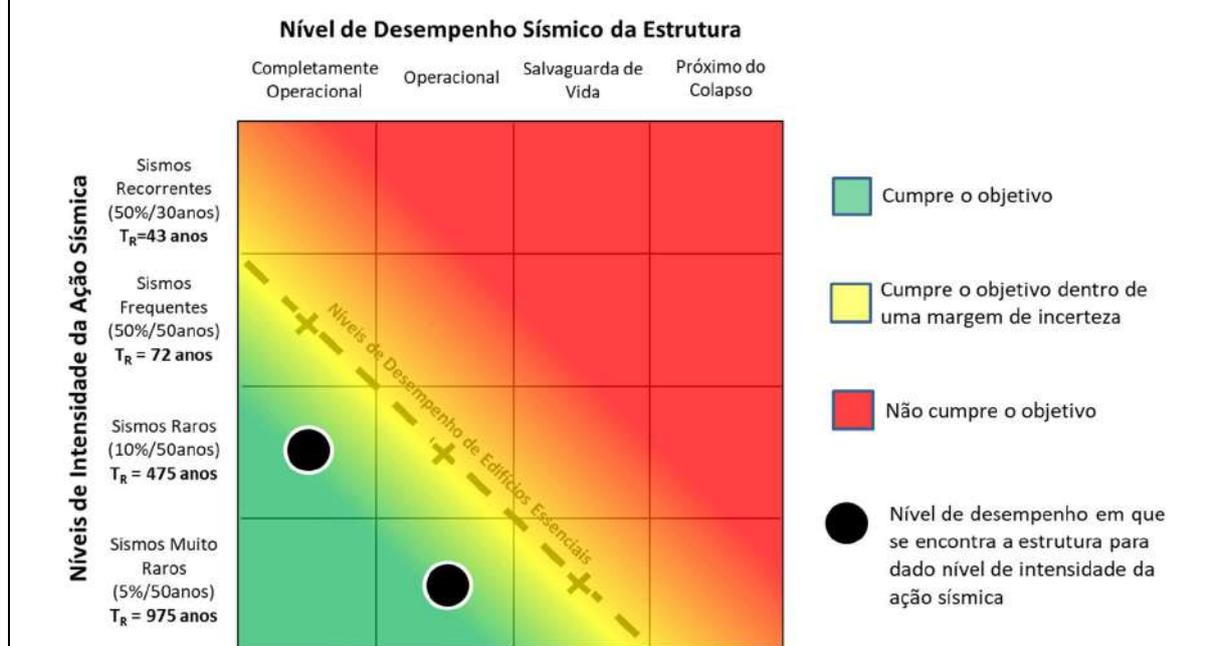
Curva de capacidade	Pontos de desempenho										
 <p>Os estados limite de cada um dos edifícios encontram-se descritos, em termos de deslocamento do topo na seguinte tabela:</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Estado limite</th> <th>Deslocamento do topo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Completamente Operacional</td> <td>D= 35 mm</td> </tr> <tr> <td>Operacional</td> <td>D= 50 mm</td> </tr> <tr> <td>Salvaguada de Vida</td> <td>D= 186 mm</td> </tr> <tr> <td>Próximo do Colapso</td> <td>D= 248 mm</td> </tr> </tbody> </table>	Estado limite	Deslocamento do topo	Completamente Operacional	D= 35 mm	Operacional	D= 50 mm	Salvaguada de Vida	D= 186 mm	Próximo do Colapso	D= 248 mm	<p>Determinação dos pontos de desempenho através do método do espectro de capacidade, para os sismos próximo e afastado e 25 períodos de retorno distintos. Nas figuras abaixo apresentam-se apenas 7 dos 25 espectros de resposta considerados, para sismo próximo.</p>  <p style="text-align: center;">Pontos de desempenho: Sismo próximo</p>
Estado limite	Deslocamento do topo										
Completamente Operacional	D= 35 mm										
Operacional	D= 50 mm										
Salvaguada de Vida	D= 186 mm										
Próximo do Colapso	D= 248 mm										

Curva de Hazard e períodos de retorno
<p>A curva de <i>hazard</i>, para sismo próximo (condicionante), é a que se apresenta de seguida.</p>  <p style="text-align: center;">Curva de Hazard: Sismo próximo</p> <p>Os períodos de retorno associados aos estados limite definidos são:</p>

Estado limite	Período de retorno	Sismo Próximo	Sismo Afastado
	Completamente Operacional	544	>10000
Operacional	2471	>10000	
Salvaguarda de Vida	>10000	>10000	
Próximo do Colapso	>10000	>10000	

### Matriz de desempenho sísmico

A matriz de desempenho sísmico, que descreve o comportamento da estrutura de cada um dos edifícios que constituem a escola relativamente aos níveis e objetivos de desempenho definidos, é apresentada abaixo.



### Conclusão

Verifica-se que o comportamento da estrutura de cada um dos edifícios que constituem a escola (edifício com laje vigada e laje fungiforme) relativamente aos níveis e objetivos de desempenho sísmico definidos é satisfatório.

Com efeito, verifica-se que para sismos com probabilidade de ocorrência igual ou superior a 10% em 50 anos a estrutura se encontra num nível de desempenho completamente operacional, respeitando assim o objetivo de desempenho estabelecido para este tipo de edifícios. Além disso, para um sismo com probabilidade de ocorrência de 5% em 50 anos (sismo muito raro) a estrutura encontra-se num nível de desempenho operacional, pelo que respeita o nível de desempenho admissível para este nível de intensidade sísmica, que corresponde ao nível de desempenho salvaguarda de vida. Para este tipo de edifícios não é verosímil que a estrutura se encontre próxima do colapso para nenhum destes níveis de intensidade da ação sísmica.



# Escola Básica Patrício Prazeres

ID Escola: 108

Escola	Agrupamento	Área coberta
Escola Básica Patrício Prazeres	Patrício Prazeres	1858 m <sup>2</sup>

Nível de ensino	Número de alunos
Escola Básica Integrada (1º, 2º e 3º ciclos)	475 alunos

Descrição geral	
<p>A escola, localizada na Rua Matilde Rosa Araújo, na Quinta das Comendadeiras, Alto do Varejão. O quarteirão é unicamente ocupado pela escola, sendo a envolvente uma zona predominantemente residencial. O terreno onde está implantada apresenta um declive pelo que o piso térreo dos edifícios é parcialmente enterrado de um dos lados.</p> <p>A escola é composta por três edifícios isolados que funcionam de forma independente: um edifício principal com quatro pisos, o primeiro dos quais parcialmente enterrado, e cobertura inclinada (corpo A), um ginásio (corpo G) e um pavilhão polidesportivo de construção mais recente. Há ainda um edifício com dois pisos, o primeiro dos quais parcialmente enterrado, que permite circular entre os corpos A e G, mas separado destes por meio de juntas de dilatação.</p> <p>A circulação entre os vários edifícios realiza-se através da passagem coberta e/ou através do pátio aberto e campos de desportos. Existe espaço, dentro da escola e nas imediações, para evacuação e encontro em caso de ocorrência de evento sísmico.</p> <p>Os acessos à escola são amplos e sem presença de outras estruturas junto aos limites do seu terreno, não existindo, portanto, a possibilidade de interação sísmica com outras estruturas.</p>	 <p><i>Imagem aérea da escola e envolvente edificada (fonte: Google Earth)</i></p>

Informação de base
<p>O estudo realizado baseou-se nos documentos disponíveis através do <i>Atlas of School Architecture in Portugal</i>, que incluem desenhos de arquitetura (plantas, cortes e alçados) e desenhos de estrutura (plantas de fundações, pisos e cobertura, pormenores de betão armado) datados de 1953. Foi realizada uma visita à escola por parte da equipa do Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas (NESDE) do LNEC para esclarecimento de algumas questões que subsistiam da análise dos desenhos disponíveis.</p>





*Planta de arquitetura do 4.º piso do edifício principal*



*Planta de arquitetura do sótão do edifício principal*



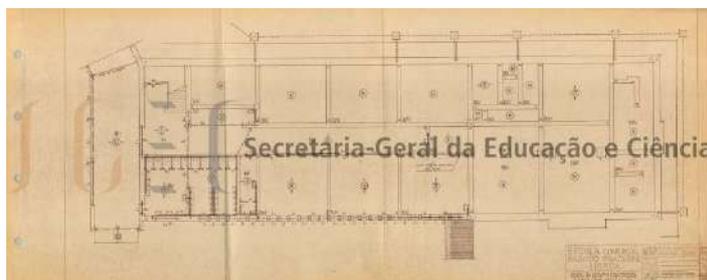
*Alçado principal do edifício principal*



*Cortes transversais e longitudinal parcial do edifício principal*



*Planta de estruturas das fundações do edifício principal*



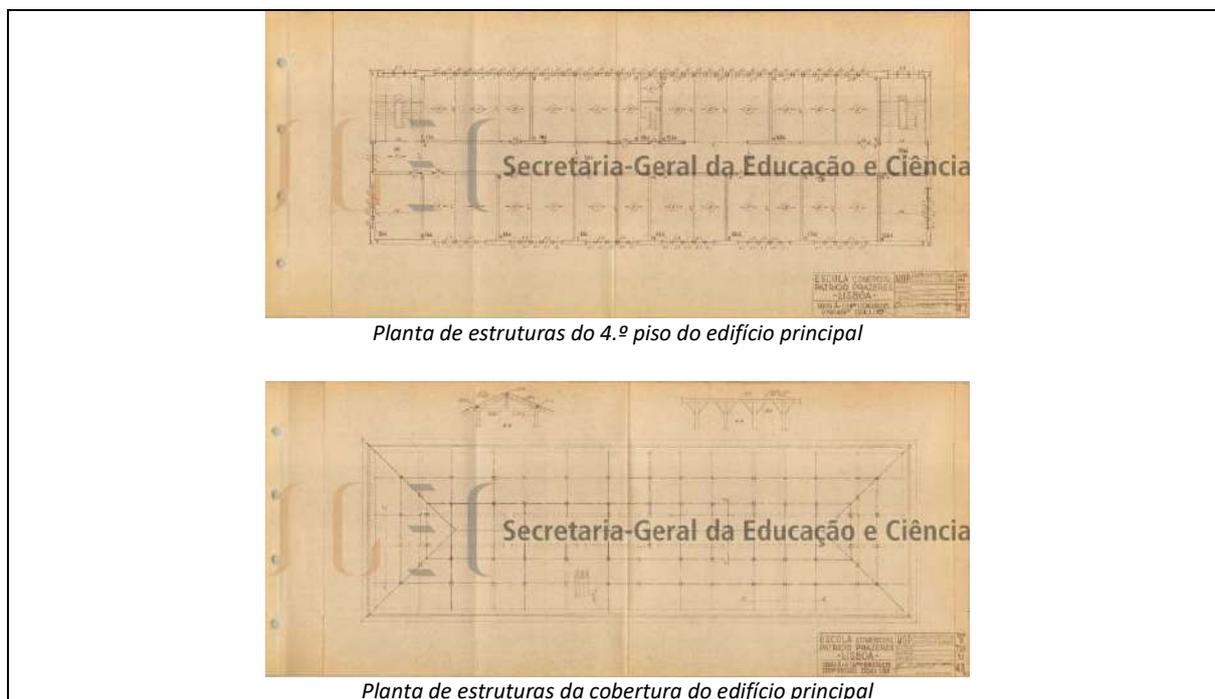
*Planta de estruturas do 1.º piso do edifício principal*



*Planta de estruturas do 2.º piso do edifício principal*



*Planta de estruturas do 3.º piso do edifício principal*



### Caracterização estrutural

O edifício principal é do tipo “placa”, com paredes resistentes em alvenaria e lajes, vigas e alguns pilares interiores em betão armado. A planta é retangular, com cerca de 18m por 57m, aproximadamente simétrica em torno do eixo transversal. A altura piso a piso é de 3,6m.

As fundações são diretas, por meio de sapatas corridas sob as paredes de alvenaria e pilares de betão armado, realizadas em duas cotas distintas para acomodar o desnível do terreno. Por este motivo, cerca de metade do edifício tem quatro pisos de altura, embora o piso inferior esteja encostado ao terreno de um dos lados, enquanto a outra metade tem apenas três pisos de altura.

As paredes resistentes desenvolvem-se em duas direções ortogonais, com espessuras de 0,6m e 0,5m nas paredes exteriores e de 0,27m e 0,15m nas paredes interiores. Nas paredes exteriores há uma ligeira redução da espessura entre o terceiro e o quarto piso, as paredes interiores possuem espessura constante em toda a altura. Nas interrupções em altura das paredes interiores são colocadas vigas de betão armado por baixo para conferir apoio e garantir a transmissão das cargas. Sobre as aberturas, portas e janelas, foram colocadas vergas em betão armado.

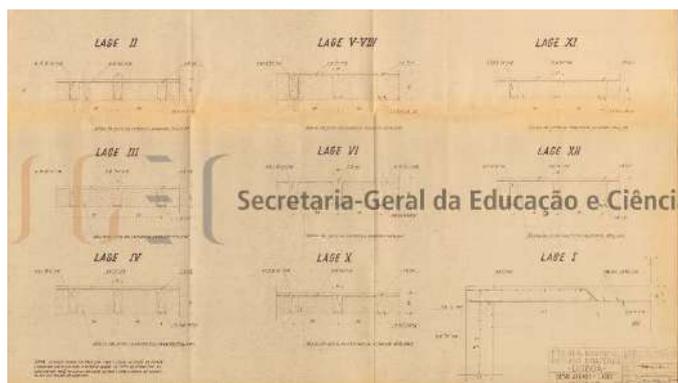
Os pisos são em laje de betão armado com diferentes secções, algumas maciças e outras aligeiradas com tijolos, apoiadas nas paredes resistentes de alvenaria e nas vigas de betão armado. Nos pisos 1, 2 e 3 as lajes são orientadas maioritariamente na direção transversal do edifício, e no piso 4 na direção longitudinal. Por este motivo, as paredes longitudinais estão sujeitas a maior carga vertical quando comparadas com as paredes transversais.

Nos dois extremos do edifício estão localizadas as escadas em betão armado, organizadas em dois núcleos de acessos verticais ladeados por paredes resistentes em alvenaria com espessuras de 0,27m e 0,6m.



*Fotografia da visita à escola – alinhamento do corredor central com pilares circulares e viga; parede exteriores em alvenaria*

Nas figuras seguintes apresentam-se os pormenores de betão armado.



*Pormenores de betão armado das lajes do edifício principal*



*Pormenores de betão armado das vigas do edifício principal*



*Pormenores de betão armado das vigas do edifício principal*



*Pormenores de betão armado das vigas do edifício principal*



*Pormenores de betão armado das vergas do edifício principal*

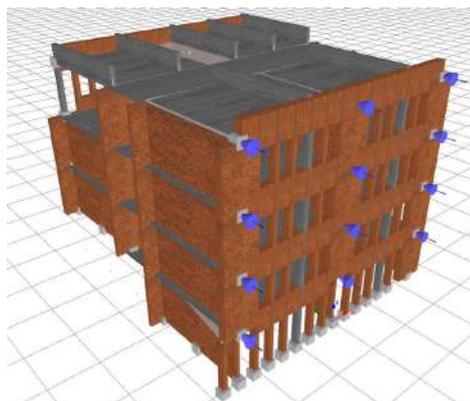
A cobertura é inclinada, com quatro águas, suportada por uma estrutura de madeira apoiada em pilares de alvenaria que descarregam em vigas invertidas de secção variável em betão armado localizadas ao nível da laje de esteira.

Não há informação sobre o projeto de estruturas da escola que permita recolher dados sobre o seu dimensionamento, nomeadamente no que diz respeito a materiais e ações consideradas. Na ausência desta informação, e atendendo à época de construção do edifício, assumiu-se uma alvenaria com um peso específico de  $21\text{kN/m}^3$  e uma resistência média à compressão de  $3\text{MPa}$ , um betão C12/16 e um aço A235.

<p><b>Caracterização geotécnica</b></p> <p>Com base na carta de solos de que o LNEC dispõe (ver relatório), a EB Patrício Prazeres encontra-se fundada em solo do tipo I, pelo que se considera a amplificação da ação calculada ao nível do substrato rochoso com base na coluna de solo respetiva (coluna I). Os espectros de resposta, que resultam de um estudo probabilístico de perigosidade sísmica desenvolvido especificamente no âmbito deste projeto, associados a um período de retorno de 475 anos, encontram-se na figura à direita.</p>	
--	--

<p><b>Modelo numérico</b></p> <p>Atendendo às características estruturais do edifício principal da escola, foi modelada apenas a parte central do edifício, aproximadamente um terço do comprimento do edifício, e analisado o seu comportamento na direção transversal, que se considera como sendo condicionante da resposta sísmica do edifício principal da escola. No modelo foram incluídas as paredes resistentes exteriores, com os seus nembos e lintéis, as paredes resistentes interiores, com as respetivas descontinuidades em altura, os elementos de betão armado (lajes, vigas e pilares), e as fundações em duas cotas distintas devido ao desnível do terreno.</p> <p>O modelo de cálculo, desenvolvido no programa SeismoStruct, é composto por elementos de barra (<i>frame</i>) que simulam o comportamento no plano de paredes, nembos e lintéis de alvenaria quando sujeitos a forças horizontais (como é o caso dos sismos). Nas fibras uniaxiais que definem o comportamento da alvenaria foi utilizado um modelo uniaxial trilinear com capacidade resistente à tração (<i>mas_par</i>).</p> <div data-bbox="367 1288 1220 1780"> </div> <p style="text-align: center;"><i>Modelo mecânico adotado para a alvenaria estrutural do edifício principal</i></p> <p>As lajes, vigas e pilares em betão armado foram simulados com elementos de barra com comportamento elástico linear, sendo as respetivas secções definidas de acordo com os desenhos de pormenor apresentados anteriormente. Nas fibras uniaxiais que definem o comportamento do betão</p>
---

foi utilizado o modelo de comportamento de *Mander et al.* (com\_ma), enquanto nas fibras de aço foi utilizado o modelo de comportamento de *Menegotto-Pinto* (stl\_mp).  
 Os pisos foram simulados como diafragmas indeformáveis no seu próprio plano através da imposição de condições cinemáticas entre os graus de liberdade do próprio piso.  
 Consideram-se as bases das paredes resistentes e dos pilares com restrições aos deslocamentos e às rotações, simulando assim um encastramento perfeito à fundação da estrutura.



Modelo numérico do edifício principal desenvolvido no programa SeismoStruct

Relativamente às cargas atuantes, adotaram-se as cargas definidas de acordo com a norma portuguesa em vigor (NP EN1991-1-1), para o tipo de edifício em questão. No quarto piso incluiu-se o peso da cobertura no pavimento e considerou-se a mesma sobrecarga devido ao seu eventual aproveitamento como zona de arquivo. Assim, as cargas permanentes e sobrecargas a considerar na análise são as apresentadas abaixo.

As massas dos elementos estruturais, bem como as cargas verticais, são geradas automaticamente pelo programa.

	1.º, 2.º e 3.º Pisos	4.º piso (inclui cobertura)
<b>Pavimento (RCP)</b>	1,5 kN/m <sup>2</sup>	2,5 kN/m <sup>2</sup>
<b>Sobrecarga (SC)</b>	Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>	Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>
<b>Paredes</b>	Exteriores: 34,6 kN/m (20% de aberturas) Interiores: 25,9 kN/m (10% de aberturas)	Exteriores: 21,6 kN/m (metade da altura) Interiores: 14,4 kN/m (metade da altura)

Os períodos de vibração da estrutura, obtidos através do modelo numérico, são:

Períodos de vibração	
1º modo	0.229 s
2º modo	0.100 s
3º modo	0.083 s

Após a aplicação das cargas gravíticas foi realizada uma análise estática não-linear com controlo de deslocamentos (*pushover*) tendo em vista obter a curva de capacidade da estrutura para ações horizontais crescentes.

Curva de capacidade	Pontos de desempenho										
<p>A curva de capacidade, isto é, o gráfico que relaciona a força lateral total (também passível de ser transformada em aceleração espectral) com o deslocamento horizontal da estrutura (deslocamento espectral) encontra-se representada abaixo, para o caso em que a solicitação horizontal é aplicada na direção transversal do edifício.</p> <p>Os estados limite de cada um dos edifícios encontram-se descritos, em termos de deslocamento do topo na seguinte tabela:</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Estado limite</th> <th>Deslocamento do topo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Completamente Operacional</td> <td>D= 2.4 mm</td> </tr> <tr> <td>Operacional</td> <td>D= 3.9 mm</td> </tr> <tr> <td>Salvaguarda de Vida</td> <td>D= 12.3 mm</td> </tr> <tr> <td>Próximo do Colapso</td> <td>D= 14.1 mm</td> </tr> </tbody> </table>	Estado limite	Deslocamento do topo	Completamente Operacional	D= 2.4 mm	Operacional	D= 3.9 mm	Salvaguarda de Vida	D= 12.3 mm	Próximo do Colapso	D= 14.1 mm	<p>Determinação dos pontos de desempenho através do método do espectro de capacidade, para os sismos próximo e afastado e 25 períodos de retorno distintos. Nas figuras abaixo apresentam-se apenas 7 dos 25 espectros de resposta considerados. Foi limitado o amortecimento máximo efetivo a um valor de 7%, tendo em conta a caracterização estrutural do edifício e a expectável capacidade para dissipar energia.</p> <p style="text-align: center;"><i>Pontos de desempenho: Sismo próximo</i></p>
Estado limite	Deslocamento do topo										
Completamente Operacional	D= 2.4 mm										
Operacional	D= 3.9 mm										
Salvaguarda de Vida	D= 12.3 mm										
Próximo do Colapso	D= 14.1 mm										

**Curva de Hazard e períodos de retorno**

A curva de *hazard*, para sismo próximo (condicionante), é a que se apresenta de seguida.

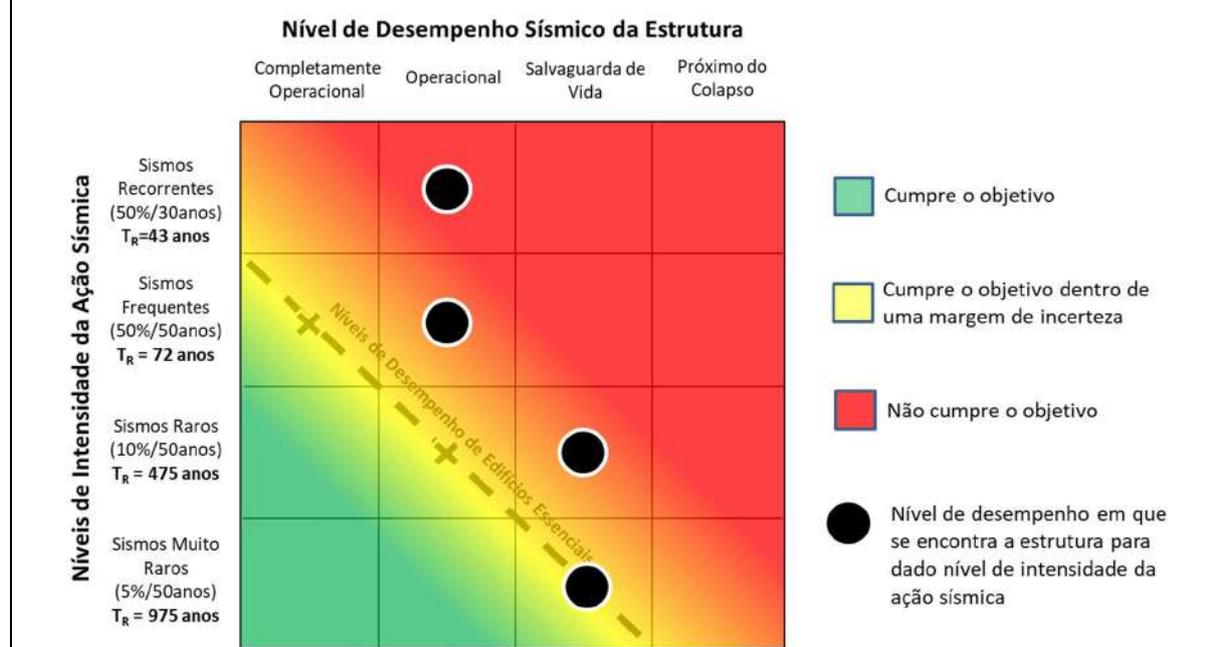
*Curva de Hazard: Sismo próximo; interpolação linear*

Os períodos de retorno associados aos estados limite definidos são:

Período de retorno	Sismo Próximo	Sismo Afastado
Completamente Operacional	17	892
Operacional	91	>10000
Salvaguarda de Vida	1196	>10000
Próximo do Colapso	1248	>10000

### Matriz de desempenho sísmico

A matriz de desempenho sísmico, que descreve o comportamento da estrutura do edifício, relativamente aos níveis e objetivos de desempenho definidos, é apresentada abaixo.



### Conclusão

Verifica-se que o comportamento da estrutura do edifício principal da escola (edifício com estrutura mista alvenaria-betão) relativamente aos níveis e objetivos de desempenho sísmico definidos é globalmente insatisfatório. No entanto, para um patamar correspondente a sismos muito raros, o edifício regista um nível de dano aceitável para o nível de desempenho associado a edifícios essenciais.

Com efeito, verifica-se que para um sismo com probabilidade de ocorrência iguais ou superiores a 50% em 50 anos (*sismos frequentes e recorrentes*) a estrutura se encontra num nível de desempenho *operacional*, o que não respeita o objetivo de desempenho estabelecido para este tipo de edifícios, que corresponde ao nível de desempenho *completamente operacional*. Além disso, para sismos com probabilidade de ocorrência igual a 10% em 50 anos (*sismos raros*) a estrutura encontra-se num nível de desempenho *salvaguarda de vida*, o que também não respeita o nível de desempenho admissível para este nível de intensidade sísmica, que corresponde ao nível de desempenho *operacional*. Para

intensidade sísmica correspondente a uma probabilidade de ocorrência de 5% em 50 anos (*sismos muito raros*), a estrutura encontra-se igualmente num nível de desempenho *salvaguarda de vida*, o que respeita os objetivos de desempenho definidos para este nível de intensidade sísmica. Por último, para sismos com uma probabilidade de ocorrência de 2% em 50 anos (*sismo máximo considerado*), a estrutura já excedeu o nível de desempenho *próximo do colapso*, o que não respeita os objetivos de desempenho definidos para edifícios essenciais.

Desta forma, uma intervenção neste edifício deve focar-se no aumento da sua capacidade resistente, de modo a evitar situações que coloquem em causa a sua integridade e a segurança dos seus ocupantes por via da instabilização estrutural e possível colapso. Além disso, deverão também ser tomadas medidas relativamente à manutenção da operacionalidade do edifício no caso de ocorrência de sismos mais frequentes, ou seja, menos intensos.



# Escola Básica Pintor Almada Negreiros

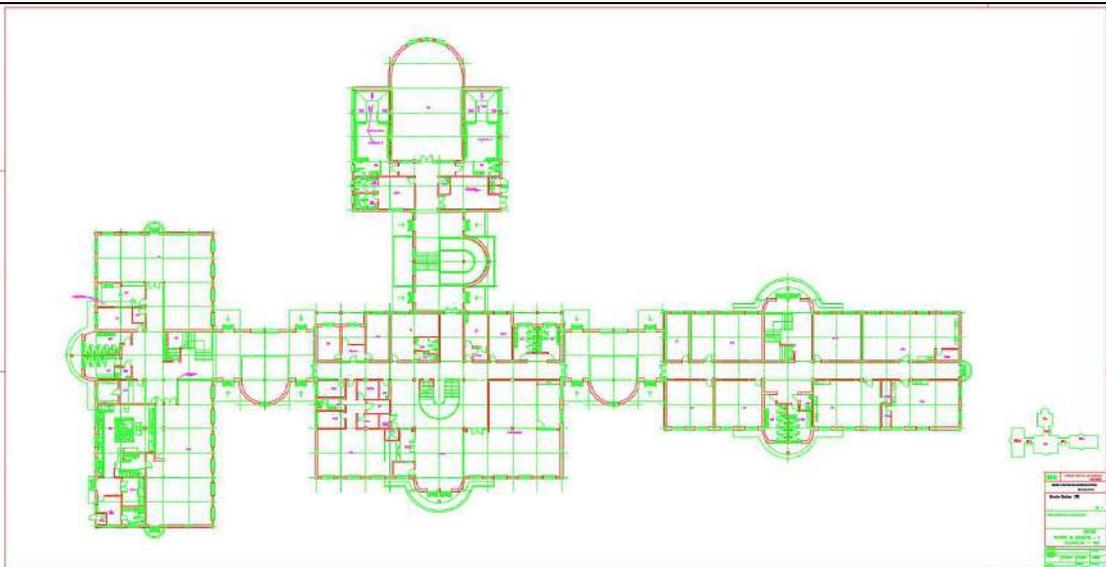
ID Escola: 111

Escola	Agrupamento	Área coberta
Escola Básica Pintor Almada Negreiros	Pintor Almada Negreiros	4086 m <sup>2</sup>

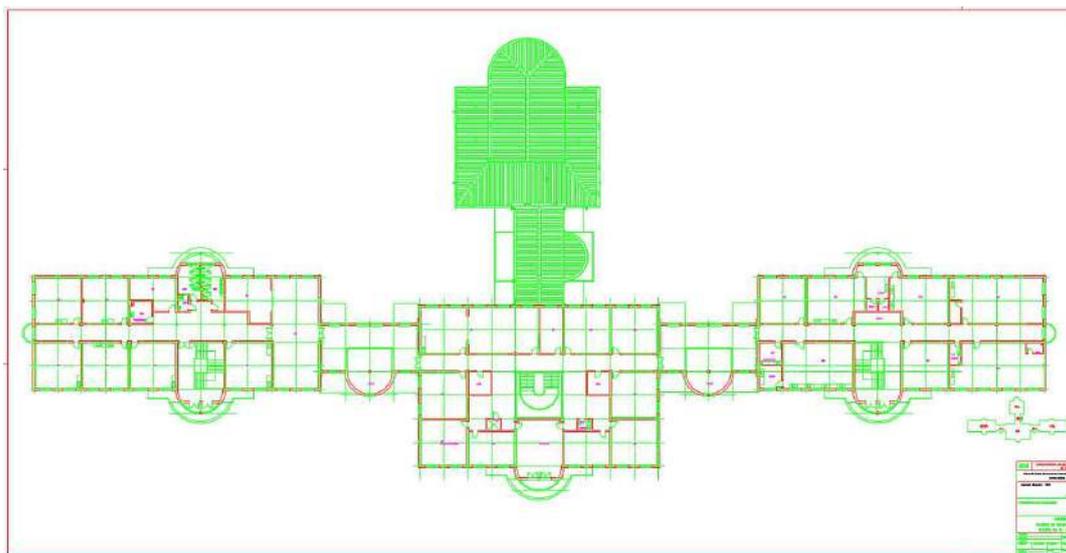
Nível de ensino	Número de alunos
Básico integrado com JI	520 alunos

Descrição geral	
<p>A escola localiza-se na freguesia de Santa Clara, com acessos largos e sem presença de outras estruturas junto aos limites do seu terreno, pelo que não se prevê a possibilidade de interação sísmica com estas estruturas.</p> <p>Existe espaço dentro da escola, nomeadamente na zona do campo de jogos, para evacuação e encontro em caso de ocorrência de evento sísmico. Recomenda-se que, em caso de ocorrência de evento sísmico se evite a concentração junto ao edifícios que se situam junto à entrada da escola.</p>	 <p><i>Imagem aérea do Google Earth</i></p>

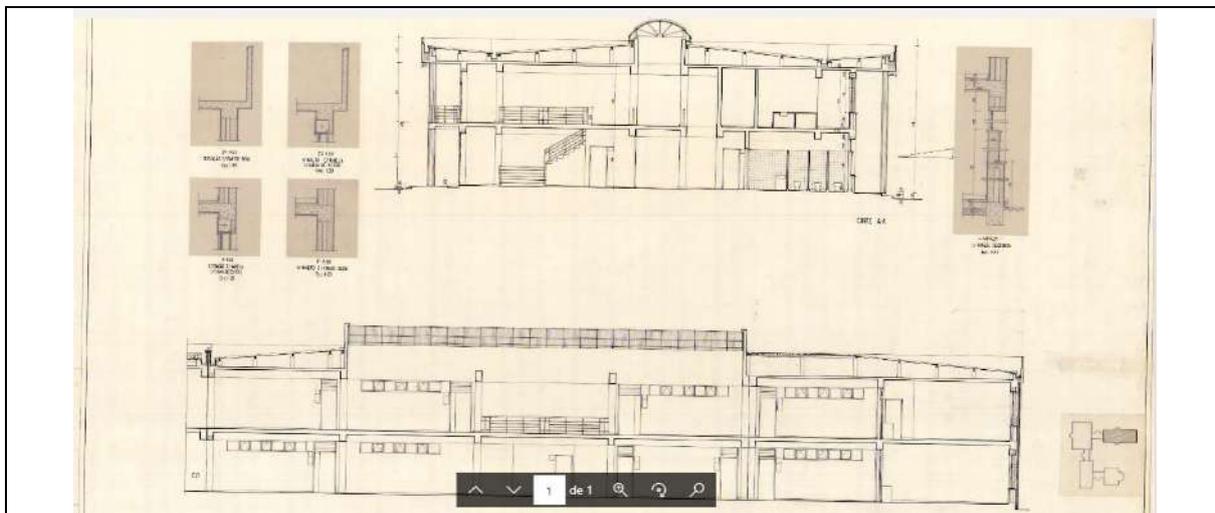
Informação de base
<p>Esta escola não dispõe de desenhos de estruturas, estando apenas disponíveis desenhos de levantamento arquitetónico fornecido pela CML, que corresponde à arquitetura tipo das escolas “VALE ROSAL”. No entanto, dada a semelhança desta escola com outras escolas da mesma tipologia, como é o caso da EB Telheiras, considera-se como informação de base os desenhos de projeto no <b>Atlas of School Architecture in Portugal</b>, que incluem desenhos de arquitetura e de estruturas. A informação destes desenhos foi complementada com a inspeção visual realizada pelo Departamento de edifícios do LNEC.</p>



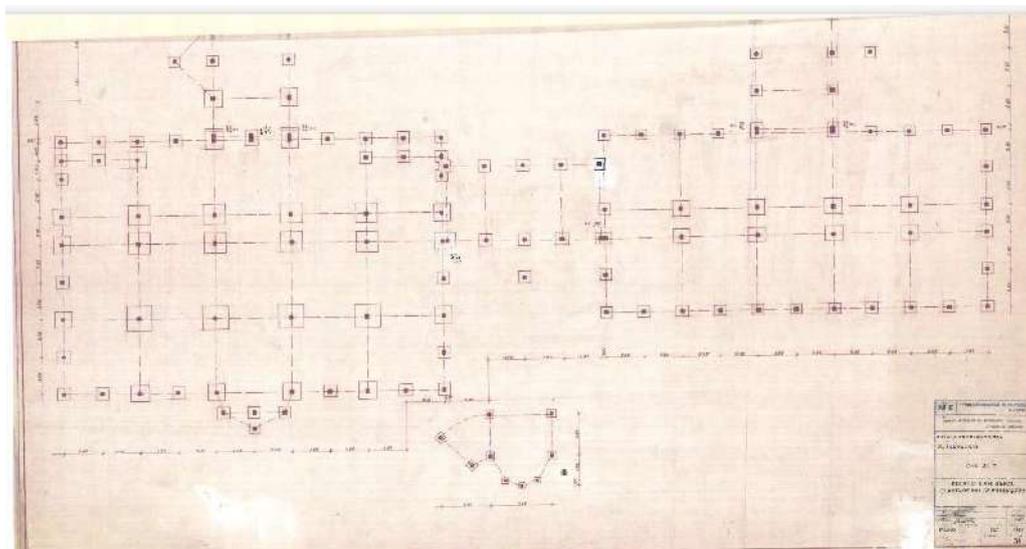
*Levantamento arquitetónico da escola tipo "VALE ROSAL" – Piso 1*



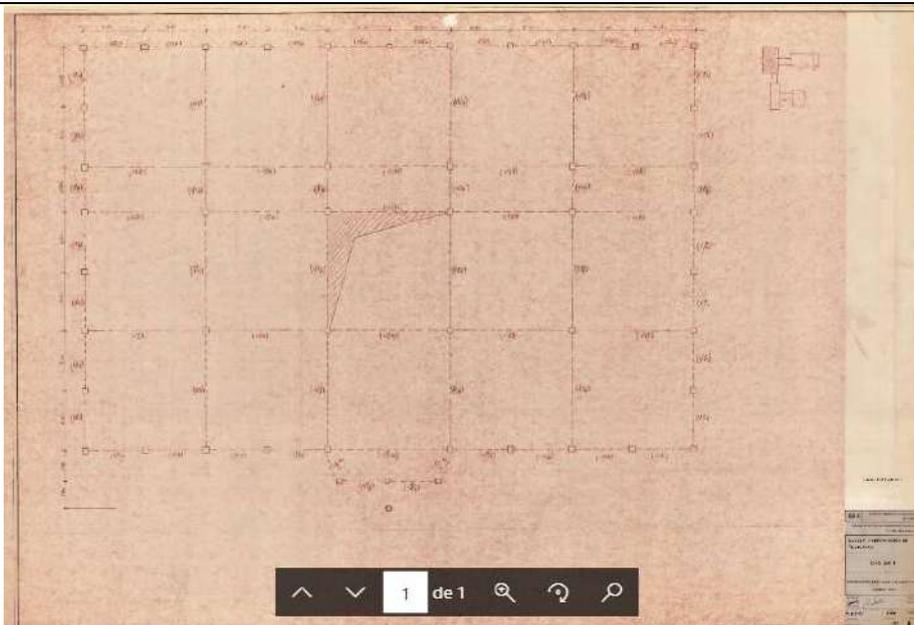
*Levantamento arquitetónico da escola tipo "VALE ROSAL" – Piso 2*



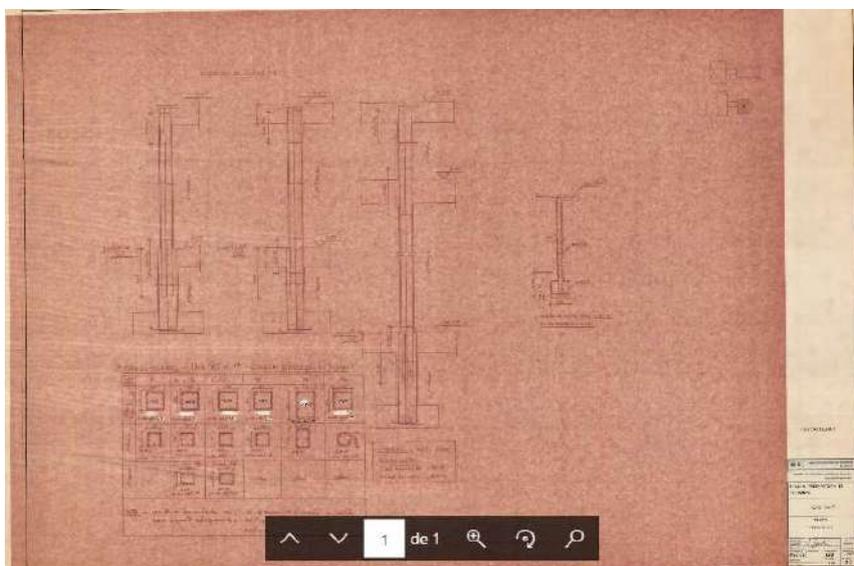
Corte transversal e longitudinal do bloco CR1A



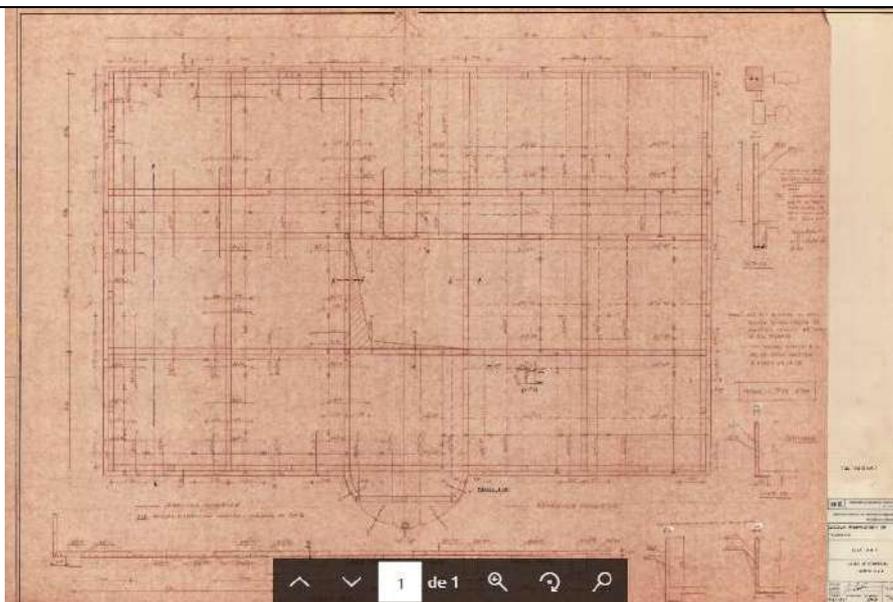
Planta de fundações dos blocos CC e CR1A



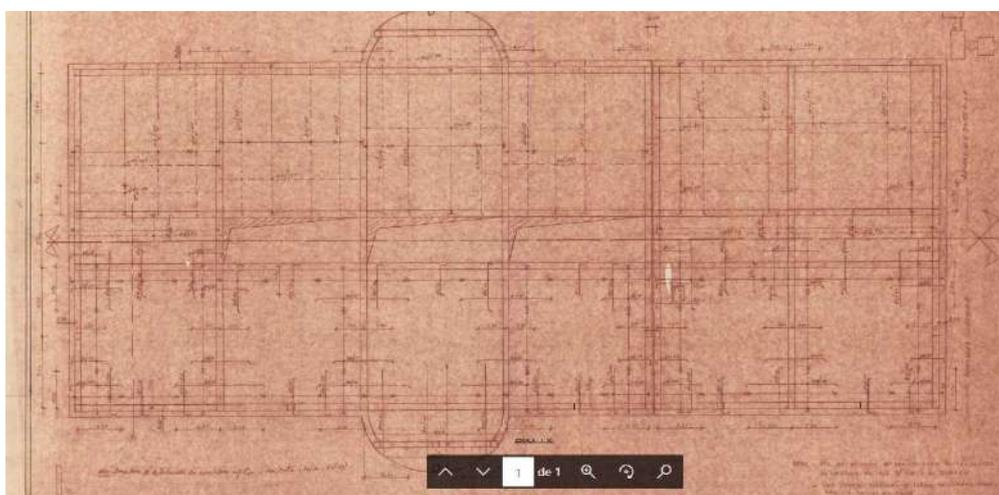
*Alinhamentos estruturais do bloco CC*



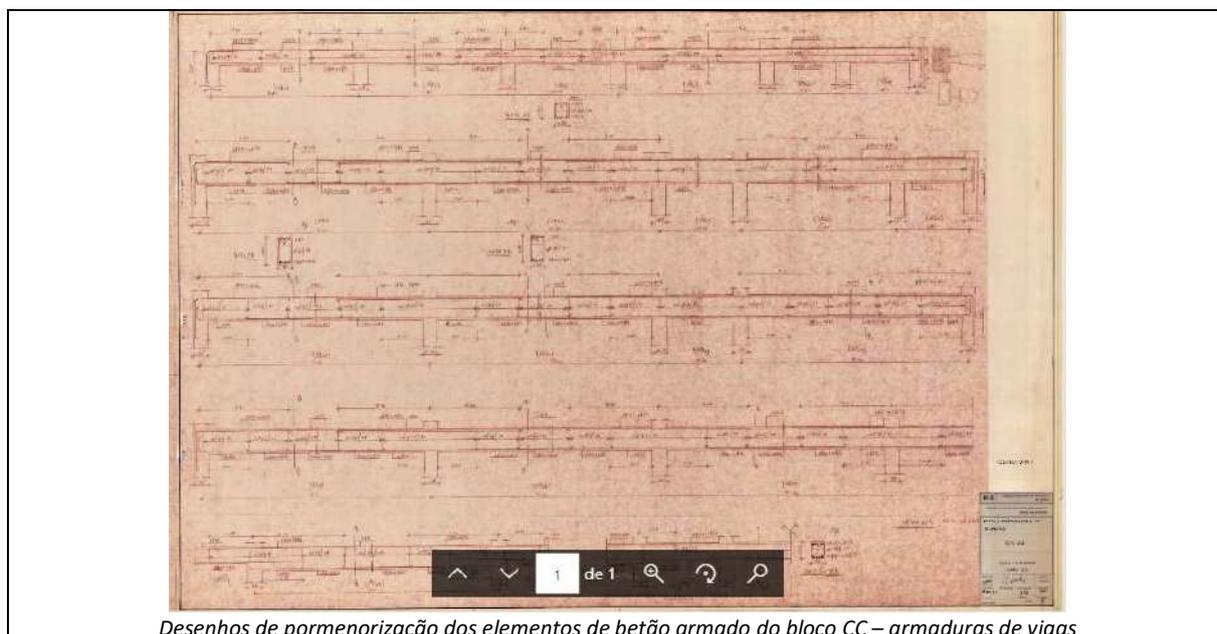
*Desenhos de pormenorização dos elementos de betão armado do bloco CC – armaduras de pilares*



*Desenhos de pormenorização dos elementos de betão armado do bloco CC – armaduras das lajes*



*Desenhos de pormenorização dos elementos de betão armado do bloco CR1A/C1A – armaduras das lajes*



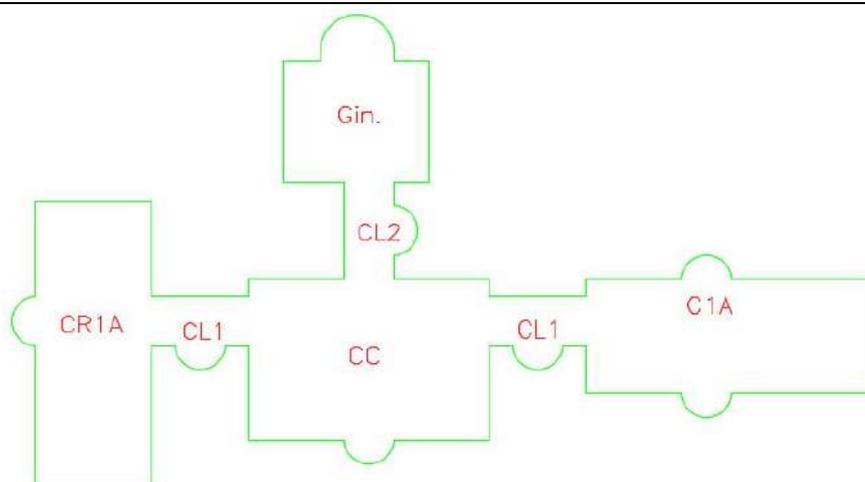
*Desenhos de pormenorização dos elementos de betão armado do bloco CC – armaduras de vigas*

### **Caracterização estrutural**

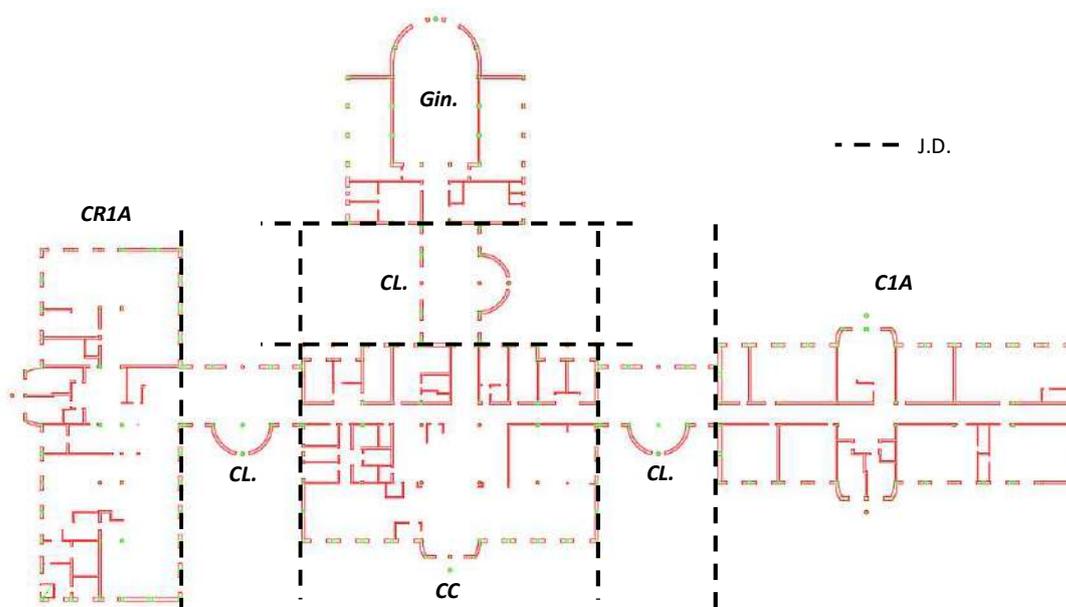
Escola tipo “VALE ROSAL”, com 5 corpos: 3 blocos de aulas com 2 pisos e 1 bloco - refeitório - com 1 piso, 1 edifício de apoio com balneários e um pavilhão gimnodesportivo. Assim, o edifício principal corresponde ao conjunto dos dois blocos com 2 pisos. Estes blocos são separados por juntas de dilatação e são constituídos por uma estrutura reticulada de pilares e vigas, formando pórtico em ambas as direções.

Tal como representado nas figuras abaixo, a ligação entre os vários blocos é feita por blocos de ligação independentes, também com 2 pisos.

É de salientar que o arranjo geométrico dos blocos varia de escola para escola (dentro da tipologia “VALE ROSAL”). No entanto, a geometria e o arranjo estrutural dos mesmos mantêm-se, sendo apenas variável a posição dos blocos de ligação e o conseqüente rearranjo arquitetónico da escola em planta. Salienta-se também que a distinção entre os blocos CR1A e C1A reside apenas no facto da zona arredondada existir numa das fachas ou em ambas, pelo que em termos estruturais estes dois blocos são semelhantes.

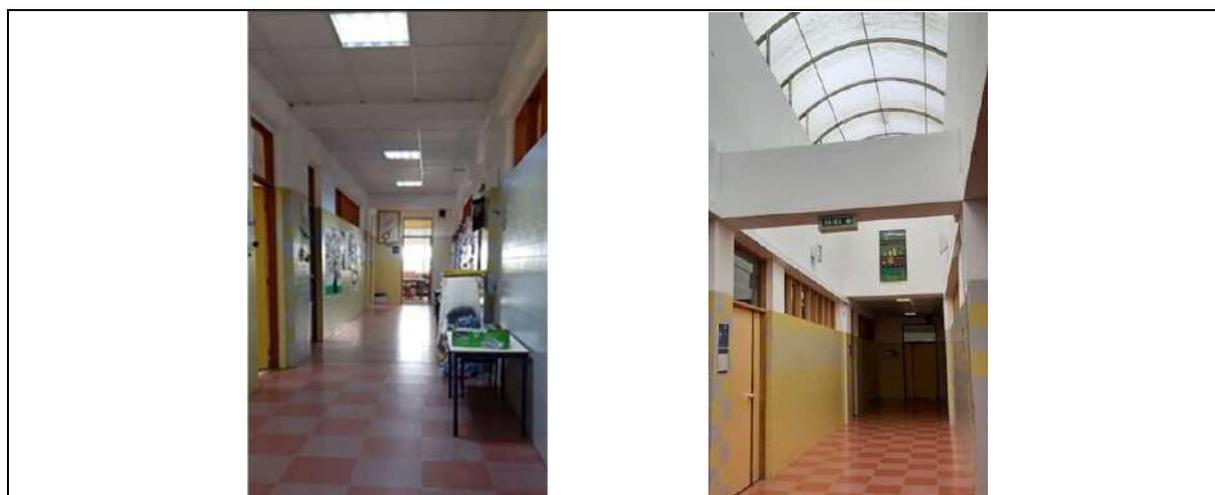


*Identificação dos blocos da arquitetura tipo das escolas "VALE ROSAL"*



*Planta com identificação das juntas de dilatação, dos blocos tipo e dos pilares*

Os blocos tipo da escola possuem três vãos na direção transversal. Na direção longitudinal os vãos das fachadas têm metade do comprimento (1/3 no caso do bloco CC), relativamente aos alinhamentos interiores. Existem vigas de bordadura em todo o perímetro dos blocos e vigas que unem os quatro pilares interiores aos pilares do perímetro. As lajes são maciças com 15.0cm de espessura.



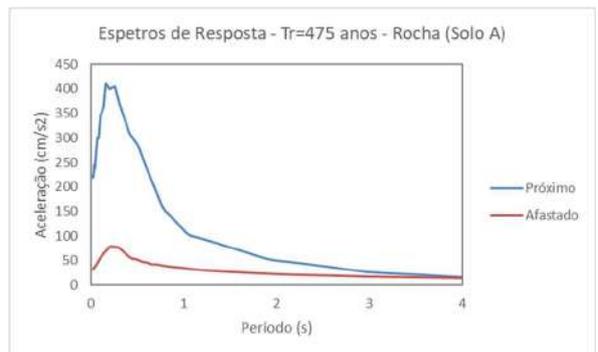
Fotografias da visita à escola: zonas interiores do edifício principal com alinhamentos estruturais e vigas aparentes

Tendo como referência o projeto de estruturas do edifício principal da escola, considera-se:

- Materiais: C20/25 + A400
- Dimensões dos elementos estruturais:
  - Pilares: 0.35x0.35 [mxm] (contínuos em altura)
  - Vigas interiores: 0.35x0.65 [mxm]
  - Vigas bordadura: 0.35x0.40 [mxm]
  - Laje maciça: 0.15m

### Caracterização geotécnica

Com base na carta de solos de que o LNEC dispõe (ver relatório), a EB Pintor Almada Negreiros encontra-se fundada em rocha (solo do tipo A), pelo que não se considera amplificação da ação calculada ao nível do substrato rochoso. Os espetros de resposta em rocha, que resultam de um estudo probabilístico de perigosidade sísmica desenvolvido especificamente no âmbito deste projeto, associados a um período de retorno de 475 anos, encontram-se na figura à direita.



### Modelo numérico

O modelo de cálculo, desenvolvido no programa SeismoStruct, é composto por elementos de barra (*frame*) de plasticidade distribuída com formulação em força. Cada secção destes elementos é definida através de fibras com comportamento uniaxial, associadas a aço ou a betão. Os elementos finitos são definidos tendo em consideração as dimensões acima apresentadas e as armaduras que foram sistematizadas com base no projeto de estruturas desta escola, tal como descrito nas tabelas abaixo.

<i>Armaduras de pilares</i>				
<b>Arm. Long.; Arm. Transv.;</b>	<b>Centrais</b>	<b>Perímetro</b>	<b>Canto e redondel</b>	<b>Circulares (Bloco CC)</b>
<b>Piso 1</b>	12Φ25+4Φ20; Φ8//0.28	12Φ25; Φ8//0.28	4Φ25+8Φ20; Φ8//0.28	8Φ25; Φ8//0.25
<b>Piso 2</b>	4Φ25; Φ8//0.28	8Φ25; Φ8//0.28	4Φ25; Φ8//0.28	8Φ25; Φ8//0.25

<i>Armaduras de vigas</i>			
<b>Arm. Long.; Arm. Transv.;</b>	<b>Extremidade</b>	<b>Sobre pilares interior</b>	<b>Meio-vão</b>
<b>Piso 1 - vigas longitudinais</b>	inf 4Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 1Φ20+4Φ16; sup 3Φ25+5Φ16; Φ8//0.10	inf 2Φ20+4Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.20
<b>Piso 1 - vigas transversais</b>	inf 4Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 4Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 3Φ20+4Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.20
<b>Piso 1 - vigas bordadura</b>	inf 3Φ20+3Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 2Φ20+3Φ16; sup 2Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 3Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.10
<b>Piso 2 - vigas longitudinais</b>	inf 4Φ12; sup 2Φ20+3Φ16; Φ6//0.10	inf 4Φ12; sup 2Φ20+3Φ16; Φ6//0.10	inf 2Φ16+4Φ12; sup 3Φ16; Φ6//0.25
<b>Piso 2 - vigas transversais</b>	inf 3Φ16; sup 2Φ20+3Φ16; Φ6//0.10	inf 3Φ16; sup 2Φ20+3Φ16; Φ6//0.10	inf 2Φ20+3Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.25
<b>Piso 2 - vigas bordadura</b>	inf 6Φ12; sup 3Φ16+3Φ12; Φ6//0.10	inf 4Φ12; sup 3Φ16+3Φ12; Φ6//0.10	inf 4Φ12; sup 3Φ12; Φ6//0.20

As lajes são armadas com Φ10//0.125 em ambas as faces e em ambas as direções, existindo reforços para momentos negativos sobre as vigas interiores e junto à bordadura. As cargas atuantes nas lajes são automaticamente distribuídas pela malha de vigas, enquanto que a sua rigidez é simulada através do cálculo da largura efetiva do banzo das vigas em “T”, o que é feito de forma automática pelo programa de cálculo.

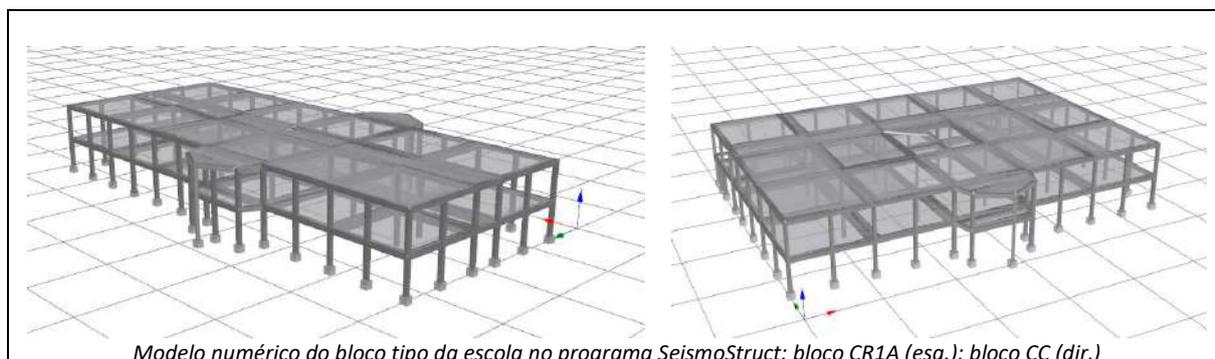
As fibras uniaxiais que definem o comportamento do betão são definidas através do modelo de *Mander et al.*, enquanto que as fibras de aço são definidas através do modelo de comportamento de *Menegotto-Pinto*.

Consideram-se as bases dos pilares com restrições aos deslocamentos e às rotações.

Relativamente às cargas atuantes, adotaram-se as cargas definidas de acordo com a norma portuguesa em vigor (NP EN1991-1-1), para o tipo de edifício em questão. Assim, as cargas permanentes e sobrecargas a considerar na análise são:

<b>Carga</b>	<b>1º Piso</b>	<b>Cobertura</b>
<b>Pavimento (RCP)</b>	1.5 kN/m	2.5 kN/m
<b>Paredes (RCP)</b>	<u>Divisórias</u> : 1.75 kN/m (aplicada na laje do 1º piso) <u>Exteriores</u> : 7.8 kN/m (aplicada nas vigas exteriores do 1º piso)	-
<b>Sobrecarga</b>	Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>	Cobertura não acessível: 0.4 kN/m <sup>2</sup>

Após a aplicação das cargas gravíticas é executada uma análise estática não-linear com controlo de deslocamentos (*pushover*).



Modelo numérico do bloco tipo da escola no programa SeismoStruct: bloco CR1A (esq.); bloco CC (dir.)

Os períodos de vibração da estrutura, obtidos através do modelo numérico, são:

Períodos de vibração	Bloco CR1A/C1A	Bloco CC
1º modo (X)	0.39 s	0.39 s
2º modo (Y)	0.37 s	0.38 s
3º modo (Torção)	0.35 s	0.33 s

### Curva de capacidade

As curvas de capacidade dos blocos CR1A/C1A e CC encontram-se representadas abaixo. O bloco CC tem menor rigidez e resistência máxima. No entanto, apresenta maior ductilidade do que o bloco CR1A/C1A, que por sua vez apresenta uma rotura frágil, condicionada pelo corte dos pilares.

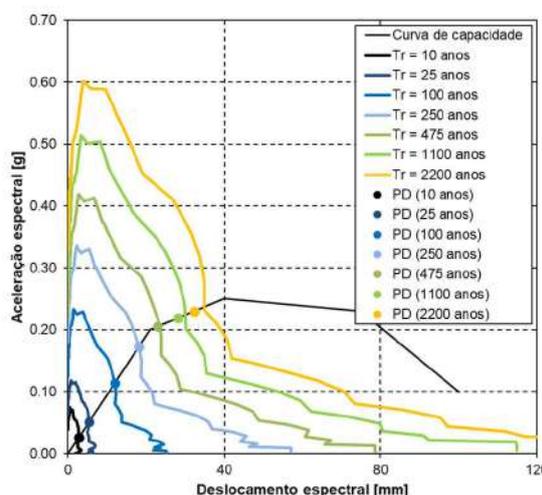


Os estados limite do bloco de aulas encontram-se descritos, em termos de deslocamento do topo na seguinte tabela:

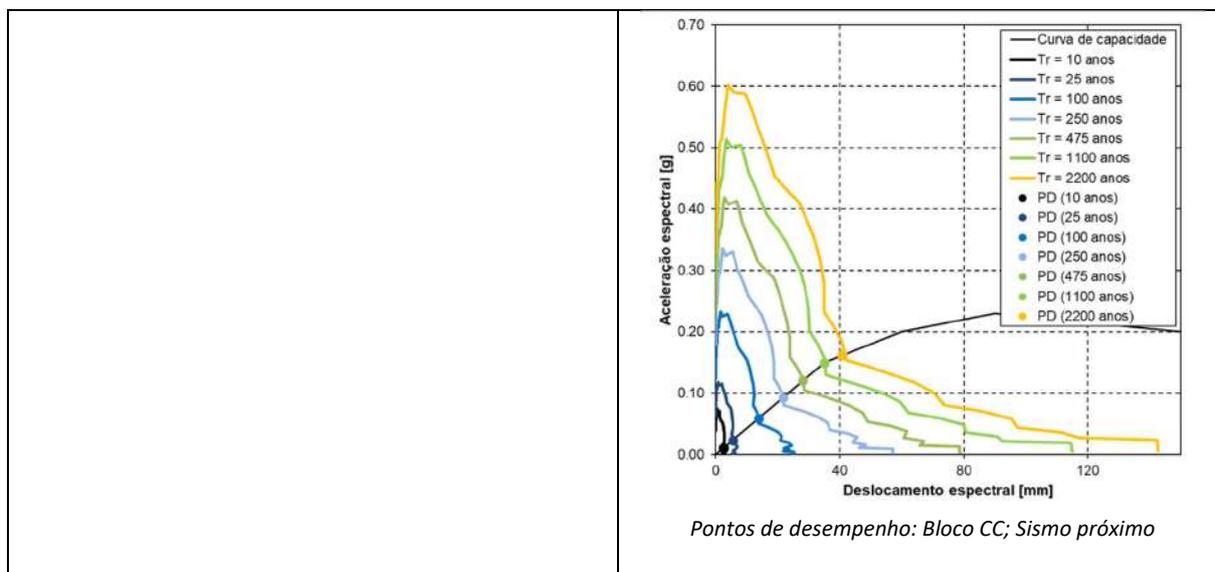
Estado limite	Bloco CR1A/C1A	Bloco CC
Completamente Operacional	D= 14.7 mm	D= 24.5 mm
Operacional	D= 21.0 mm	D= 35.0 mm
Salvaguarda de Vida	D= 45.0 mm	D= 112.5 mm
Próximo do Colapso	D= 60.0 mm	D= 150.0 mm

### Pontos de desempenho

Determinação dos pontos de desempenho através do método do espectro de capacidade, para os sismos próximo e afastado e 25 períodos de retorno distintos. Nas figuras abaixo apresentam-se apenas 7 dos 25 espectros de resposta considerados, para sismo próximo.

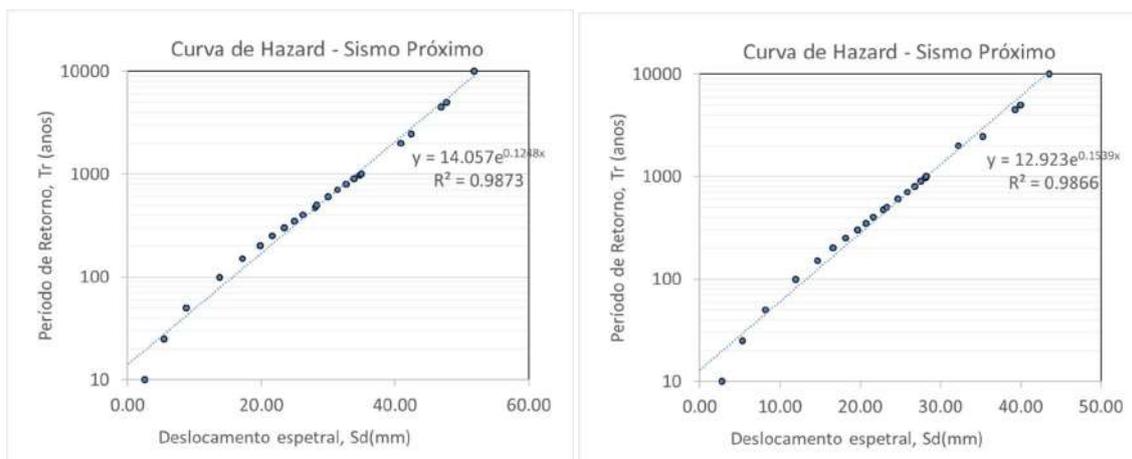


Pontos de desempenho: Bloco CR1A/C1A; Sismo próximo



**Curva de Hazard e períodos de retorno**

A curva de hazard, para sismo próximo (condicionante), é a que se apresenta de seguida.



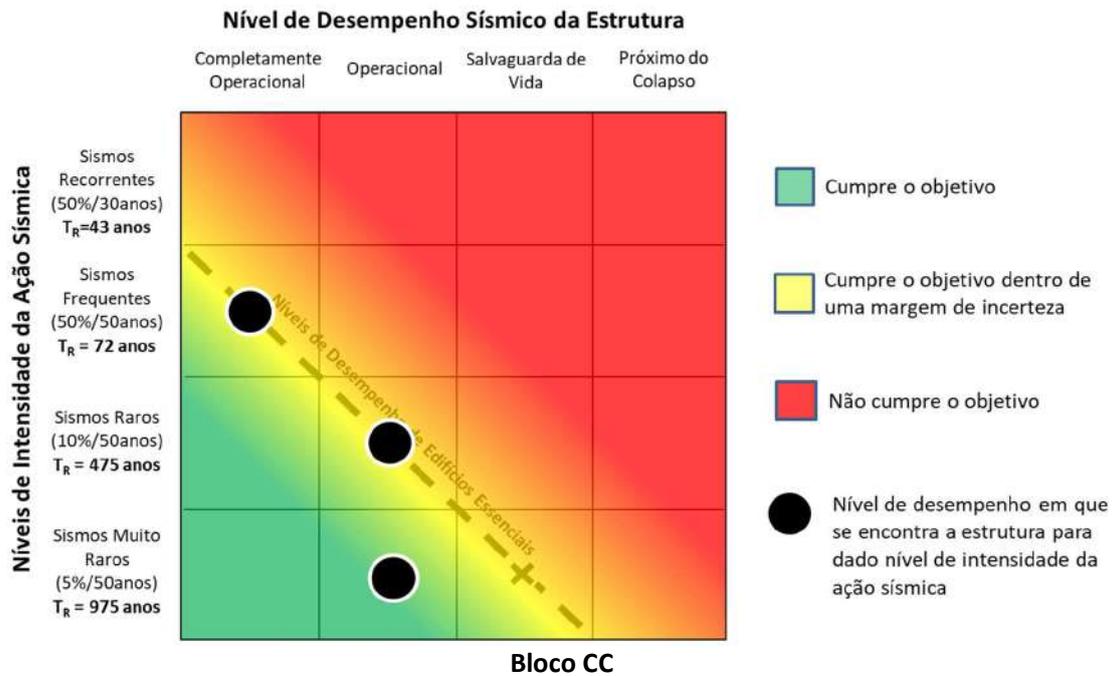
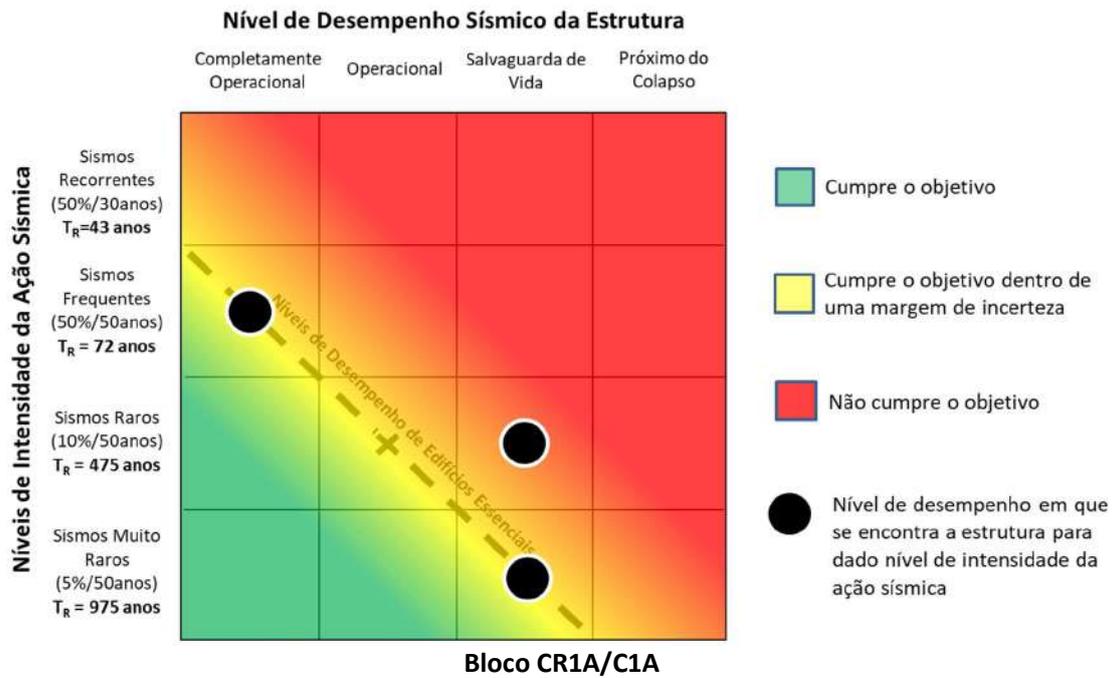
Curva de Hazard: Sismo próximo; Bloco CC (esq.); Bloco CR1A/C1A (dir.)

Os períodos de retorno associados aos estados limite definidos são:

Período de retorno		Bloco CR1A/C1A	Bloco CC
Estado limite	Completamente Operacional	124	299
	Operacional	327	1109
	Salvaguarda de Vida	>10000	>10000
	Próximo do Colapso	>10000	>10000

**Matriz de desempenho sísmico**

A matriz de desempenho sísmico, que descreve o comportamento da estrutura de cada um dos blocos que constituem a escola relativamente aos níveis e objetivos de desempenho definidos, é apresentada abaixo.



### Conclusão

Verifica-se que o comportamento da estrutura do edifício principal da escola, que se subdivide em 4 blocos independentes com estrutura porticada em betão armado e lajes vigadas, relativamente aos níveis e objetivos de desempenho sísmico definidos é condicionado pelo comportamento do bloco CR1A/C1A.

No caso deste bloco, o comportamento sísmico é satisfatório para sismos muito raros, i.e. sismos com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 5% em 50 anos (um período de retorno de 975 anos) e também para sismos frequentes, i.e. sismos com probabilidade de ocorrência igual ou superior a 50% em 50 anos (período de retorno de 72 anos). No entanto, entre estes dois patamares, ou seja, para sismos raros com probabilidade de ocorrência situada entre as duas probabilidades anteriormente referidas, o comportamento do edifício não respeita os objetivos de desempenho estabelecidos para um edifício classificado como essencial, encontrando-se na zona vermelha da matriz de desempenho apresentada acima. Nessas circunstâncias, é expectável que o edifício se encontre num nível de dano acima do expectável para este nível de intensidade da ação sísmica, limitando a sua operacionalidade e possível utilização em cenários pós-sismo.

Assim, deverão também ser tomadas medidas relativamente à manutenção da operacionalidade do edifício no caso de ocorrência de sismos raros.

Não obstante, conclui-se que para este tipo de edifícios não é verosímil que a estrutura se encontre próxima do colapso para nenhum destes níveis de intensidade da ação sísmica.



# Escola Básica Piscinas

ID Escola: 116

Escola	Agrupamento	Área coberta
Escola Básica Piscinas Olivais	Piscinas - Olivais	1500 m <sup>2</sup>

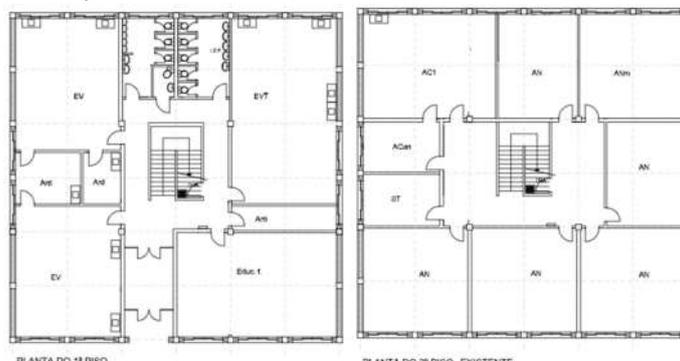
Nível de ensino	Número de alunos
Básico com 2º e 3º ciclos	680 alunos

Descrição geral
<p>A escola localiza-se na freguesia dos Olivais, na zona de confluência entre a Rua Cap. Santiago Carvalho e a Av. Dr. Francisco Luís Gomes. Os acessos são amplos e sem presença de outras estruturas junto aos limites do seu terreno, não existindo, portanto, a possibilidade de interação sísmica com outras estruturas.</p> <p>Os dois blocos de aulas que constituem a escola estão ligados, ao nível do primeiro piso, por uma zona coberta e fechada, cuja estrutura é independente das estruturas dos blocos. Assim, o funcionamento dos dois blocos, no que ao comportamento sísmico diz respeito é independente.</p> <p>Existe espaço, dentro da escola (por exemplo na zona do campo de jogos) e também nas imediações da mesma, para evacuação e encontro em caso de ocorrência de evento sísmico.</p>



Imagem aérea do Google Earth

Informação de base
<p>Estão apenas disponíveis desenhos de levantamento arquitetónico fornecidos pela CML, que resultam do projeto tipo das escolas de pavilhões “3x3”. Não foram realizadas alterações ao levantamento fornecido, apesar de se considerar nesta análise a informação acrescida recolhida após a inspeção visual levada a cabo pelo Departamento de Edifícios do LNEC.</p>



Levantamento arquitetónico do bloco tipo “3x3”

### Caracterização estrutural

Escola tipo “3x3”, com estrutura porticada em betão armado. Os blocos têm quatro pilares ao centro, definindo três vãos (“3x3”) nas duas direções. No perímetro os vãos têm metade do comprimento, relativamente aos alinhamentos interiores. A escola é composta por 2 blocos de aulas e um bloco que acolhe o ginásio. Os blocos de aulas possuem laje fungiforme, onde os alinhamentos dos pórticos são amaciçados.

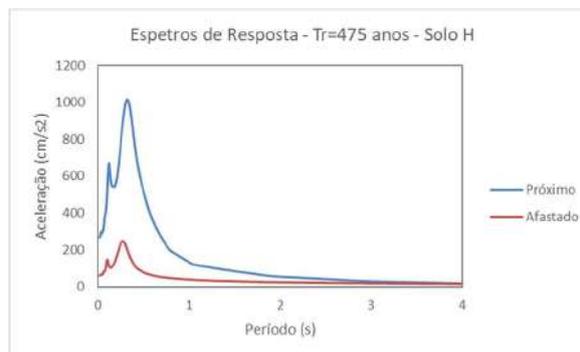
Não há informação sobre o projeto de estruturas da escola que permita recolher dados sobre o seu dimensionamento da escola, nomeadamente no que diz respeito a materiais, ações consideradas, dimensões de elementos estruturais, armaduras colocadas, entre outros pormenores construtivos. Assim, a análise aqui desenvolvida é baseada naquilo que se presume ser a prática construtiva e os materiais da época de construção da escola. Com efeito, assumem-se materiais e restantes características da estrutura de acordo com outras escolas de tipologias e época construtiva semelhante, como é o caso da tipologia “Vale Rosal”. Assim, considera-se:

- Materiais: B25(C25/30) + A400
- Dimensões dos elementos estruturais:
  - Pilares: 0.35x0.35 [mxm] (contínuos em altura)
  - Laje fungiforme aligeirada:
    - Altura total: 42.5cm
    - Altura maciça: 10.0cm
    - Largura total: 90.0cm
    - Largura das nervuras: 13.0cm

É de salientar que, na ausência de informação sobre o projeto de estruturas da escola, que permita recolher dados sobre o seu dimensionamento, nomeadamente no que diz respeito a materiais, ações consideradas, dimensões de elementos estruturais, armaduras colocadas, entre outros pormenores construtivos, estes resultados devem ser encarados como indicadores do comportamento expectável e não como uma avaliação detalhada do comportamento sísmico da estrutura.

### Caracterização geotécnica

Com base na carta de solos de que o LNEC dispõe (Ver relatório), a EB Piscinas encontra-se fundada em solo do tipo H, pelo que se considera a amplificação da ação calculada ao nível do substrato rochoso com base na coluna de solo respetiva (coluna H). Os espectros de resposta, que resultam de um estudo probabilístico de perigosidade sísmica desenvolvido especificamente no âmbito deste projeto, associados a um período de retorno de 475 anos, encontram-se na figura à direita.



**Modelo numérico**

O modelo de cálculo, desenvolvido no programa SeismoStruct, é composto por elementos de barra (*frame*) de plasticidade distribuída com formulação em força. Cada secção destes elementos é definida através de fibras com comportamento uniaxial, associadas a aço ou a betão. Os elementos finitos são definidos tendo em consideração as dimensões acima apresentadas e as armaduras que foram sistematizadas com base no projeto de execução da tipologia “Vale Rosal”. As armaduras dos pilares são:

Arm. Long; Arm. Transv.	Centrais	Perímetro	Canto
<b>1º piso</b>	12Φ25+4Φ20; Φ8//0.15	12Φ25; Φ8//0.15	4Φ25+8Φ20; Φ8//0.15
<b>2º Piso</b>	4Φ25; Φ8//0.15	8Φ25; Φ8//0.15	4Φ25; Φ8//0.15

Relativamente às vigas, as armaduras são:

Arm. Long; Arm. Transv.	Local	Extremidades	Sob pilares interiores	Meio-vão
<b>1º piso</b>	Vigas interiores	inf 4Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 4Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 3Φ20+4Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.20
	Vigas perímetro	inf 3Φ20+3Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 2Φ20+3Φ16; sup 2Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 3Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.10
<b>2º Piso</b>	Vigas interiores	inf 3Φ16; sup 2Φ20+3Φ16; Φ6//0.10	inf 3Φ16; sup 2Φ20+3Φ16; Φ6//0.10	inf 2Φ20+3Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.25
	Vigas perímetro	inf 6Φ12; sup 3Φ16+3Φ12; Φ6//0.10	inf 4Φ12; sup 3Φ16+3Φ12; Φ6//0.10	inf 4Φ12; sup 3Φ12; Φ6//0.20

As lajes maciças são armadas com Φ10//0.125 em ambas as faces. As cargas atuantes nas lajes são automaticamente distribuídas pela malha de vigas, enquanto que a sua rigidez é simulada através do cálculo da largura efetiva do banzo das vigas em “T”, o que é feito também de forma automática pelo programa de cálculo.

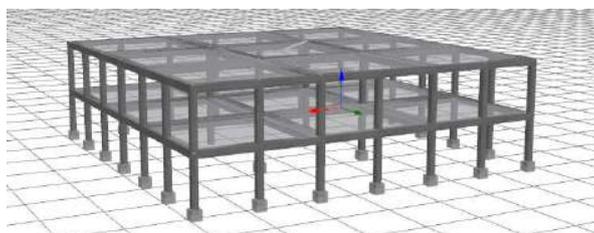
As fibras uniaxiais que definem o comportamento do betão são definidas através do modelo de *Mander et al.*, enquanto que as fibras de aço são definidas através do modelo de comportamento de *Menegotto-Pinto*.

Consideram-se as bases dos pilares com restrições aos deslocamentos e libertas às rotações, simulando assim uma fundação flexível, de acordo com a conceção de sapatas isoladas que caracteriza a fundação da estrutura.

Relativamente às cargas atuantes, adotaram-se as cargas definidas de acordo com a norma portuguesa em vigor (NP EN1991-1-1), para o tipo de edifício em questão. Assim, as cargas permanentes e sobrecargas a considerar na análise são:

Carga	1º Piso	Cobertura
<b>Pavimento (RCP)</b>	1.5 kN/m	2.5 kN/m
<b>Paredes (RCP)</b>	<u>Divisórias</u> : 1.75 kN/m (aplicada na laje do 1º piso) <u>Exteriores</u> : 7.8 kN/m (aplicada nas vigas exteriores do 1º piso)	-
<b>Sobrecarga</b>	Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>	Cobertura não acessível: 0.4 kN/m <sup>2</sup>

Após a aplicação das cargas gravíticas é executada uma análise estática não-linear com controlo de deslocamentos (*pushover*).

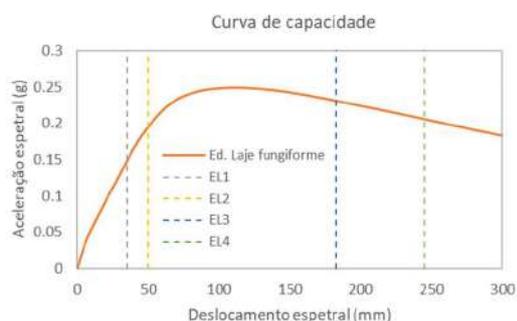


Modelo numérico do bloco tipo da escola no programa SeismoStruct

Os períodos de vibração da estrutura, obtidos através do modelo numérico, são:

Períodos de vibração	
1º modo (X)	0.76 s
2º modo (Y)	0.76 s
3º modo (Torção)	0.62 s

### Curva de capacidade

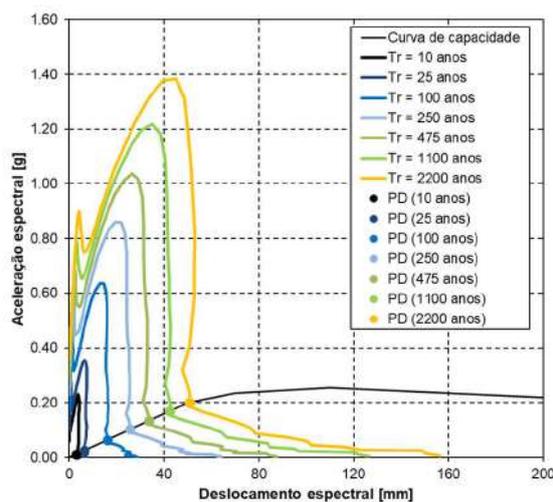


Os estados limite de cada um dos edifícios encontram-se descritos, em termos de deslocamento do topo na seguinte tabela:

Estado limite	Deslocamento do topo
Completamente Operacional	D= 35 mm
Operacional	D= 50 mm
Salvaguarda de Vida	D= 186 mm
Próximo do Colapso	D= 248 mm

### Pontos de desempenho

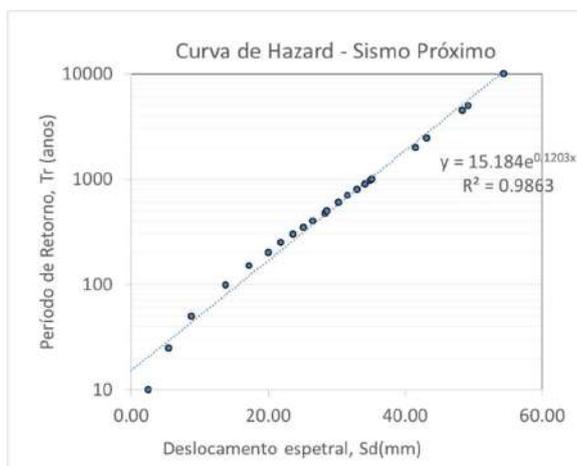
Determinação dos pontos de desempenho através do método do espectro de capacidade, para os sismos próximo e afastado e 25 períodos de retorno distintos. Nas figuras abaixo apresentam-se apenas 7 dos 25 espectros de resposta considerados, para sismo próximo e edifício com laje fungiforme.



Pontos de desempenho: Sismo próximo

**Curva de Hazard e períodos de retorno**

A curva de hazard, para sismo próximo (condicionante), é a que se apresenta de seguida.



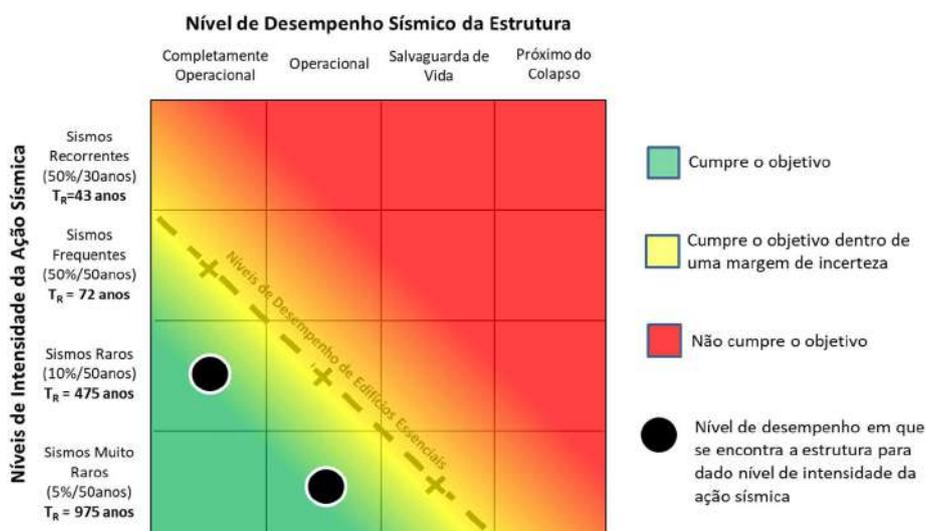
Curva de Hazard: Sismo próximo

Os períodos de retorno associados aos estados limite definidos são:

Período de retorno		Sismo Próximo	Sismo Afastado
Estado limite	Completamente Operacional	502	>10000
	Operacional	2133	>10000
	Salvaguarda de Vida	>10000	>10000
	Próximo do Colapso	>10000	>10000

**Matriz de desempenho sísmico**

A matriz de desempenho sísmico, que descreve o comportamento da estrutura de cada um dos edifícios que constituem a escola relativamente aos níveis e objetivos de desempenho definidos, é apresentada abaixo.



### Conclusão

Verifica-se que o comportamento da estrutura de cada um dos edifícios que constituem a escola (edifício com laje vigada e laje fungiforme) relativamente aos níveis e objetivos de desempenho sísmico definidos é satisfatório.

Com efeito, verifica-se que para sismos com probabilidade de ocorrência igual ou superior a 10% em 50 anos a estrutura se encontra num nível de desempenho completamente operacional, respeitando assim o objetivo de desempenho estabelecido para este tipo de edifícios. Além disso, para um sismo com probabilidade de ocorrência de 5% em 50 anos (sismo muito raro) a estrutura encontra-se num nível de desempenho operacional, pelo que respeita o nível de desempenho admissível para este nível de intensidade sísmica, que corresponde ao nível de desempenho salvaguarda de vida. Para este tipo de edifícios não é verosímil que a estrutura se encontre próxima do colapso para nenhum destes níveis de intensidade da ação sísmica.



# Escola Básica Professor Lindley Cintra

ID Escola: 122

Escola	Agrupamento	Área coberta
Escola Básica Professor Lindley Cintra	Professor Lindley Cintra - Lumiar	2683 m <sup>2</sup>

Nível de ensino	Número de alunos
Básico com 2º e 3º ciclos	530 alunos

#### Descrição geral

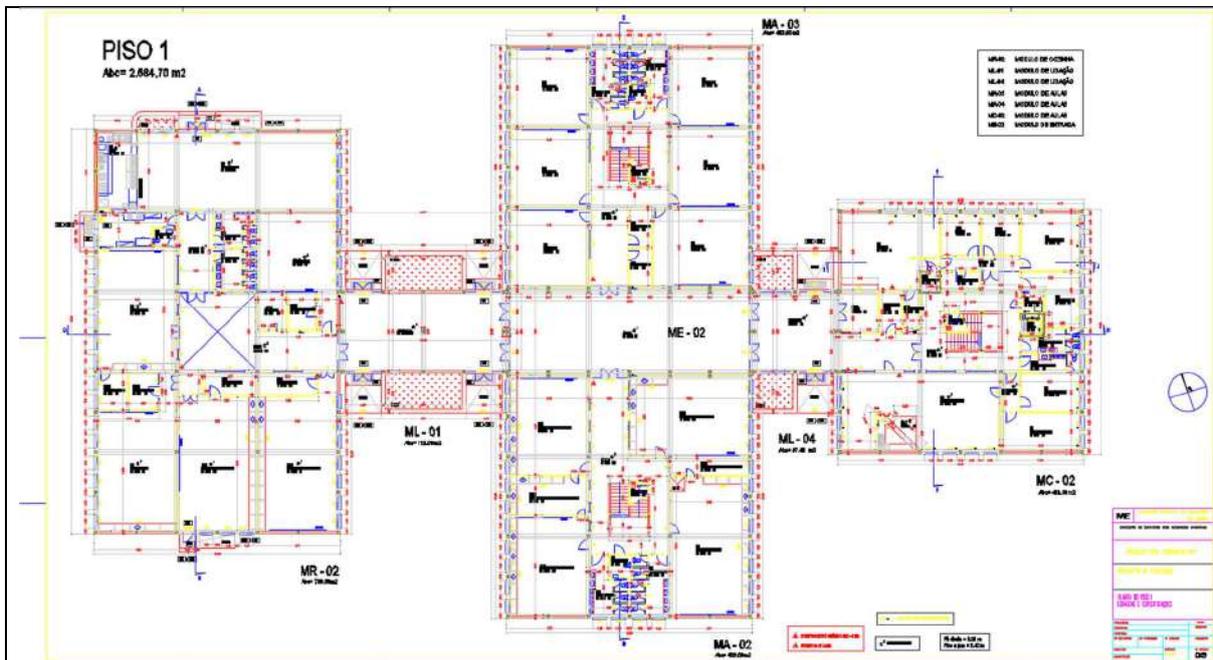
A escola localiza-se na freguesia do Lumiar, num quarteirão que integra também a ES Lumiar e a EB Quinta dos Frades. A entrada faz-se pelo final da Rua Mário Sampaio Ribeiro, uma rua sem saída, sendo os acessos amplos e sem presença de outras estruturas junto aos limites do seu terreno, não existindo, portanto, a possibilidade de interação sísmica com outras estruturas. Existe espaço, dentro da escola e nas imediações, para evacuação e encontro em caso de ocorrência de evento sísmico.



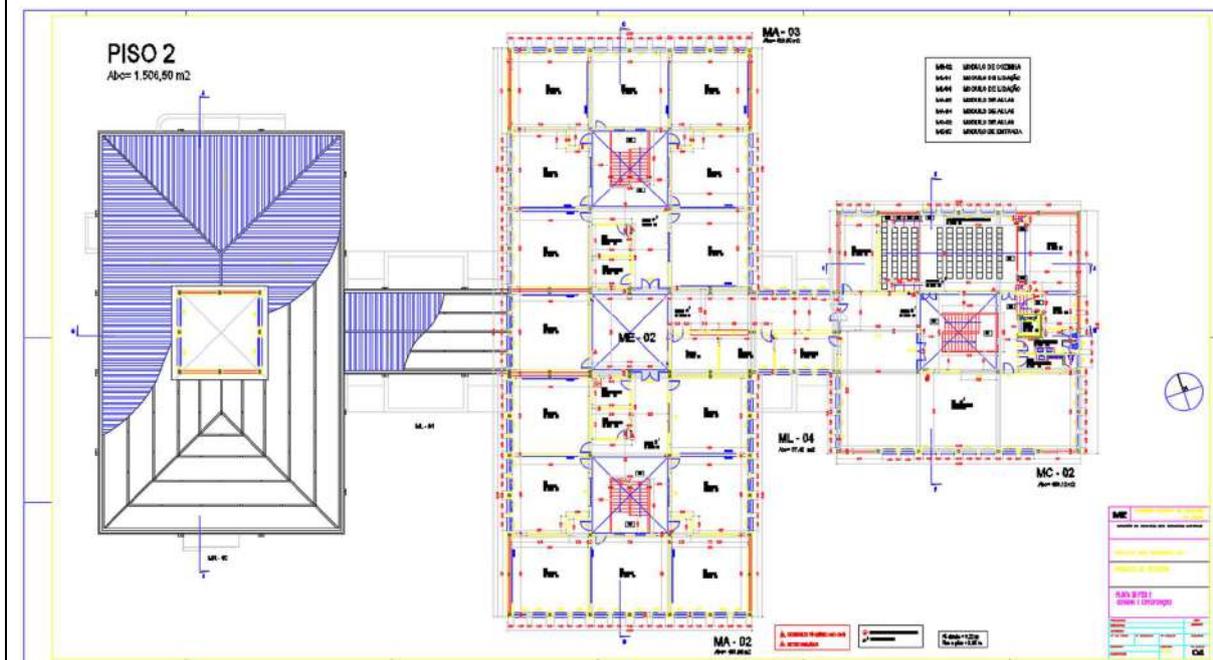
Imagem aérea do Google Earth

#### Informação de base

Estão apenas disponíveis desenhos de levantamento arquitetónico fornecidos pela CML, que resultam do projeto tipo das escolas de pavilhões "COMPACTO\_24T". Não foram realizadas alterações ao levantamento fornecido, apesar de se considerar nesta análise a informação acrescida recolhida após a inspeção visual levada a cabo pelo Departamento de Edifícios do LNEC. Foram também consideradas informações relativas a outras escolas com semelhante tipologia, tal como é o caso da EB Olivais, que dispõe de alguns desenhos de engenharia no *Atlas of Scholl Architecture in Portugal*, os quais foram considerados no desenvolvimento desta análise.



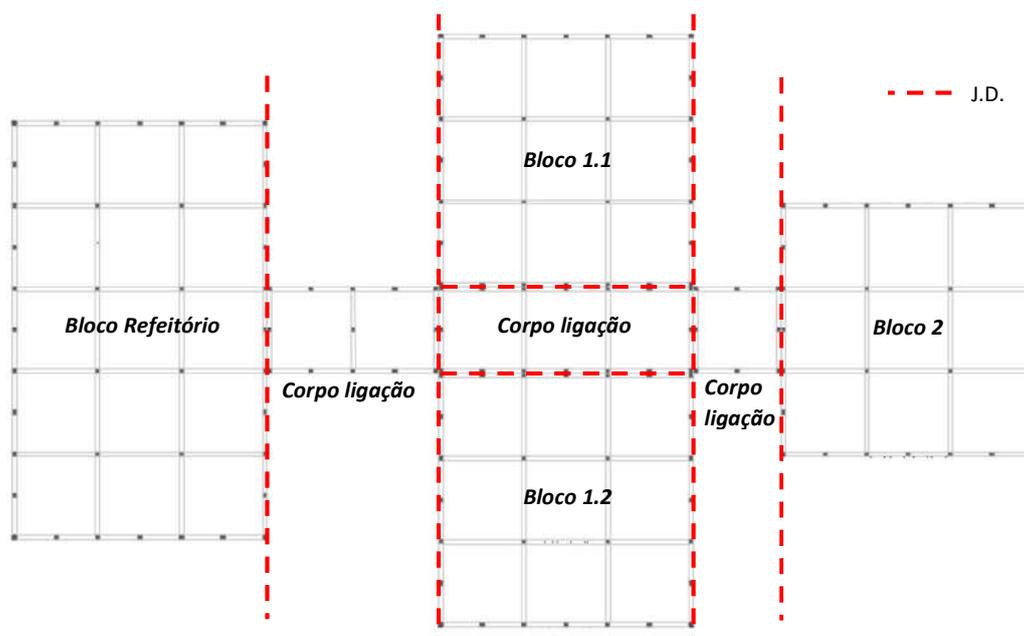
Levantamento arquitetónico do bloco tipo "C24T" – Piso 1



Levantamento arquitetónico do bloco tipo "C24T" – Piso 2

### Caracterização estrutural

Escola tipo “COMPACTO 24T” (“C24T”), com estrutura porticada em betão armado. Os blocos têm várias juntas de dilatação que os separam os corpos semelhantes aos blocos “3x3” unidos por pórticos com apenas um vão (ver figura abaixo). A exceção é o corpo do refeitório, que tem apenas 1 piso, e é mais comprido (tem mais dois vãos, i.e. mais um alinhamento de pilares interiores) que o bloco de “3x3”.



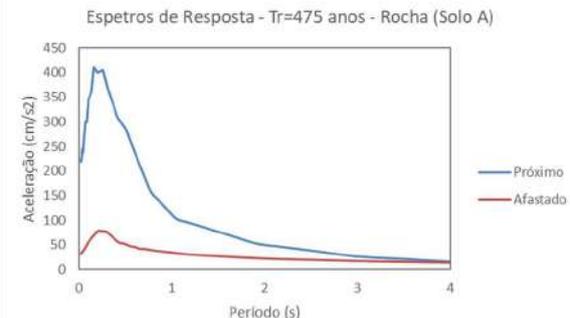
Planta com identificação das juntas de dilatação e dos pilares

Os blocos tipo “3x3” têm quatro pilares ao centro, definindo três vãos nas duas direções. No perímetro os vãos têm metade do comprimento, relativamente aos alinhamentos interiores. Existem vigas de bordadura em todo o perímetro dos blocos e quatro vigas que passam nos quatro pilares interiores. As lajes são maciças com 15.0cm de espessura.

Não existem informações sobre o projeto de estruturas do edifício principal da escola que permita recolher dados sobre o seu dimensionamento da escola, nomeadamente no que diz respeito a ações consideradas, dimensões de elementos estruturais, armaduras colocadas, entre outros pormenores construtivos. Assim sendo, a análise aqui desenvolvida é baseada nos projetos de outras escolas de tipologias e época construtiva semelhante, como é o caso da tipologia “Vale Rosal”, assim como no dimensionamento do edifício de ginásio. Assim, considera-se:

- Materiais: B25(C25/30) + A400
- Dimensões dos elementos estruturais:
  - Pilares: 0.35x0.35 [mxm] (contínuos em altura)
  - Vigas interiores: 0.35x0.65 [mxm]
  - Vigas bordadura: 0.35x0.40 [mxm]
  - Laje maciça: 0.15m

É de salientar que, na ausência de informação sobre o projeto de estruturas da escola, que permita recolher dados sobre o seu dimensionamento, nomeadamente no que diz respeito a dimensões de elementos estruturais, armaduras colocadas, entre outros pormenores construtivos, estes resultados devem ser encarados como indicadores do comportamento expectável e não como uma avaliação detalhada do comportamento sísmico da estrutura.

<b>Caracterização geotécnica</b>	
<p>Com base na carta de solos de que o LNEC dispõe (ver relatório), a EB Professor Lindley Cintra encontra-se fundada em rocha (solo do tipo A), pelo que não se considera amplificação da ação calculada ao nível do substrato rochoso. Os espetros de resposta em rocha, que resultam de um estudo probabilístico de perigosidade sísmica desenvolvido especificamente no âmbito deste projeto, associados a um período de retorno de 475 anos, encontram-se na figura à direita.</p>	

<b>Modelo numérico</b>			
<p>O modelo de cálculo, desenvolvido no programa SeismoStruct, é composto por elementos de barra (<i>frame</i>) de plasticidade distribuída com formulação em força. Cada secção destes elementos é definida através de fibras com comportamento uniaxial, associadas a aço ou a betão. Os elementos finitos são definidos tendo em consideração as dimensões acima apresentadas e as armaduras que foram sistematizadas com base no projeto de execução da tipologia “Vale Rosal” e adaptados tendo em consideração os desenhos de pormenor do edifício do ginásio da EB Olivais, cuja tipologia é semelhante à desta escola. As armaduras dos pilares são:</p>			
Arm. Long; Arm. Transv.		<b>Centrais</b>	
<b>1º piso</b>		8Φ16; Φ6//0.15	
<b>2º Piso</b>		8Φ16; Φ6//0.20	
<p>Relativamente às vigas, as armaduras são:</p>			
Arm. Long; Arm. Transv.	<b>Local</b>	<b>Extremidades/ Sob pilares interiores</b>	<b>Meio-vão</b>
<b>Todos os pisos</b>	Vigas interiores	inf 4Φ12; sup 2Φ16+3Φ12; Φ6//0.10	inf 4Φ16+3Φ12; sup 3Φ12; Φ6//0.20
	Vigas perímetro	inf 4Φ12; sup 4Φ12; Φ6//0.20	inf 4Φ12; sup 4Φ12; Φ6//0.20
<p>As lajes maciças são armadas com Φ8//0.10 junto à face inferior, em ambas as direções, e com Φ8//0.15 junto à face superior, em ambas as direções. As cargas atuantes nas lajes são automaticamente distribuídas pela malha de vigas, enquanto que a sua rigidez é simulada através do</p>			

cálculo da largura efetiva do banzo das vigas em “T”, o que é feito também de forma automática pelo programa de cálculo.

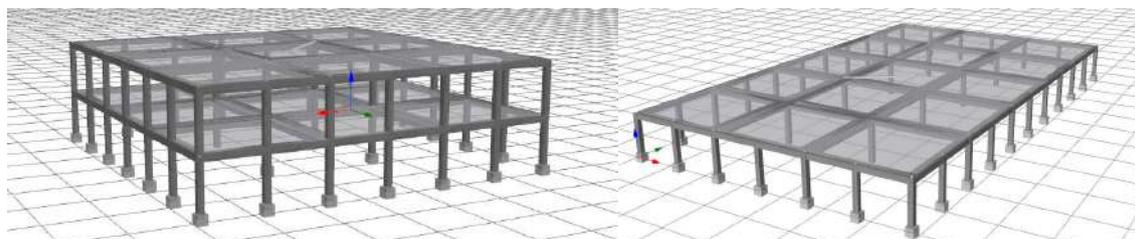
As fibras uniaxiais que definem o comportamento do betão são definidas através do modelo de *Mander et al.*, enquanto que as fibras de aço são definidas através do modelo de comportamento de *Menegotto-Pinto*.

Consideram-se as bases dos pilares com restrições aos deslocamentos e às rotações.

Relativamente às cargas atuantes, adotaram-se as cargas definidas de acordo com a norma portuguesa em vigor (NP EN1991-1-1), para o tipo de edifício em questão. Assim, as cargas permanentes e sobrecargas a considerar na análise são:

Carga	1º Piso	Cobertura
Pavimento (RCP)	1.5 kN/m <sup>2</sup>	2.5 kN/m <sup>2</sup>
Paredes (RCP)	Divisórias: 1.75 kN/m <sup>2</sup> (aplicada na laje do 1º piso) Exteriores: 7.8 kN/m (aplicada nas vigas exteriores do 1º piso)	-
Sobrecarga	Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>	Cobertura não acessível: 0.4 kN/m <sup>2</sup>

Após a aplicação das cargas gravíticas é executada uma análise estática não-linear com controlo de deslocamentos (*pushover*).

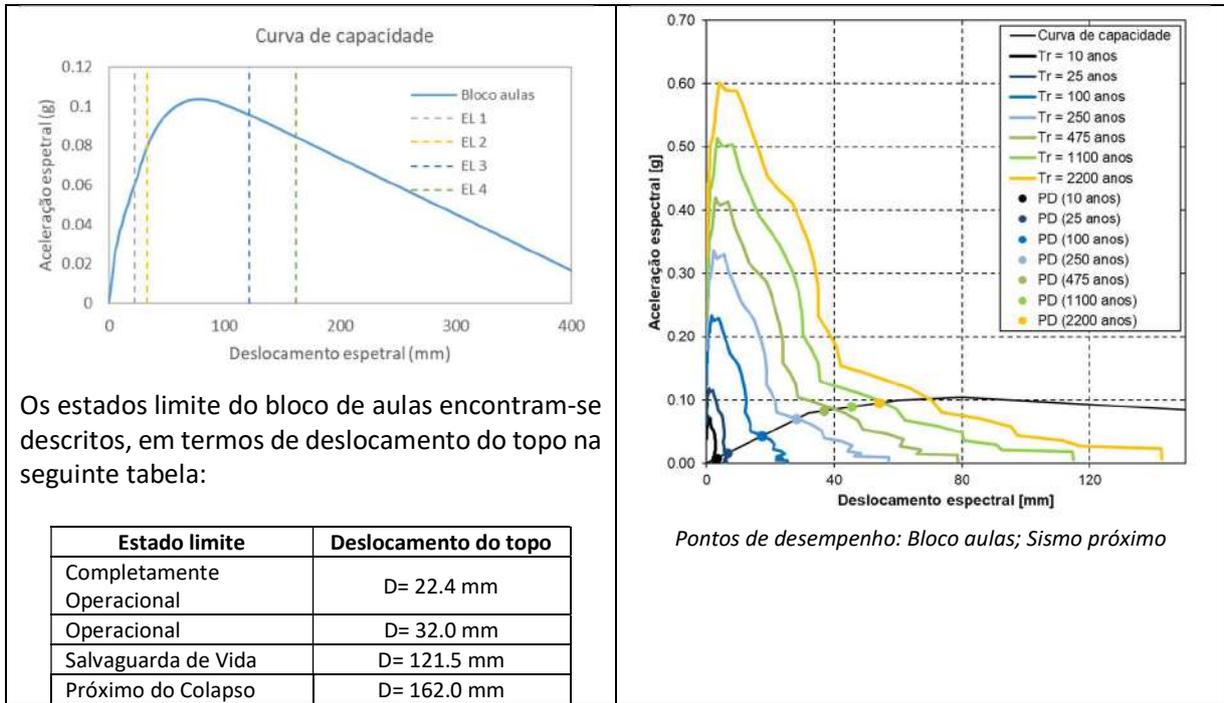


Modelo numérico do bloco tipo da escola no programa SeismoStruct: bloco de aulas (esq.); bloco de refeitório (dir.)

Os períodos de vibração da estrutura, obtidos através do modelo numérico, são:

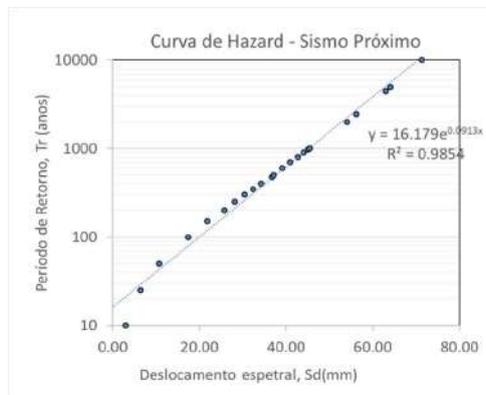
Períodos de vibração	Bloco aulas	Bloco refeitório
1º modo (X)	0.44 s	0.27 s
2º modo (Y)	0.44 s	0.26 s
3º modo (Torção)	0.36 s	0.21 s

Curva de capacidade	Pontos de desempenho
A curva de capacidade do bloco de aulas encontra-se representada abaixo. O bloco do refeitório por não ser condicionante, devido ao facto de ter apenas 1 piso e, conseqüentemente, menos massa, não é considerado na análise subsequente.	Determinação dos pontos de desempenho através do método do espectro de capacidade, para os sismos próximo e afastado e 25 períodos de retorno distintos. Nas figuras abaixo apresentam-se apenas 7 dos 25 espectros de resposta considerados, para sismo próximo.



**Curva de Hazard e períodos de retorno**

A curva de hazard, para sismo próximo (condicionante), é a que se apresenta de seguida.

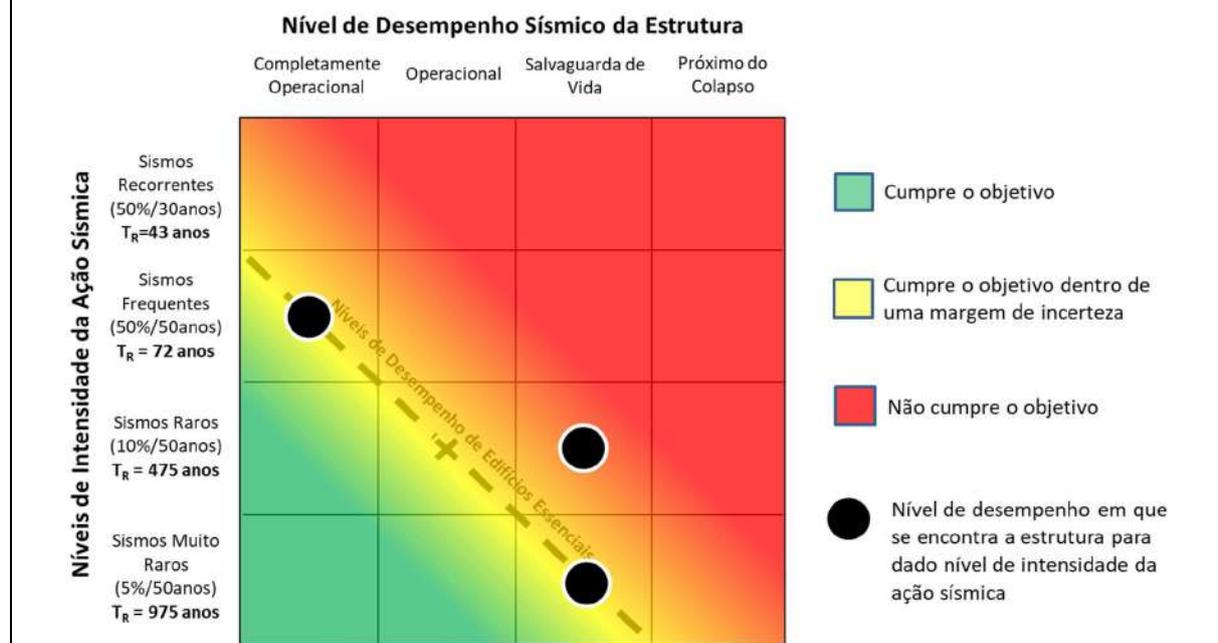


Os períodos de retorno associados aos estados limite definidos são:

	Período de retorno	Sismo Próximo	Sismo Afastado
Estado limite	Completamente Operacional	125	>10000
	Operacional	300	>10000
	Salvaguada de Vida	>10000	>10000
	Próximo do Colapso	>10000	>10000

### Matriz de desempenho sísmico

A matriz de desempenho sísmico, que descreve o comportamento da estrutura de cada um dos blocos que constituem a escola relativamente aos níveis e objetivos de desempenho definidos, é apresentada abaixo.



### Conclusão

Verifica-se que o comportamento da estrutura do edifício principal da escola (edifício com estrutura porticada de betão armado e laje vigada) relativamente aos níveis e objetivos de desempenho sísmico definidos é satisfatório para sismos frequentes e muitos raros. No entanto, para um patamar intermédio correspondente a sismos raros, o edifício regista um nível de dano acima do expectável para o nível de desempenho associado a edifícios essenciais.

Com efeito, verifica-se que para um sismo com probabilidade de ocorrência iguais ou superiores a 50% em 50 anos (*sismos frequentes e recorrentes*) a estrutura se encontra num nível de desempenho *completamente operacional*, respeitando assim o objetivo de desempenho estabelecido para este tipo de edifícios. Além disso, para um sismo com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a de 5% em 50 anos (*sismos muito raros*) a estrutura encontra-se num nível de desempenho *salvaguarda de vida*, pelo que respeita o nível de desempenho admissível para este nível de intensidade sísmica, que corresponde a este mesmo nível de desempenho. No entanto, para níveis de intensidade sísmica entre os dois patamares acima referidos, a estrutura encontra-se num nível de desempenho *salvaguarda de vida*, o que não respeita os objetivos de desempenho definidos para este nível de intensidade sísmica e que corresponde ao nível de desempenho *operacional*.

Desta forma, é expectável que para sismos com período de retorno de aproximadamente 475 anos, existam danos significativos na estrutura que impeçam a sua operacionalidade pós-sismo. Assim,



deverão também ser tomadas medidas relativamente à manutenção da operacionalidade do edifício no caso de ocorrência de sismos raros.

Não obstante, conclui-se que para este tipo de edifícios não é verosímil que a estrutura se encontre próxima do colapso para nenhum destes níveis de intensidade da ação sísmica.



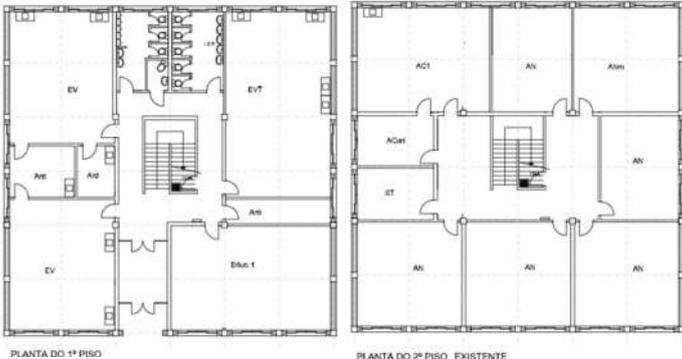
# Escola Secundária Lumiar

ID Escola: 123

Escola	Agrupamento	Área coberta
Escola Secundária Lumiar	Professor Lindley Cintra-Lumiar	6625 m <sup>2</sup>

Nível de ensino	Número de alunos
Secundário e 3º ciclo	725 alunos

Descrição geral	
<p>A escola localiza-se na freguesia do Lumiar, num quarteirão que integra também a EB23 Professor Lindley Cintra e a EB Quinta dos Frades. A entrada faz-se pela Rua Mário Sampaio Ribeiro, sendo os acessos amplos e sem presença de outras estruturas junto aos limites do seu terreno, não existindo, portanto, a possibilidade de interação sísmica com outras estruturas.</p> <p>Os vários blocos com compõem a escola estão separados, funcionando de forma independente. Existe espaço, dentro da escola e nas imediações, para evacuação e encontro em caso de ocorrência de evento sísmico. O planeamento de emergência deverá ser integrado com as restantes escolas que se encontram no mesmo quarteirão.</p>	 <p><i>Imagem aérea do Google Earth</i></p>

Informação de base
<p>Estão apenas disponíveis desenhos de levantamento arquitetónico fornecidos pela CML, que resultam do projeto tipo das escolas de pavilhões “3x3”. Não foram realizadas alterações ao levantamento fornecido, apesar de se considerar nesta análise a informação acrescida recolhida após a inspeção visual levada a cabo pelo Departamento de Edifícios do LNEC.</p>
 <p><i>Levantamento arquitetónico do bloco tipo “3x3”</i></p>

**Caracterização estrutural**

Escola tipo “3x3”, com estrutura porticada em betão armado. Os blocos têm quatro pilares ao centro, definindo três vãos (“3x3”) nas duas direções. No perímetro os vãos têm metade do comprimento, relativamente aos alinhamentos interiores. A escola é composta por 8 blocos: 5 blocos de aulas com 2 pisos, 2 blocos com apenas 1 piso e 1 pavilhão gimnodesportivo. Dos 5 blocos de aulas, 3 desses blocos possuem laje fungiforme, enquanto que os restantes 2 blocos têm laje vigada. Nos blocos com laje fungiforme aligeirada, os alinhamentos dos pórticos são amaciçados (ver figuras abaixo).



Blocos com laje vigada. Todos os restantes têm laje fungiforme aligeirada.

*Identificação dos blocos com diferentes concepções estruturais*



*Blocos com laje vigada: bloco B (esq.); bloco C (dir.)*

Zona maciça à volta dos pilares

Zona maciça entre os pilares

Zona maciça entre os pilares



*Blocos com laje fungiforme, com zonas amaciçadas na envoltura e nos alinhamentos entre pilares: bloco refeição (esq.); bloco D (dir.)*

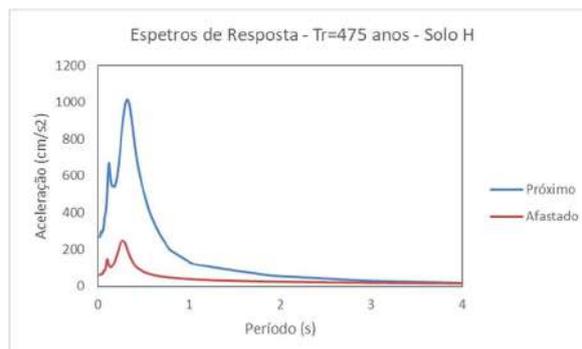
Não há informação sobre o projeto de estruturas da escola que permita recolher dados sobre o seu dimensionamento da escola, nomeadamente no que diz respeito a materiais, ações consideradas, dimensões de elementos estruturais, armaduras colocadas, entre outros pormenores construtivos. Assim, a análise aqui desenvolvida é baseada naquilo que se presume ser a prática construtiva e os materiais da época de construção da escola. Com efeito, assumem-se materiais e restantes características da estrutura de acordo com outras escolas de tipologias e época construtiva semelhante, como é o caso da tipologia “Vale Rosal”. Assim, considera-se:

- Materiais: B25(C25/30) + A400
- Dimensões dos elementos estruturais:
  - Pilares: 0.35x0.35 [mxm] (contínuos em altura)
  - Laje fungiforme aligeirada:
    - Altura total: 42.5cm
    - Altura maciça: 10.0cm
    - Largura total: 90.0cm
    - Largura das nervuras: 13.0cm
  - Laje vigada:
    - Laje maciça: 15.0cm
    - Vigas interiores: 0.35x0.65 [mxm]
    - Vigas perímetro: 0.35x0.40 [mxm]

É de salientar que, na ausência de informação sobre o projeto de estruturas da escola, que permita recolher dados sobre o seu dimensionamento, nomeadamente no que diz respeito a materiais, ações consideradas, dimensões de elementos estruturais, armaduras colocadas, entre outros pormenores construtivos, estes resultados devem ser encarados como indicadores do comportamento expectável e não como uma avaliação detalhada do comportamento sísmico da estrutura.

### Caracterização geotécnica

Com base na carta de solos de que o LNEC dispõe (Ver relatório), a ES Lumiar encontra-se fundada em solo do tipo H, pelo que se considera a amplificação da ação calculada ao nível do substrato rochoso com base na coluna de solo respetiva (coluna H). Os espectros de resposta, que resultam de um estudo probabilístico de perigosidade sísmica desenvolvido especificamente no âmbito deste projeto, associados a um período de retorno de 475 anos, encontram-se na figura à direita.



### Modelo numérico

O modelo de cálculo, desenvolvido no programa SeismoStruct, é composto por elementos de barra (*frame*) de plasticidade distribuída com formulação em força. Cada secção destes elementos é definida através de fibras com comportamento uniaxial, associadas a aço ou a betão. Os elementos finitos são definidos tendo em consideração as dimensões acima apresentadas e as armaduras que foram

sistematizadas com base no projeto de execução da tipologia “Vale Rosal”. As armaduras dos pilares são:

Arm. Long; Arm. Transv.	Centrais	Perímetro	Canto
<b>1º piso</b>	12Φ25+4Φ20; Φ8//0.15	12Φ25; Φ8//0.15	4Φ25+8Φ20; Φ8//0.15
<b>2º Piso</b>	4Φ25; Φ8//0.15	8Φ25; Φ8//0.15	4Φ25; Φ8//0.15

Relativamente às vigas, as armaduras são:

Arm. Long; Arm. Transv.	Local	Extremidades	Sob pilares interiores	Meio-vão
<b>1º piso</b>	Vigas interiores	inf 4Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 4Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 3Φ20+4Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.20
	Vigas perímetro	inf 3Φ20+3Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 2Φ20+3Φ16; sup 2Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 3Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.10
<b>2º Piso</b>	Vigas interiores	inf 3Φ16; sup 2Φ20+3Φ16; Φ6//0.10	inf 3Φ16; sup 2Φ20+3Φ16; Φ6//0.10	inf 2Φ20+3Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.25
	Vigas perímetro	inf 6Φ12; sup 3Φ16+3Φ12; Φ6//0.10	inf 4Φ12; sup 3Φ16+3Φ12; Φ6//0.10	inf 4Φ12; sup 3Φ12; Φ6//0.20

As lajes maciças são armadas com Φ10//0.125 em ambas as faces. As cargas atuantes nas lajes são automaticamente distribuídas pela malha de vigas, enquanto que a sua rigidez é simulada através do cálculo da largura efetiva do banzo das vigas em “T”, o que é feito também de forma automática pelo programa de cálculo.

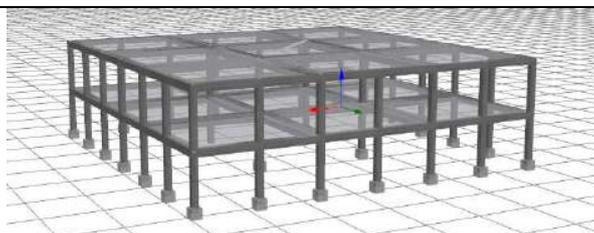
As fibras uniaxiais que definem o comportamento do betão são definidas através do modelo de *Mander et al.*, enquanto que as fibras de aço são definidas através do modelo de comportamento de *Menegotto-Pinto*.

Consideram-se as bases dos pilares com restrições aos deslocamentos e libertas às rotações, simulando assim uma fundação flexível, de acordo com a conceção de sapatas isoladas que caracteriza a fundação da estrutura.

Relativamente às cargas atuantes, adotaram-se as cargas definidas de acordo com a norma portuguesa em vigor (NP EN1991-1-1), para o tipo de edifício em questão. Assim, as cargas permanentes e sobrecargas a considerar na análise são:

Carga	1º Piso	Cobertura
<b>Pavimento (RCP)</b>	1.5 kN/m	2.5 kN/m
<b>Paredes (RCP)</b>	<u>Divisórias</u> : 1.75 kN/m (aplicada na laje do 1º piso) <u>Exteriores</u> : 7.8 kN/m (aplicada nas vigas exteriores do 1º piso)	-
<b>Sobrecarga</b>	Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>	Cobertura não acessível: 0.4 kN/m <sup>2</sup>

Após a aplicação das cargas gravíticas é executada uma análise estática não-linear com controlo de deslocamentos (*pushover*).



Modelo numérico do bloco tipo da escola no programa SeismoStruct

Os períodos de vibração da estrutura, obtidos através do modelo numérico, são:

Períodos de vibração	Ed. Laje vigada	Ed. Laje fungiforme
1º modo (X)	0.72 s	0.76 s
2º modo (Y)	0.72 s	0.76 s
3º modo (Torção)	0.62 s	0.62 s

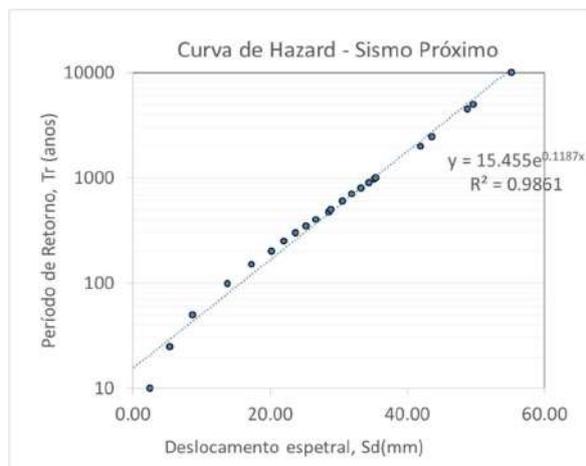
Curva de capacidade	Pontos de desempenho															
<p>A curva de capacidade encontra-se representada abaixo, para os dois blocos existentes na escola (bloco com laje vigada e bloco com laje fungiforme).</p> <p>Os estados limite de cada um dos edifícios encontram-se descritos, em termos de deslocamento do topo na seguinte tabela:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Estado limite</th> <th>Ed. Laje vigada</th> <th>Ed. Laje fungiforme</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Completamente Operacional</td> <td>D= 35 mm</td> <td>D= 35 mm</td> </tr> <tr> <td>Operacional</td> <td>D= 50 mm</td> <td>D= 50 mm</td> </tr> <tr> <td>Salvaguarda de Vida</td> <td>D= 184 mm</td> <td>D= 186 mm</td> </tr> <tr> <td>Próximo do Colapso</td> <td>D= 245 mm</td> <td>D= 248 mm</td> </tr> </tbody> </table>	Estado limite	Ed. Laje vigada	Ed. Laje fungiforme	Completamente Operacional	D= 35 mm	D= 35 mm	Operacional	D= 50 mm	D= 50 mm	Salvaguarda de Vida	D= 184 mm	D= 186 mm	Próximo do Colapso	D= 245 mm	D= 248 mm	<p>Determinação dos pontos de desempenho através do método do espectro de capacidade, para os sismos próximo e afastado e 25 períodos de retorno distintos. Nas figuras abaixo apresentam-se apenas 7 dos 25 espectros de resposta considerados, para sismo próximo e edifício com laje fungiforme.</p> <p>Pontos de desempenho: Ed. Laje fungiforme; Sismo próximo</p>
Estado limite	Ed. Laje vigada	Ed. Laje fungiforme														
Completamente Operacional	D= 35 mm	D= 35 mm														
Operacional	D= 50 mm	D= 50 mm														
Salvaguarda de Vida	D= 184 mm	D= 186 mm														
Próximo do Colapso	D= 245 mm	D= 248 mm														



**Curva de Hazard e períodos de retorno**

**Edifício com laje vigada**

A curva de hazard, para sismo próximo (condicionante), é a que se apresenta de seguida.



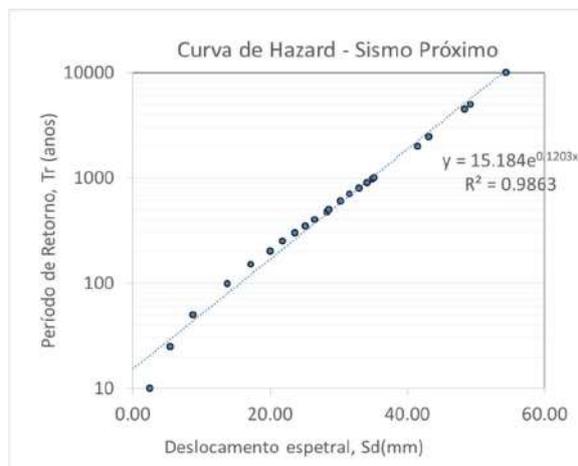
Curva de Hazard: Ed. Laje vigada; Sismo próximo

Os períodos de retorno associados aos estados limite definidos são:

<b>Ed. Laje vigada</b>		<b>Sismo Próximo</b>	<b>Sismo Afastado</b>
<b>Período de retorno</b>			
<b>Estado limite</b>	Completamente Operacional	505	>10000
	Operacional	2138	>10000
	Salvaguarda de Vida	>10000	>10000
	Próximo do Colapso	>10000	>10000

**Edifício com laje fungiforme**

A curva de hazard, para sismo próximo (condicionante), é a que se apresenta de seguida.



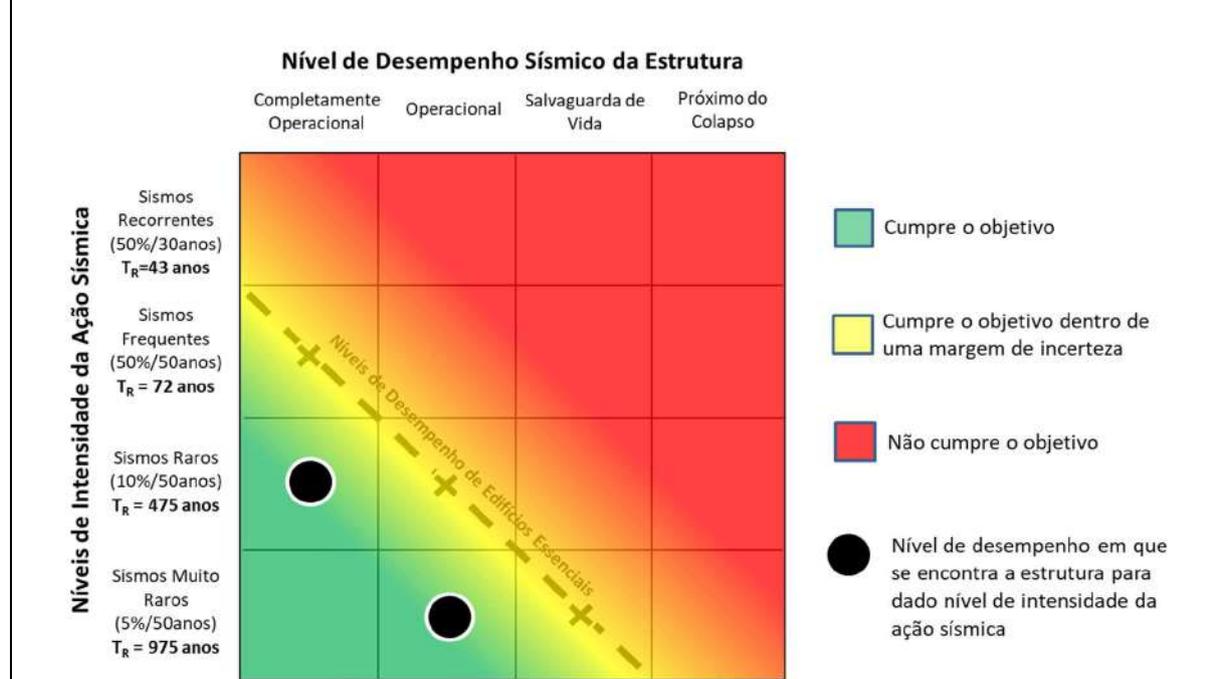
Curva de Hazard: Ed. Laje fungiforme; Sismo próximo

Os períodos de retorno associados aos estados limite definidos são:

<b>Ed. Laje fungiforme</b>		<b>Sismo Próximo</b>	<b>Sismo Afastado</b>
<b>Período de retorno</b>			
<b>Estado limite</b>	Completamente Operacional	502	>10000
	Operacional	2133	>10000
	Salvaguarda de Vida	>10000	>10000
	Próximo do Colapso	>10000	>10000

### Matriz de desempenho sísmico

A matriz de desempenho sísmico, que descreve o comportamento da estrutura de cada um dos edifícios que constituem a escola (edifício com laje vigada e laje fungiforme) relativamente aos níveis e objetivos de desempenho definidos, é apresentada abaixo.



### Conclusão

Verifica-se que o comportamento da estrutura de cada um dos edifícios que constituem a escola (edifício com laje vigada e laje fungiforme) relativamente aos níveis e objetivos de desempenho sísmico definidos é satisfatório.

Com efeito, verifica-se que para sismos com probabilidade de ocorrência igual ou superior a 10% em 50 anos a estrutura se encontra num nível de desempenho completamente operacional, respeitando assim o objetivo de desempenho estabelecido para este tipo de edifícios. Além disso, para um sismo com probabilidade de ocorrência de 5% em 50 anos (sismo muito raro) a estrutura encontra-se num nível de desempenho operacional, pelo que respeita o nível de desempenho admissível para este nível de intensidade sísmica, que corresponde ao nível de desempenho salvaguarda de vida. Para este tipo de edifícios não é verosímil que a estrutura se encontre próxima do colapso para nenhum destes níveis de intensidade da ação sísmica.



# Escola Básica Quinta de Marrocos

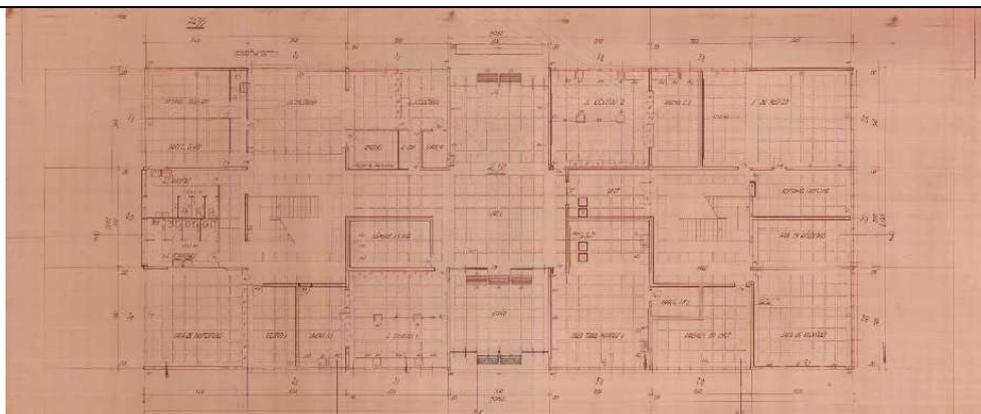
ID Escola: 124

Escola	Agrupamento	Área coberta
Escola Básica Quinta de Marrocos	Quinta de Marrocos	2785 m <sup>2</sup>

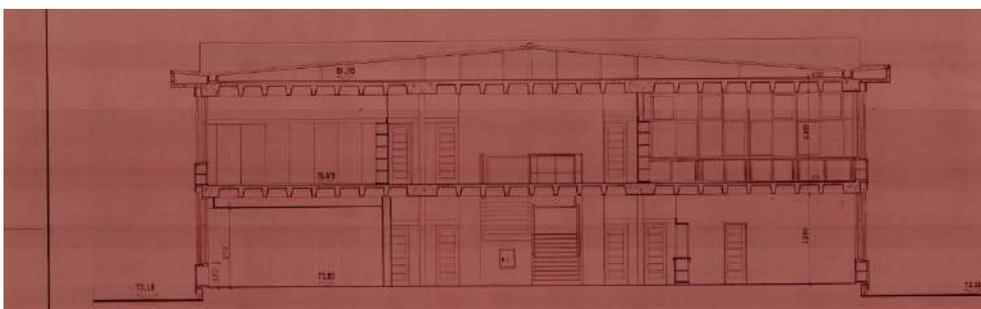
Nível de ensino	Número de alunos
Básico com 2º e 3º ciclos	585 alunos

Descrição geral	
<p>A escola localiza-se na freguesia de Benfica, num quarteirão que integra também a EB Pedro de Santarém, a ES José Gomes Ferreira e ainda vários edifícios e escolas do Instituto Politécnico de Lisboa. A entrada para a escola faz-se pela Estrada de Benfica, sendo os acessos amplos e sem presença de outras estruturas imediatamente junto aos limites do seu terreno, não existindo, portanto, a possibilidade de interação sísmica com outras estruturas.</p> <p>Os vários blocos com compõem a escola estão separados, funcionando de forma independente. Existe espaço, dentro da escola, nomeadamente na zona dos campos de jogos, e também nas imediações, para evacuação e encontro em caso de ocorrência de evento sísmico. O planeamento de emergência deverá ser integrado com as restantes escolas que se encontram no mesmo quarteirão.</p>	 <p><i>Imagem aérea do Google Earth</i></p>

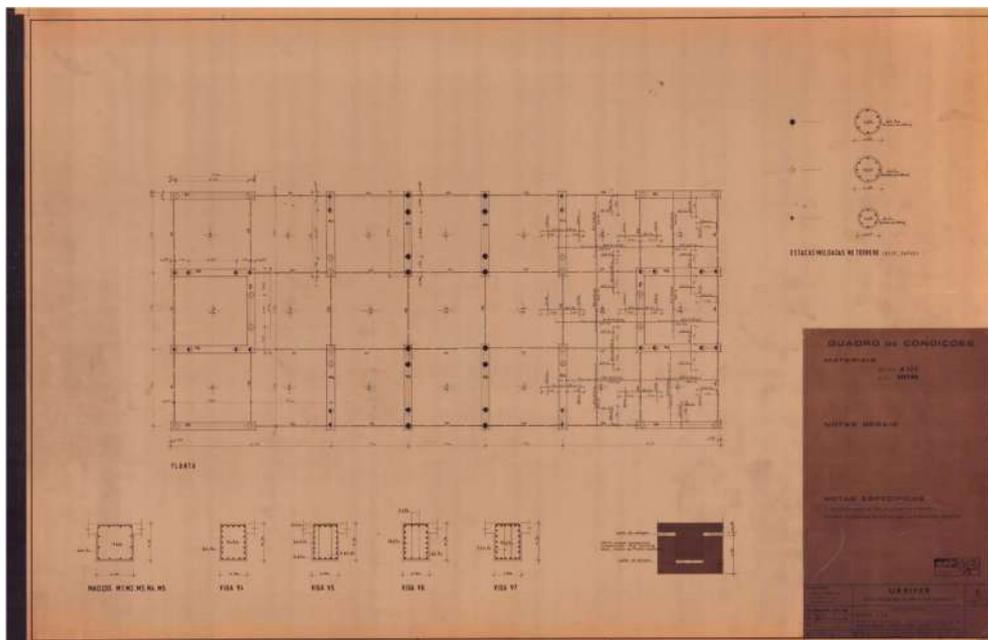
Informação de base
<p>Estão disponíveis desenhos do <i>Atlas of School Architecture in Portugal</i>, que incluem desenhos de levantamento arquitetónico e desenhos de estruturas, nomeadamente plantas de fundações e desenhos com armaduras de vigas e paredes da estrutura. Assim, é com base nos desenhos e na informação recolhida na inspeção visual levada a cabo pelo Departamento de Edifícios do LNEC que esta análise se baseia.</p>



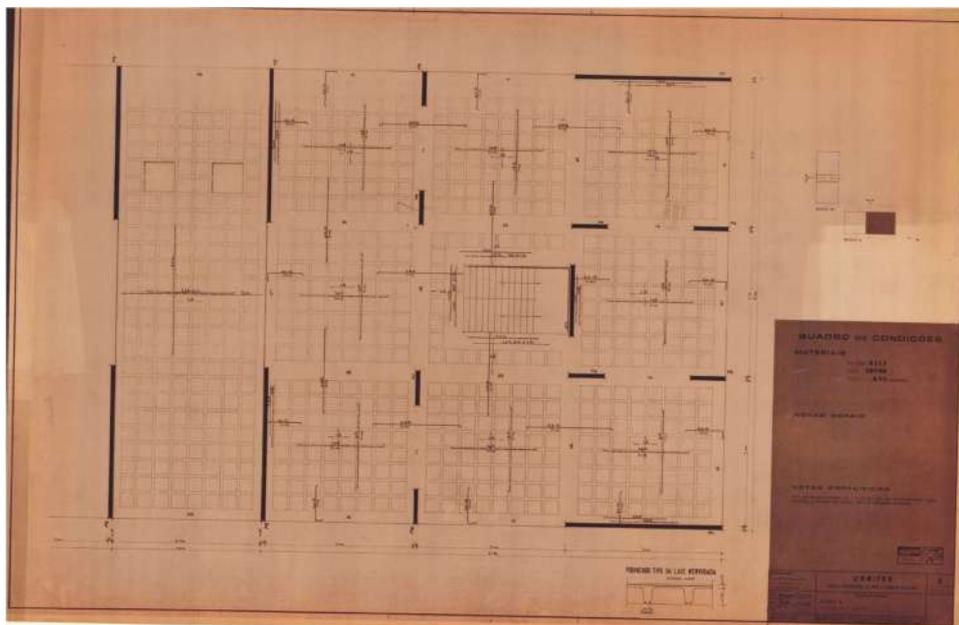
*Bloco A – planta do 1º piso*



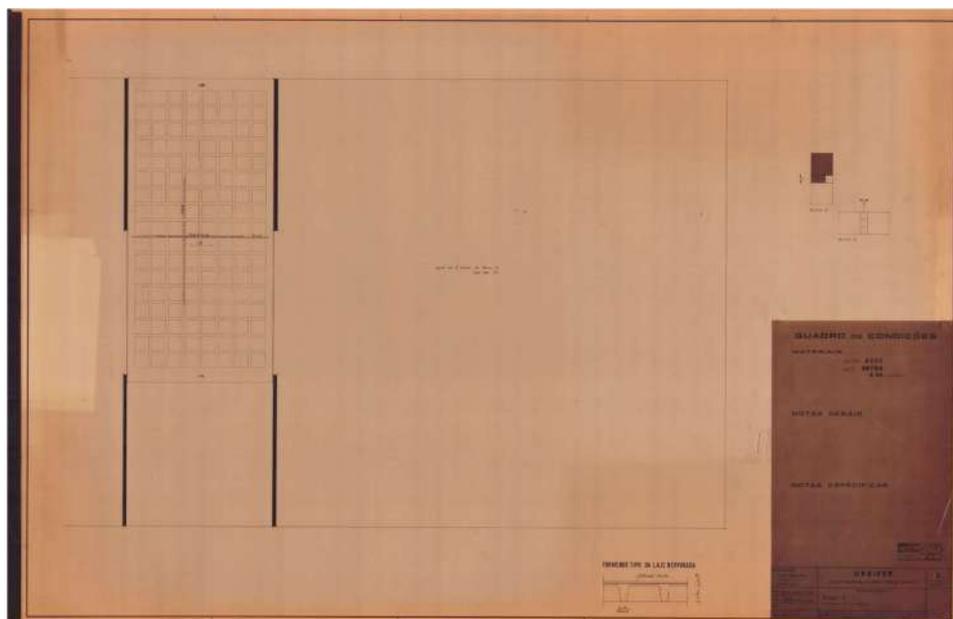
*Bloco D – Corte*



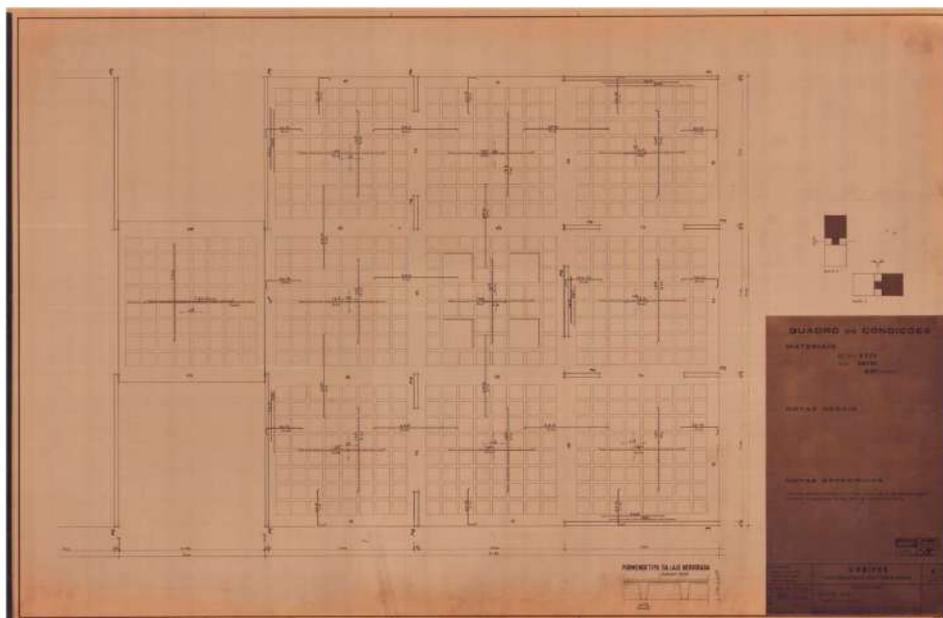
*Blocos A e B - Planta de fundações, estacas, maciços de encabeçamento, vigas e lajes do R/C*



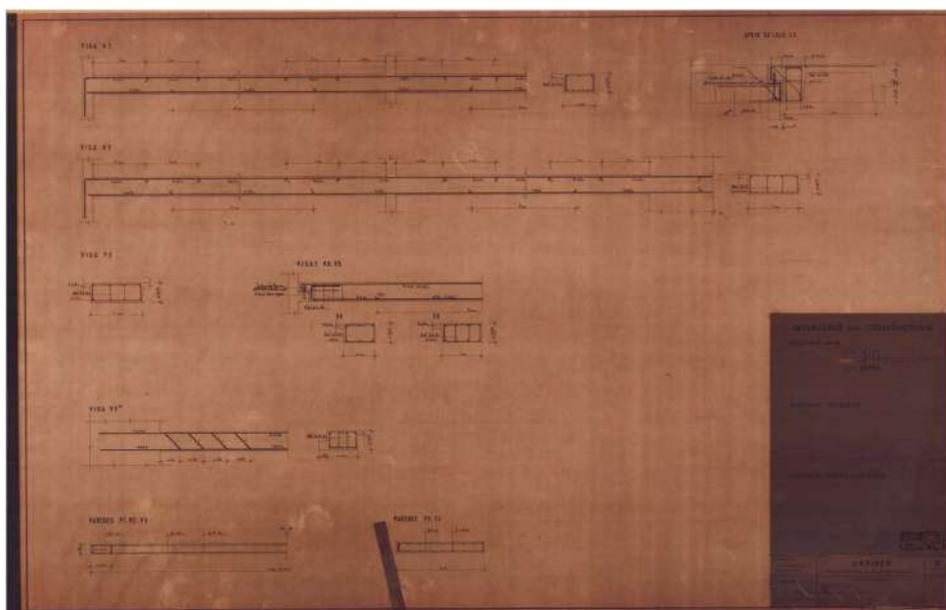
*Bloco A – Planta de estruturas do 1º piso*



*Bloco B – Planta de estruturas do 1º piso*



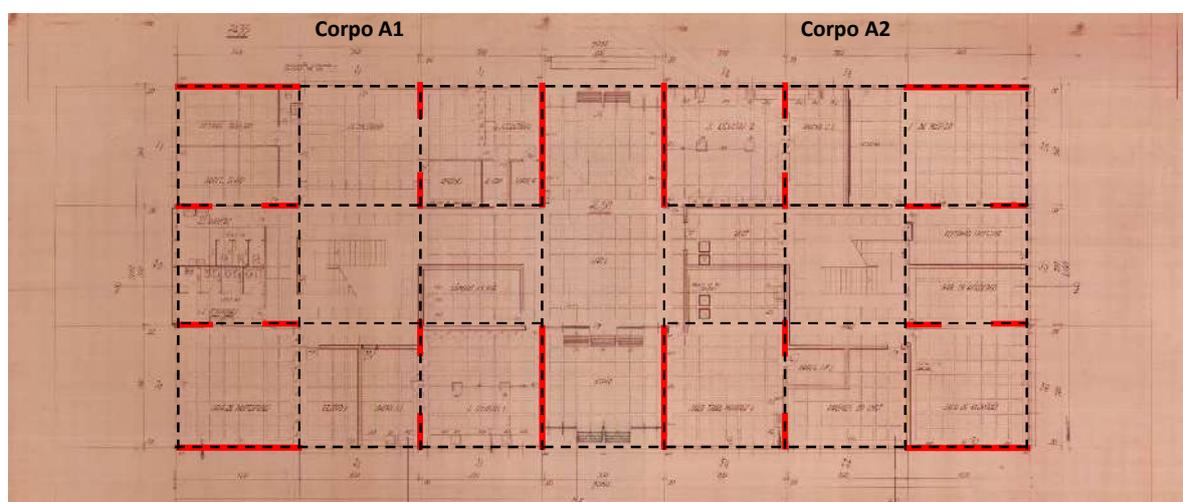
*Blocos A e B – Planta de estruturas do 2º piso (laje de esteira)*



*Blocos A e B – desenhos de pormenorização de betão armado – vigas e paredes*

**Caracterização estrutural**

A escola é constituída por 3 blocos independentes: dois blocos de aulas com 2 pisos e um pavilhão gimnodesportivo. Os blocos de aulas possuem dois corpos quadrangulares, arquitetonicamente semelhantes à tipologia “3x3”, ligados por uma zona mais estreita, com dois pisos na zona central. Comparativamente aos blocos tipo “3x3”, os elementos verticais deste edifício não são pilares, mas sim pilares-parede (ver representação a vermelho no desenho abaixo). Nos alinhamentos entre paredes (representados a preto no desenho abaixo), existem zonas maciças, designadas de “vigas” nos desenhos de estruturas que constam do *Atlas of School Architecture in Portugal*, mas que não são mais do que o equivalente às zonas maciças das lajes fungiformes. Com efeito, entre as designadas “vigas”, as lajes dos dois blocos de aulas são lajes aligeiradas com altura total igual à altura das “vigas”.



Planta com identificação dos elementos estruturais: paredes (a vermelho) e zonas maciças/vigas da laje (a preto)

Parede da periferia                      Alinhamento maciço/viga                      Parede interior



Lajes fungiformes com zonas maciças nos alinhamentos entre paredes

Como se pode verificar pelas figuras acima, os blocos apresentam uma malha de elementos estruturais regular. As paredes de maior dimensão têm uma secção de 7.40x0.20 [m], enquanto que as paredes

mais curtas têm uma secção de 1.70x0.20 [m]. As vigas têm largura de 0.60m ou 1.0m e altura igual à altura da laje. A laje, cujo pormenor se encontra na figura abaixo, tem uma altura total de 0.375m e um espaçamento entre nervuras de aproximadamente 0.75m. As nervuras têm uma largura média de 0.19m.

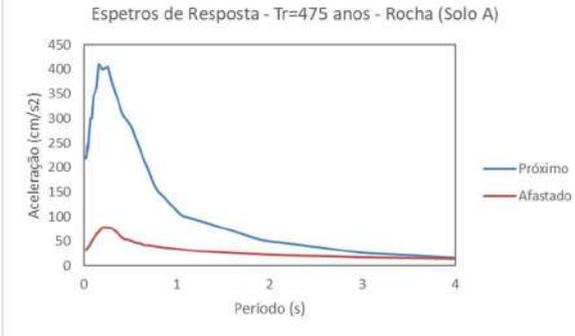


Os materiais indicados nos desenhos de estruturas consultados na visita à escola são adotados nesta análise, em particular um betão B225 (B180 nas paredes P1 e P2) e um aço A40T, especificados no R.E.B.A.

Na visita à escola foi possível observar algumas patologias estruturais que, pese embora não integradas no presente estudo, importa referir e analisar futuramente. De entre as patologias identificadas são de destacar os problemas associados a assentamentos, visíveis do exterior. Esses assentamentos são, aparentemente, apenas do pavimento exterior, uma vez que não se detetaram fissuras nos elementos estruturais e nas paredes de enchimento do próprio edifício. Ainda assim, é importante avaliar a integridade das fundações, numa eventual futura intervenção à escola.

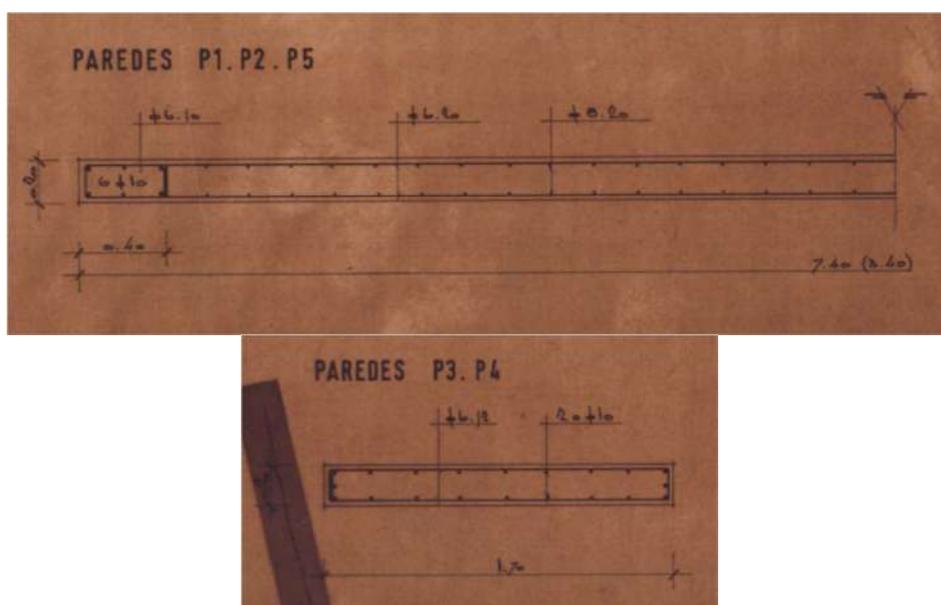


*Problemas de assentamentos junto às vigas de fundação*

<p><b>Caracterização geotécnica</b></p>	
<p>Com base na carta de solos de que o LNEC dispõe (Ver relatório), a EB Quinta de Marrocos encontra-se fundada em rocha (solo do tipo A), pelo que não se considera amplificação da ação calculada ao nível do substrato rochoso. Os espectros de resposta em rocha, que resultam de um estudo probabilístico de perigosidade sísmica desenvolvido especificamente no âmbito deste projeto, associados a um período de retorno de 475 anos, encontram-se na figura à direita.</p>	

**Modelo numérico**

O modelo de cálculo, desenvolvido no programa SeismoStruct, é composto por elementos de barra (*frame*) de plasticidade distribuída com formulação em força. Cada secção destes elementos é definida através de fibras com comportamento uniaxial, associadas a aço ou a betão. Os elementos finitos são definidos tendo em consideração as dimensões acima apresentadas e as armaduras que foram sistematizadas com base no projeto de execução obtido através do *Atlas of School Architecture in Portugal*. As paredes, devido à sua elevada dimensão em planta são unidas às vigas através de *links* rígidos com comprimento igual à maior dimensão da parede. As armaduras das paredes são:



Desenhos de pormenorização de betão armado: armaduras das paredes P1, P2 e P5 (cima), P3 e P4 (baixo)

As lajes nervuradas foram modeladas, no SeismoStruct, com uma lâmina maciça com espessura equivalente igual  $t_m=0,132m$ , que corresponde à área de secção transversal equivalente num metro de laje fungiforme, e uma espessura para a flexão de  $t_f=0,268m$ , correspondente à inércia de um metro linear de laje. A rigidez da laje é contabilizada pelo cálculo da largura efetiva do banzo em “T” das vigas, enquanto que a carga aplicada na laje é distribuída de forma automática pelas vigas de piso.

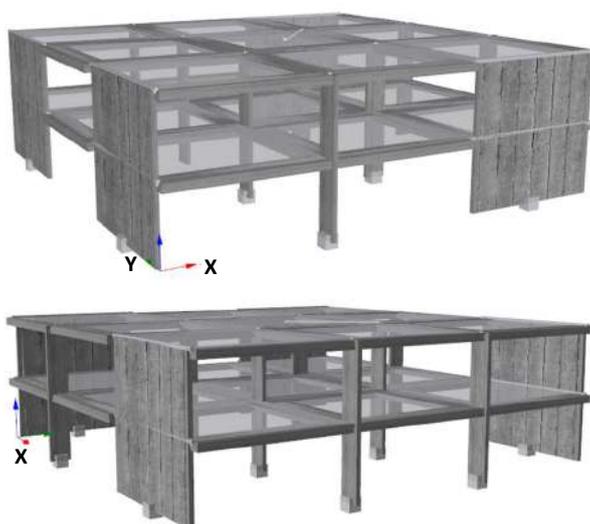
As fibras uniaxiais que definem o comportamento do betão são definidas através do modelo de *Mander et al.*, enquanto que as fibras de aço são definidas através do modelo de comportamento de *Menegotto-Pinto*. Consideram-se as bases dos pilares com restrições aos deslocamentos e às rotações, simulando assim uma fundação rígida, o que constitui uma simplificação que se considera aceitável face à planta de fundações que se obteve.

Relativamente às cargas atuantes, adotaram-se as cargas definidas de acordo com a norma portuguesa em vigor (NP EN1991-1-1), para o tipo de edifício em questão. Assim, as cargas permanentes e sobrecargas a considerar na análise são:

Carga	1º Piso	Cobertura
Pavimento (RCP)	1.5 kN/m <sup>2</sup>	2.5 kN/m <sup>2</sup>
Paredes (RCP)	Divisórias: 1.75 kN/m <sup>2</sup> (aplicada na laje do 1º piso) Exteriores: 7.8 kN/m (aplicada nas vigas exteriores do 1º piso)	-
Sobrecarga	Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>	Cobertura não acessível: 0.4 kN/m <sup>2</sup>

Tendo em consideração a caracterização estrutural, procede-se à análise de um dos blocos que constituem os edifícios da escola. Dada a regularidade estrutural e o comportamento dinâmico expectável, a análise de um dos blocos pode ser desenvolvida apenas com um dos corpos simétricos que o constituem (Corpo A1 ou A2 – ver figura acima), sendo esse representativo e suficientemente detalhado para se poder caracterizar a resposta sísmica dos dois blocos da escola.

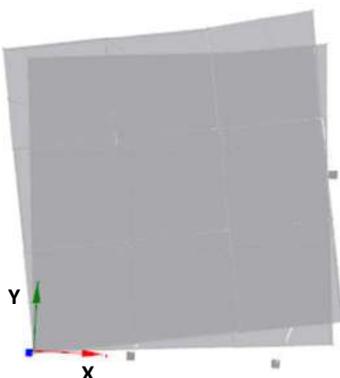
Desta forma, após a aplicação das cargas gravíticas é executada uma análise estática não-linear com controlo de deslocamentos (*pushover*) do corpo A2 do bloco tipo.



Modelo numérico do bloco tipo da escola no programa SeismoStruct

É de referir que na direção X, a estrutura é perfeitamente simétrica. No entanto, na direção Y, há uma grande rigidez num dos alinhamentos exteriores, proveniente das duas paredes que se desenvolvem nessa direção e que se encontram nesse mesmo alinhamento. No alinhamento oposto as paredes desenvolvem-se na direção perpendicular, pelo que a sua contribuição para a rigidez na direção Y é

muito inferior. Desta forma, nesta direção os dois corpos A1 e A2 têm tendência a “torcer” no sentido do corpo de ligação entre ambos, tal como representado abaixo:

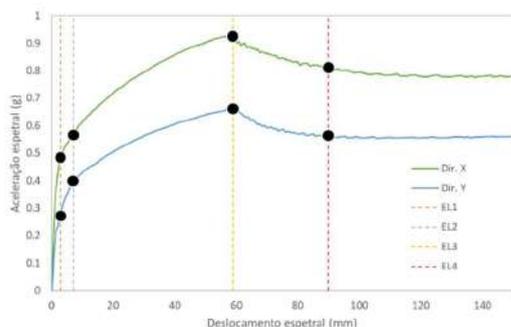


Vista em planta da deformada da estrutura quando sujeita a carga horizontal na direção Y.

Os períodos de vibração da estrutura, obtidos através do modelo numérico, são:

Períodos de vibração	
1º modo (Y)	0.12 s
2º modo (X)	0.08 s
3º modo (Torção)	0.05 s

### Curva de capacidade



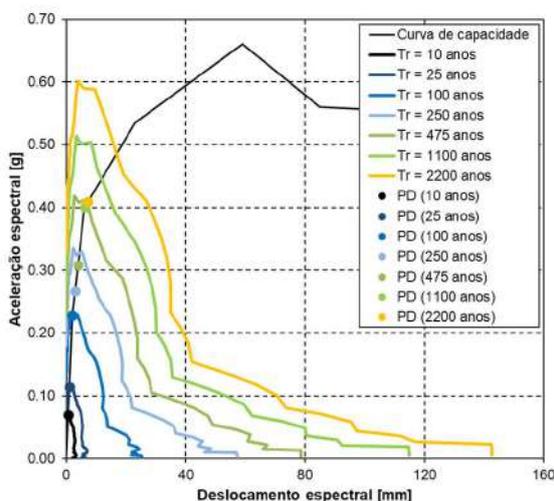
Devido à assimetria em planta, que se descreve na secção anterior, o edifício é menos resistente e mais flexível na direção Y.

Os estados limite de cada um dos edifícios encontram-se descritos, em termos de deslocamento do topo na seguinte tabela:

Estado limite	Dir. X	Dir. Y
Completamente Operacional	D= 4.3 mm	D= 5.6 mm
Operacional	D= 6.1 mm	D= 8.0 mm
Salvaguarda de Vida	D= 63.8 mm	D= 69.8 mm
Próximo do Colapso	D= 85.0 mm	D= 93.0 mm

### Pontos de desempenho

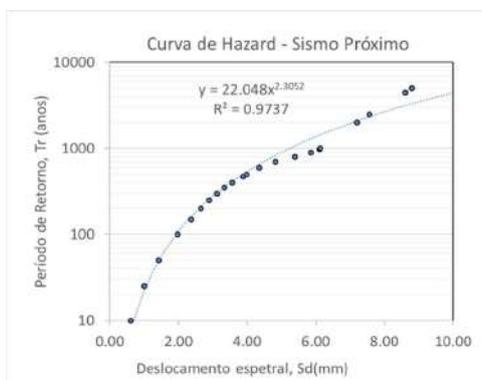
Determinação dos pontos de desempenho através do método do espectro de capacidade, para os sismos próximo e afastado e 25 períodos de retorno distintos. Nas figuras abaixo apresentam-se apenas 7 dos 25 espectros de resposta considerados, para sismo próximo.



Pontos de desempenho: Direção Y, Sismo próximo

**Curva de Hazard e períodos de retorno**

A curva de hazard, para sismo próximo (condicionante), é a que se apresenta de seguida.



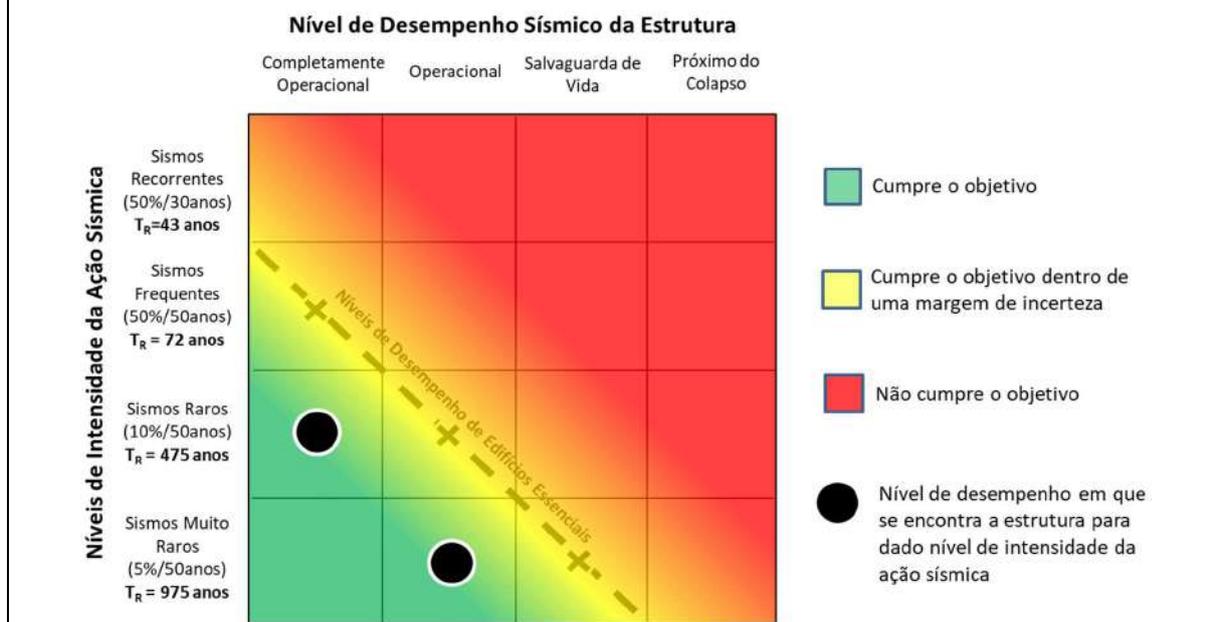
Curva de Hazard: Direção Y, Sismo próximo

Os períodos de retorno associados aos estados limite definidos são:

Período de retorno		Sismo Próximo	Sismo Afastado
Estado limite	Completamente Operacional	626	>10000
	Operacional	1425	>10000
	Salvaguarda de Vida	>10000	>10000
	Próximo do Colapso	>10000	>10000

**Matriz de desempenho sísmico**

A matriz de desempenho sísmico, que descreve o comportamento da estrutura de cada um dos edifícios que constituem a escola relativamente aos níveis e objetivos de desempenho definidos, é apresentada abaixo.



### Conclusão

Verifica-se que o comportamento da estrutura de cada um dos edifícios que constituem a escola (edifício com laje vigada e laje fungiforme) relativamente aos níveis e objetivos de desempenho sísmico definidos é satisfatório.

Com efeito, verifica-se que para sismos com probabilidade de ocorrência igual ou superior a 10% em 50 anos a estrutura se encontra num nível de desempenho completamente operacional, respeitando assim o objetivo de desempenho estabelecido para este tipo de edifícios. Além disso, para um sismo com probabilidade de ocorrência de 5% em 50 anos (sismo muito raro) a estrutura encontra-se num nível de desempenho operacional, pelo que respeita o nível de desempenho admissível para este nível de intensidade sísmica, que corresponde ao nível de desempenho salvaguarda de vida. Para este tipo de edifícios não é verosímil que a estrutura se encontre próxima do colapso para nenhum destes níveis de intensidade da ação sísmica.



# Escola Básica Eugénio dos Santos

ID Escola: 131

Escola	Agrupamento	Área coberta
Escola Básica Eugénio dos Santos	Rainha Dona Leonor	3475 m <sup>2</sup>

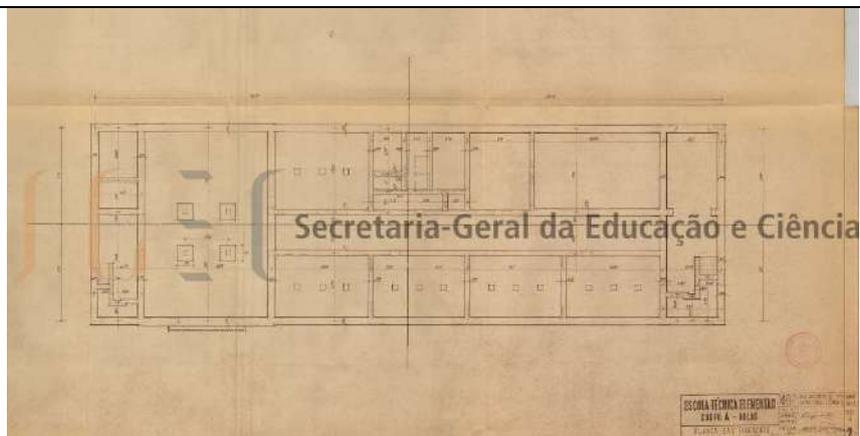
Nível de ensino	Número de alunos
Escola Básica com 2.º e 3.º ciclos	830 alunos

Descrição geral
<p>A escola está localizada no bairro de Alvalade, junto à intersecção da Rua Luís Augusto Palmeirim com a Avenida de Roma, e inserida numa zona consolidada de utilização mista (residencial e de comércio e serviços). É composta por três edifícios isolados: um edifício principal com três pisos e cobertura inclinada (corpo A), um ginásio (corpo G) e um edifício de piso térreo do tipo industrial, com uma nave, onde funcionam as oficinas (corpo O).</p> <p>Os três edifícios estão afastados, funcionando de forma independente. A circulação entre os vários edifícios realiza-se através de uma passagem coberta e/ou através do pátio aberto e campos de desporto. Existe espaço, dentro da escola, para evacuação e encontro em caso de ocorrência de evento sísmico. Os dois portões exteriores da escola dão acesso direto a zonas de passeio, sem espaço para ponto de encontro, pelo que a definição de pontos de encontro dentro da escola é recomendada.</p>

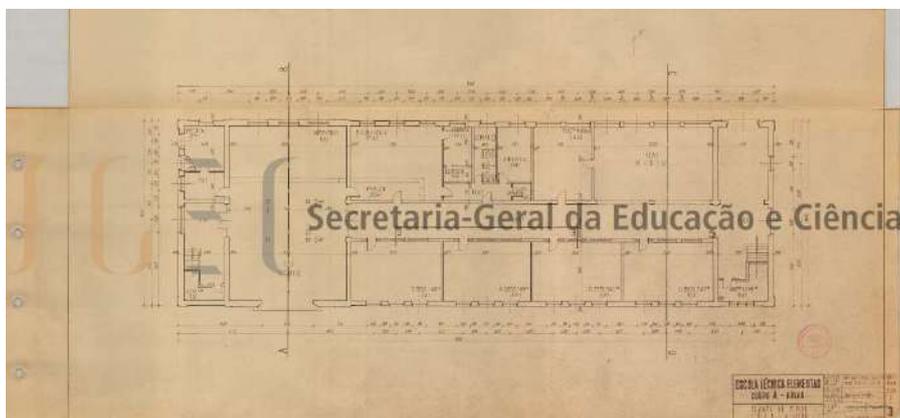


Imagem aérea da escola e envolvente edificada (fonte: Google Earth)

Informação de base
<p>O estudo realizado baseou-se nos documentos disponíveis através do <i>Atlas of School Architecture in Portugal</i>, que incluem desenhos de arquitetura (plantas, cortes e alçados) e desenhos de estrutura (plantas de fundações, pisos e cobertura, pormenores de betão armado) datados de 1949. Foi realizada uma visita à escola por parte da equipa do Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas (NESDE) do LNEC para esclarecimento de algumas questões que subsistiam da análise dos desenhos disponíveis.</p>



*Planta de arquitetura das fundações do edifício principal*



*Planta de arquitetura do 1.º piso do edifício principal*



*Planta de arquitetura do 2.º piso do edifício principal*



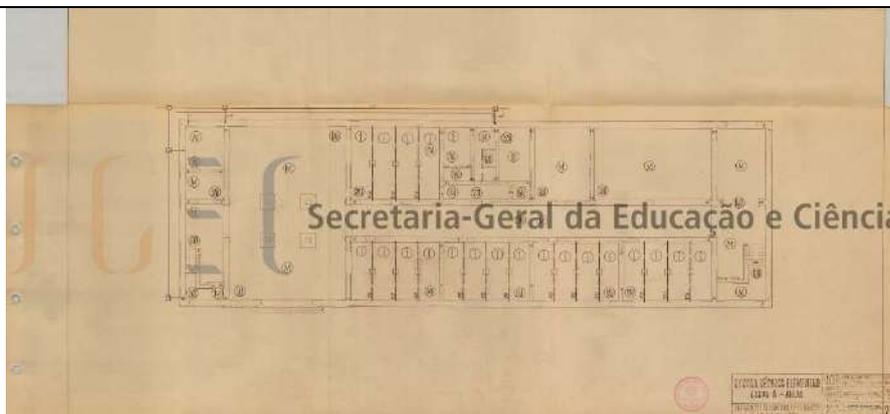
*Planta de arquitetura do 3.º piso do edifício principal*



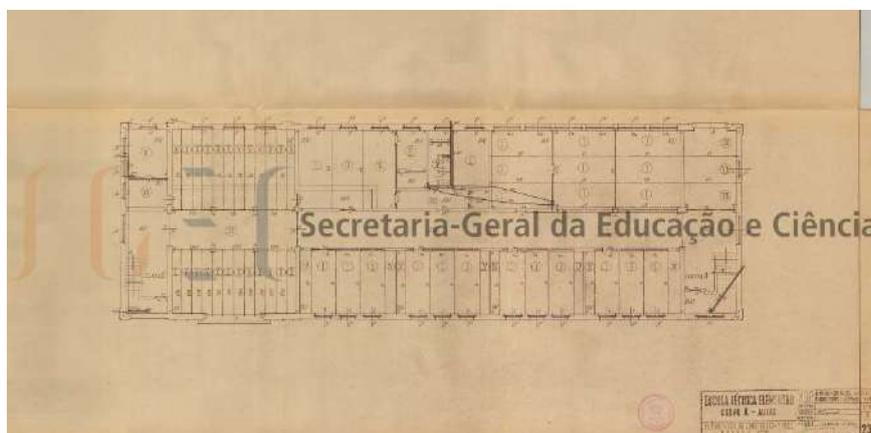
*Alçado principal e lateral do edifício principal*



*Cortes transversais e longitudinal parcial do edifício principal*



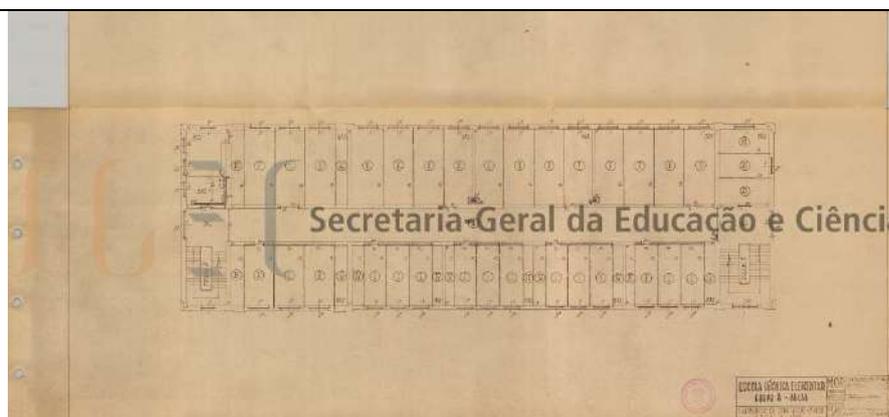
*Planta de estruturas das fundações do edifício principal*



*Planta de estruturas do 1.º piso do edifício principal*



*Planta de estruturas do 2.º piso do edifício principal*



*Planta de estruturas do 3.º piso do edifício principal*



*Planta de estruturas da cobertura do edifício principal*

### **Caracterização estrutural**

O edifício principal é do tipo “placa”, com paredes resistentes em alvenaria e lajes, vigas e cinco pilares interiores em betão armado. A planta é retangular, com cerca de 19m por 61m, aproximadamente simétrica em torno do eixo transversal. A altura piso a piso é de 4m.

As fundações são diretas por meio de sapatas corridas sob as paredes de alvenaria e de sapatas isoladas sob os pilares de betão armado. As paredes resistentes desenvolvem-se em duas direções ortogonais, com espessuras de 0,6m, 0,55m e 0,5m nas paredes exteriores e de 0,5m, 0,39m, 0,27m e 0,15m nas paredes interiores. Nas paredes exteriores há uma ligeira redução da espessura entre o primeiro e o segundo piso, as paredes interiores possuem espessura constante em toda a altura. Sobre as aberturas, portas e janelas, foram colocadas vergas em betão armado (ver fotografia abaixo).

Os pisos são em laje de betão armado com diferentes secções, algumas maciças e outras aligeiradas com tijolos, apoiadas nas paredes resistentes de alvenaria e nas vigas de betão armado, e orientadas maioritariamente na direção transversal do edifício. Por este motivo, as paredes longitudinais estão sujeitas a maior carga vertical quando comparadas com as paredes transversais.

Nos dois extremos do edifício estão localizadas as escadas em betão armado, organizadas em dois núcleos de acessos verticais ladeados por paredes resistentes em alvenaria com uma espessura mínima de 0,5m.

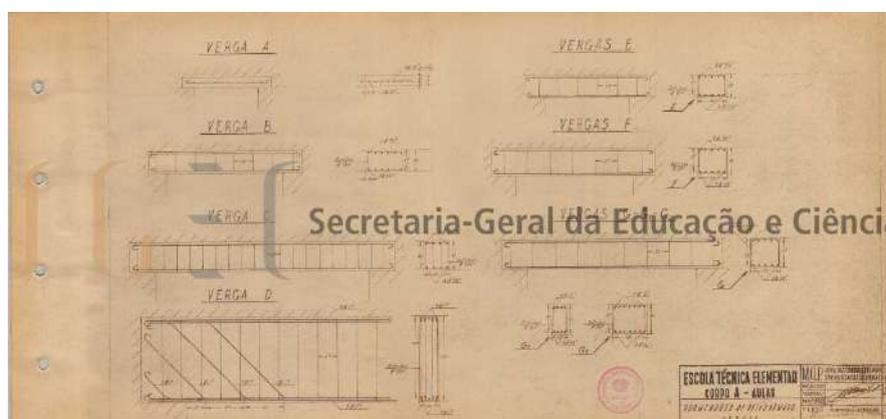




*Pormenores de betão armado das vigas e pilares do edifício principal*



*Pormenores de betão armado das escadas do edifício principal*



*Pormenores de betão armado das vergas do edifício principal*

A cobertura é inclinada, com quatro águas, suportada por uma estrutura de madeira apoiada em pilares de alvenaria que descarregam em vigas invertidas de secção variável em betão armado localizadas ao nível da laje de esteira (ver figura seguinte).

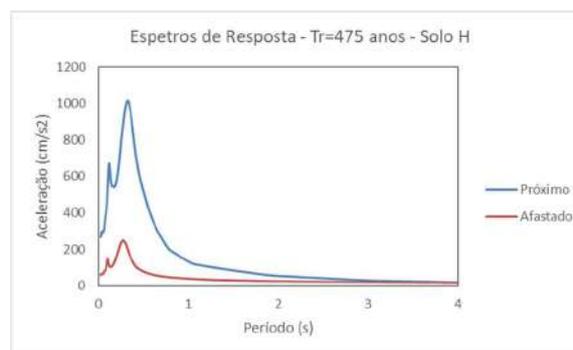


Fotografia da visita realizada – vista do interior da cobertura do edifício principal

Não há informação sobre o projeto de estruturas da escola que permita recolher dados sobre o seu dimensionamento, nomeadamente no que diz respeito a materiais e ações consideradas. Na ausência desta informação, e atendendo à época de construção do edifício, assumiu-se uma alvenaria com um peso específico de  $21\text{kN/m}^3$  e uma resistência média à compressão de  $3\text{MPa}$ , um betão C12/16 e um aço A235.

### Caracterização geotécnica

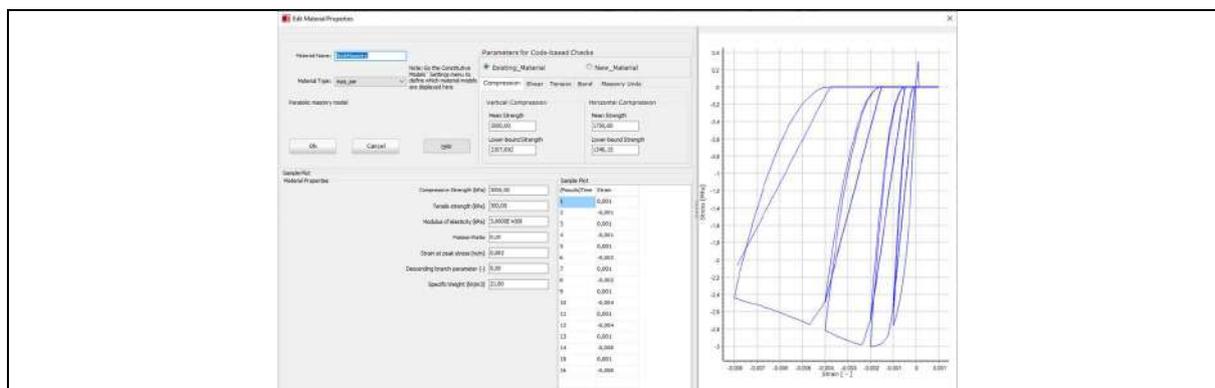
Com base na carta de solos de que o LNEC dispõe, a EB Eugénio dos Santos encontra-se fundada em solo do tipo H, pelo que se considera a amplificação da ação calculada ao nível do substrato rochoso com base na coluna de solo respetiva (coluna H). Os espetros de resposta, que resultam de um estudo probabilístico de perigosidade sísmica desenvolvido especificamente no âmbito deste projeto, associados a um período de retorno de 475 anos, encontram-se na figura à direita.



### Modelo numérico

Atendendo às características estruturais do edifício principal da escola, foi modelado apenas metade do edifício e analisado o seu comportamento apenas na direção transversal, que se considera como sendo condicionante da resposta sísmica do edifício principal da escola. No modelo foram incluídas as paredes resistentes na direção transversal e apenas os troços das paredes longitudinais que contribuem para a resistência na direção transversal.

O modelo de cálculo, desenvolvido no programa SeismoStruct, é composto por elementos de barra (*frame*) que simulam o comportamento no plano de paredes, nembos e lintéis de alvenaria quando sujeitos a forças horizontais (como é o caso dos sismos). Nas fibras uniaxiais que definem o comportamento da alvenaria foi utilizado um modelo uniaxial trilinear com capacidade resistente à tração (*mas\_par*).



Modelo mecânico adotado para a alvenaria estrutural do edifício principal

As vigas e pilares em betão armado foram simulados com elementos de barra com comportamento elástico linear, sendo as respetivas secções definidas de acordo com os desenhos de pormenor apresentados anteriormente. Nas fibras uniaxiais que definem o comportamento do betão foi utilizado o modelo de comportamento de *Mander et al.* (com\_ma), enquanto nas fibras de aço foi utilizado o modelo de comportamento de *Menegotto-Pinto* (stl\_mp).

Os pisos foram simulados como diafragmas indeformáveis no seu próprio plano através da imposição de condições cinemáticas entre os graus de liberdade do próprio piso.

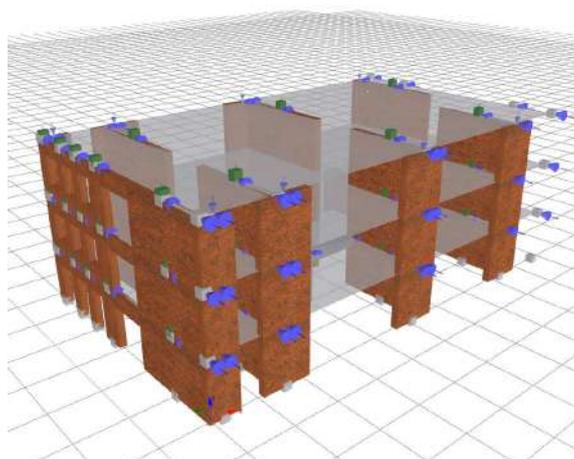
Consideram-se as bases das paredes resistentes e dos pilares com restrições aos deslocamentos e às rotações, simulando assim um encastramento perfeito à fundação da estrutura.

Relativamente às cargas atuantes, adotaram-se as cargas definidas de acordo com a norma portuguesa em vigor (NP EN1991-1-1), para o tipo de edifício em questão. No terceiro piso incluiu-se o peso da cobertura no pavimento e considerou-se a mesma sobrecarga devido ao seu eventual aproveitamento como zona de arquivo. Assim, as cargas permanentes e sobrecargas a considerar na análise são:

	1.º e 2.º Pisos	3.º piso (inclui cobertura)
<b>Pavimento (RCP)</b>	1,5 kN/m <sup>2</sup>	2,5 kN/m <sup>2</sup>
<b>Sobrecarga (SC)</b>	Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>	Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>
<b>Paredes</b>	Exteriores: 28,8 kN/m (20% de aberturas) Interiores: 25,3 kN/m (10% de aberturas)	Exteriores: 18,0 kN/m (metade da altura) Interiores: 14,0 kN/m (metade da altura)

As massas dos elementos estruturais são geradas automaticamente pelo programa. As restantes massas, associadas aos elementos estruturais não incluídos no modelo (troços de paredes longitudinais não representados no modelo, nembos e lintéis de alvenaria, lajes e algumas vigas, escadas e vergas), foram simuladas através de massas localizadas ao nível dos pisos, distribuídas de acordo com áreas de influência.

Uma situação semelhante sucede com as cargas verticais, as quais, para os elementos estruturais não incluídos no modelo, foram distribuídas de acordo com áreas de influência tendo em consideração a forma como os pavimentos descarregam nas paredes resistentes. O modelo numérico resultante está ilustrado na figura seguinte:

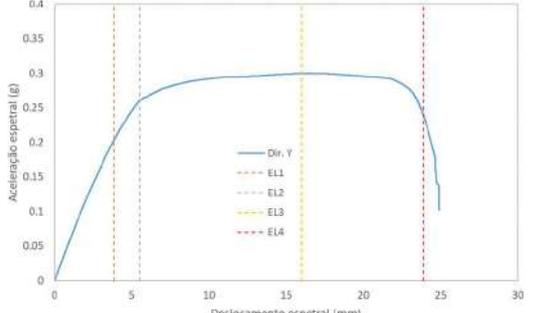


Modelo numérico do edifício principal desenvolvido no programa SeismoStruct

Os períodos de vibração da estrutura, obtidos através do modelo numérico, são:

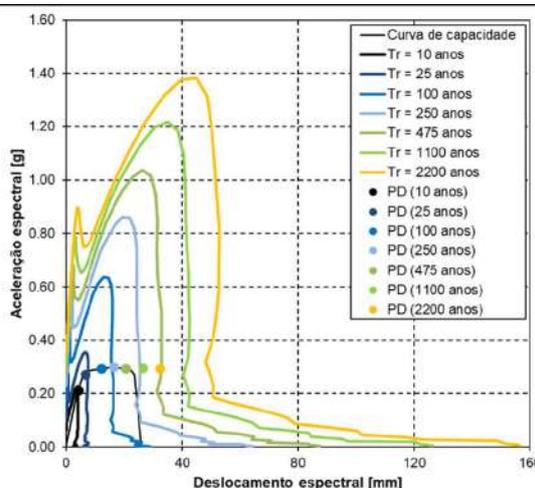
Períodos de vibração	
1º modo	0.266 s
2º modo	0.089 s
3º modo	0.056 s

Após a aplicação das cargas gravíticas foi realizada uma análise estática não-linear com controlo de deslocamentos (*pushover*) tendo em vista obter a curva de capacidade da estrutura para ações horizontais crescentes.

Curva de capacidade	Pontos de desempenho
<p>A curva de capacidade, isto é, o gráfico que relaciona a força lateral total (também passível de ser transformada em aceleração espectral) com o deslocamento horizontal da estrutura (deslocamento espectral) encontra-se representada abaixo, considerando as cargas horizontais aplicadas na direção transversal do edifício.</p>	<p>Determinação dos pontos de desempenho através do método do espectro de capacidade, para os sismos próximo e afastado e 25 períodos de retorno distintos. Nas figuras abaixo apresentam-se apenas 7 dos 25 espectros de resposta considerados. Foi limitado o amortecimento máximo efetivo a um valor de 7%, tendo em conta a caracterização estrutural do edifício e a expectável capacidade para dissipar energia.</p>
	

Os estados limite do edifício encontram-se descritos, em termos de deslocamento do topo na seguinte tabela:

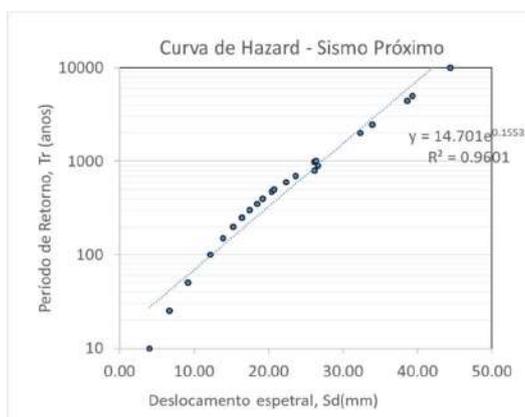
Estado limite	Deslocamento do topo
Completamente Operacional	D= 3.85 mm
Operacional	D= 5.50 mm
Salvaguarda de Vida	D= 16.0 mm
Próximo do Colapso	D= 23.9 mm



Pontos de desempenho: Sismo próximo

**Curva de Hazard e períodos de retorno**

A curva de hazard, para sismo próximo (condicionante), é a que se apresenta de seguida.



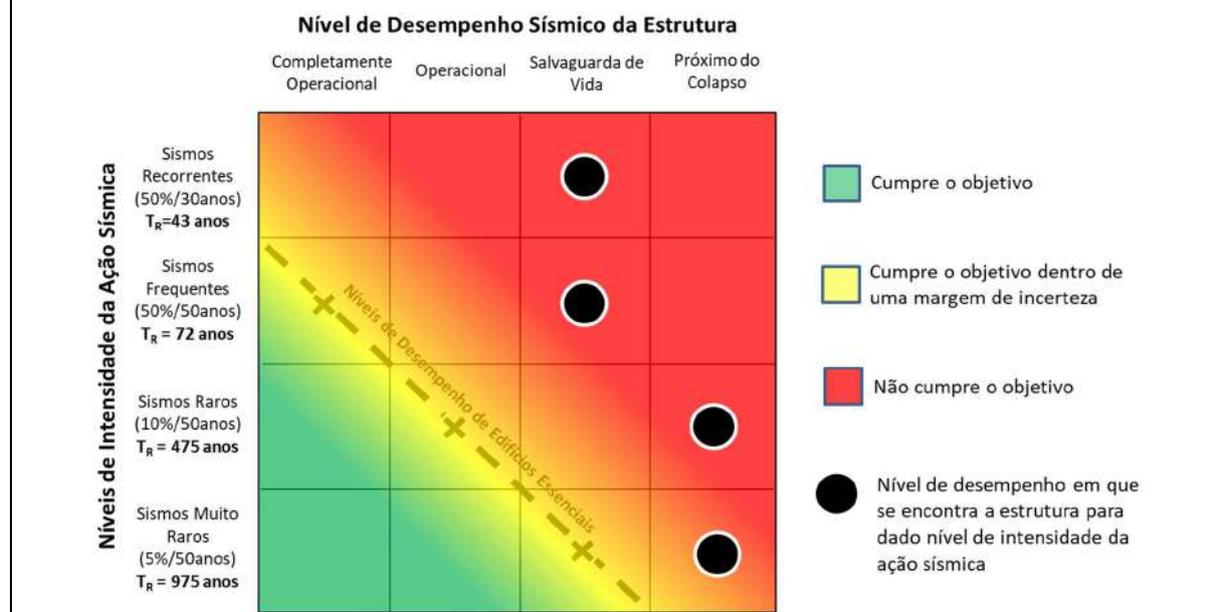
Curva de Hazard: Sismo próximo

Os períodos de retorno associados aos estados limite definidos são:

Período de retorno	Sismo Próximo	Sismo Afastado
Completamente Operacional	24	125
Operacional	29	361
Salvaguarda de Vida	241	>10000
Próximo do Colapso	4001	>10000

### Matriz de desempenho sísmico

A matriz de desempenho sísmico, que descreve o comportamento da estrutura de cada um dos edifícios que constituem a escola (edifício com estrutura mista alvenaria-betão) relativamente aos níveis e objetivos de desempenho definidos, é apresentada abaixo.



### Conclusão

Verifica-se que o comportamento da estrutura do edifício principal da escola (edifício com estrutura mista alvenaria-betão) relativamente aos níveis e objetivos de desempenho sísmico definidos é globalmente insatisfatório.

Com efeito, verifica-se que para um sismo com probabilidade de ocorrência iguais ou superiores a 50% em 50 anos (*sismos frequentes e recorrentes*) a estrutura se encontra num nível de desempenho *salvaguarda de vida*, o que não respeita o objetivo de desempenho estabelecido para este tipo de edifícios, que corresponde ao nível de desempenho *completamente operacional*. Além disso, para sismos com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 50% em 50 anos (*sismos raros e muito raros*) a estrutura encontra-se num nível de desempenho *próximo do colapso*, o que também não respeita os níveis de desempenho admissíveis para estes níveis de intensidade sísmica, que correspondem aos níveis de desempenho *operacional* e de *salvaguarda de vida*, respetivamente. Para intensidade sísmica correspondente a uma probabilidade de ocorrência de 2% em 50 anos e período de retorno de 2475 anos (*sismo máximo considerado*), a estrutura encontra-se num nível de desempenho *próximo do colapso*, mas sem ultrapassar este nível de desempenho, o que só ocorre para um sismo com período de retorno médio de 4283 anos, o que respeita os objetivos de desempenho definidos.

Desta forma, uma intervenção neste edifício deve focar-se no aumento da sua capacidade resistente, de modo a evitar situações que coloquem em causa a sua integridade e a segurança dos seus ocupantes por via da queda de elementos estruturais e situações de colapso iminente. Além disso, deverão também ser tomadas medidas relativamente à manutenção da operacionalidade do edifício no caso de ocorrência de sismos mais frequentes, ou seja, menos intensos.



# Escola Básica Paula Vicente

ID Escola: 138

Escola	Agrupamento	Área coberta
Escola Básica Paula Vicente	Restelo	2230 m <sup>2</sup>

Nível de ensino	Número de alunos
2º e 3º ciclos	430 alunos

Descrição geral
<p>A escola, construída no final da década de 1950, localiza-se na freguesia de Belém, com entrada pela Rua Gonçalves Zarco. É composta por dois edifícios. O edifício principal é formado por dois corpos desencontrados aproximadamente a meio, mas sem juntas de dilatação. O outro edifício é o ginásio. Edifício principal e ginásio são separados por uma zona de ligação com dois pisos, que funciona de forma independente dos outros dois edifícios. O acesso à escola é feito diretamente através da rua, existindo bastante espaço, nas imediações da escola e dentro dos limites da mesma, para evacuação e encontro em caso de ocorrência de evento sísmico.</p> <p>Atendendo à distância a que os edifícios mais próximos da escola se encontram, não é previsível qualquer interação sísmica com outras construções.</p>



Imagem aérea do Google Earth

Informação de base
<p>Estão disponíveis desenhos do <i>Atlas of School Architecture in Portugal</i>, que incluem desenhos de levantamento arquitetónico (plantas, cortes e alçados) e desenhos de estruturas, nomeadamente plantas de fundações e desenhos com armaduras de vigas e pilares da estrutura. É com base nestes desenhos que este estudo se baseia.</p>



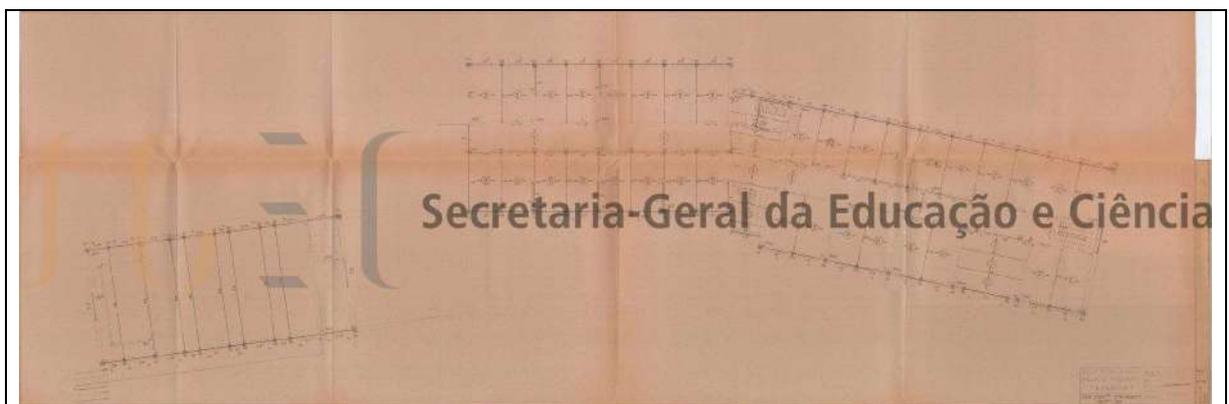
*Planta do 3º piso do edifício principal*



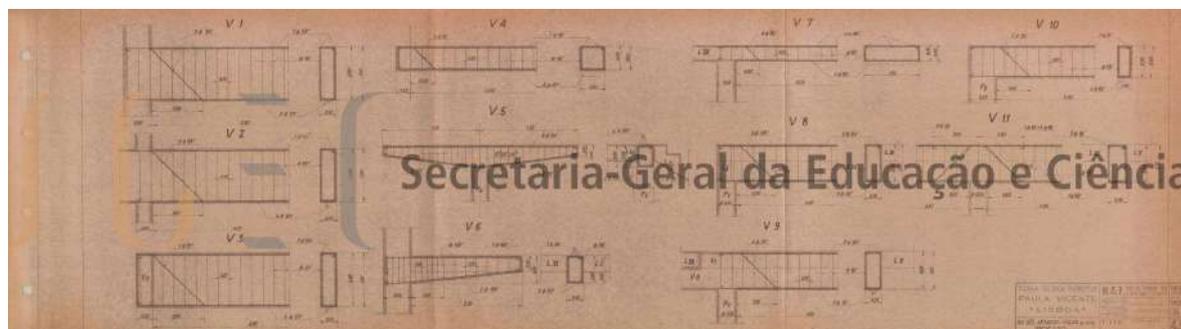
*Cortes transversais do edifício principal*



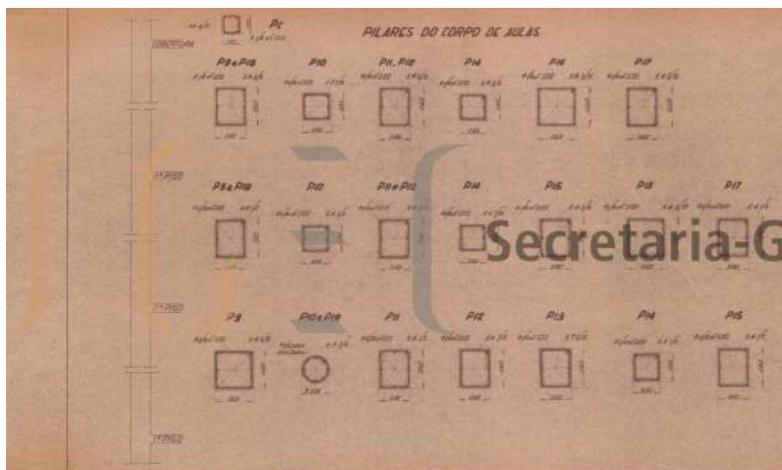
*Planta de fundações do edifício principal*



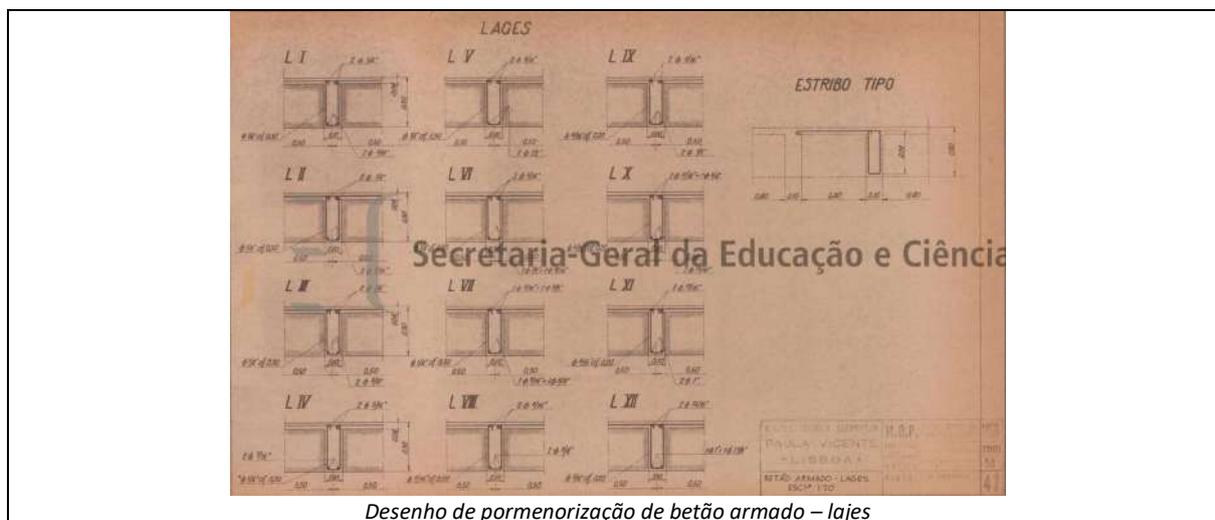
Alinhamentos estruturais – pilares, vigas e paredes – do 1º piso



Desenho de pormenorização de betão armado – vigas



Desenho de pormenorização de betão armado – pilares



Desenho de pormenorização de betão armado – lajes

### Caracterização estrutural

O edifício principal da escola, com um total de 3 pisos, é constituído por uma estrutura mista de betão armado e alvenaria, fundada numa grelha de sapatas e lintéis de betão armado (ver planta de fundações acima). O edifício não possui juntas de dilatação, pelo que se consideram apenas dois corpos distintos dada a geometria do edifício (ver figura abaixo). Na direção longitudinal o comportamento em pórtico é assegurado pelas vigas que unem todos os pilares dos alinhamentos A, C e D (no corpo 1) e dos alinhamentos A', B' e D' (no corpo 2). Os alinhamentos B e C' são constituídos por paredes de alvenaria que recebem a carga gravítica e a descarregam na fundação contínua que a sustenta. Na direção transversal as vigas de piso ligam os alinhamentos das salas de aula (i.e., A-B e C-D, A'-B' e C-D'). Na zona de corredor não existem vigas, pelo que a transmissão de cargas horizontais é assegurada pela laje. As lajes são aligeiradas, com espessura total de 50.0cm e nervuras com largura de 10.0cm. A distância entre o centro de nervuras consecutivas é de 50.0cm. No topo, a lâmina maciça de betão é de 4.0cm.



Planta com identificação dos alinhamentos estruturais do edifício principal

O corpo 1 do edifício tem, a Norte, apenas dois pisos aparentes, estando um dos pisos enterrado. Os alinhamentos interiores do edifício são constituídos, no 1º piso, por pilares circulares com 35.0cm de diâmetro. Nos pisos superiores esses pilares passam a ser quadrangulares com 35.0cm de lado. Nos alinhamentos exteriores (à exceção do alinhamento D) os pilares são quadrangulares ou retangulares em toda a altura, com dimensões 50.0x50.0 ou 40.0x50.0. No alinhamento D, os pilares são alternadamente quadrangulares (50.0x50.0) e circulares (35.0cm) no primeiro piso. Nos pisos superiores os pilares circulares passam a ser quadrangulares com 35.0cm de lado, enquanto que os restantes mantêm a dimensão.

As vigas transversais principais têm uma secção de 40.0x80.0. As vigas longitudinais do corredor têm uma secção de 55.0x70.0, enquanto que as vigas longitudinais dos alinhamentos exteriores têm uma dimensão de 40.0x45.0.

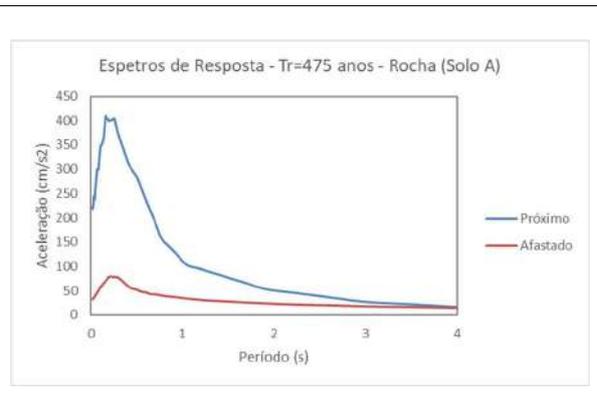
Os pórticos transversais estão afastados aproximadamente 3.96m. Na ausência de qualquer outra informação, assumiu-se um betão C16/20, aço A250 para varões longitudinais e aço macio para estribos.

É de salientar que na ausência de informação mais detalhada relativa ao projeto de estruturas da escola, que permita recolher dados sobre materiais, ações consideradas, entre outros pormenores construtivos, estes resultados devem ser encarados como indicadores do comportamento expectável e não como uma avaliação detalhada do comportamento sísmico da estrutura.

**Caracterização geotécnica**

Com base na carta de solos de que o LNEC dispõe (Ver relatório), a EB Paula Vicente encontra-se fundada em rocha (solo do tipo A), pelo que não se considera qualquer amplificação da ação calculada no estudo probabilístico de perigosidade sísmica desenvolvido especificamente no âmbito deste projeto.

Os espectros de resposta, para sismo próximo e sismo afastado, associados a um período de retorno de 475 anos, encontram-se na figura à direita.



**Modelo numérico**

Atendendo às características estruturais da escola, considera-se que o mecanismo preponderante na resposta sísmica consiste na resposta dos pórticos transversais do edifício. Nestes pórticos, as paredes de alvenaria funcionam como apoios simples para a carga gravítica e, como tal, não contribuem para a resistência às ações horizontais. Nesse sentido, as paredes são consideradas num modelo de pórtico plano como elementos bi-articulados, cuja rigidez é calculada tendo em conta a dimensão da parede (estimada com base nos desenhos de arquitetura) e um módulo de elasticidade de 2.0GPa. Salienta-se que esta consideração apenas é válida no caso de as paredes de alvenaria manterem a sua integridade durante o sismo e, conseqüentemente, manterem a resistência relativamente à ação da carga gravítica. Para garantir esta capacidade recomenda-se que as paredes de alvenaria sejam cintadas e, eventualmente, reforçadas no sentido de garantir que o comportamento betão-alvenaria é mantido durante o sismo.

O modelo de cálculo, desenvolvido no programa SeismoStruct, é composto por elementos de barra (*frame*) de plasticidade distribuída com formulação em força. Cada secção destes elementos é definida através de fibras com comportamento uniaxial, associadas a aço ou a betão. Os elementos finitos são definidos tendo em consideração as dimensões acima apresentadas e as armaduras indicadas nos desenhos de estruturas. Os elementos bi-articulados que simulam as paredes de alvenaria têm comportamento elástico.

As nervuras das lajes do corredor têm armadura de 2Φ12 junto à face inferior e de 2Φ8 na face superior. São os estribos, de Φ6 afastados a 0.30 que se prolongam por cima da zona aligeirada, constituindo assim a armadura da lâmina maciça da laje.

A laje aligeirada foi modelada, no SeismoStruct, com elementos distintos na zona corrente e nas zonas maciças (em redor dos elementos verticais e junto à bordadura. A secção aligeirada tem uma espessura de membrana  $t_m=0,086m$ , que corresponde à área de secção transversal equivalente num metro de laje, e uma espessura para a flexão de  $t_f=0,298m$ , correspondente à inércia de um metro linear de laje. As fibras uniaxiais que definem o comportamento do betão são definidas através do modelo de *Mander et al.*, enquanto que as fibras de aço são definidas através do modelo de comportamento de *Menegotto-Pinto*.

Consideram-se as bases dos pilares com restrições aos deslocamentos e às rotações, simulando assim uma fundação rígida, o que constitui uma simplificação que se considera aceitável face à planta de fundações que se obteve.

Relativamente às cargas atuantes, adotaram-se as cargas definidas de acordo com a norma portuguesa em vigor (NP EN1991-1-1), para o tipo de edifício em questão. Assim, as cargas permanentes e sobrecargas a considerar na análise são:

Carga	1º Piso	Cobertura
Pavimento (RCP)	1.5 kN/m <sup>2</sup>	2.5 kN/m <sup>2</sup>
Paredes (RCP)	Divisórias: 1.75 kN/m <sup>2</sup> (aplicada na laje do 1º piso) Exteriores: 7.8 kN/m (aplicada nas vigas exteriores do 1º piso)	-
Sobrecarga	Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>	Cobertura não acessível: 0.4 kN/m <sup>2</sup>

Consideram-se dois pórticos planos, correspondentes a cada um dos dois corpos do edifício principal, representativos do comportamento da estrutura na direção transversal.

Após a aplicação das cargas gravíticas é executada uma análise estática não-linear com controlo de deslocamentos (*pushover*).

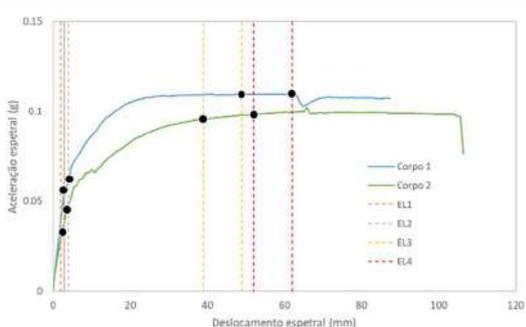


Modelos numéricos dos pórticos transversais do edifício principal no programa SeismoStruct: corpo 1 (esq.); corpo 2 (dir.)

Os períodos de vibração da estrutura, obtidos através do modelo numérico, são:

Períodos de vibração	Corpo 1	Corpo 2
1º modo	0.37 s	0.51 s
2º modo	0.12 s	0.17 s
3º modo	0.07 s	0.10 s

### Curva de capacidade



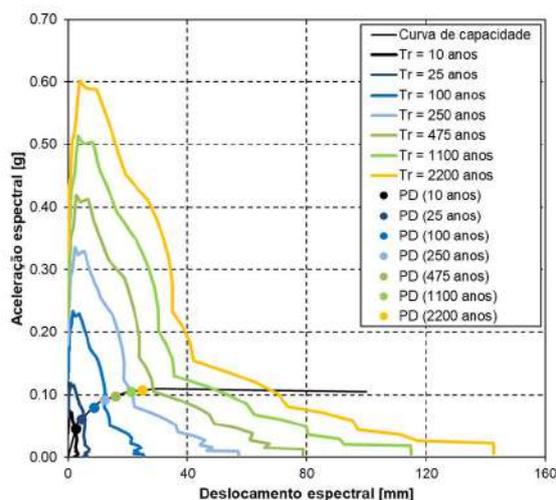
Os estados limite desta estrutura são condicionados pela rotura ao corte dos elementos, sendo esse o ponto que controla o estado limite de Salvaguarda de Vida. O estado limite Próximo do Colapso é definido como 4/3 do anterior. Os outros dois estados limite mantêm as definições apresentadas no relatório. Os valores dos deslocamentos do topo associados aos estados limite são:

Estado limite	Corpo 1	Corpo 2
Completamente Operacional	D= 2.1 mm	D= 2.8 mm
Operacional	D= 3.0 mm	D= 4.0 mm
Salvaguarda de Vida	D= 46.5 mm	D= 39.0 mm
Próximo do Colapso	D= 62.0 mm	D= 52.0 mm

### Pontos de desempenho

Determinação dos pontos de desempenho através do método do espectro de capacidade, para os sismos próximo e afastado e 25 períodos de retorno distintos.

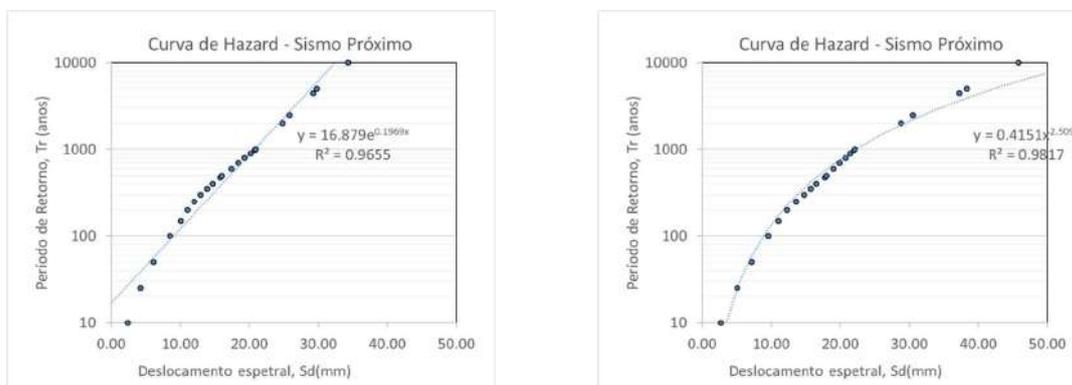
Na figura abaixo apresentam-se apenas 7 dos 25 espectros de resposta considerados, para sismo próximo.



Pontos de desempenho: Sismo próximo; Corpo 1

**Curva de Hazard e períodos de retorno**

A curva de hazard, para sismo próximo pode assim ser determinada sendo apresentada de seguida.



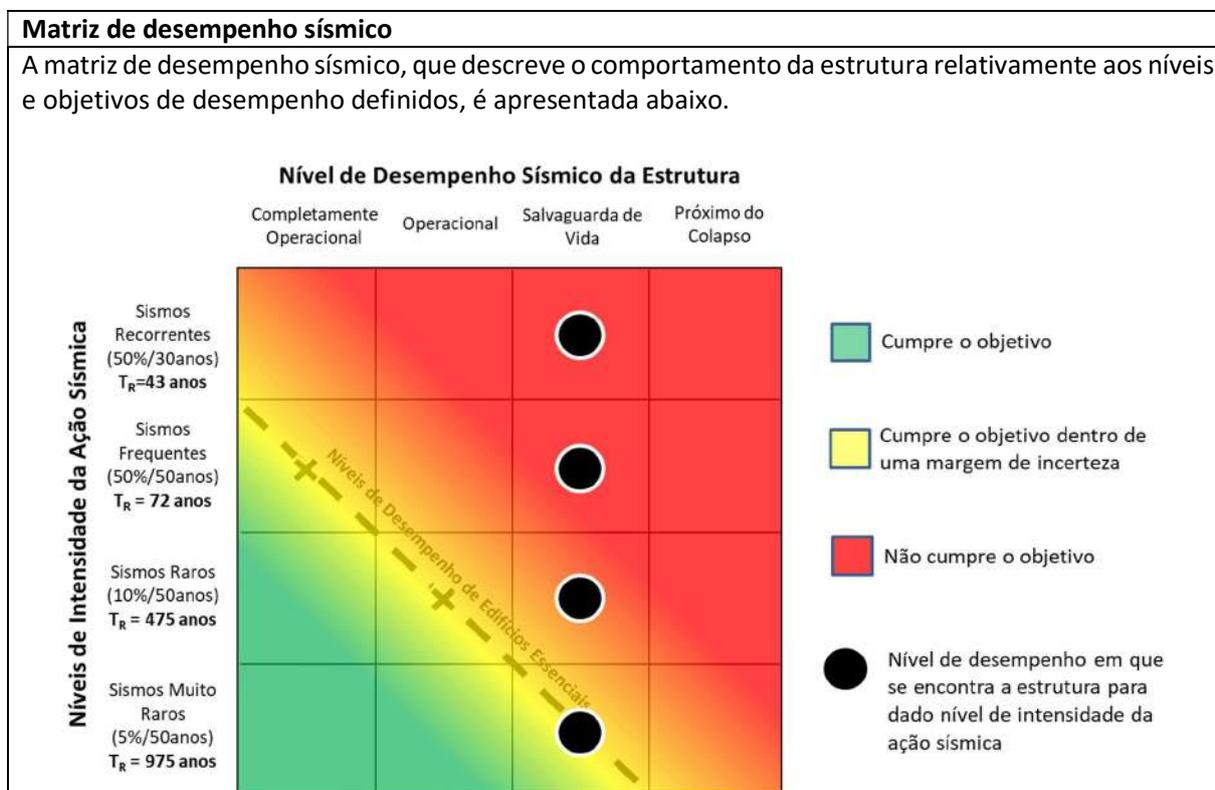
Curva de Hazard: Sismo próximo: corpo 1 (esq.); corpo 2 (dir.)

Os períodos de retorno associados aos estados limite definidos são:

Período de retorno		Corpo 1	Corpo 2
Estado limite	Completamente Operacional	26	6
	Operacional	30	13
	Salvaguarda de Vida	>10000	4087
	Próximo do Colapso	>10000	8414

**Matriz de desempenho sísmico**

A matriz de desempenho sísmico, que descreve o comportamento da estrutura relativamente aos níveis e objetivos de desempenho definidos, é apresentada abaixo.



### Conclusão

A análise aqui desenvolvida é baseada no projeto de estruturas do edifício que consta do *Atlas of School Architecture in Portugal*.

Verifica-se que o edifício principal da escola se encontra subdividido em dois corpos, constituídos por uma estrutura mista de pórticos em betão armado e paredes de alvenaria. As lajes são aligeiradas e descarregam nos pórticos de betão e nas paredes de alvenaria.

Foi assumido que as paredes de alvenaria mantêm a sua integridade durante o sismo e, conseqüentemente, mantêm a resistência relativamente à ação da carga gravítica. Ainda assim, recomenda-se que as paredes de alvenaria sejam cintadas e, eventualmente, reforçadas no sentido de garantir que o comportamento betão-alvenaria é mantido durante o sismo.

Pese embora a consideração de integridade das paredes, verificou-se o comportamento da estrutura do edifício que constitui a escola é insatisfatório para os níveis e objetivos de desempenho sísmico relacionados com a operacionalidade pós-sismo. Isto ocorre para sismos com probabilidade de ocorrência igual ou superior a 10% em 50 anos.

Com efeito, embora a estrutura se encontre salvaguardada relativamente aos níveis de desempenho mais gravosos, é expectável a ocorrência de danos que limitem a sua operacionalidade, mesmo para sismos com moderada a baixa intensidade.

Para sismos mais intensos, com probabilidade de ocorrência superior a 10% em 50 anos, a estrutura tem uma resposta conforme com os objetivos de desempenho definidos, não sendo verosímil que a estrutura se encontre próxima do colapso para nenhum destes níveis de intensidade da ação sísmica.

Tendo por base estas conclusões, é recomendado que a estrutura seja reforçada, nomeadamente no que diz respeito a elementos não estruturais que podem ser afetados por sismos de intensidade moderada a baixa, e que podem limitar a sua operacionalidade e causar perdas económicas elevadas.



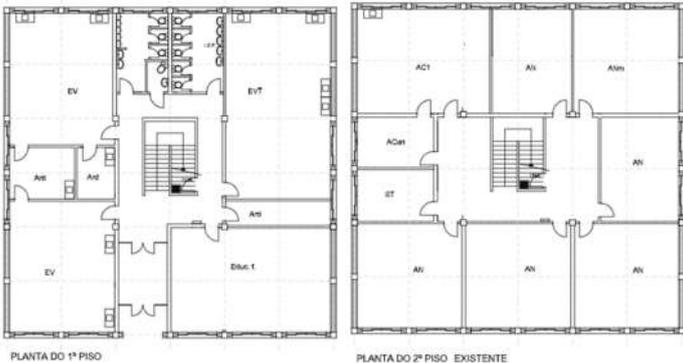
# Escola Secundária Restelo

ID Escola: 139

Escola	Agrupamento	Área coberta
Escola Secundária do Restelo	Restelo	3683 m <sup>2</sup>

Nível de ensino	Número de alunos
Secundário + 3º ciclo	1100 alunos

Descrição geral	
<p>A escola localiza-se junto à Avenida das Descobertas, Restelo, com acessos largos e sem presença de outras estruturas junto aos limites do seu terreno, não existindo, portanto, a possibilidade de interação sísmica com outras estruturas.</p> <p>Os vários blocos que compõem a escola estão afastados, funcionando de forma independente. Existe espaço, dentro da escola e nas imediações, para evacuação e encontro em caso de ocorrência de evento sísmico.</p>	 <p><i>Imagem aérea do Google Earth</i></p>

Informação de base
<p>Estão apenas disponíveis desenhos de levantamento arquitetónico fornecidos pela CML, que resultam do projeto tipo das escolas de pavilhões “3x3”. Não foram realizadas alterações ao levantamento fornecido, apesar de se considerar nesta análise a informação acrescida recolhida após a inspeção visual levada a cabo pelo Departamento de Edifícios do LNEC.</p>
 <p><i>Levantamento arquitetónico do bloco tipo “3x3”</i></p>

### Caracterização estrutural

Escola tipo “3x3”, com estrutura porticada em betão armado. Os blocos têm quatro pilares ao centro, definindo três vãos (“3x3”) nas duas direções. No perímetro os vãos têm metade do comprimento, relativamente aos alinhamentos interiores. Existem 4 blocos com laje fungiforme 1 bloco com laje vigada. Existem ainda dois blocos com apenas 1 piso e um edifício de balneários. Nos blocos com laje fungiforme aligeirada, os alinhamentos dos pórticos são amaciçados.



Bloco com laje vigada. Todos os restantes têm laje fungiforme aligeirada.

Não há informação sobre o projeto de estruturas da escola que permita recolher dados sobre o seu dimensionamento da escola, nomeadamente no que diz respeito a materiais, ações consideradas, dimensões de elementos estruturais, armaduras colocadas, entre outros pormenores construtivos. Assim, a análise aqui desenvolvida é baseada naquilo que se presume ser a prática construtiva e os materiais da época de construção da escola. Com efeito, assumem-se materiais e restantes características da estrutura de acordo com outras escolas de tipologias e época construtiva semelhante, como é o caso da tipologia “Vale Rosal”. Assim, considera-se:

- Materiais: B25(C25/30) + A400
- Dimensões dos elementos estruturais:
  - Pilares: 0.35x0.35 [mxm] (contínuos em altura)
  - Laje fungiforme aligeirada:
    - Altura total: 42.5cm
    - Altura maciça: 10.0cm
    - Largura total: 90.0cm
    - Largura das nervuras: 13.0cm
  - Laje vigada:
    - Laje maciça: 15.0cm
    - Vigas interiores: 0.35x0.65 [mxm]
    - Vigas perímetro: 0.35x0.40 [mxm]

É de salientar que, na ausência de informação sobre o projeto de estruturas da escola, que permita recolher dados sobre o seu dimensionamento, nomeadamente no que diz respeito a materiais, ações consideradas, dimensões de elementos estruturais, armaduras colocadas, entre outros pormenores construtivos, estes resultados devem ser encarados como indicadores do comportamento expectável e não como uma avaliação detalhada do comportamento sísmico da estrutura.

<b>Caracterização geotécnica</b>	
<p>Com base na carta de solos de que o LNEC dispõe (Ver relatório), a ES Restelo encontra-se fundada em rocha (solo do tipo A), pelo que não se considera amplificação da ação calculada ao nível do substrato rochoso. Os espectros de resposta em rocha, que resultam de um estudo probabilístico de perigosidade sísmica desenvolvido especificamente no âmbito deste projeto, associados a um período de retorno de 475 anos, encontram-se na figura à direita.</p>	

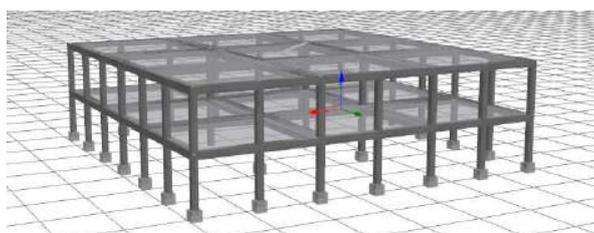
<b>Modelo numérico</b>																											
<p>O modelo de cálculo, desenvolvido no programa SeismoStruct, é composto por elementos de barra (<i>frame</i>) de plasticidade distribuída com formulação em força. Cada secção destes elementos é definida através de fibras com comportamento uniaxial, associadas a aço ou a betão. Os elementos finitos são definidos tendo em consideração as dimensões acima apresentadas e as armaduras que foram sistematizadas com base no projeto de execução da tipologia “Vale Rosal”. As armaduras dos pilares são:</p>																											
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Arm. Long; Arm. Transv.</th> <th>Centrais</th> <th>Perímetro</th> <th>Canto</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><b>1º piso</b></td> <td>12Φ25+4Φ20; Φ8//0.15</td> <td>12Φ25; Φ8//0.15</td> <td>4Φ25+8Φ20; Φ8//0.15</td> </tr> <tr> <td><b>2º Piso</b></td> <td>4Φ25; Φ8//0.15</td> <td>8Φ25; Φ8//0.15</td> <td>4Φ25; Φ8//0.15</td> </tr> </tbody> </table>	Arm. Long; Arm. Transv.	Centrais	Perímetro	Canto	<b>1º piso</b>	12Φ25+4Φ20; Φ8//0.15	12Φ25; Φ8//0.15	4Φ25+8Φ20; Φ8//0.15	<b>2º Piso</b>	4Φ25; Φ8//0.15	8Φ25; Φ8//0.15	4Φ25; Φ8//0.15															
Arm. Long; Arm. Transv.	Centrais	Perímetro	Canto																								
<b>1º piso</b>	12Φ25+4Φ20; Φ8//0.15	12Φ25; Φ8//0.15	4Φ25+8Φ20; Φ8//0.15																								
<b>2º Piso</b>	4Φ25; Φ8//0.15	8Φ25; Φ8//0.15	4Φ25; Φ8//0.15																								
<p>Relativamente às vigas, as armaduras são:</p>																											
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Arm. Long; Arm. Transv.</th> <th>Local</th> <th>Extremidades</th> <th>Sob pilares interiores</th> <th>Meio-vão</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2"><b>1º piso</b></td> <td>Vigas interiores</td> <td>inf 4Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10</td> <td>inf 4Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10</td> <td>inf 3Φ20+4Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.20</td> </tr> <tr> <td>Vigas perímetro</td> <td>inf 3Φ20+3Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10</td> <td>inf 2Φ20+3Φ16; sup 2Φ25+3Φ16; Φ8//0.10</td> <td>inf 3Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.10</td> </tr> <tr> <td rowspan="2"><b>2º Piso</b></td> <td>Vigas interiores</td> <td>inf 3Φ16; sup 2Φ20+3Φ16; Φ6//0.10</td> <td>inf 3Φ16; sup 2Φ20+3Φ16; Φ6//0.10</td> <td>inf 2Φ20+3Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.25</td> </tr> <tr> <td>Vigas perímetro</td> <td>inf 6Φ12; sup 3Φ16+3Φ12; Φ6//0.10</td> <td>inf 4Φ12; sup 3Φ16+3Φ12; Φ6//0.10</td> <td>inf 4Φ12; sup 3Φ12; Φ6//0.20</td> </tr> </tbody> </table>	Arm. Long; Arm. Transv.	Local	Extremidades	Sob pilares interiores	Meio-vão	<b>1º piso</b>	Vigas interiores	inf 4Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 4Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 3Φ20+4Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.20	Vigas perímetro	inf 3Φ20+3Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 2Φ20+3Φ16; sup 2Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 3Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.10	<b>2º Piso</b>	Vigas interiores	inf 3Φ16; sup 2Φ20+3Φ16; Φ6//0.10	inf 3Φ16; sup 2Φ20+3Φ16; Φ6//0.10	inf 2Φ20+3Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.25	Vigas perímetro	inf 6Φ12; sup 3Φ16+3Φ12; Φ6//0.10	inf 4Φ12; sup 3Φ16+3Φ12; Φ6//0.10	inf 4Φ12; sup 3Φ12; Φ6//0.20				
Arm. Long; Arm. Transv.	Local	Extremidades	Sob pilares interiores	Meio-vão																							
<b>1º piso</b>	Vigas interiores	inf 4Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 4Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 3Φ20+4Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.20																							
	Vigas perímetro	inf 3Φ20+3Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 2Φ20+3Φ16; sup 2Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 3Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.10																							
<b>2º Piso</b>	Vigas interiores	inf 3Φ16; sup 2Φ20+3Φ16; Φ6//0.10	inf 3Φ16; sup 2Φ20+3Φ16; Φ6//0.10	inf 2Φ20+3Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.25																							
	Vigas perímetro	inf 6Φ12; sup 3Φ16+3Φ12; Φ6//0.10	inf 4Φ12; sup 3Φ16+3Φ12; Φ6//0.10	inf 4Φ12; sup 3Φ12; Φ6//0.20																							
<p>As lajes maciças são armadas com Φ10//0.125 em ambas as faces. As cargas atuantes nas lajes são automaticamente distribuídas pela malha de vigas, enquanto que a sua rigidez é simulada através do cálculo da largura efetiva do banzo das vigas em “T”, o que é feito também de forma automática pelo programa de cálculo.</p>																											
<p>As fibras uniaxiais que definem o comportamento do betão são definidas através do modelo de <i>Mander et al.</i>, enquanto que as fibras de aço são definidas através do modelo de comportamento de <i>Menegotto-Pinto</i>.</p>																											

Consideram-se as bases dos pilares com restrições aos deslocamentos e libertas às rotações, simulando assim uma fundação flexível, de acordo com a conceção de sapatas isoladas que caracteriza a fundação da estrutura.

Relativamente às cargas atuantes, adotaram-se as cargas definidas de acordo com a norma portuguesa em vigor (NP EN1991-1-1), para o tipo de edifício em questão. Assim, as cargas permanentes e sobrecargas a considerar na análise são:

Carga	1º Piso	Cobertura
<b>Pavimento (RCP)</b>	1.5 kN/m <sup>2</sup>	2.5 kN/m <sup>2</sup>
<b>Paredes (RCP)</b>	<u>Divisórias:</u> 1.75 kN/m <sup>2</sup> (aplicada na laje do 1º piso) <u>Exteriores:</u> 7.8 kN/m (aplicada nas vigas exteriores do 1º piso)	-
<b>Sobrecarga</b>	Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>	Cobertura não acessível: 0.4 kN/m <sup>2</sup>

Após a aplicação das cargas gravíticas é executada uma análise estática não-linear com controlo de deslocamentos (*pushover*).

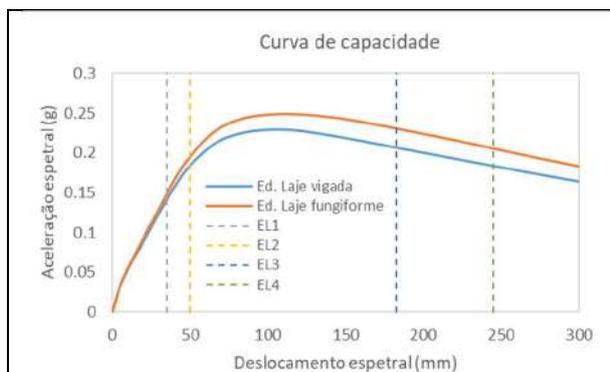


Modelo numérico do bloco tipo da escola no programa SeismoStruct

Os períodos de vibração da estrutura, obtidos através do modelo numérico, são:

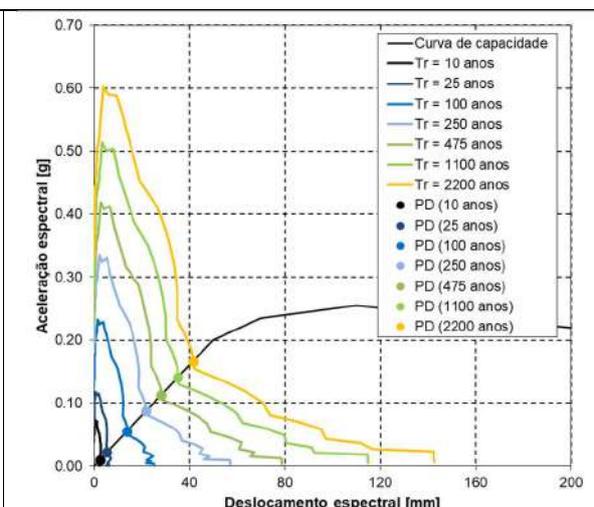
Períodos de vibração	Ed. Laje vigada	Ed. Laje fungiforme
1º modo (X)	0.72 s	0.76 s
2º modo (Y)	0.72 s	0.76 s
3º modo (Torção)	0.62 s	0.62 s

Curva de capacidade	Pontos de desempenho
A curva de capacidade encontra-se representada abaixo, para os dois blocos existentes na escola (bloco com laje vigada e bloco com laje fungiforme).	Determinação dos pontos de desempenho através do método do espectro de capacidade, para os sismos próximo e afastado e 25 períodos de retorno distintos. Nas figuras abaixo apresentam-se apenas 7 dos 25 espectros de resposta considerados, para sismo próximo e edifício com laje fungiforme.



Os estados limite de cada um dos edifícios encontram-se descritos, em termos de deslocamento do topo na seguinte tabela:

Estado limite	Ed. Laje vigada	Ed. Laje fungiforme
Completamente Operacional	D= 35 mm	D= 35 mm
Operacional	D= 50 mm	D= 50 mm
Salvaguarda de Vida	D= 184 mm	D= 186 mm
Próximo do Colapso	D= 245 mm	D= 248 mm

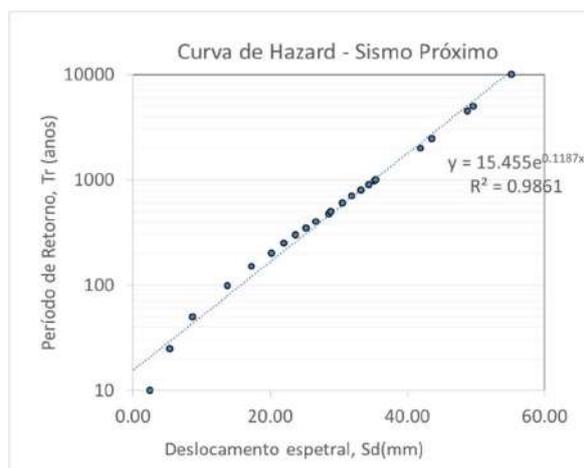


Pontos de desempenho: Ed. Laje fungiforme; Sismo próximo

**Curva de Hazard e períodos de retorno**

**Edifício com laje vigada**

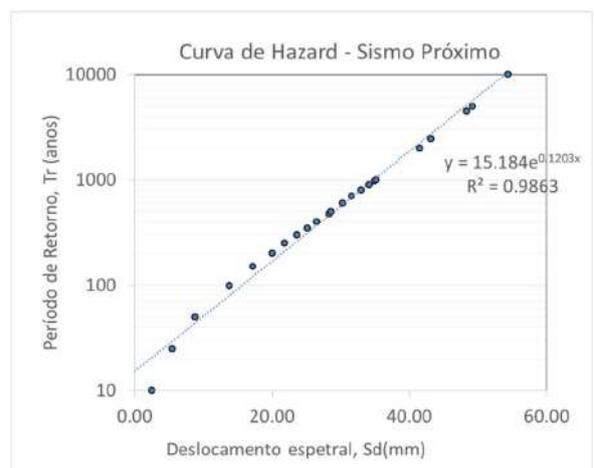
A curva de hazard, para sismo próximo (condicionante), é a que se apresenta de seguida.



Curva de Hazard: Ed. Laje vigada; Sismo próximo

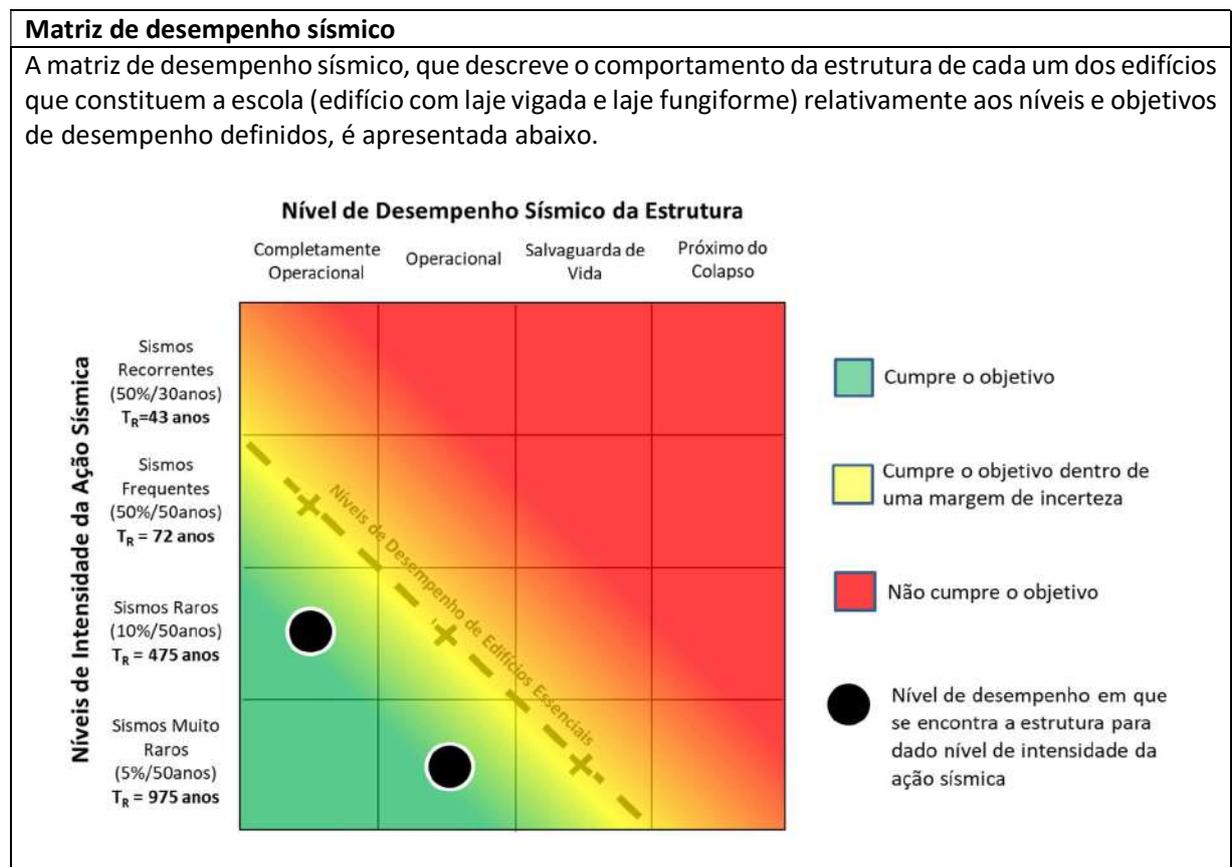
**Edifício com laje fungiforme**

A curva de hazard, para sismo próximo (condicionante), é a que se apresenta de seguida.



Curva de Hazard: Ed. Laje fungiforme; Sismo próximo

Os períodos de retorno associados aos estados limite definidos são:				Os períodos de retorno associados aos estados limite definidos são:					
		<b>Ed. Laje vigada</b>	<b>Sismo Próximo</b>	<b>Sismo Afastado</b>			<b>Ed. Laje fungiforme</b>	<b>Sismo Próximo</b>	<b>Sismo Afastado</b>
<b>Estado limite</b>	Completamente Operacional		544	>10000	<b>Estado limite</b>	Completamente Operacional		544	>10000
	Operacional		2471	>10000		Operacional		2471	>10000
	Salvaguarda de Vida		>10000	>10000		Salvaguarda de Vida		>10000	>10000
	Próximo do Colapso		>10000	>10000		Próximo do Colapso		>10000	>10000



**Conclusão**

Verifica-se que o comportamento da estrutura de cada um dos edifícios que constituem a escola (edifício com laje vigada e laje fungiforme) relativamente aos níveis e objetivos de desempenho sísmico definidos é satisfatório.

Com efeito, verifica-se que para sismos com probabilidade de ocorrência igual ou superior a 10% em 50 anos a estrutura se encontra num nível de desempenho completamente operacional, respeitando assim o objetivo de desempenho estabelecido para este tipo de edifícios. Além disso, para um sismo com probabilidade de ocorrência de 5% em 50 anos (sismo muito raro) a estrutura encontra-se num



nível de desempenho operacional, pelo que respeita o nível de desempenho admissível para este nível de intensidade sísmica, que corresponde ao nível de desempenho salvaguarda de vida. Para este tipo de edifícios não é verosímil que a estrutura se encontre próxima do colapso para nenhum destes níveis de intensidade da ação sísmica.



# Escola Básica Olivais

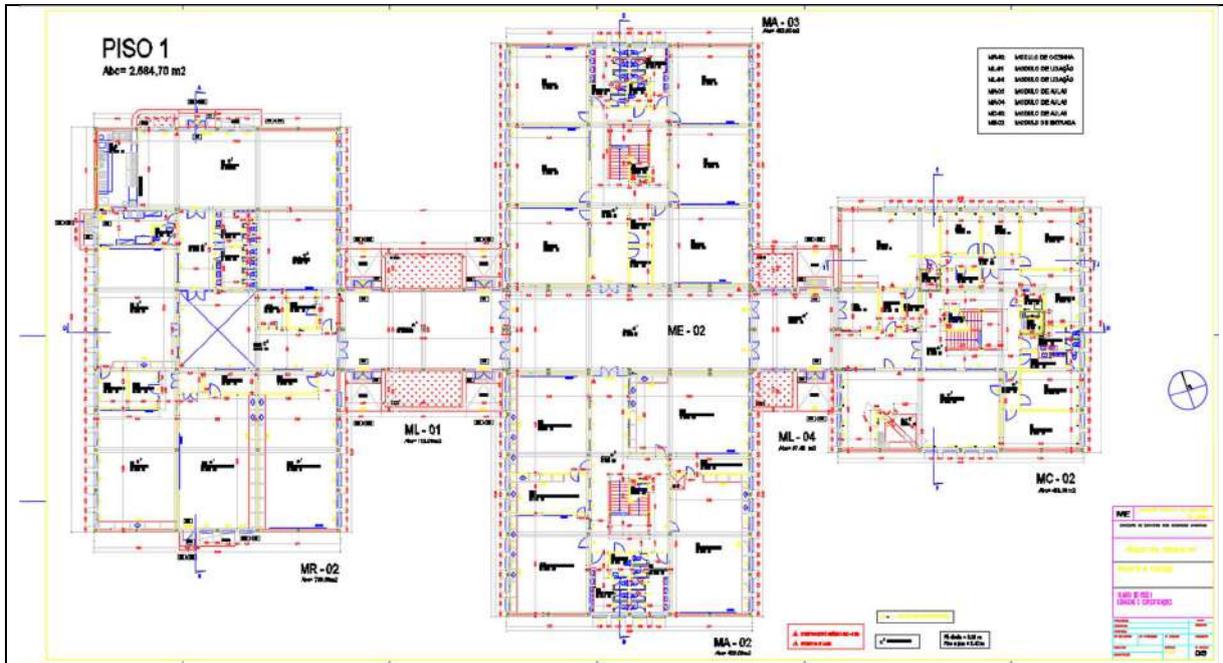
ID Escola: 143

Escola	Agrupamento	Área coberta
Escola Básica Olivais	Santa Maria dos Olivais	3000 m <sup>2</sup>

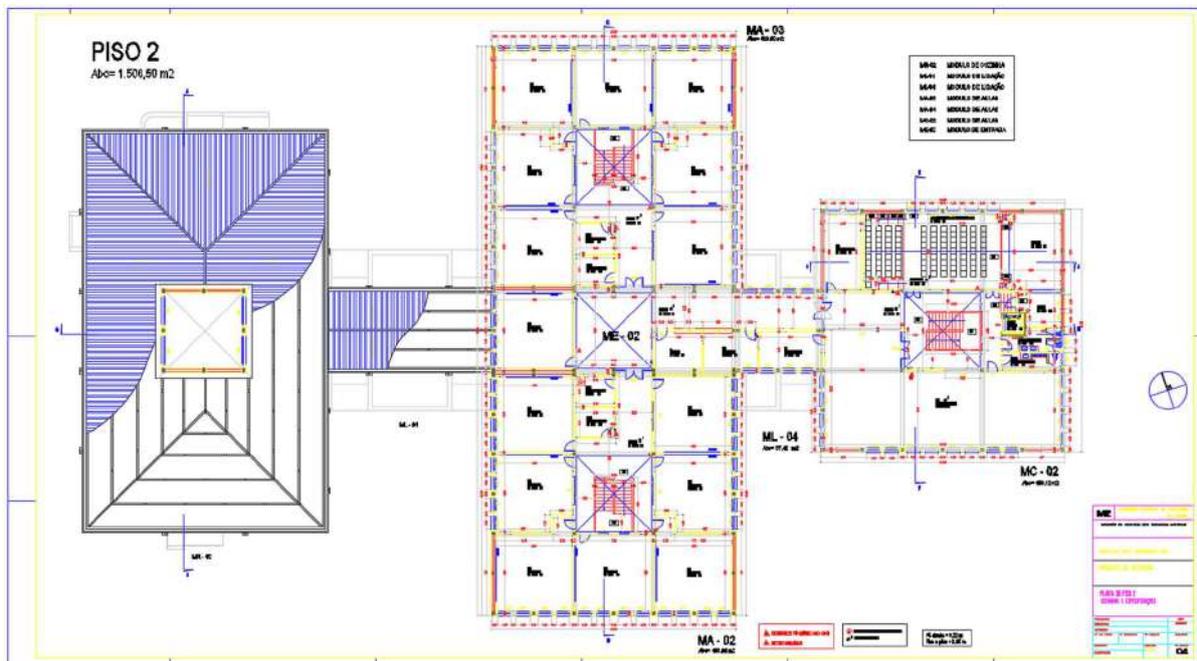
Nível de ensino	Número de alunos
Básico com 2º e 3º ciclos	535 alunos

Descrição geral	
<p>A escola localiza-se na freguesia dos Olivais, numa zona residencial, com edifícios altos de betão armado. O acesso à escola faz-se através de uma praça utilizada como estacionamento automóvel. O espaço disponível nesta praça poderá dificultar a evacuação da escola, o que deverá ser tido em consideração no plano de emergência. Os limites do terreno da escola estão bastante próximos dos edifícios adjacentes, pelo que é de evitar a definição de circuitos de evacuação ou pontos de encontros nesses locais, devido ao perigo de queda de objetos ou elementos não estruturais no caso de ocorrência de evento sísmico. Dentro da escola, a zona do campo de jogos é a mais adequada para servir como ponto de encontro pós-sismo. Os edifícios da escola estão suficientemente afastados dos edifícios adjacentes, podendo assim desprezar-se qualquer interação sísmica com outras estruturas.</p>	 <p><i>Imagem aérea do Google Earth</i></p>

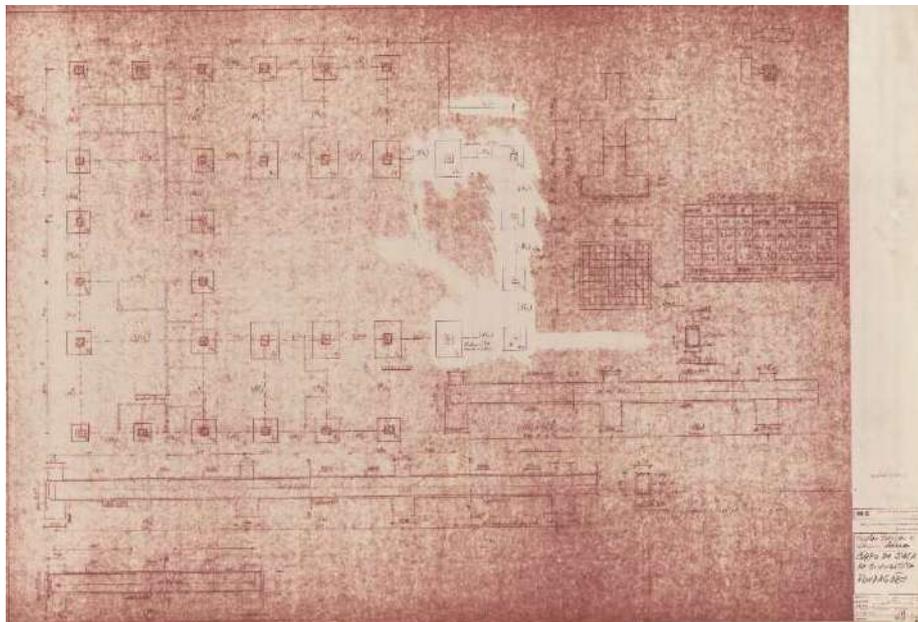
Informação de base
<p>Estão apenas disponíveis desenhos de levantamento arquitetónico fornecidos pela CML, que resultam do projeto tipo das escolas de pavilhões “COMPACTO_24T”. Não foram realizadas alterações ao levantamento fornecido, apesar de se considerar nesta análise a informação acrescida recolhida após a inspeção visual levada a cabo pelo Departamento de Edifícios do LNEC. Adicionalmente, a EB Olivais dispõe de alguns desenhos de levantamento arquitetónico e de engenharia no <b>Atlas of Scholl Architecture in Portugal</b>, os quais foram consultados. No entanto, os desenhos de engenharia não incluem desenhos de estruturas ou fundações do edifício principal, mas apenas do edifício de ginásio.</p>



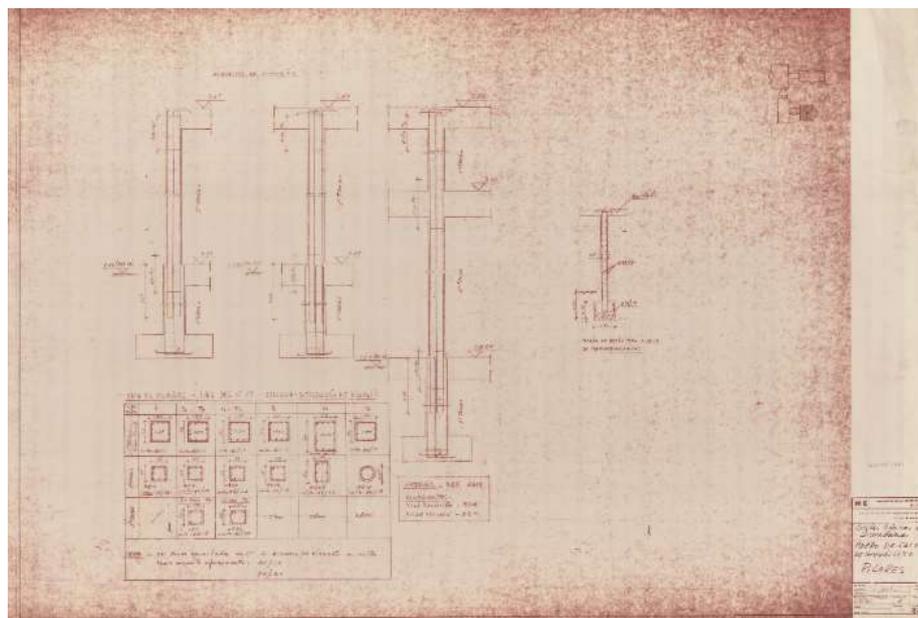
Levantamento arquitetónico do bloco tipo "C24T" – Piso 1



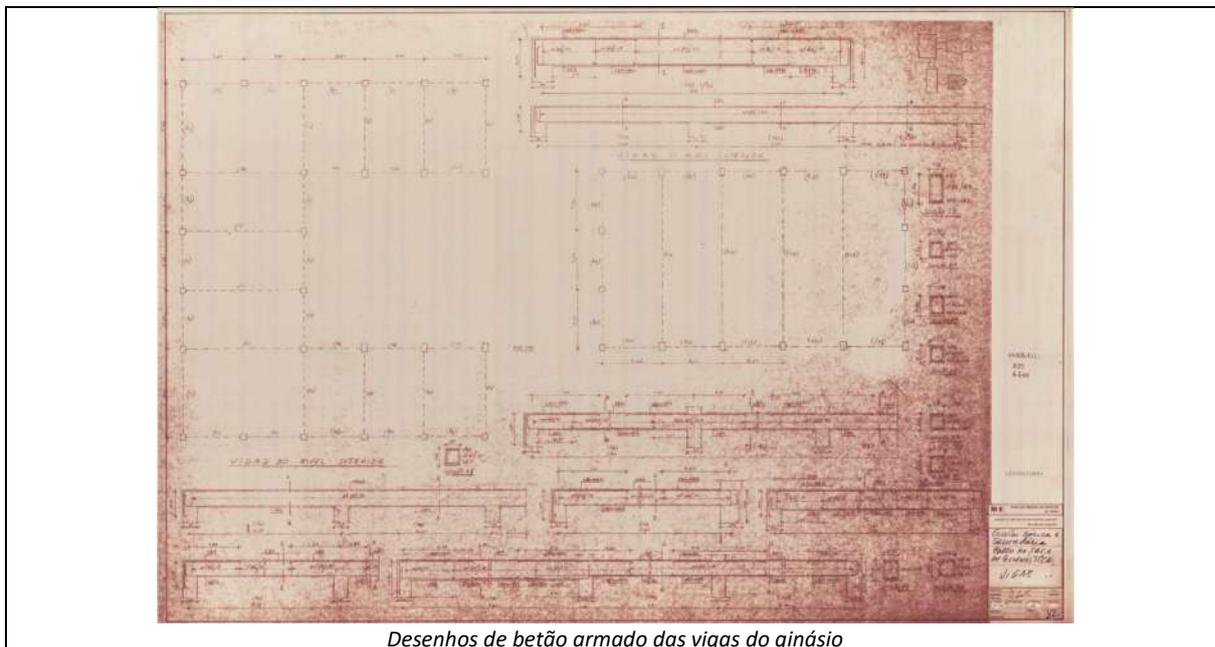
Levantamento arquitetónico do bloco tipo "C24T" – Piso 2



*Desenho de fundações do ginásio*

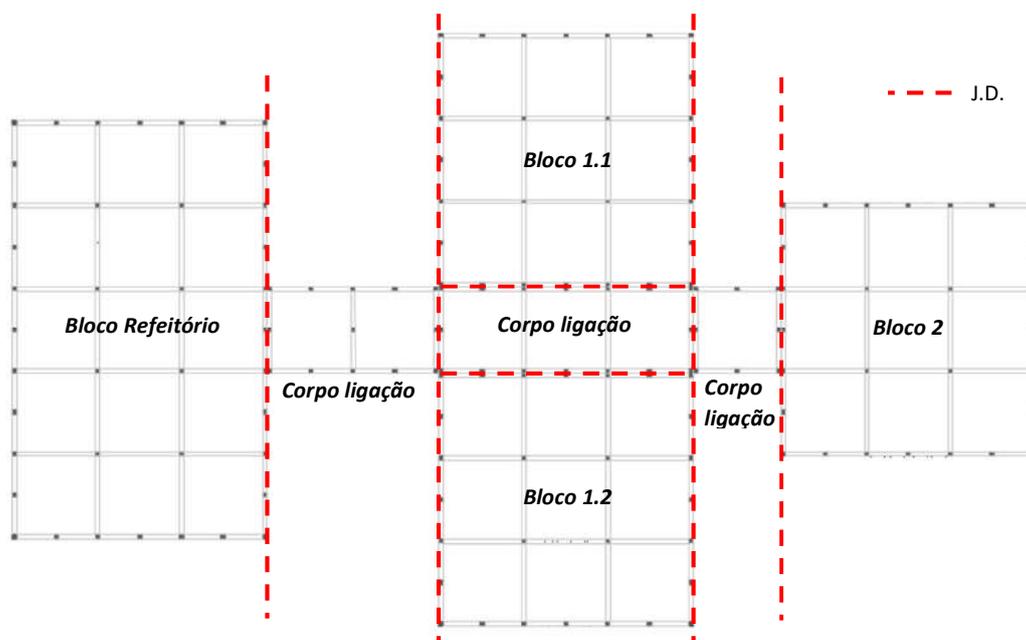


*Desenhos de betão armado dos pilares do ginásio*



**Caracterização estrutural**

Escola tipo “COMPACTO 24T” (“C24T”), com estrutura porticada em betão armado. Os blocos têm várias juntas de dilatação que os separam os corpos semelhantes aos blocos “3x3” unidos por pórticos com apenas um vão (ver figura abaixo). A exceção é o corpo do refeitório, que tem apenas 1 piso, e é mais comprido (tem mais dois vãos, i.e. mais um alinhamento de pilares interiores) que o bloco de “3x3”.



*Planta com identificação das juntas de dilatação e dos pilares*

Os blocos tipo “3x3” têm quatro pilares ao centro, definindo três vãos nas duas direções. No perímetro os vãos têm metade do comprimento, relativamente aos alinhamentos interiores. Existem vigas de bordadura em todo o perímetro dos blocos e quatro vigas que passam nos quatro pilares interiores. As lajes são maciças com 15.0cm de espessura.

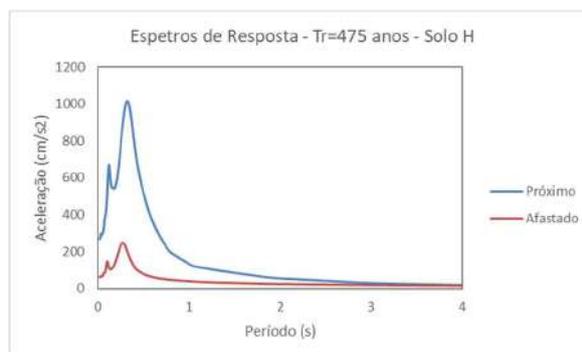
Não existem informações sobre o projeto de estruturas do edifício principal da escola que permita recolher dados sobre o seu dimensionamento da escola, nomeadamente no que diz respeito a ações consideradas, dimensões de elementos estruturais, armaduras colocadas, entre outros pormenores construtivos. Assim sendo, a análise aqui desenvolvida é baseada nos projetos de outras escolas de tipologias e época construtiva semelhante, como é o caso da tipologia “Vale Rosal”, assim como no dimensionamento do edifício de ginásio. Assim, considera-se:

- Materiais: B25(C25/30) + A400
- Dimensões dos elementos estruturais:
  - Pilares: 0.35x0.35 [mxm] (contínuos em altura)
  - Vigas interiores: 0.35x0.65 [mxm]
  - Vigas bordadura: 0.35x0.40 [mxm]
  - Laje maciça: 0.15m

É de salientar que, na ausência de informação sobre o projeto de estruturas da escola, que permita recolher dados sobre o seu dimensionamento, nomeadamente no que diz respeito a dimensões de elementos estruturais, armaduras colocadas, entre outros pormenores construtivos, estes resultados devem ser encarados como indicadores do comportamento expectável e não como uma avaliação detalhada do comportamento sísmico da estrutura.

### Caracterização geotécnica

Com base na carta de solos de que o LNEC dispõe (Ver relatório), a EB Olivais encontra-se fundada em solo do tipo H, pelo que se considera a amplificação da ação calculada ao nível do substrato rochoso com base na coluna de solo respetiva (coluna H). Os espectros de resposta, que resultam de um estudo probabilístico de perigosidade sísmica desenvolvido especificamente no âmbito deste projeto, associados a um período de retorno de 475 anos, encontram-se na figura à direita.



### Modelo numérico

O modelo de cálculo, desenvolvido no programa SeismoStruct, é composto por elementos de barra (*frame*) de plasticidade distribuída com formulação em força. Cada secção destes elementos é definida através de fibras com comportamento uniaxial, associadas a aço ou a betão. Os elementos finitos são definidos tendo em consideração as dimensões acima apresentadas e as armaduras que foram sistematizadas com base no projeto de execução da tipologia “Vale Rosal” e adaptados tendo em consideração os desenhos de pormenor do edifício do ginásio desta escola. As armaduras dos pilares são:

Arm. Long; Arm. Transv.	Centrais
<b>1º piso</b>	8Φ16; Φ6//0.15
<b>2º Piso</b>	8Φ16; Φ6//0.20

Relativamente às vigas, as armaduras são:

Arm. Long; Arm. Transv.	Local	Extremidades/ Sob pilares interiores	Meio-vão
<b>Todos os pisos</b>	Vigas interiores	inf 4Φ12; sup 2Φ16+3Φ12; Φ6//0.10	inf 4Φ16+3Φ12; sup 3Φ12; Φ6//0.20
	Vigas perímetro	inf 4Φ12; sup 4Φ12; Φ6//0.20	inf 4Φ12; sup 4Φ12; Φ6//0.20

As lajes maciças são armadas com Φ8//0.10 junto à face inferior, em ambas as direções, e com Φ8//0.15 junto à face superior, em ambas as direções. As cargas atuantes nas lajes são automaticamente distribuídas pela malha de vigas, enquanto que a sua rigidez é simulada através do cálculo da largura efetiva do banzo das vigas em “T”, o que é feito também de forma automática pelo programa de cálculo.

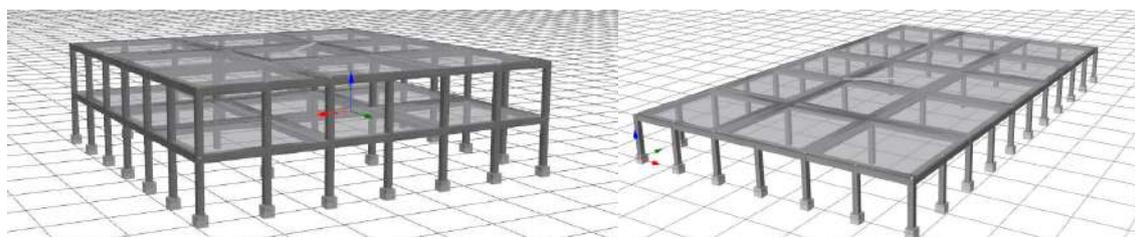
As fibras uniaxiais que definem o comportamento do betão são definidas através do modelo de *Mander et al.*, enquanto que as fibras de aço são definidas através do modelo de comportamento de *Menegotto-Pinto*.

Consideram-se as bases dos pilares com restrições aos deslocamentos e às rotações.

Relativamente às cargas atuantes, adotaram-se as cargas definidas de acordo com a norma portuguesa em vigor (NP EN1991-1-1), para o tipo de edifício em questão. Assim, as cargas permanentes e sobrecargas a considerar na análise são:

Carga	1º Piso	Cobertura
<b>Pavimento (RCP)</b>	1.5 kN/m <sup>2</sup>	2.5 kN/m <sup>2</sup>
<b>Paredes (RCP)</b>	<u>Divisórias</u> : 1.75 kN/m <sup>2</sup> (aplicada na laje do 1º piso) <u>Exteriores</u> : 7.8 kN/m (aplicada nas vigas exteriores do 1º piso)	-
<b>Sobrecarga</b>	Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>	Cobertura não acessível: 0.4 kN/m <sup>2</sup>

Após a aplicação das cargas gravíticas é executada uma análise estática não-linear com controlo de deslocamentos (*pushover*).



Modelo numérico do bloco tipo da escola no programa SeismoStruct: bloco de aulas (esq.); bloco de refeitório (dir.)

Os períodos de vibração da estrutura, obtidos através do modelo numérico, são:

Períodos de vibração	Bloco aulas	Bloco refeitório
1º modo (X)	0.44 s	0.27 s
2º modo (Y)	0.44 s	0.26 s
3º modo (Torção)	0.36 s	0.21 s

### Curva de capacidade

A curva de capacidade do bloco de aulas encontra-se representada abaixo. O bloco do refeitório por não ser condicionante, devido ao facto de ter apenas 1 piso e, conseqüentemente, menos massa, não é considerado na análise subsequente.

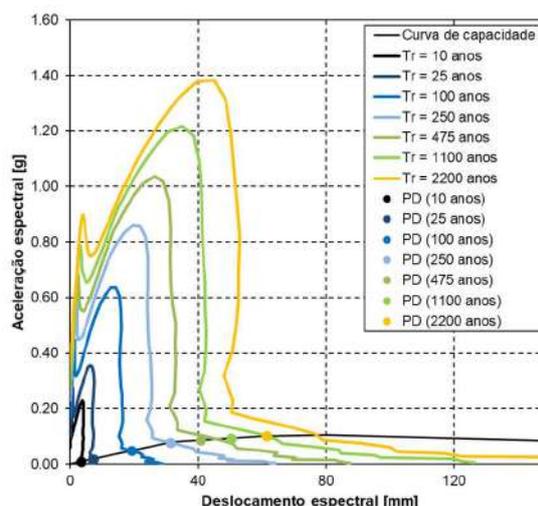


Os estados limite do bloco de aulas encontram-se descritos, em termos de deslocamento do topo na seguinte tabela:

Estado limite	Deslocamento do topo
Completamente Operacional	D= 22.4 mm
Operacional	D= 32.0 mm
Salvaguarda de Vida	D= 121.5 mm
Próximo do Colapso	D= 162.0 mm

### Pontos de desempenho

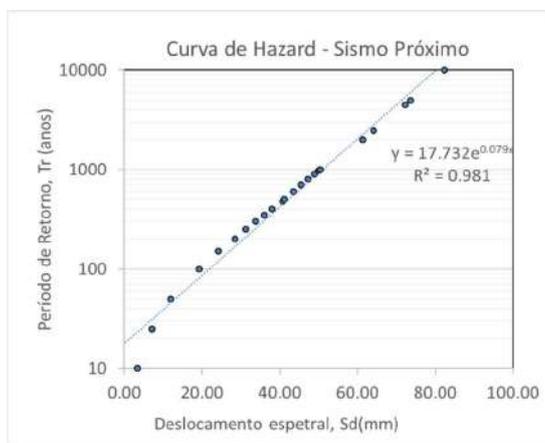
Determinação dos pontos de desempenho através do método do espectro de capacidade, para os sismos próximo e afastado e 25 períodos de retorno distintos. Nas figuras abaixo apresentam-se apenas 7 dos 25 espectros de resposta considerados, para sismo próximo.



Pontos de desempenho: Bloco aulas; Sismo próximo

**Curva de Hazard e períodos de retorno**

A curva de hazard, para sismo próximo (condicionante), é a que se apresenta de seguida.



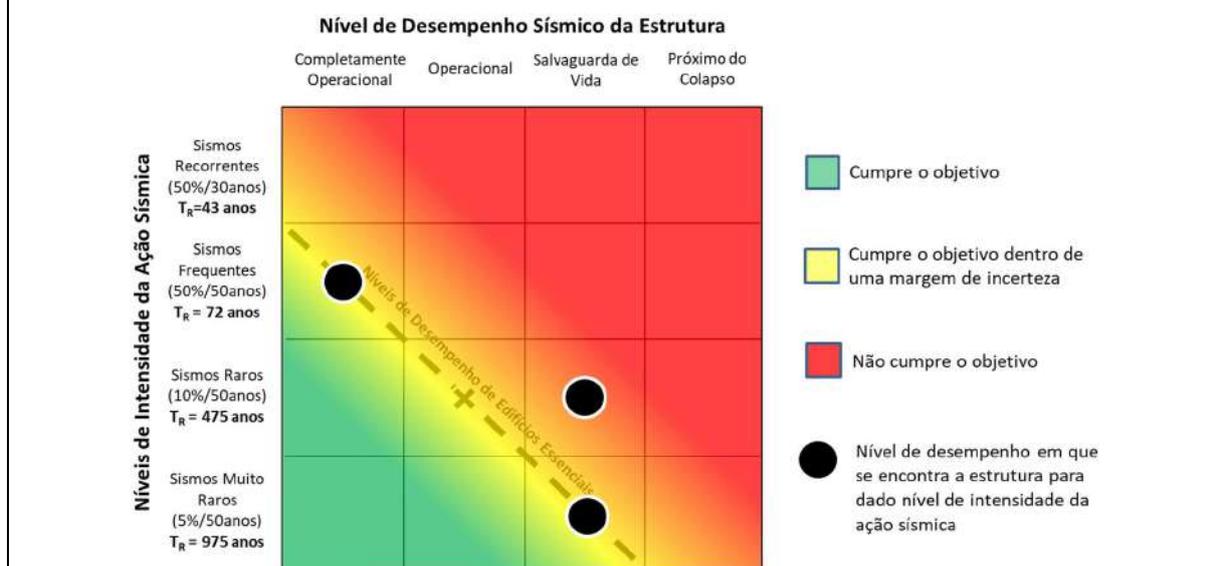
Curva de Hazard: Sismo próximo

Os períodos de retorno associados aos estados limite definidos são:

Período de retorno		Sismo Próximo	Sismo Afastado
Estado limite	Completamente Operacional	104	>10000
	Operacional	222	>10000
	Salvaguarda de Vida	>10000	>10000
	Próximo do Colapso	>10000	>10000

**Matriz de desempenho sísmico**

A matriz de desempenho sísmico, que descreve o comportamento da estrutura de cada um dos blocos que constituem a escola relativamente aos níveis e objetivos de desempenho definidos, é apresentada abaixo.



### Conclusão

Verifica-se que o comportamento da estrutura do edifício principal da escola (edifício com estrutura porticada de betão armado e laje vigada) relativamente aos níveis e objetivos de desempenho sísmico definidos é satisfatório para sismos frequentes e muitos raros. No entanto, para um patamar intermédio correspondente a sismos raros, o edifício regista um nível de dano acima do expectável para o nível de desempenho associado a edifícios essenciais.

Com efeito, verifica-se que para sismos com probabilidade de ocorrência igual ou superior a 50% em 50 anos (*sismos frequentes e recorrentes*) a estrutura se encontra num nível de desempenho *completamente operacional*, respeitando assim o objetivo de desempenho estabelecido para este tipo de edifícios. Além disso, para sismos com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a de 5% em 50 anos (*sismos muito raros*) a estrutura encontra-se num nível de desempenho *salvaguarda de vida*, pelo que respeita o nível de desempenho admissível para este nível de intensidade sísmica, que corresponde a este mesmo estado limite. No entanto, para níveis de intensidade sísmica entre os dois patamares acima referidos, a estrutura encontra-se num nível de desempenho *salvaguarda de vida*, o que não respeita os objetivos de desempenho definidos para este nível de intensidade sísmica e que corresponde ao nível de desempenho *operacional*.

Desta forma, é expectável que para sismos com período de retorno de aproximadamente 475 anos, existam danos significativos na estrutura que impeçam a sua operacionalidade pós-sismo. Assim, deverão também ser tomadas medidas relativamente à manutenção da operacionalidade do edifício no caso de ocorrência de sismos raros.

Não obstante, conclui-se que para este tipo de edifícios não é verosímil que a estrutura se encontre próxima do colapso para nenhum destes níveis de intensidade da ação sísmica.



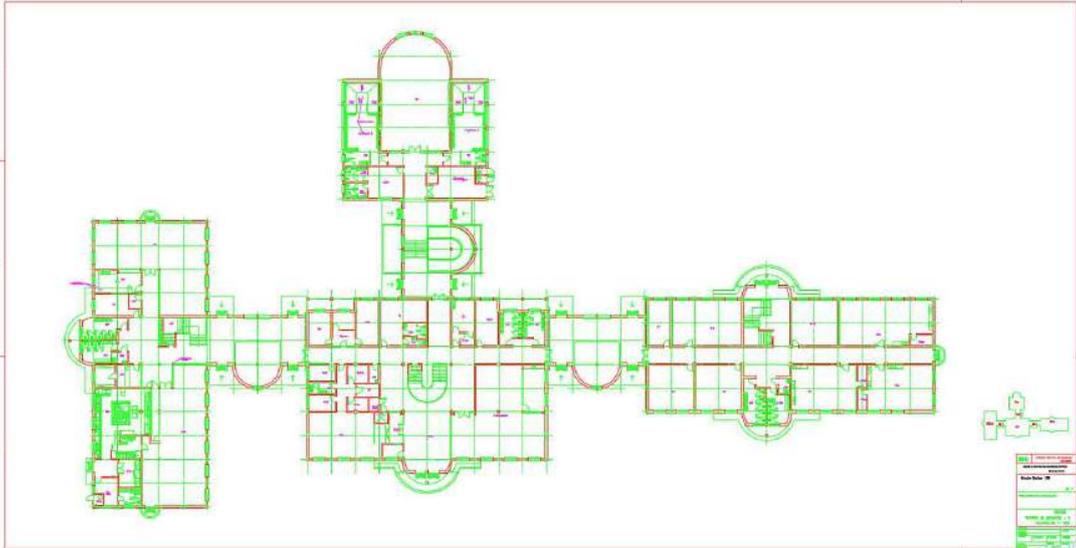
# Escola Básica São Vicente / Telheiras

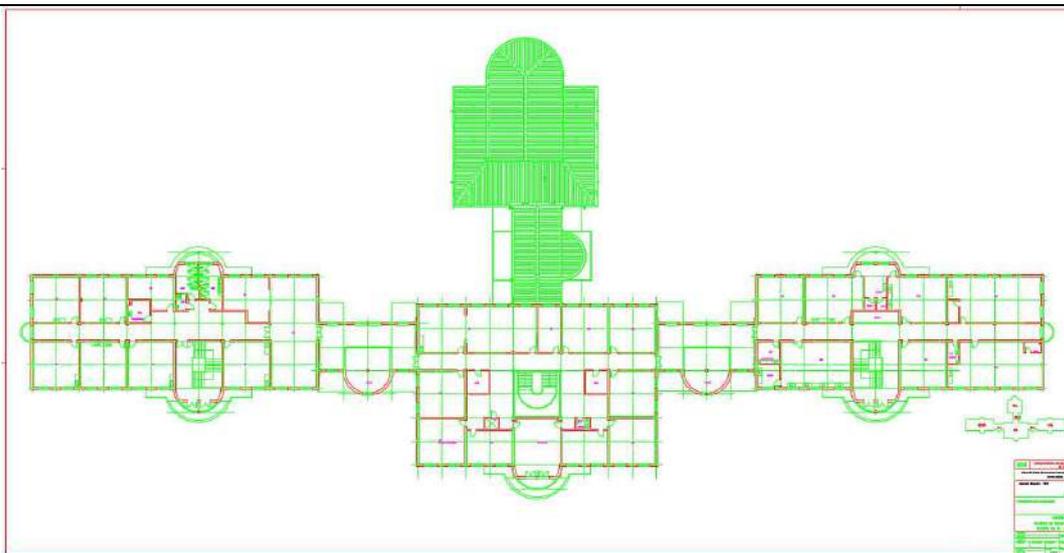
ID Escola: 152

Escola	Agrupamento	Área coberta
Escola Básica São Vicente/Telheiras	Vergílio Ferreira	3950 m <sup>2</sup>

Nível de ensino	Número de alunos
Básico integrado com JI	730 alunos

Descrição geral	
<p>A escola localiza-se na freguesia do Lumiar, com acessos largos e sem presença de outras estruturas junto aos limites do seu terreno, não existindo, portanto, a possibilidade de interação sísmica com outras estruturas.</p> <p>Existe espaço, dentro da escola e nas imediações, para evacuação e encontro em caso de ocorrência de evento sísmico.</p>	 <p><i>Imagem aérea do Google Earth</i></p>

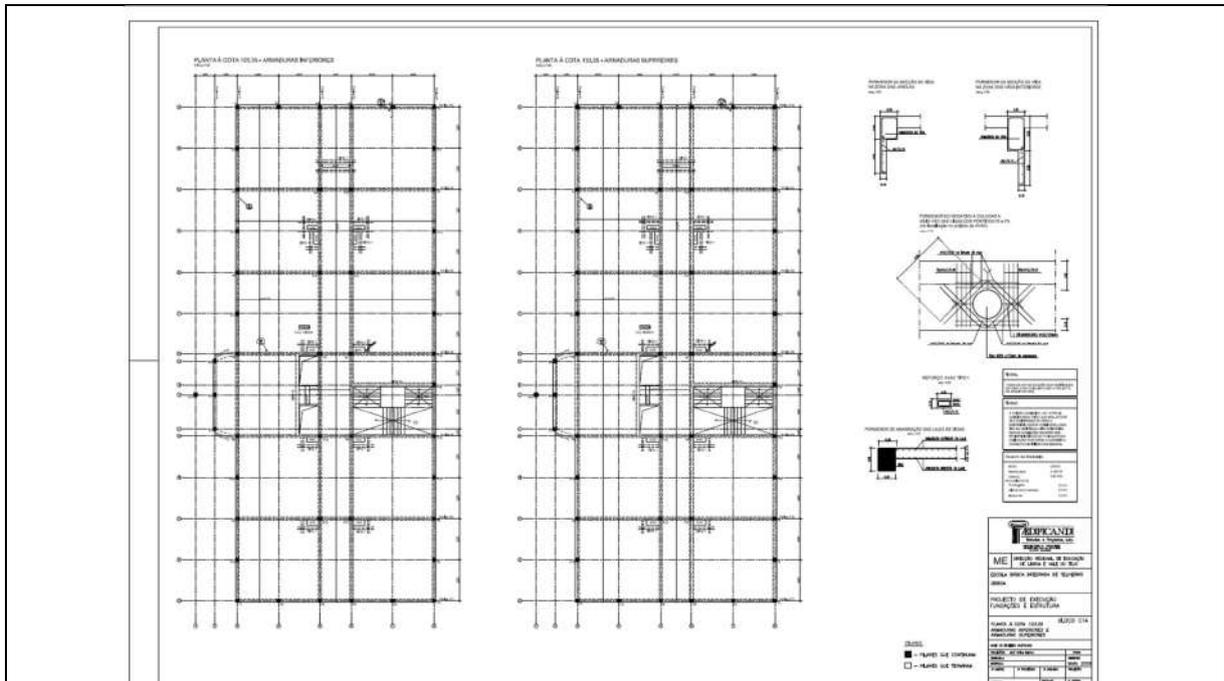
Informação de base
<p>Estão disponíveis desenhos de projeto, datados de 2009, que incluem desenhos de arquitetura e de estruturas. Estes desenhos complementam o levantamento arquitetónico fornecido pela CML, que corresponde à arquitetura tipo das escolas “VALE ROSAL”. Adicionalmente, a EBI São Vicente/Telheiras dispõe ainda de alguns desenhos de levantamento arquitetónico e de engenharia no <b>Atlas of School Architecture in Portugal</b>, os quais também foram consultados no âmbito desta análise.</p>
 <p><i>Levantamento arquitetónico da escola tipo “VALE ROSAL” – Piso 1</i></p>



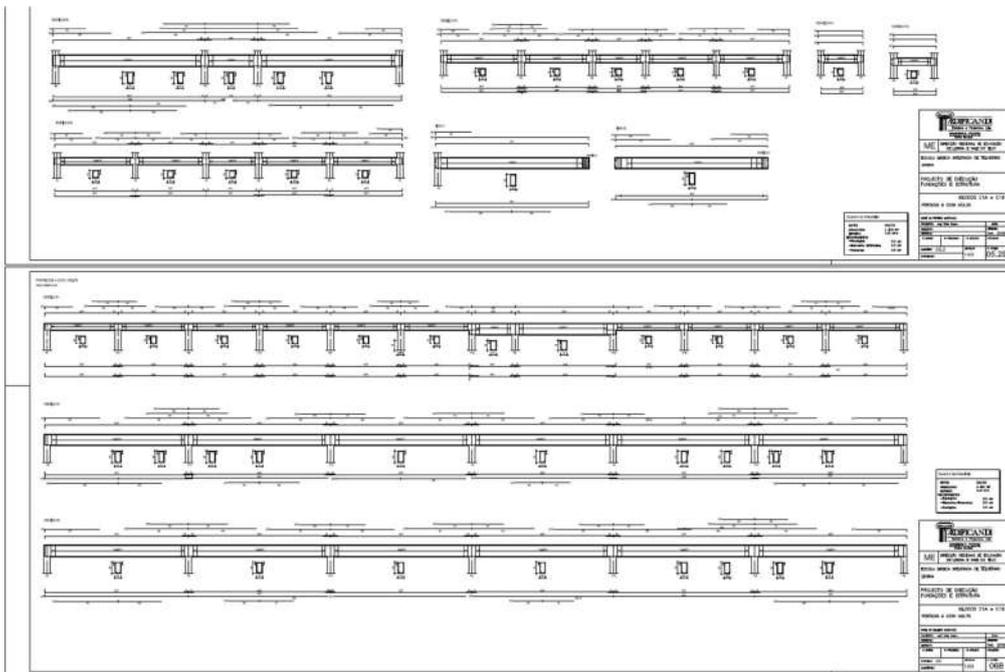
Levantamento arquitetónico da escola tipo "VALE ROSAL" – Piso 2



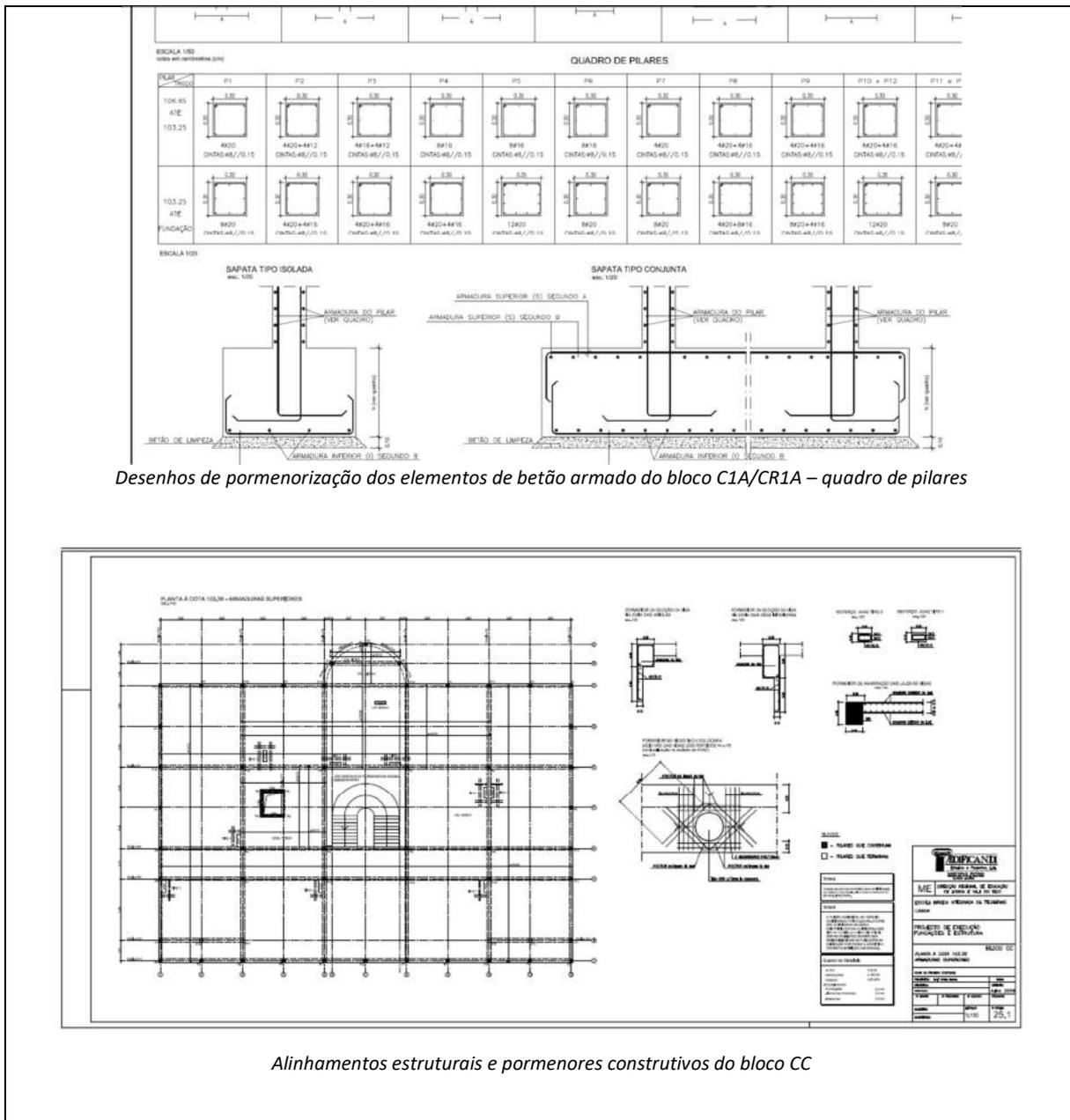
Alçados e cortes do edifício principal

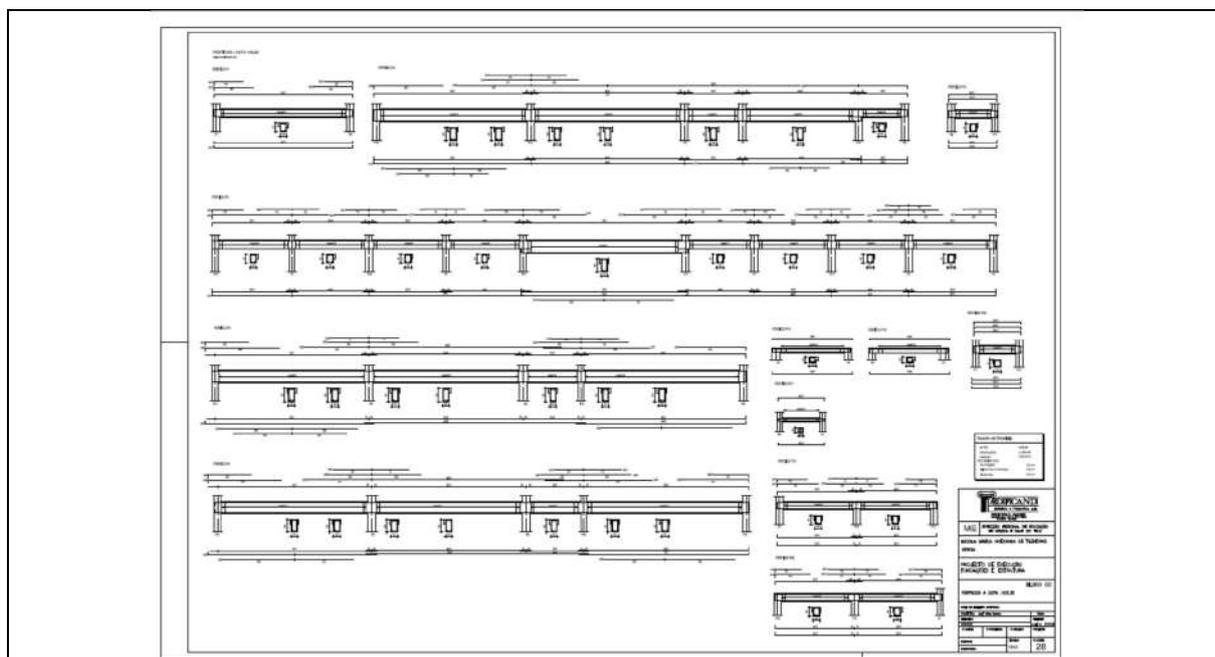


Alinhamentos estruturais e pormenores construtivos do bloco C1A/CR1A

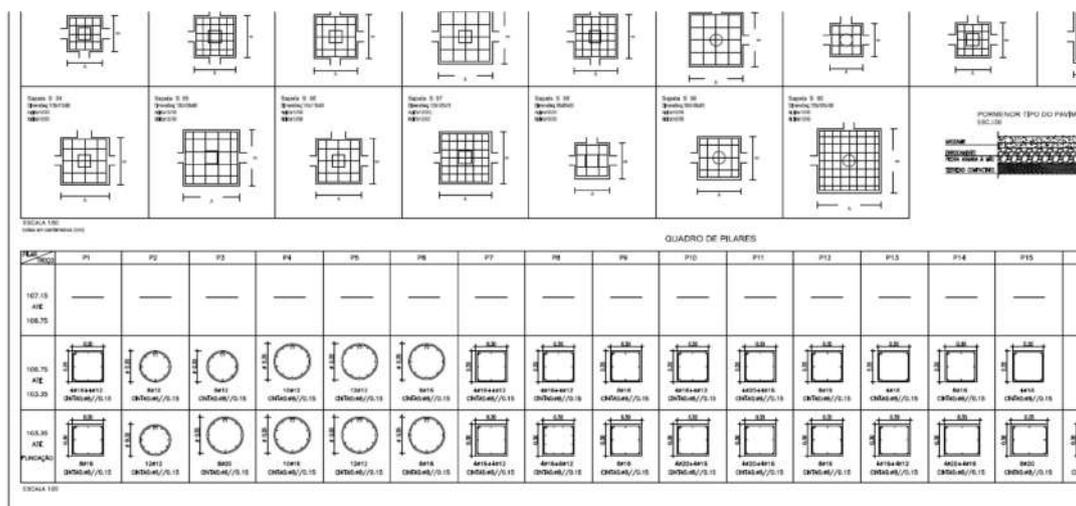


Desenhos de pormenorização dos elementos de betão armado do bloco C1A/CR1A – vigas





Desenhos de pormenorização dos elementos de betão armado do bloco CC – vigas



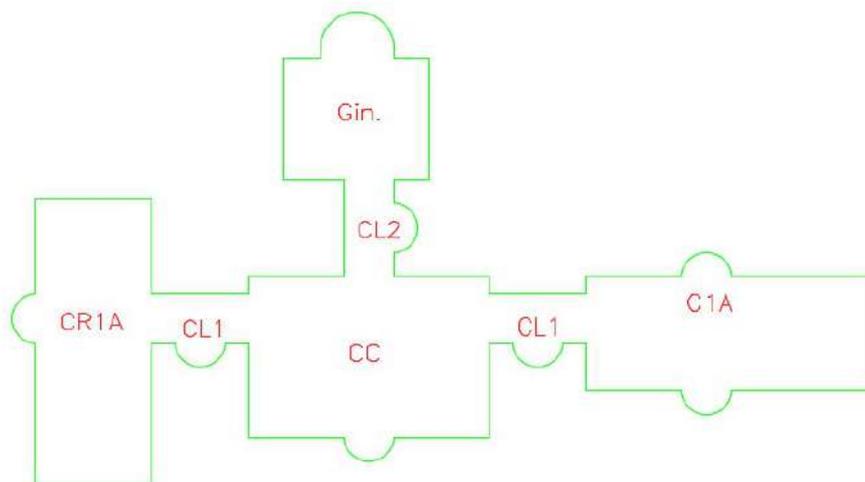
Desenhos de pormenorização dos elementos de betão armado do bloco CC – quadro de pilares

**Caracterização estrutural**

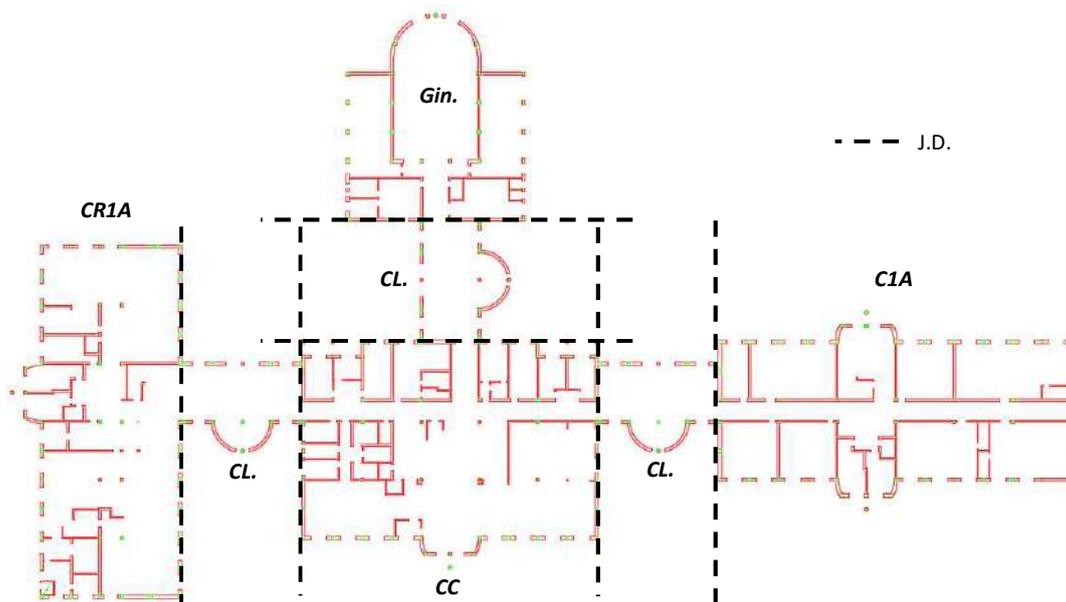
Escola tipo “VALE ROSAL”, com 4 blocos interligados, todos com 2 pisos e um ginásio independente. O edifício de ginásio tem cobertura de madeira e pilares em betão armado. Quanto ao edifício principal, tem várias juntas de dilatação que o separa em vários blocos. Cada um destes blocos, com 2 pisos (à exceção do bloco do ginásio) é constituído por uma estrutura reticulada de pilares e vigas, formando pórtico em ambas as direções.

Tal como representado nas figuras abaixo, a ligação entre os vários blocos é feita por blocos de ligação independentes, também com 2 pisos.

É de salientar que o arranjo geométrico dos blocos varia de escola para escola (dentro da tipologia “VALE ROSAL”). No entanto, a geometria e o arranjo estrutural dos mesmos mantêm-se, sendo apenas variável a posição dos blocos de ligação e o conseqüente rearranjo arquitetónico da escola em planta. Salienta-se também que a distinção entre os blocos CR1A e C1A reside apenas no facto da zona arredondada existir numa das fachadas ou em ambas, pelo que em termos estruturais estes dois blocos são semelhantes.



*Identificação dos blocos da arquitetura tipo das escolas “VALE ROSAL”*



*Planta com identificação das juntas de dilatação, dos blocos tipo e dos pilares*

Os blocos tipo da escola possuem três vãos na direção transversal. Na direção longitudinal os vãos das fachadas têm metade do comprimento (1/3 no caso do bloco CC), relativamente aos alinhamentos

interiores. Existem vigas de bordadura em todo o perímetro dos blocos e vigas que unem os quatro pilares interiores aos pilares do perímetro. As lajes são maciças com 15.0cm de espessura.



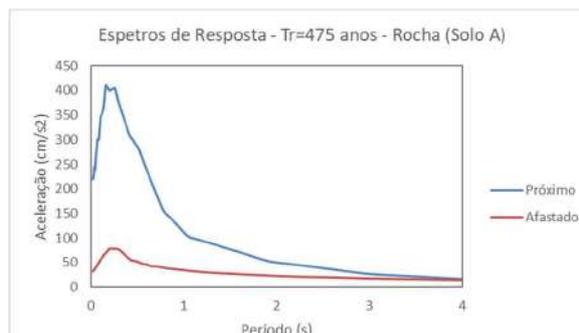
Fotografias da visita à escola: sala de aula com viga aparente (esq.); zona de entrada do bloco CC, com pilares circulares e vigas aparentes (dir.)

Tendo como referência o projeto de estruturas do edifício principal da escola, considera-se:

- Materiais: B25(C25/30) + A400
- Dimensões dos elementos estruturais:
  - Pilares: 0.30x0.30 [mxm] (contínuos em altura)
  - Vigas interiores: 0.30x0.60 [mxm]
  - Vigas bordadura: 0.30x0.40 [mxm]
  - Laje maciça: 0.15m

### Caracterização geotécnica

Com base na carta de solos de que o LNEC dispõe (ver relatório), a EBI São Vicente/Telheiras encontra-se fundada em rocha (solo do tipo A), pelo que não se considera amplificação da ação calculada ao nível do substrato rochoso. Os espetros de resposta em rocha, que resultam de um estudo probabilístico de perigosidade sísmica desenvolvido especificamente no âmbito deste projeto, associados a um período de retorno de 475 anos, encontram-se na figura à direita.



### Modelo numérico

O modelo de cálculo, desenvolvido no programa SeismoStruct, é composto por elementos de barra (*frame*) de plasticidade distribuída com formulação em força. Cada secção destes elementos é definida através de fibras com comportamento uniaxial, associadas a aço ou a betão. Os elementos finitos são definidos tendo em consideração as dimensões acima apresentadas e as armaduras que foram sistematizadas com base no projeto de estruturas desta escola.

As cargas atuantes nas lajes são automaticamente distribuídas pela malha de vigas, enquanto que a sua rigidez é simulada através do cálculo da largura efetiva do banzo das vigas em “T”, o que é feito de forma automática pelo programa de cálculo.

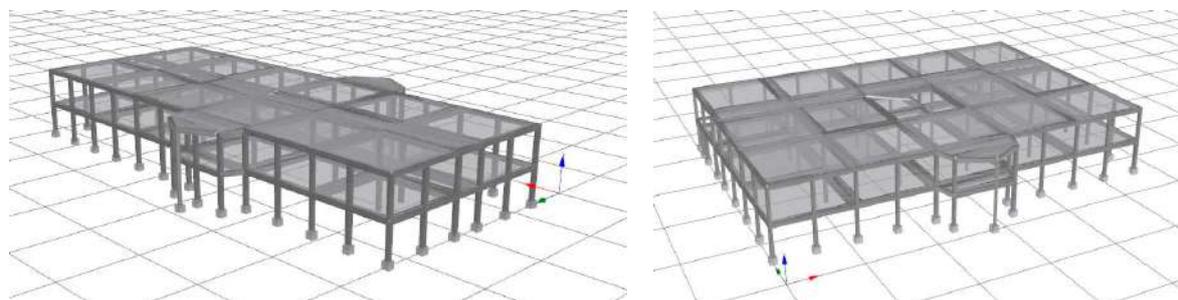
As fibras uniaxiais que definem o comportamento do betão são definidas através do modelo de *Mander et al.*, enquanto que as fibras de aço são definidas através do modelo de comportamento de *Menegotto-Pinto*.

Consideram-se as bases dos pilares com restrições aos deslocamentos e às rotações.

Relativamente às cargas atuantes, adotaram-se as cargas definidas de acordo com a norma portuguesa em vigor (NP EN1991-1-1), para o tipo de edifício em questão. Assim, as cargas permanentes e sobrecargas a considerar na análise são:

Carga	1º Piso	Cobertura
Pavimento (RCP)	1.5 kN/m <sup>2</sup>	2.5 kN/m <sup>2</sup>
Paredes (RCP)	Divisórias: 1.75 kN/m <sup>2</sup> (aplicada na laje do 1º piso) Exteriores: 7.8 kN/m (aplicada nas vigas exteriores do 1º piso)	-
Sobrecarga	Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>	Cobertura não acessível: 0.4 kN/m <sup>2</sup>

Após a aplicação das cargas gravíticas é executada uma análise estática não-linear com controlo de deslocamentos (*pushover*).

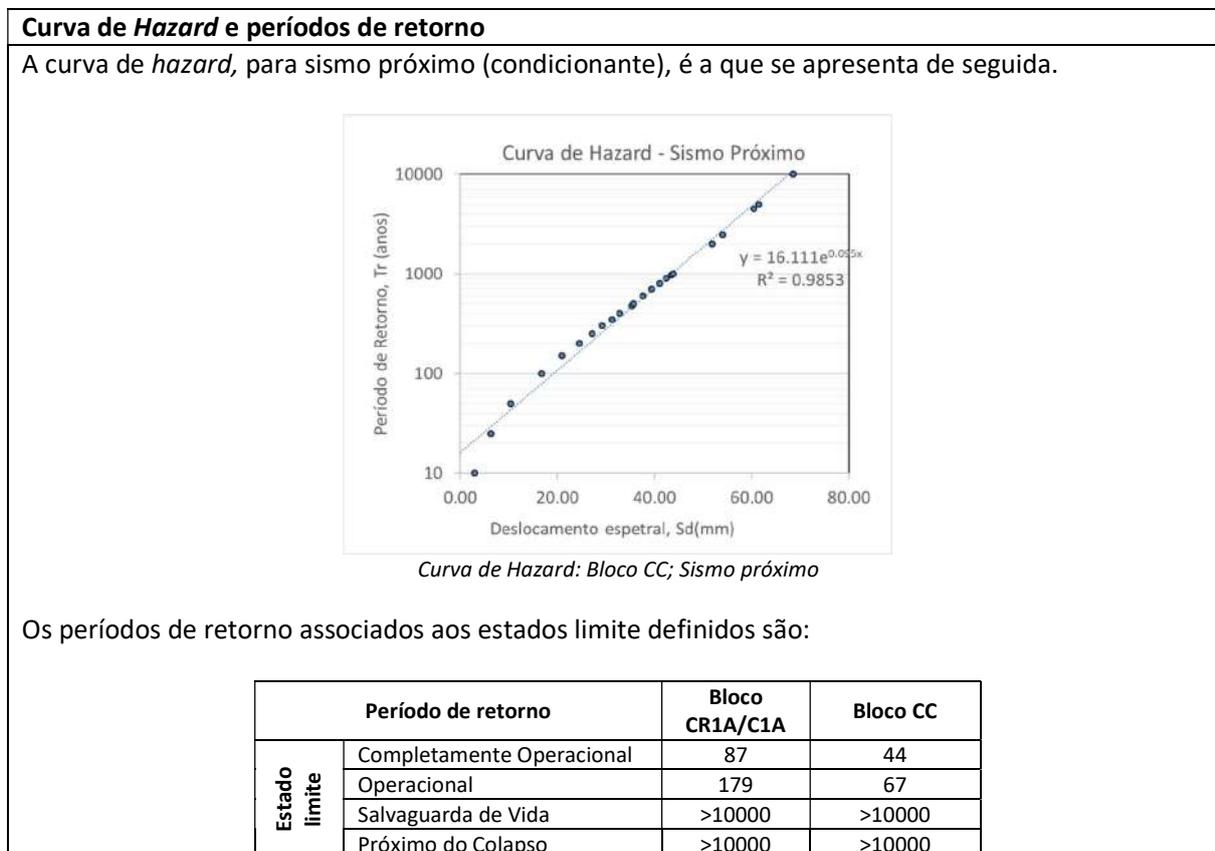
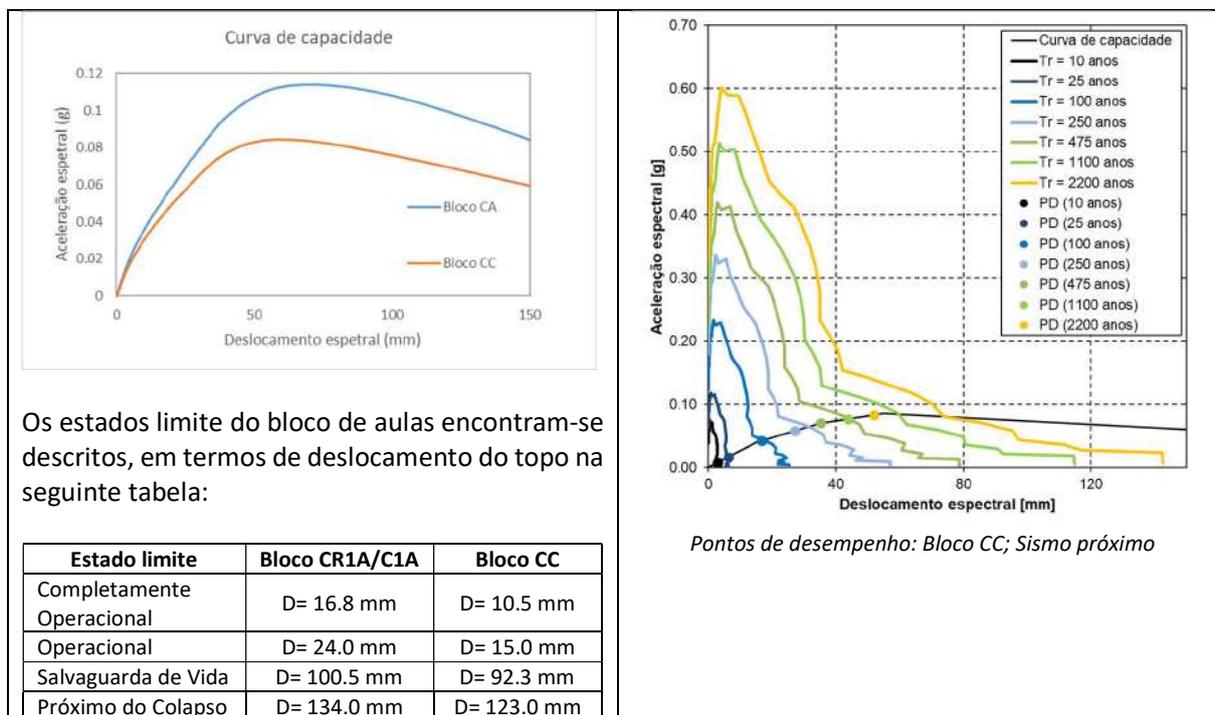


Modelo numérico do bloco tipo da escola no programa SeismoStruct: bloco CR1A (esq.); bloco CC (dir.)

Os períodos de vibração da estrutura, obtidos através do modelo numérico, são:

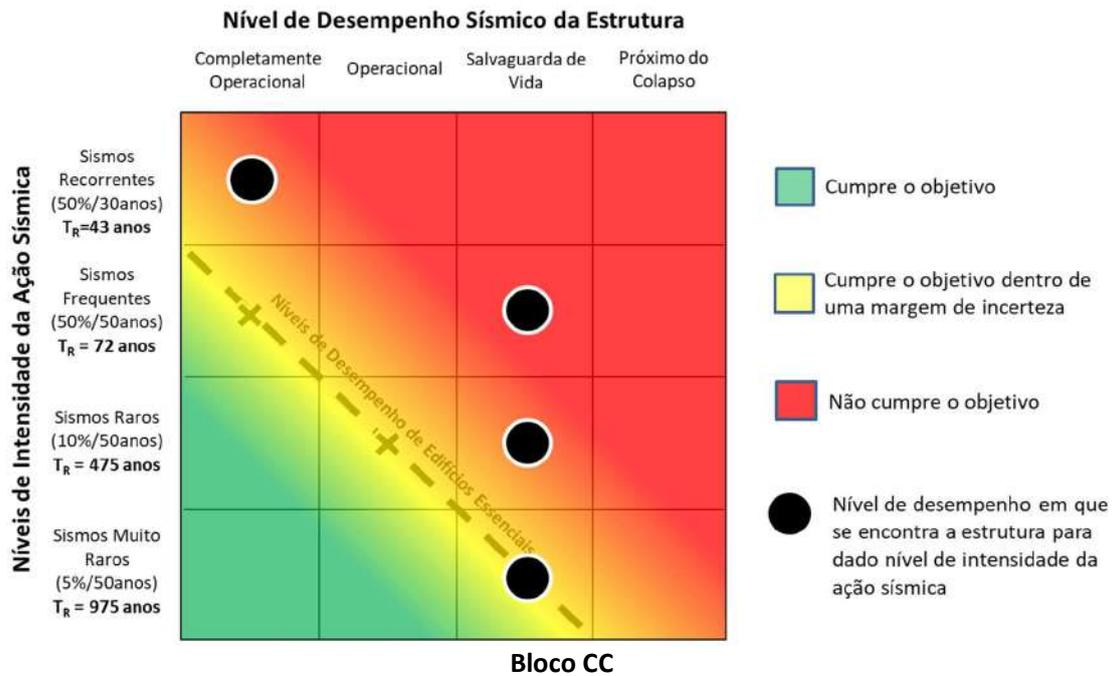
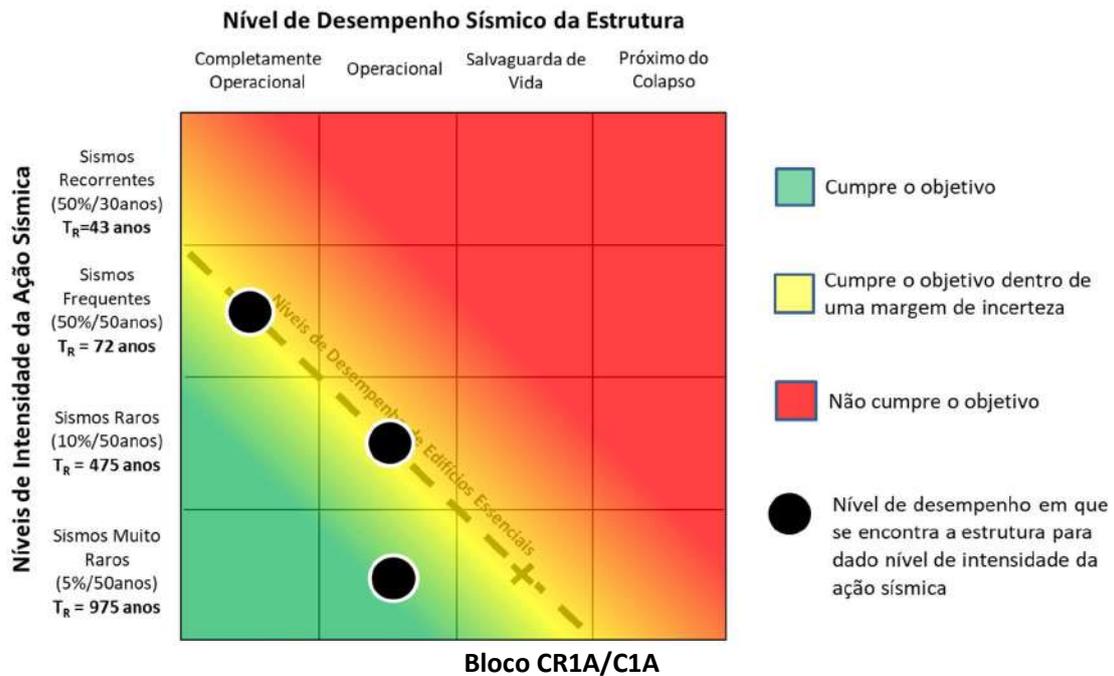
Períodos de vibração	Bloco CR1A/C1A	Bloco CC
1º modo (X)	0.50 s	0.51 s
2º modo (Y)	0.48 s	0.51 s
3º modo (Torção)	0.45 s	0.46 s

Curva de capacidade	Pontos de desempenho
As curvas de capacidade dos blocos CR1A/C1A e CC encontram-se representadas abaixo. O bloco CC é condicionante devido aos maiores vãos na direção transversal, o que aumenta os esforços nos pilares e conseqüentemente conduz à cedência para valores inferiores de carga horizontal.	Determinação dos pontos de desempenho através do método do espectro de capacidade, para os sismos próximo e afastado e 25 períodos de retorno distintos. Nas figuras abaixo apresentam-se apenas 7 dos 25 espectros de resposta considerados, para sismo próximo.



**Matriz de desempenho sísmico**

A matriz de desempenho sísmico, que descreve o comportamento da estrutura de cada um dos blocos que constituem a escola relativamente aos níveis e objetivos de desempenho definidos, é apresentada abaixo.



### Conclusão

Verifica-se que o comportamento da estrutura do edifício principal da escola, que se subdivide em 4 blocos independentes com estrutura porticada em betão armado e lajes vigada, relativamente aos níveis e objetivos de desempenho sísmico definidos é condicionado pelo comportamento do bloco CC.

No caso deste bloco, o comportamento sísmico é satisfatório para sismos muito raros, i.e. sismos com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 5% em 50 anos (um período de retorno de 975 anos). No entanto, para sismos com maior probabilidade de ocorrência, o edifício não respeita os objetivos de desempenho estabelecidos para um edifício classificado como essencial, encontrando-se na zona vermelha da matriz de desempenho apresentada acima. Nessas circunstâncias, é expectável que o edifício se encontre num nível de dano acima do expectável para estes níveis de intensidade da ação sísmica, limitando a sua operacionalidade e possível utilização em cenários pós-sismo.

Não obstante, conclui-se que para este tipo de edifícios não é verosímil que a estrutura se encontre próxima do colapso para nenhum destes níveis de intensidade da ação sísmica.

Tendo por base estas conclusões, é recomendado que a estrutura seja reforçada, nomeadamente no que diz respeito a elementos não estruturais que podem ser afetados por sismos de intensidade moderada a baixa, e que podem limitar a sua operacionalidade e causar perdas económicas elevadas.



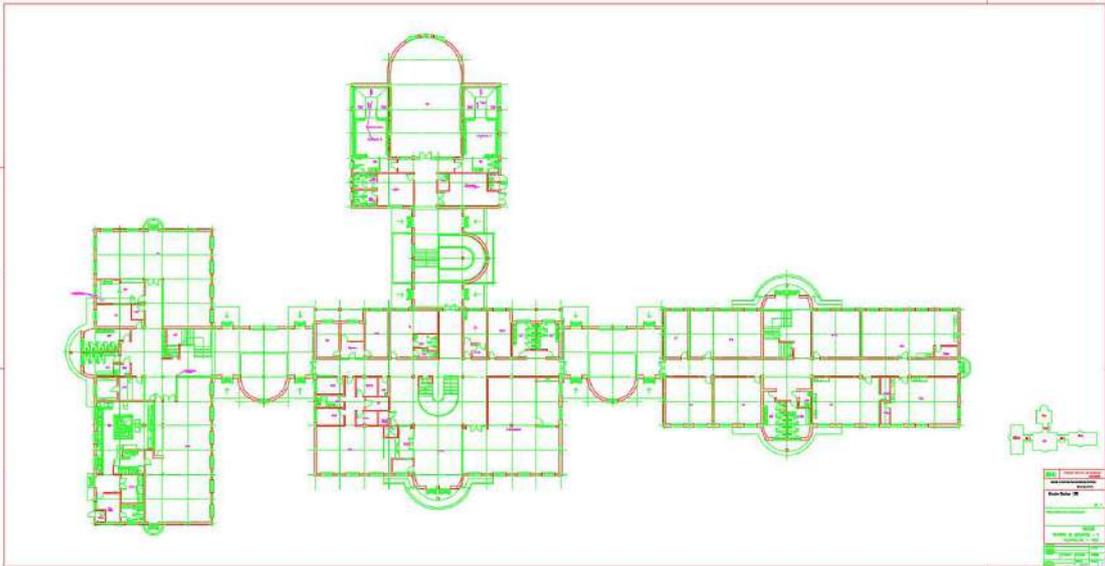
# Escola Básica Telheiras

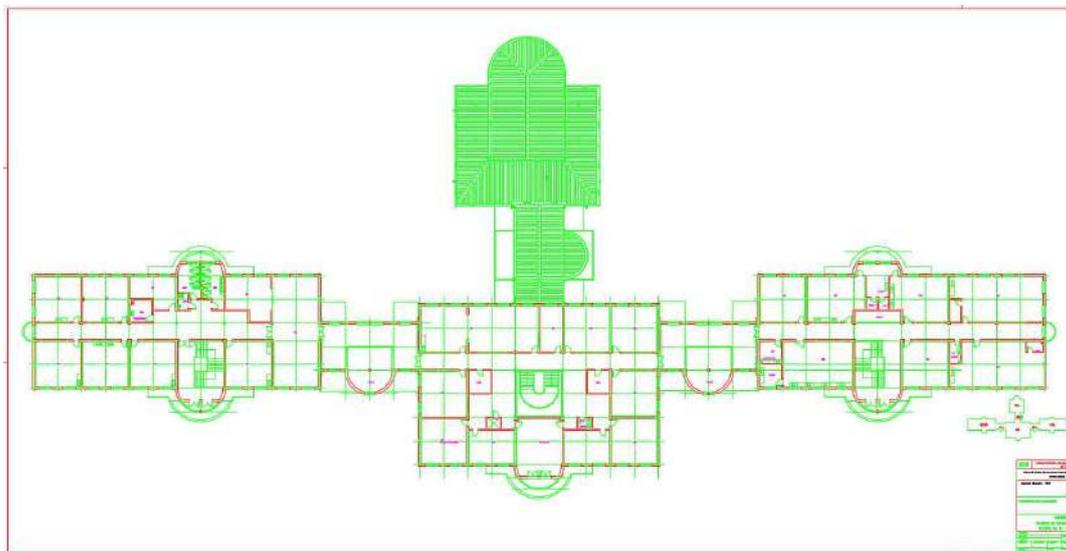
ID Escola: 147

Escola	Agrupamento	Área coberta
Escola Básica Telheiras	Vergílio Ferreira	3500 m <sup>2</sup>

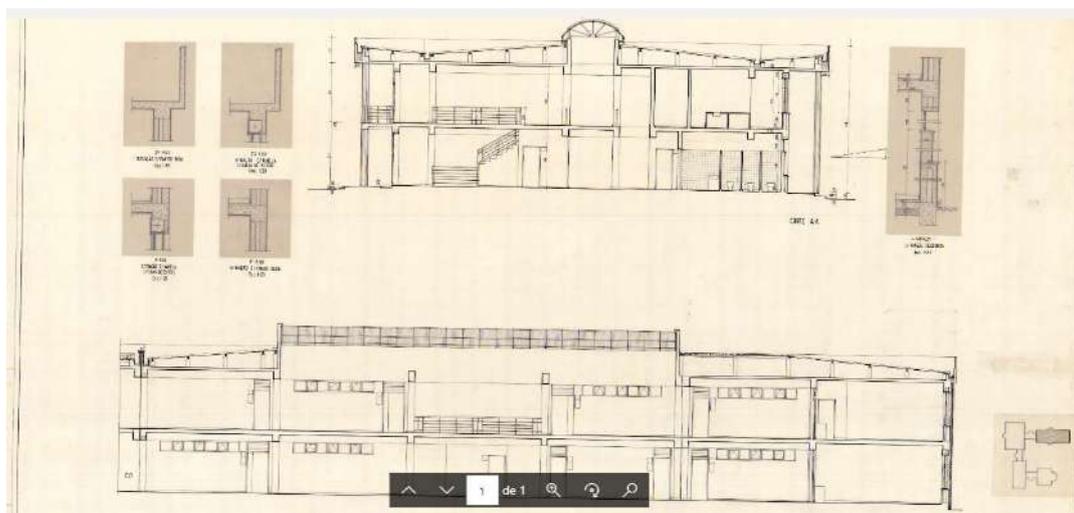
Nível de ensino	Número de alunos
Básico com 2º e 3º ciclos	595 alunos

Descrição geral	
<p>A escola localiza-se na freguesia do Lumiar, com acessos largos e com presença de outras estruturas junto aos limites do seu terreno apenas de um dos lados. Tais estruturas contíguas são edifícios habitacionais de média dimensão não se prevendo, portanto, a possibilidade de interação sísmica com estas estruturas.</p> <p>Existe espaço dentro da escola, nomeadamente na zona do campo de jogos, para evacuação e encontro em caso de ocorrência de evento sísmico.</p>	 <p><i>Imagem aérea do Google Earth</i></p>

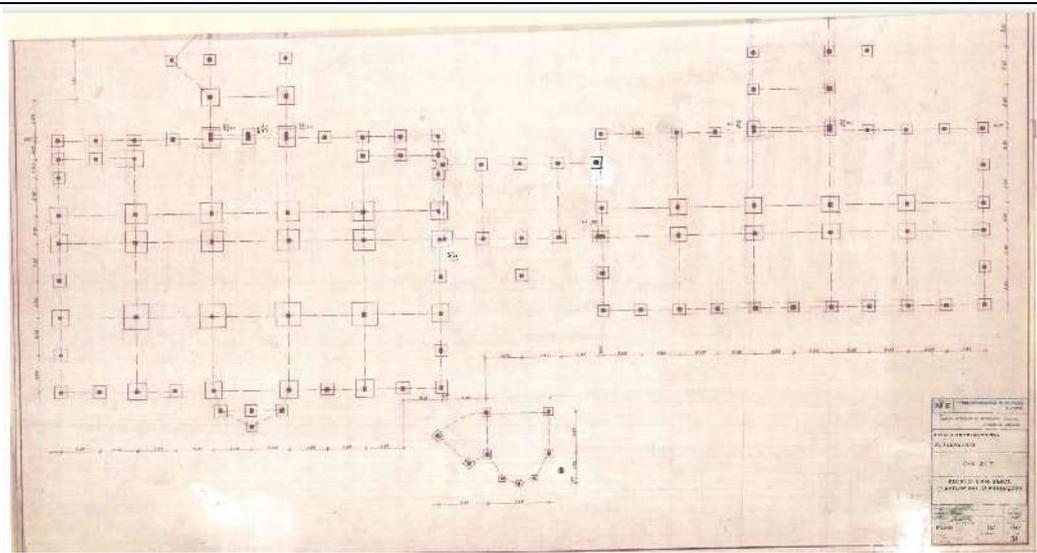
Informação de base
<p>Estão disponíveis desenhos de projeto no <i>Atlas of School Architecture in Portugal</i>, que incluem desenhos de arquitetura e de estruturas. Estes desenhos complementam o levantamento arquitetónico fornecido pela CML, que corresponde à arquitetura tipo das escolas “VALE ROSAL”. A escola foi visitada pelo Departamento de edifícios do LNEC, sendo a informação visual então recolhida considerada no desenvolvimento desta análise.</p>
 <p><i>Levantamento arquitetónico da escola tipo “VALE ROSAL” – Piso 1</i></p>



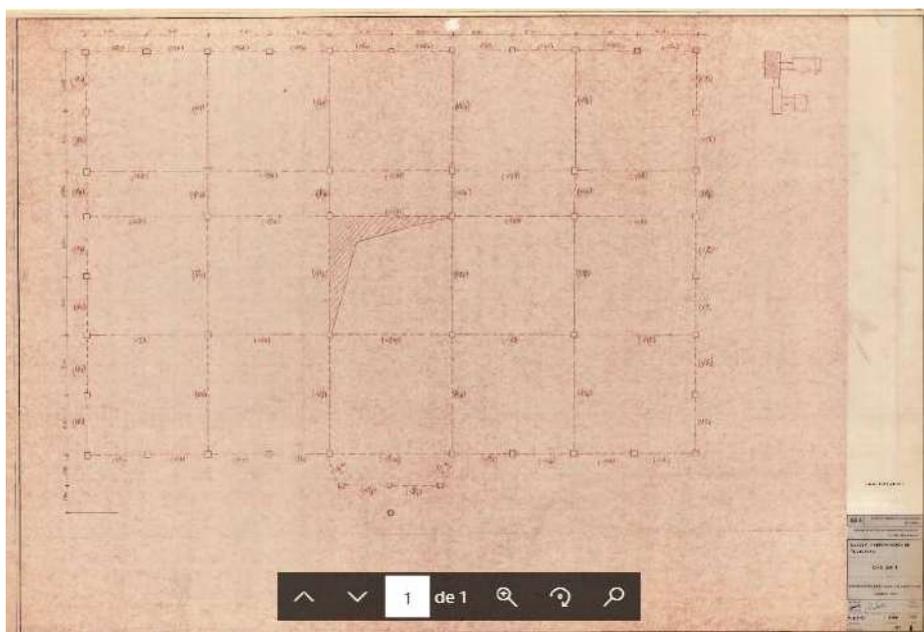
Levantamento arquitetónico da escola tipo "VALE ROSAL" – Piso 2



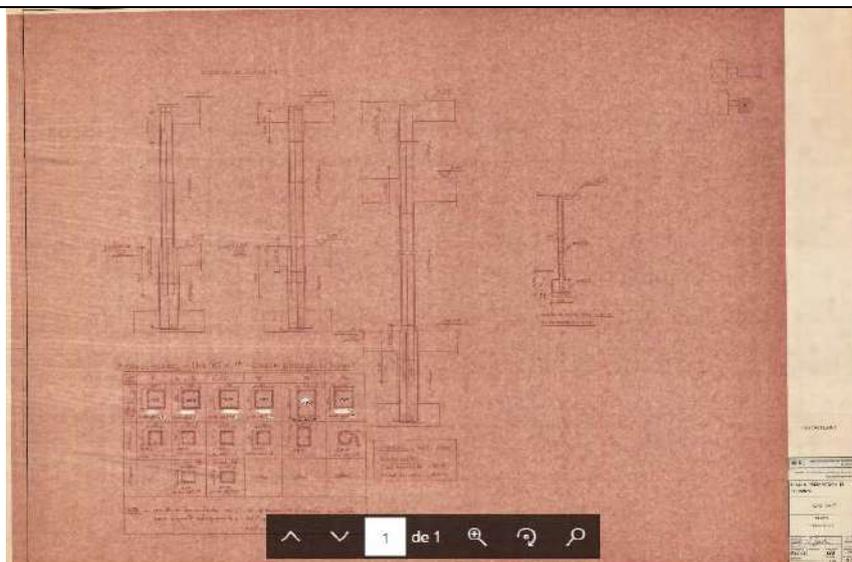
Corte transversal e longitudinal do bloco CR1A



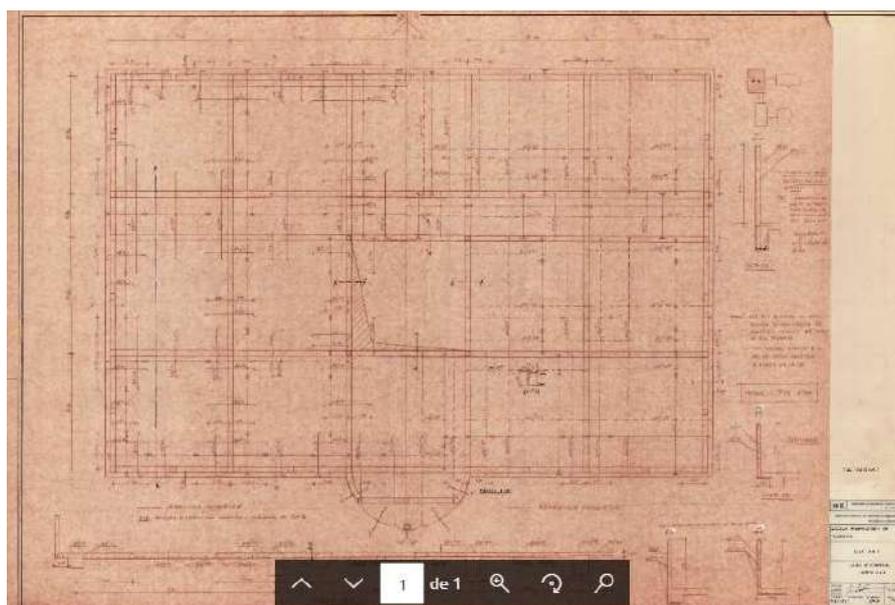
*Planta de fundações dos blocos CC e CR1A*



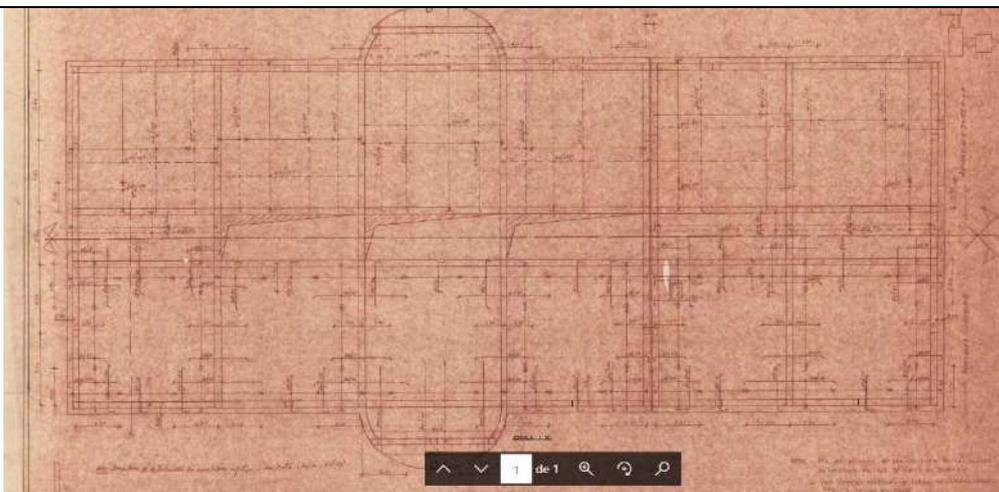
*Alinhamentos estruturais do bloco CC*



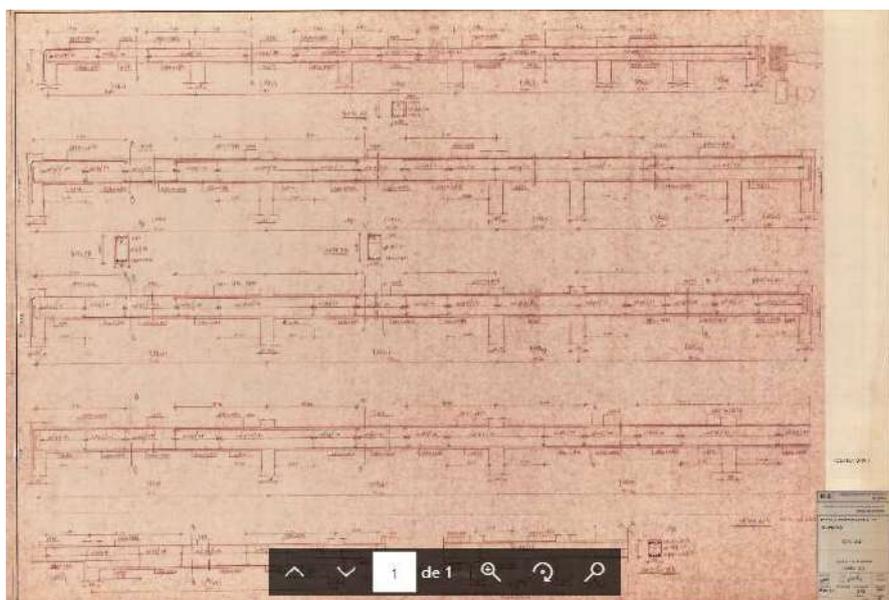
*Desenhos de pormenorização dos elementos de betão armado do bloco CC – armaduras de pilares*



*Desenhos de pormenorização dos elementos de betão armado do bloco CC – armaduras das lajes*



*Desenhos de pormenorização dos elementos de betão armado do bloco CR1A/C1A – armaduras das lajes*



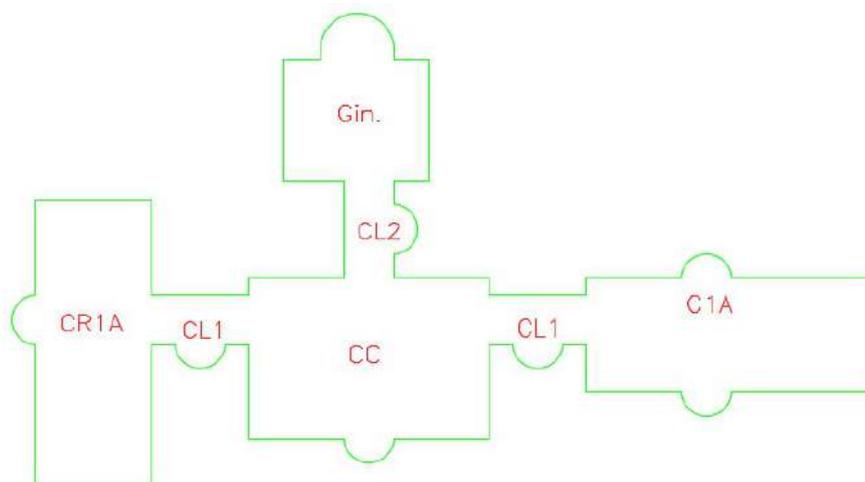
*Desenhos de pormenorização dos elementos de betão armado do bloco CC – armaduras de vigas*

### **Caracterização estrutural**

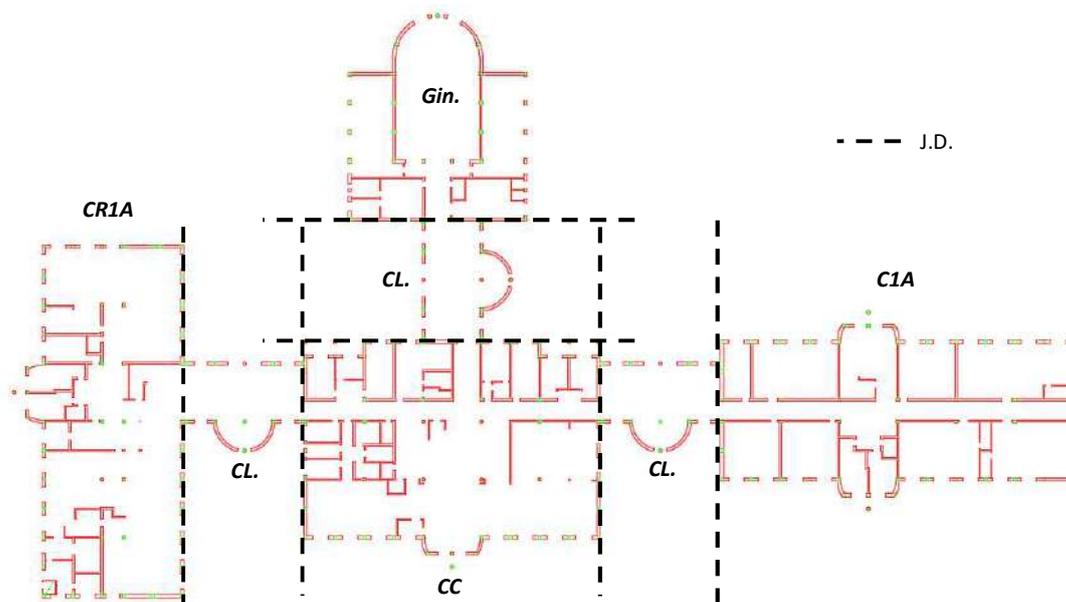
Escola tipo “VALE ROSAL”, com 4 blocos interligados, de entre os quais 2 blocos com 2 pisos, 1 bloco com 1 piso (correspondente ao refeitório) e 1 bloco de ginásio. Assim, o edifício principal corresponde ao conjunto dos dois blocos com 2 pisos. Estes blocos são separados por juntas de dilatação e são constituídos por uma estrutura reticulada de pilares e vigas, formando pórtico em ambas as direções. Tal como representado nas figuras abaixo, a ligação entre os vários blocos é feita por blocos de ligação independentes, também com 2 pisos.

É de salientar que o arranjo geométrico dos blocos varia de escola para escola (dentro da tipologia “VALE ROSAL”). No entanto, a geometria e o arranjo estrutural dos mesmos mantêm-se, sendo apenas variável a posição dos blocos de ligação e o conseqüente rearranjo arquitetónico da escola em planta. Salienta-se também que a distinção entre os blocos CR1A e C1A reside apenas no facto da zona

arredondada existir numa das fachas ou em ambas, pelo que em termos estruturais estes dois blocos são semelhantes.



*Identificação dos blocos da arquitetura tipo das escolas "VALE ROSAL"*



*Planta com identificação das juntas de dilatação, dos blocos tipo e dos pilares*

Os blocos tipo da escola possuem três vãos na direção transversal. Na direção longitudinal os vãos das fachadas têm metade do comprimento (1/3 no caso do bloco CC), relativamente aos alinhamentos interiores. Existem vigas de bordadura em todo o perímetro dos blocos e vigas que unem os quatro pilares interiores aos pilares do perímetro. As lajes são maciças com 15.0cm de espessura.



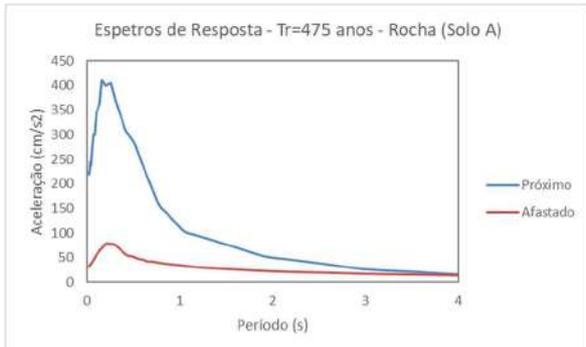
Fotografias da visita à escola: zona de escadas do bloco CC com pilares circulares e vigas aparentes

Tendo como referência o projeto de estruturas do edifício principal da escola, considera-se:

- Materiais: C20/25 + A400
- Dimensões dos elementos estruturais:
  - Pilares: 0.35x0.35 [mxm] (contínuos em altura)
  - Vigas interiores: 0.35x0.65 [mxm]
  - Vigas bordadura: 0.35x0.40 [mxm]
  - Laje maciça: 0.15m

### Caracterização geotécnica

Com base na carta de solos de que o LNEC dispõe (ver relatório), a EB Telheiras encontra-se fundada em rocha (solo do tipo A), pelo que não se considera amplificação da ação calculada ao nível do substrato rochoso. Os espectros de resposta em rocha, que resultam de um estudo probabilístico de perigosidade sísmica desenvolvido especificamente no âmbito deste projeto, associados a um período de retorno de 475 anos, encontram-se na figura à direita.



### Modelo numérico

O modelo de cálculo, desenvolvido no programa SeismoStruct, é composto por elementos de barra (*frame*) de plasticidade distribuída com formulação em força. Cada secção destes elementos é definida através de fibras com comportamento uniaxial, associadas a aço ou a betão. Os elementos finitos são definidos tendo em consideração as dimensões acima apresentadas e as armaduras que foram sistematizadas com base no projeto de estruturas desta escola, tal como descrito nas tabelas abaixo.

Armaduras de pilares

Arm. Long.; Arm. Transv.;	Centrais	Perímetro	Canto e redondel	Circulares (Bloco CC)
Piso 1	12Φ25+4Φ20; Φ8//0.28	12Φ25; Φ8//0.28	4Φ25+8Φ20; Φ8//0.28	8Φ25; Φ8//0.25
Piso 2	4Φ25; Φ8//0.28	8Φ25; Φ8//0.28	4Φ25; Φ8//0.28	8Φ25; Φ8//0.25

*Armaduras de vigas*

Arm. Long.; Arm. Transv.;	Extremidade	Sobre pilares interior	Meio-vão
<b>Piso 1 - vigas longitudinais</b>	inf 4Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 1Φ20+4Φ16; sup 3Φ25+5Φ16; Φ8//0.10	inf 2Φ20+4Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.20
<b>Piso 1 - vigas transversais</b>	inf 4Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 4Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 3Φ20+4Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.20
<b>Piso 1 - vigas bordadura</b>	inf 3Φ20+3Φ16; sup 3Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 2Φ20+3Φ16; sup 2Φ25+3Φ16; Φ8//0.10	inf 3Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.10
<b>Piso 2 - vigas longitudinais</b>	inf 4Φ12; sup 2Φ20+3Φ16; Φ6//0.10	inf 4Φ12; sup 2Φ20+3Φ16; Φ6//0.10	inf 2Φ16+4Φ12; sup 3Φ16; Φ6//0.25
<b>Piso 2 - vigas transversais</b>	inf 3Φ16; sup 2Φ20+3Φ16; Φ6//0.10	inf 3Φ16; sup 2Φ20+3Φ16; Φ6//0.10	inf 2Φ20+3Φ16; sup 3Φ16; Φ6//0.25
<b>Piso 2 - vigas bordadura</b>	inf 6Φ12; sup 3Φ16+3Φ12; Φ6//0.10	inf 4Φ12; sup 3Φ16+3Φ12; Φ6//0.10	inf 4Φ12; sup 3Φ12; Φ6//0.20

As lajes são armadas com Φ10//0.125 em ambas as faces e em ambas as direções, existindo reforços para momentos negativos sobre as vigas interiores e junto à bordadura. As cargas atuantes nas lajes são automaticamente distribuídas pela malha de vigas, enquanto que a sua rigidez é simulada através do cálculo da largura efetiva do banzo das vigas em “T”, o que é feito de forma automática pelo programa de cálculo.

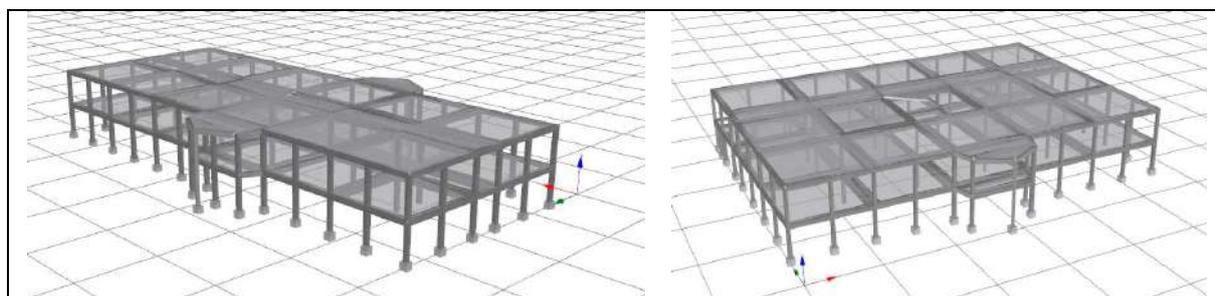
As fibras uniaxiais que definem o comportamento do betão são definidas através do modelo de *Mander et al.*, enquanto que as fibras de aço são definidas através do modelo de comportamento de *Menegotto-Pinto*.

Consideram-se as bases dos pilares com restrições aos deslocamentos e às rotações.

Relativamente às cargas atuantes, adotaram-se as cargas definidas de acordo com a norma portuguesa em vigor (NP EN1991-1-1), para o tipo de edifício em questão. Assim, as cargas permanentes e sobrecargas a considerar na análise são:

Carga	1º Piso	Cobertura
<b>Pavimento (RCP)</b>	1.5 kN/m <sup>2</sup>	2.5 kN/m <sup>2</sup>
<b>Paredes (RCP)</b>	<u>Divisórias</u> : 1.75 kN/m <sup>2</sup> (aplicada na laje do 1º piso) <u>Exteriores</u> : 7.8 kN/m (aplicada nas vigas exteriores do 1º piso)	-
<b>Sobrecarga</b>	Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>	Cobertura não acessível: 0.4 kN/m <sup>2</sup>

Após a aplicação das cargas gravíticas é executada uma análise estática não-linear com controlo de deslocamentos (*pushover*).



Modelo numérico do bloco tipo da escola no programa SeismoStruct: bloco CR1A (esq.); bloco CC (dir.)

Os períodos de vibração da estrutura, obtidos através do modelo numérico, são:

Períodos de vibração	Bloco CR1A/C1A	Bloco CC
1º modo (X)	0.39 s	0.39 s
2º modo (Y)	0.37 s	0.38 s
3º modo (Torção)	0.35 s	0.33 s

### Curva de capacidade

As curvas de capacidade dos blocos CR1A/C1A e CC encontram-se representadas abaixo. O bloco CC tem menor rigidez e resistência máxima. No entanto, apresenta maior ductilidade do que o bloco CR1A/C1A, que por sua vez apresenta uma rotura frágil, condicionada pelo corte dos pilares.

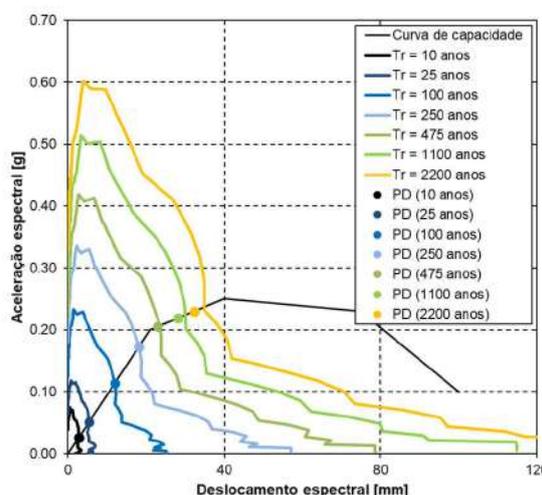


Os estados limite do bloco de aulas encontram-se descritos, em termos de deslocamento do topo na seguinte tabela:

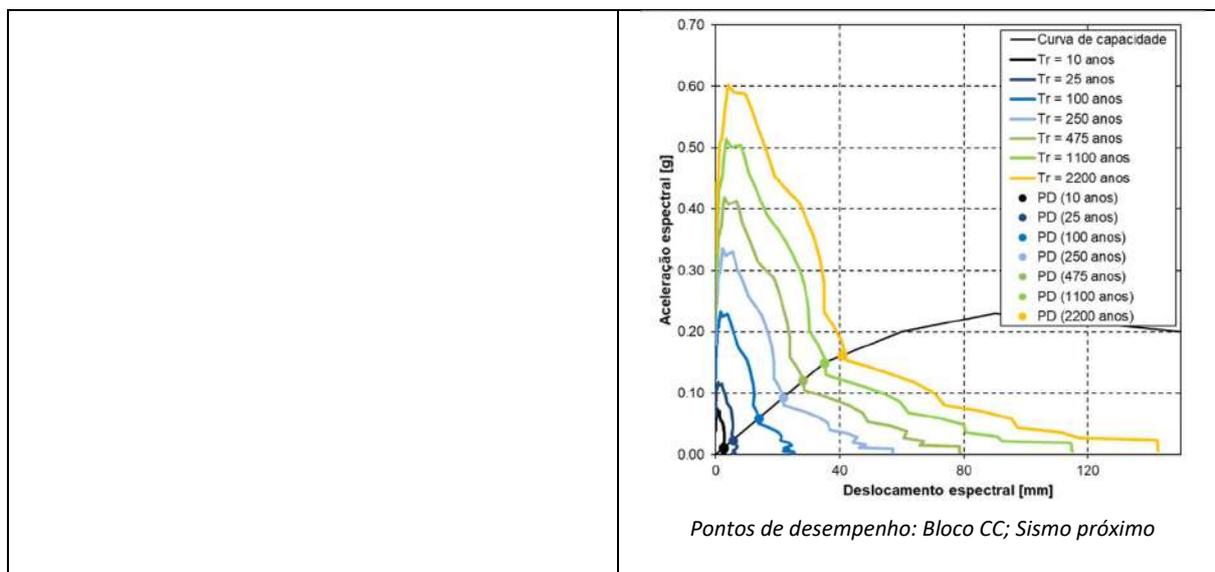
Estado limite	Bloco CR1A/C1A	Bloco CC
Completamente Operacional	D= 14.7 mm	D= 24.5 mm
Operacional	D= 21.0 mm	D= 35.0 mm
Salvaguarda de Vida	D= 45.0 mm	D= 112.5 mm
Próximo do Colapso	D= 60.0 mm	D= 150.0 mm

### Pontos de desempenho

Determinação dos pontos de desempenho através do método do espectro de capacidade, para os sismos próximo e afastado e 25 períodos de retorno distintos. Nas figuras abaixo apresentam-se apenas 7 dos 25 espectros de resposta considerados, para sismo próximo.

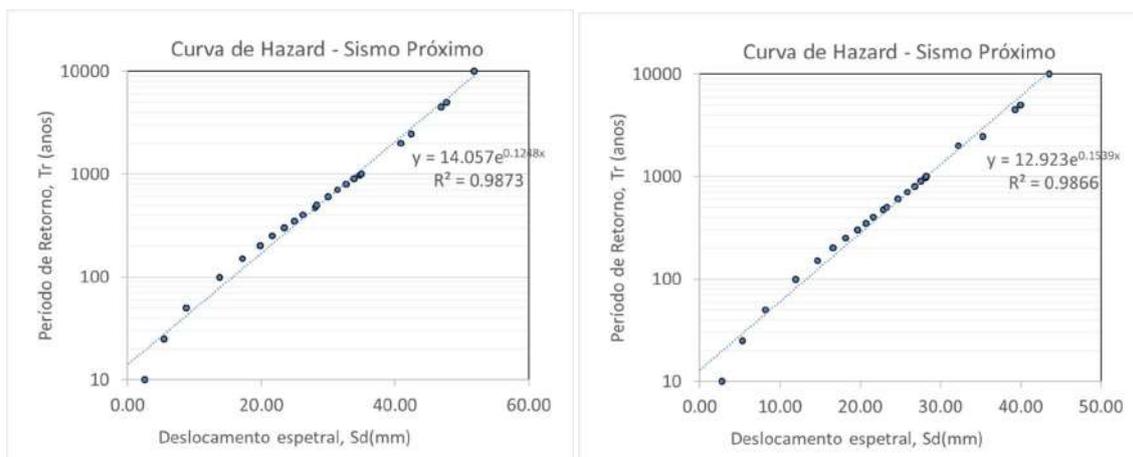


Pontos de desempenho: Bloco CR1A/C1A; Sismo próximo



**Curva de Hazard e períodos de retorno**

A curva de hazard, para sismo próximo (condicionante), é a que se apresenta de seguida.



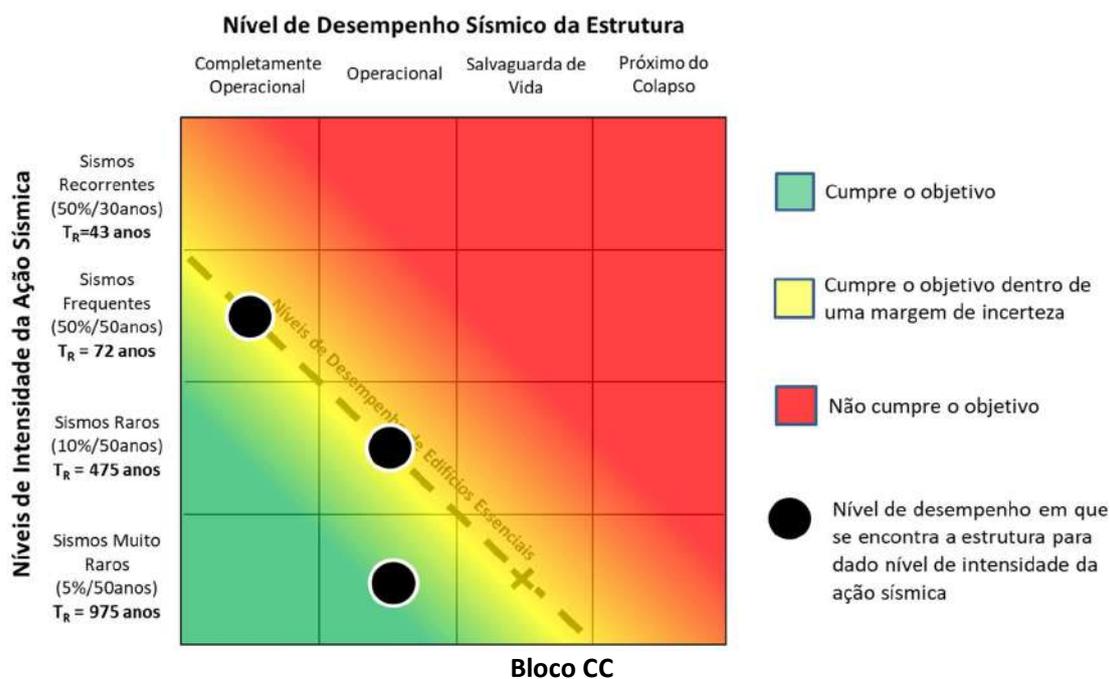
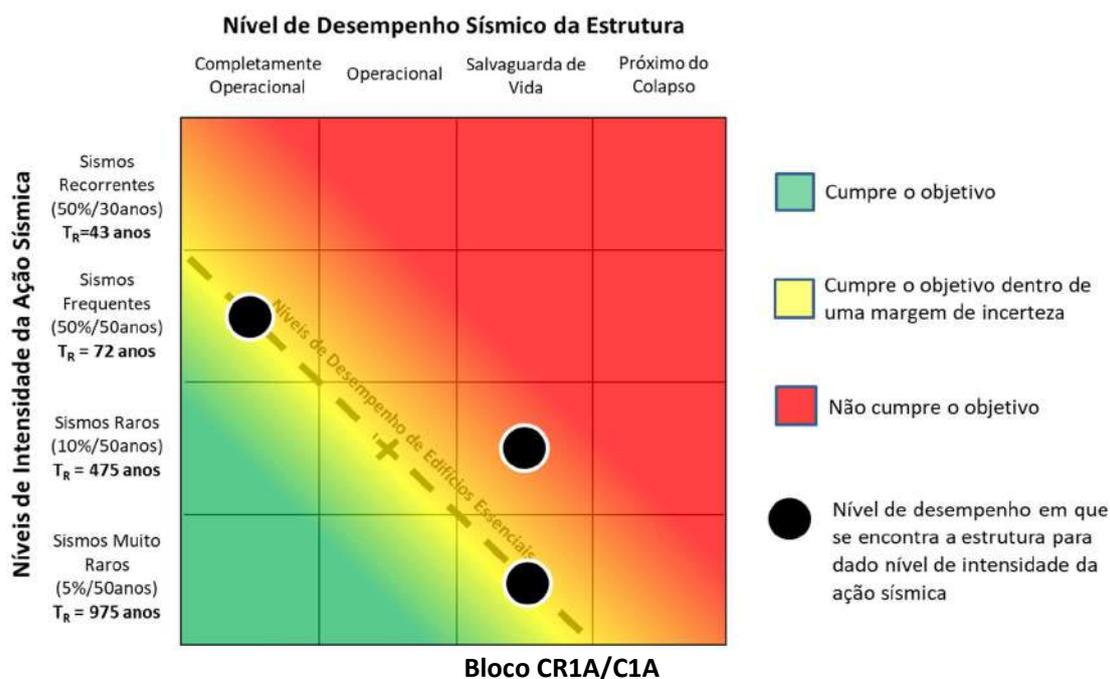
Curva de Hazard: Sismo próximo; Bloco CC (esq.); Bloco CR1A/C1A (dir.)

Os períodos de retorno associados aos estados limite definidos são:

Período de retorno		Bloco CR1A/C1A	Bloco CC
Estado limite	Completamente Operacional	124	299
	Operacional	327	1109
	Salvaguarda de Vida	>10000	>10000
	Próximo do Colapso	>10000	>10000

### Matriz de desempenho sísmico

A matriz de desempenho sísmico, que descreve o comportamento da estrutura de cada um dos blocos que constituem a escola relativamente aos níveis e objetivos de desempenho definidos, é apresentada abaixo.



### Conclusão

Verifica-se que o comportamento da estrutura do edifício principal da escola, que se subdivide em 4 blocos independentes com estrutura porticada em betão armado e lajes vigadas, relativamente aos níveis e objetivos de desempenho sísmico definidos é condicionado pelo comportamento do bloco CR1A/C1A.

No caso deste bloco, o comportamento sísmico é satisfatório para sismos muito raros, i.e. sismos com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 5% em 50 anos (um período de retorno de 975 anos) e também para sismos frequentes, i.e. sismos com probabilidade de ocorrência igual ou superior a 50% em 50 anos (período de retorno de 72 anos). No entanto, entre estes dois patamares, ou seja, para sismos raros com probabilidade de ocorrência situada entre as duas probabilidades anteriormente referidas, o comportamento do edifício não respeita os objetivos de desempenho estabelecidos para um edifício classificado como essencial, encontrando-se na zona vermelha da matriz de desempenho apresentada acima. Nessas circunstâncias, é expectável que o edifício se encontre num nível de dano acima do expectável para este nível de intensidade da ação sísmica, limitando a sua operacionalidade e possível utilização em cenários pós-sismo.

Não obstante, conclui-se que para este tipo de edifícios não é verosímil que a estrutura se encontre próxima do colapso para nenhum destes níveis de intensidade da ação sísmica.

Tendo por base estas conclusões, é recomendado que a estrutura seja reforçada, nomeadamente no que diz respeito a elementos não estruturais que podem ser afetados por sismos de intensidade moderada a baixa, e que podem limitar a sua operacionalidade e causar perdas económicas elevadas.



# Escola Artística Instituto Gregoriano de Lisboa

ID Escola: -

Escola	Agrupamento	Área coberta
Escola Artística do Instituto Gregoriano de Lisboa	Não agrupada	259 m <sup>2</sup>

Nível de ensino	Número de alunos
Escola Artística	475 alunos

**Descrição geral**

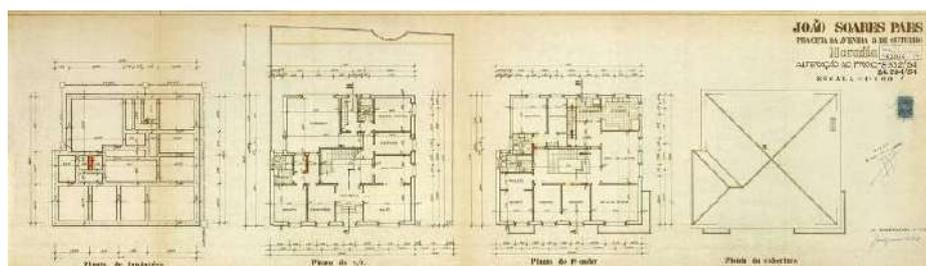
A escola está localizada na extremidade Norte da Avenida 5 de Outubro e inserida numa zona consolidada de utilização mista (residencial e de comércio e serviços). É composta por um único edifício, de dois pisos e geminada com um prédio de 8 andares, enquadrado na tipologia de construção de estrutura mista alvenaria-betão.



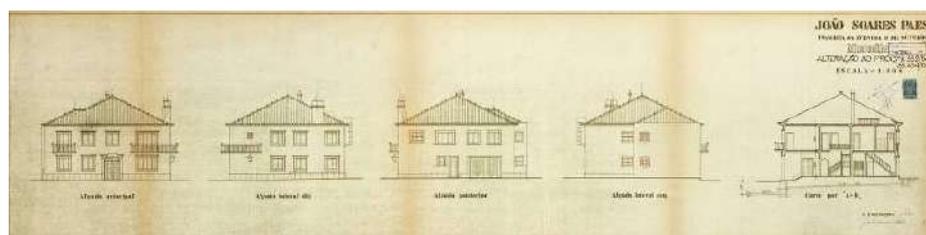
Imagem da escola  
(fonte: Google Earth)

**Informação de base**

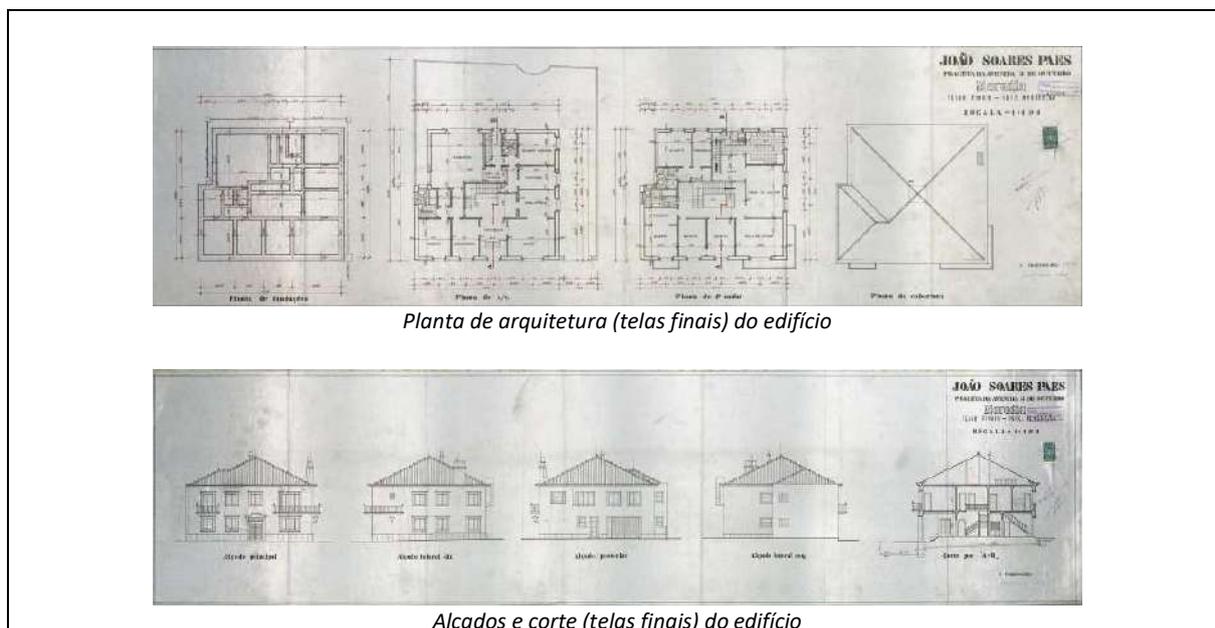
O estudo realizado baseou-se no projeto de alterações e telas finais de arquitetura (plantas, cortes e alçados), ambos datados de 1954, disponibilizados pelo Departamento de Educação da Câmara Municipal de Lisboa e no conhecimento existente no LNEC sobre este tipo de estruturas.



Planta de arquitetura do projeto de alterações do edifício



Alçados e corte do projeto de alterações do edifício



**Caracterização estrutural**

O edifício apresenta uma planta praticamente quadrada, com cerca de 16m por 15m, e uma altura entre pisos de 3,7m.

Atendendo à tipologia construtiva, estima-se que o edifício seja do tipo “placa”, com paredes resistentes em alvenaria, lajes de betão armado orientadas na direção do menor vão de cada divisão, e eventualmente vigas de betão armado quando tal seja exigido para reduzir os vão das lajes e/ou suportar as cargas verticais.

As fundações são diretas por meio de sapatas corridas sob as paredes de alvenaria. As paredes resistentes desenvolvem-se em duas direções ortogonais, com elevada densidade em cada direção. A cobertura é inclinada, com quatro águas.

**Caracterização geotécnica**

Com base na carta de solos de que o LNEC dispõe, a EA Instituto Gregoriano encontra-se fundada em solo do tipo H, pelo que se considera a amplificação da ação calculada ao nível do substrato rochoso com base na coluna de solo respetiva (coluna H). Os espectros de resposta, que resultam de um estudo probabilístico de perigosidade sísmica desenvolvido especificamente no âmbito deste projeto, associados a um período de retorno de 475 anos, encontram-se na figura à direita.

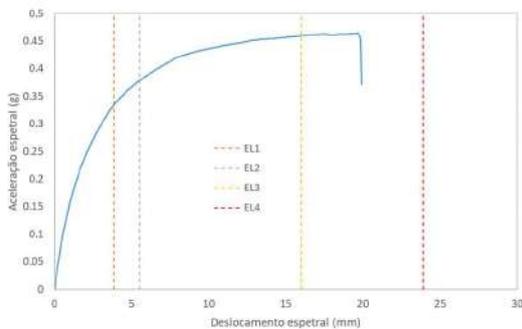


**Modelo numérico**

Dada a ausência de informação sobre o projeto de estrutura do edifício que permita recolher dados sobre o seu dimensionamento, nomeadamente no que diz respeito a materiais e ações consideradas, e atendo ao facto de se tratar de um edifício regular, com configuração perfeitamente tipificada dentro da tipologia de edifícios de alvenaria com pisos rígidos, foi adotada para este edifício uma curva de capacidade baseada em estudos anteriores realizados no LNEC sobre a vulnerabilidade sísmica deste tipo de edifícios.

**Curva de capacidade**

A curva de capacidade, isto é, o gráfico que relaciona a força lateral total (também passível de ser transformada em aceleração espectral) com o deslocamento horizontal da estrutura (deslocamento espectral) encontra-se representada abaixo. Esta curva é baseada em trabalho de investigação do LNEC no âmbito da avaliação sísmica de edifícios de alvenaria com pavimentos rígidos. A curva aqui utilizada corresponde a uma curva mediana de entre as tipologias mais resistentes (sem patologias) estudadas.

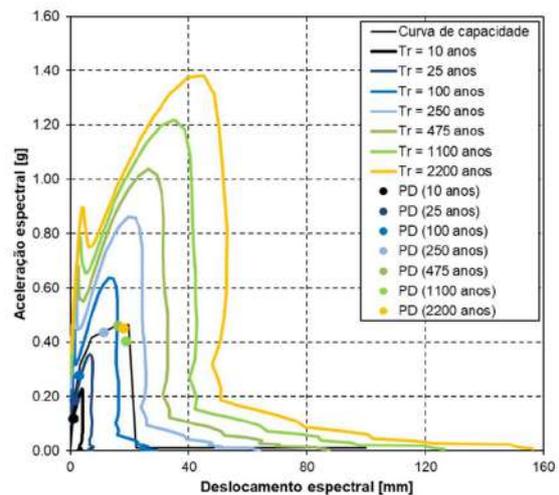


Os estados limite da resposta estrutural do edifício encontram-se descritos, em termos de deslocamento do topo na seguinte tabela:

Estado limite	Deslocamento do topo
Completamente Operacional	D= 2.31 mm
Operacional	D= 3.30 mm
Salvaguarda de Vida	D= 16.5 mm
Próximo do Colapso	D= 22.0 mm

**Pontos de desempenho**

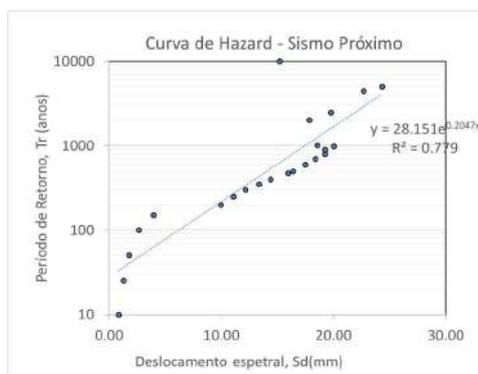
Determinação dos pontos de desempenho através do método do espectro de capacidade, para os sismos próximo e afastado e 25 períodos de retorno distintos. Nas figuras abaixo apresentam-se apenas 7 dos 25 espectros de resposta considerados, para sismo próximo.



Pontos de desempenho: Sismo próximo

**Curva de Hazard e períodos de retorno**

A curva de hazard, para sismo próximo (condicionante), é a que se apresenta de seguida.



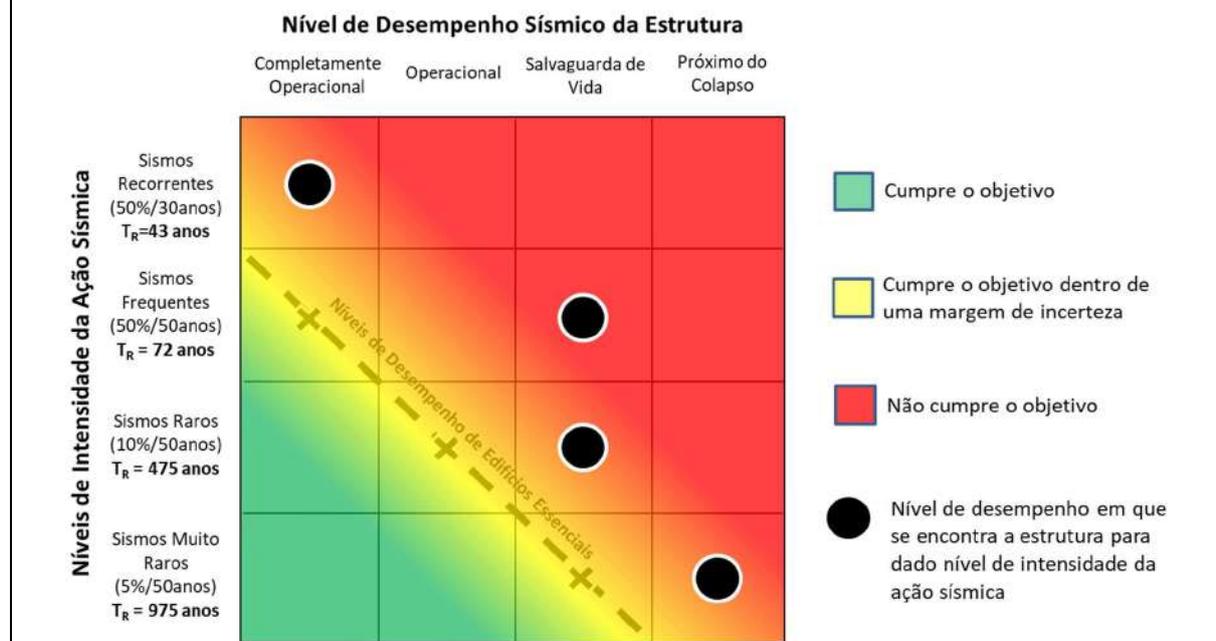
Curva de Hazard: Sismo próximo

Os períodos de retorno associados aos estados limite definidos são:

Período de retorno	Sismo Próximo	Sismo Afastado
Completamente Operacional	45	>10000
Operacional	55	>10000
Salvaguada de Vida	825	>10000
Próximo do Colapso	2543	>10000

**Matriz de desempenho sísmico**

A matriz de desempenho sísmico, que descreve o comportamento da estrutura de cada um dos edifícios que constituem a escola (edifício de alvenaria com pavimentos rígidos) é apresentada abaixo.



### Conclusão

Verifica-se que o comportamento da estrutura do edifício principal da escola (edifício com estrutura mista alvenaria-betão) relativamente aos níveis e objetivos de desempenho sísmico definidos é globalmente insatisfatório, nomeadamente para nível de desempenho que não envolvam o colapso do edifício.

Com efeito, verifica-se que para um sismo com probabilidade de ocorrência igual a 50% em 50 anos (*sismos frequentes*) a estrutura se encontra num nível de desempenho *salvaguarda de vida*, o que não respeita o objetivo de desempenho estabelecido para este tipo de edifícios, que corresponde ao nível de desempenho *completamente operacional*. Além disso, para um sismo com probabilidade de ocorrência igual a 10% em 50 anos (*sismos raros*) a estrutura encontra-se igualmente num nível de desempenho de *salvaguarda de vida*, o que também não respeita o nível de desempenho admissível para este nível de intensidade sísmica, e que corresponde ao nível de desempenho *operacional*. Para intensidade sísmica correspondente a uma probabilidade de ocorrência de 5% em 50 anos e período de retorno de 975 anos (*sismos muito raros*), estrutura encontra-se num nível de desempenho *próximo do colapso*, quando deveria registar, no máximo, o nível de desempenho *salvaguarda de vida*. Por último, para sismos com probabilidade de ocorrência de 2% em 50 anos e período de retorno de 2475 anos (*sismo máximo considerado*), a estrutura encontra-se num nível de desempenho *próximo do colapso*, mas sem ultrapassar este nível de desempenho, o que só ocorre para um sismo com período de retorno médio de 2543 anos, o que respeita os objetivos de desempenho definidos.

Desta forma, uma intervenção neste edifício deve focar-se no aumento da sua capacidade resistente, de modo a evitar situações que coloquem em causa a sua integridade e a segurança dos seus ocupantes por via da queda de elementos estruturais e não estruturais, assim como deverão também ser tomadas medidas relativamente à manutenção da operacionalidade do edifício no caso de ocorrência de sismos mais frequentes, ou seja, menos intensos.

É de referir que este edifício estaria muito próximo de satisfazer os objetivos de desempenho sísmico caso se tratasse de um edifício corrente (por exemplo residencial, como seria possivelmente a sua utilização original) e, como tal, fosse enquadrado nos objetivos de desempenho básicos. No entanto, a sua utilização como escola faz com que os objetivos de desempenho sísmico a considerar sejam objetivos essenciais, necessariamente mais exigentes que os objetivos associados a edifícios correntes. Assim, o reforço deste edifício é recomendado.



# Escola Secundária Marquês de Pombal

ID Escola: 57

Escola	Agrupamento	Área coberta
Escola Secundária Marquês de Pombal	Desagrupada	14571 m <sup>2</sup>

Nível de ensino	Número de alunos
Secundário com 3º ciclo	400 alunos

### Descrição geral

A escola localiza-se em Belém, numa zona plana e com um número de edifícios relativamente baixo nas imediações. A escola, construída no final da década de 1950, é composta por quatro corpos independentes: um edifício principal com 4 pisos, um edifício secundário (igualmente com salas de aula e laboratórios) com 3 pisos, um edifício de ginásio e um conjunto de edifícios de apenas 1 piso, que funcionam como oficinas. Existem um conjunto de espaços que, fazendo parte da escola, se encontram concessionados, pelo que importa integrar os seus ocupantes no planeamento de emergência da escola.

O acesso à escola é feito através da Rua Alexandre Sá Pinto, uma rua com largura suficiente para permitir a evacuação. Além disso, existe espaço, dentro dos limites da escola, para evacuação e encontro em caso de ocorrência de evento sísmico.

Atendendo à distância a que os edifícios mais próximos se encontram, não é previsível qualquer interação sísmica com os mesmos.



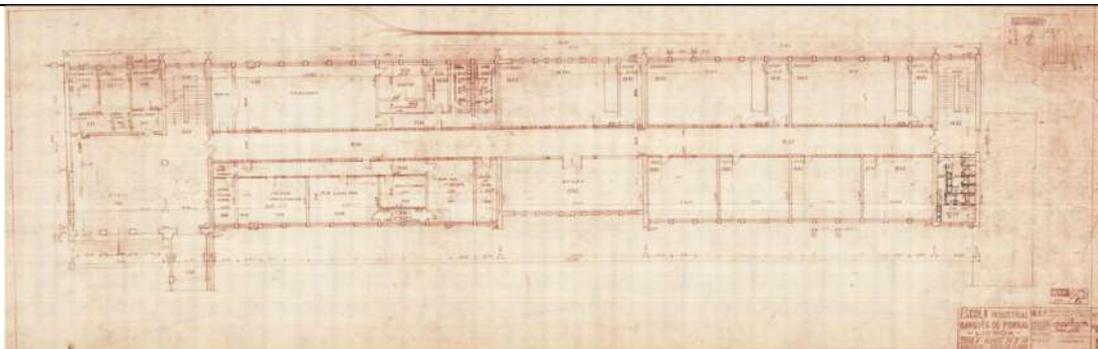
*Imagem aérea do edifício principal*



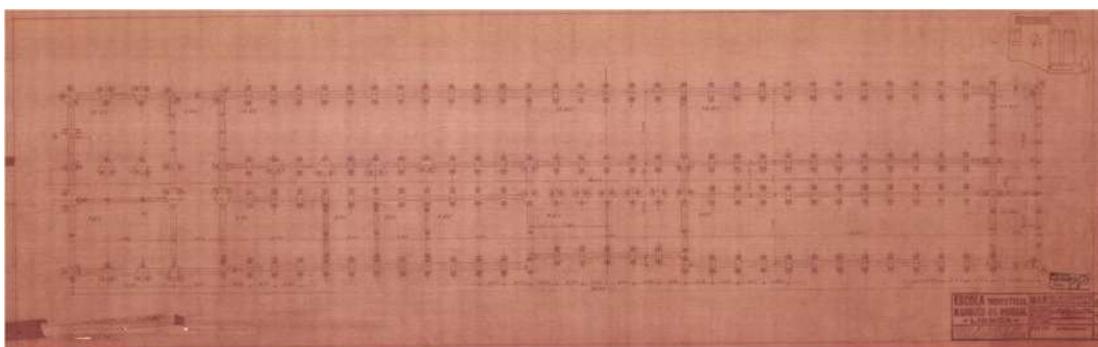
*Imagem aérea do edifício secundário e das oficinas*

### Informação de base

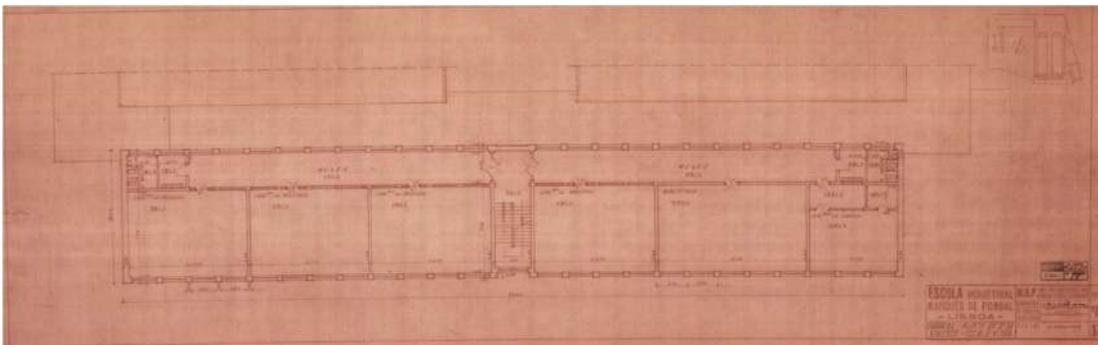
Estão disponíveis desenhos do **Atlas of School Architecture in Portugal**, que incluem desenhos de levantamento arquitetónico e desenhos de estruturas, nomeadamente plantas de fundações e desenhos com armaduras de vigas e pilares da estrutura. Assim, é com base nos desenhos de levantamento e na informação recolhida na visita à escola realizada pelo Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas (NESDE) do LNEC, que este estudo se baseia.



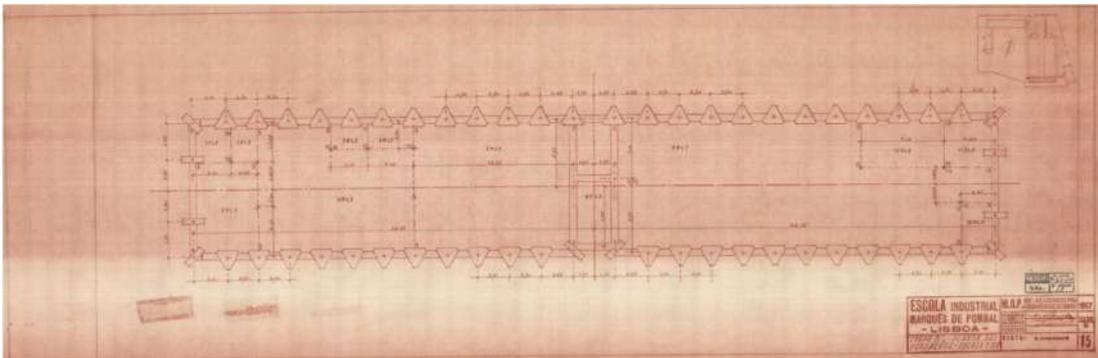
*Levantamento arquitetónico do 2º piso do edifício principal (piso da entrada principal)*



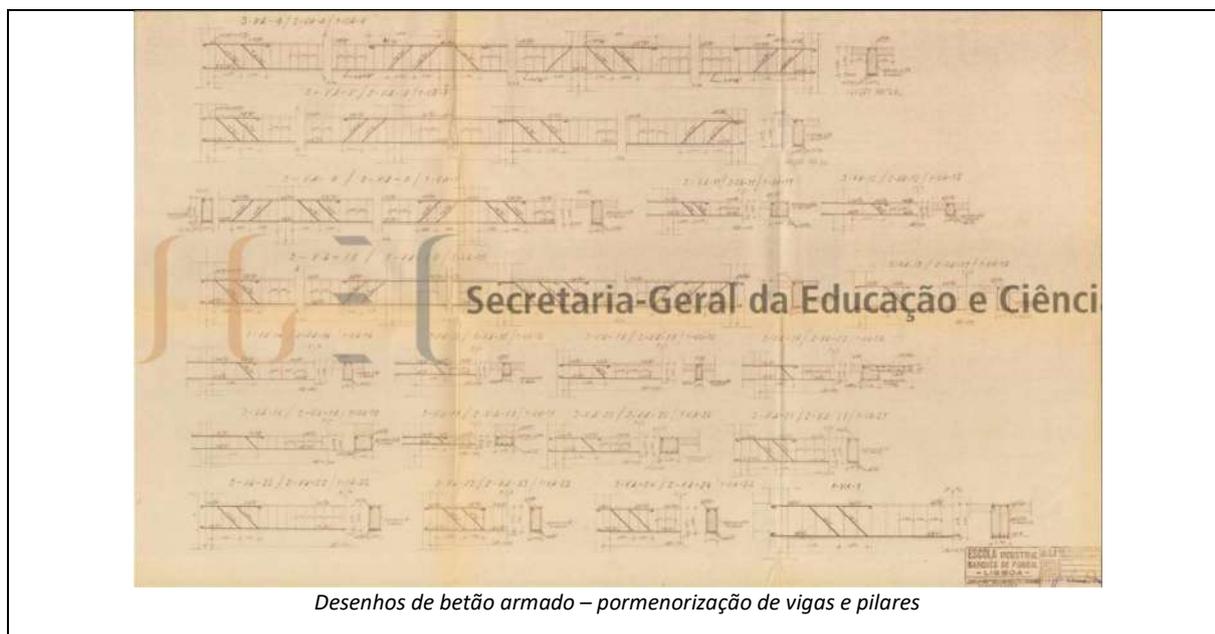
*Planta de fundações do edifício principal*



*Levantamento arquitetónico do 2º piso do edifício secundário*



*Planta de fundações do edifício secundário*



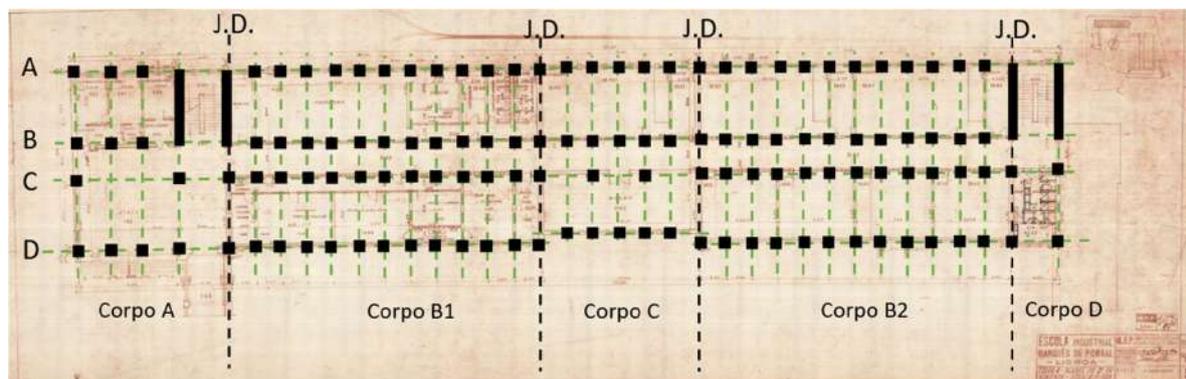
**Caracterização estrutural**

A análise a desenvolver é focada no edifício principal e no edifício secundário, referidos acima. O edifício principal da escola, com um total de 4 pisos (e sótão sob a cobertura), é constituído por uma estrutura reticulada de betão armado, fundada com recurso a micro-estacas, cujos maciços de encabeçamento são ligados por vigas de fundação. O edifício principal tem um pequeno desnível sendo a entrada, numa das extremidades, realizada pelo 2º piso. Nessa zona o piso 1 encontra-se enterrado (ver figura abaixo).



O edifício principal é constituído por um corredor central que se desenvolve em todo o comprimento do edifício, dando acesso às salas de aula que se encontram em ambos os lados desse corredor. O edifício contém quatro juntas de dilatação (ver figura abaixo), formando assim cinco corpos que respondem de forma independente na direção transversal. No corpo A (entrada principal) os pilares são descontínuos no piso 2, local onde possui maiores vãos (ver figura abaixo), o que é compensado por vigas de maior dimensão. Não obstante, esse corpo possui o núcleo de escadas, com paredes de betão armado, o que confere uma rigidez na direção transversal significativamente elevada. Também o corpo da extremidade oposta integra um núcleo de escadas conferindo-lhe uma rigidez na direção transversal bastante elevada. Desta forma, a vulnerabilidade dos três corpos centrais afigura-se como

condicionante. Destes três corpos, dois deles são simétricos (B1 e B2), sendo o corpo C mais curto, com menores vãos, que alberga o museu e sala de reuniões. Assim considera-se como condicionante o comportamento dos dois corpos de maior dimensão (B1 e B2). É sobre estes corpos que se desenvolve a análise subsequente.



Planta do piso 2 com identificação dos alinhamentos estruturais do edifício principal



Corpo A do edifício principal – zona ampla da entrada com vigas e pilar central

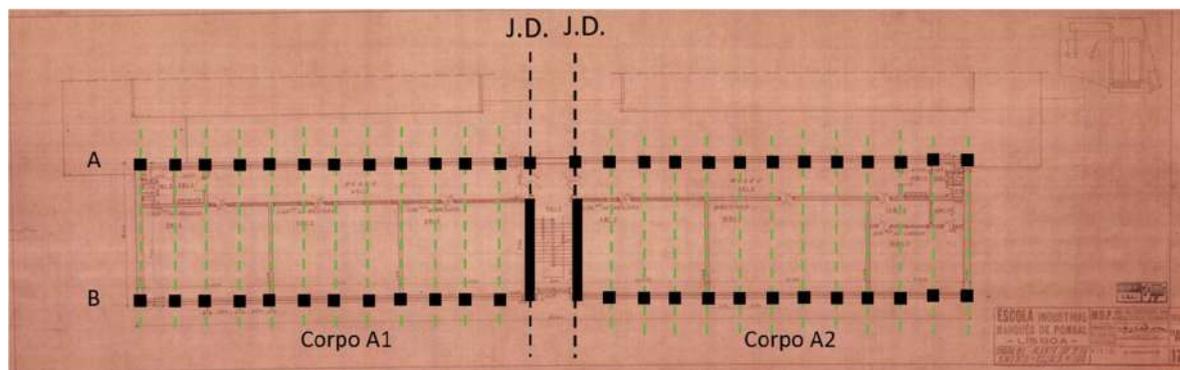
Relativamente ao edifício principal da escola, as dimensões dos elementos estruturais, aferidas através dos desenhos do *Atlas of School Architecture in Portugal* e confirmadas na visita efetuada pelo NESDE, são apresentadas nas tabelas seguintes. A laje maciça tem uma espessura de 25.0cm.

Pilares [m x m]	Alinhamento A/D	Alinhamento B	Alinhamento C
Piso 1	0.45x0.25	0.40x0.40	0.40x0.30
Piso 2	0.35x0.25	0.40x0.40	0.35x0.25
Pisos 3 e 4	0.35x0.25	0.25x0.25	0.35x0.25

Vigas [m x m]	Dir. transversal	Dir. longitudinal
Todos os pisos	0.25x0.65	0.25x0.80

Por outro lado, o edifício secundário é caracterizado por uma banda única de salas de aula, ligadas por um corredor laterak que se desenvolve em todo o comprimento do edifício. O edifício contém um corpo central independente, com paredes de betão armado que integram o núcleo de escadas. Este corpo

separa os dois corpos simétricos que formam o edifício. Nestes corpos (A1 e A2) o sistema estrutural é constituído por pilares na periferia e vigas cujo vão iguala a largura do edifício. Desta forma, a análise aqui desenvolvida é focada nos dois corpos laterais (A1 e A2), cuja vulnerabilidade é condicionante para o comportamento deste edifício.



Planta do piso 2 com identificação dos alinhamentos estruturais do edifício secundário

As dimensões dos elementos estruturais, aferidas através dos desenhos do *Atlas of School Architecture in Portugal* e confirmadas na visita efetuada pelo NESDE são apresentadas nas tabelas seguintes. A laje maciça tem uma espessura de 25.0cm.

Pilares [m x m]	Alinhamento A/B
Todos os pisos	0.50x0.35

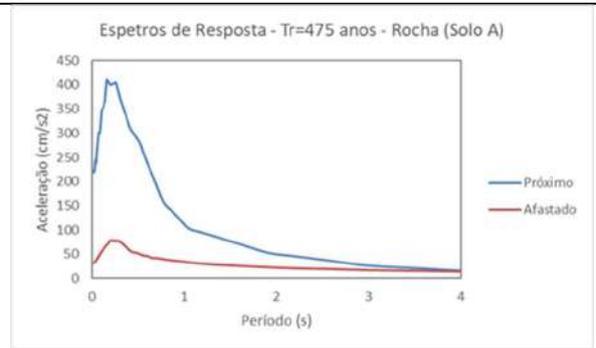
Vigas [m x m]	Dir. transversal	Dir. longitudinal
Todos os pisos	0.35x0.80	0.40x0.90

Não existindo informação de base para caracterizar convenientemente os materiais e outros pormenores construtivos da escola, consideram-se materiais característicos da época de construção da escola. Em particular, considera-se um betão de classe C16/20 e aço do tipo A250.

É de salientar que na ausência de informação sobre o projeto de estruturas da escola que permita recolher dados sobre o seu dimensionamento, nomeadamente no que diz respeito a materiais, ações consideradas, dimensões de elementos estruturais, armaduras colocadas, entre outros pormenores construtivos, estes resultados devem ser encarados como indicadores do comportamento expectável e não como uma avaliação detalhada do comportamento sísmico da estrutura.

**Caracterização geotécnica**

Com base na carta de solos de que o LNEC dispõe (Ver relatório), a ES Marquês de Pombal encontra-se fundada em solo do tipo A (rocha), pelo que a ação a considerar corresponde diretamente à ação estimada através do estudo de perigosidade desenvolvido para este trabalho (não é necessário considerar qualquer amplificação da ação calculada ao nível do substrato rochoso). Os espectros de resposta, que resultam do estudo



probabilístico de perigosidade sísmica desenvolvido especificamente no âmbito deste projeto, associados a um período de retorno de 475 anos, encontram-se na figura à direita.	
--	--

<b>Modelo numérico</b>																					
<p>Atendendo às características estruturais da escola, considera-se que o sistema resistente condicionante no caso do edifício principal consiste nos corpos B1/B2, pelo que são esses os corpos do edifício considerados na análise. Assim, a análise do edifício principal centra-se num dos pórticos resistentes na direção transversal. A largura de influência de cada um dos referidos pórticos transversais é de 2.60m. Por outro lado, no que concerne ao edifício secundário, o sistema resistente condicionante no caso do edifício principal consiste nos corpos A1/A2, pelo que são esses os corpos do edifício considerados na análise. Assim, a análise desse edifício é centrada num dos pórticos resistentes na direção transversal, sendo a sua largura de influência de 2.70m.</p> <p>O modelo de cálculo, desenvolvido no programa SeismoStruct, é composto por elementos de barra (<i>frame</i>) de plasticidade distribuída com formulação em força. Cada secção destes elementos é definida através de fibras com comportamento uniaxial, associadas a aço ou a betão. Os elementos finitos são definidos tendo em consideração as dimensões acima apresentadas. As armaduras, na ausência de qualquer outra informação, foram estimadas tendo por base as dimensões dos elementos, medidas na visita efetuada pelo NESDE, e taxas de armadura mínima, usuais à época em que o dimensionamento não contemplava a resistência sísmica.</p> <p>A taxa de armadura de pilares e vigas respeita as taxas regulamentares de armadura mínimas e máximas, tendo em conta a utilização de aço A250 e betão C16/20. As armaduras dos pilares são:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Edifício principal:</li> </ul>																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Pilares [long.; cintas]</th> <th>Alinhamento A</th> <th>Alinhamento B</th> <th>Alinhamento C</th> <th>Alinhamento D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Piso 1</td> <td>6Φ16; Φ8//0.20</td> <td>16Φ25; Φ8//0.30</td> <td>8Φ16; Φ8//0.20</td> <td>8Φ12; Φ6//0.20</td> </tr> <tr> <td>Piso 2</td> <td>6Φ16; Φ8//0.20</td> <td>12Φ25; Φ8//0.30</td> <td>8Φ16; Φ8//0.20</td> <td>6Φ12; Φ6//0.20</td> </tr> <tr> <td>Pisos 3 e 4</td> <td>6Φ16; Φ8//0.20</td> <td>8Φ16; Φ8//0.20</td> <td>8Φ16; Φ8//0.20</td> <td>6Φ12; Φ6//0.20</td> </tr> </tbody> </table>		Pilares [long.; cintas]	Alinhamento A	Alinhamento B	Alinhamento C	Alinhamento D	Piso 1	6Φ16; Φ8//0.20	16Φ25; Φ8//0.30	8Φ16; Φ8//0.20	8Φ12; Φ6//0.20	Piso 2	6Φ16; Φ8//0.20	12Φ25; Φ8//0.30	8Φ16; Φ8//0.20	6Φ12; Φ6//0.20	Pisos 3 e 4	6Φ16; Φ8//0.20	8Φ16; Φ8//0.20	8Φ16; Φ8//0.20	6Φ12; Φ6//0.20
Pilares [long.; cintas]	Alinhamento A	Alinhamento B	Alinhamento C	Alinhamento D																	
Piso 1	6Φ16; Φ8//0.20	16Φ25; Φ8//0.30	8Φ16; Φ8//0.20	8Φ12; Φ6//0.20																	
Piso 2	6Φ16; Φ8//0.20	12Φ25; Φ8//0.30	8Φ16; Φ8//0.20	6Φ12; Φ6//0.20																	
Pisos 3 e 4	6Φ16; Φ8//0.20	8Φ16; Φ8//0.20	8Φ16; Φ8//0.20	6Φ12; Φ6//0.20																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Vigas – todos os pisos [long.; estribos]</th> <th>Dir. transversal</th> <th>Dir. longitudinal</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Extremidade/sobre pilar interior</td> <td>Sup: 5Φ20; Inf: 4Φ20; Φ8//0.15</td> <td>Sup: 3Φ20; Inf: 3Φ20; Φ8//0.15</td> </tr> <tr> <td>Meio-vão</td> <td>Sup: 2Φ20; Inf: 5Φ20; Φ8//0.20</td> <td>Sup: 3Φ20; Inf: 3Φ20; Φ8//0.20</td> </tr> </tbody> </table>		Vigas – todos os pisos [long.; estribos]	Dir. transversal	Dir. longitudinal	Extremidade/sobre pilar interior	Sup: 5Φ20; Inf: 4Φ20; Φ8//0.15	Sup: 3Φ20; Inf: 3Φ20; Φ8//0.15	Meio-vão	Sup: 2Φ20; Inf: 5Φ20; Φ8//0.20	Sup: 3Φ20; Inf: 3Φ20; Φ8//0.20											
Vigas – todos os pisos [long.; estribos]	Dir. transversal	Dir. longitudinal																			
Extremidade/sobre pilar interior	Sup: 5Φ20; Inf: 4Φ20; Φ8//0.15	Sup: 3Φ20; Inf: 3Φ20; Φ8//0.15																			
Meio-vão	Sup: 2Φ20; Inf: 5Φ20; Φ8//0.20	Sup: 3Φ20; Inf: 3Φ20; Φ8//0.20																			
<ul style="list-style-type: none"> <li>Edifício secundário:</li> </ul> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Pilares [long.; cintas]</th> <th>Alinhamento A/B</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Piso 1</td> <td>8Φ25; Φ8//0.30 c/4 ramos</td> </tr> <tr> <td>Pisos 2 e 3</td> <td>6Φ25; Φ8//0.15 c/4 ramos</td> </tr> </tbody> </table>		Pilares [long.; cintas]	Alinhamento A/B	Piso 1	8Φ25; Φ8//0.30 c/4 ramos	Pisos 2 e 3	6Φ25; Φ8//0.15 c/4 ramos														
Pilares [long.; cintas]	Alinhamento A/B																				
Piso 1	8Φ25; Φ8//0.30 c/4 ramos																				
Pisos 2 e 3	6Φ25; Φ8//0.15 c/4 ramos																				

Vigas – todos os pisos [long.; estribos]	Dir. transversal	Dir. longitudinal
<b>Extremidades</b>	Sup: 7Φ25; Inf: 3Φ25; Φ8//0.15	Sup: 4Φ20; Inf: 3Φ16; Φ8//0.15
<b>Meio-vão</b>	Sup: 2Φ20; Inf: 6Φ25; Φ8//0.20	Sup: 3Φ20; Inf: 3Φ16; Φ8//0.25

As lajes maciças são armadas com Φ10//0.15 em ambas as faces. As cargas atuantes nas lajes são automaticamente distribuídas pela malha de vigas, enquanto que a sua rigidez é simulada através do cálculo da largura efetiva do banzo das vigas em “T”, o que é feito também de forma automática pelo programa de cálculo.

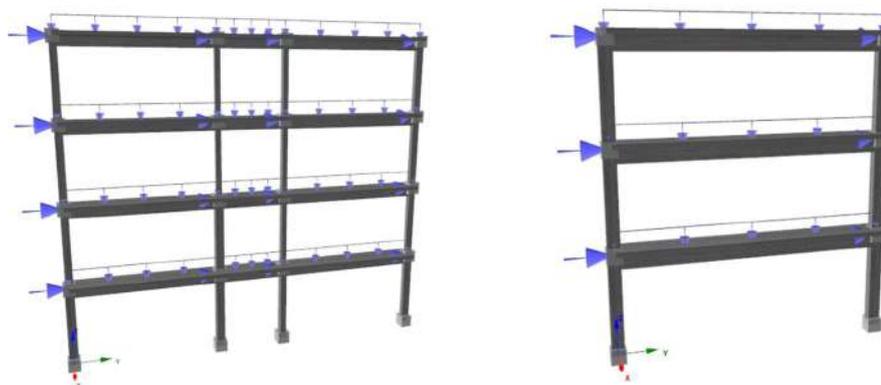
As fibras uniaxiais que definem o comportamento do betão são definidas através do modelo de *Mander et al.*, enquanto que as fibras de aço são definidas através do modelo de comportamento de *Menegotto-Pinto*.

Consideram-se as bases dos pilares com restrições aos deslocamentos e às rotações, simulando assim um encastramento perfeito à fundação da estrutura, o que é justificado pela rigidez da mesma, conferida pela ligação das sapatas através de vigas de fundação de dimensões significativas.

Relativamente às cargas atuantes, adotaram-se as cargas definidas de acordo com a norma portuguesa em vigor (NP EN1991-1-1), para o tipo de edifício em questão. Assim, as cargas permanentes e sobrecargas a considerar na análise são:

Carga	Pisos intermédios	Cobertura (laje esteira)
<b>Pavimento (RCP)</b>	1.5 kN/m <sup>2</sup>	2.5 kN/m <sup>2</sup>
<b>Paredes (RCP)</b>	<u>Divisórias:</u> 1.75 kN/m <sup>2</sup> <u>Exteriores:</u> 7.8 kN/m (aplicada nas vigas exteriores)	Divisórias: 1.75 kN/m <sup>2</sup>
<b>Sobrecarga</b>	Classe C1 (EC1-1-1): 3kN/m <sup>2</sup>	Sótão não utilizado devido a difícil acesso: 0.4 kN/m <sup>2</sup>

Após a aplicação das cargas gravíticas é executada uma análise estática não-linear com controlo de deslocamentos (*pushover*).



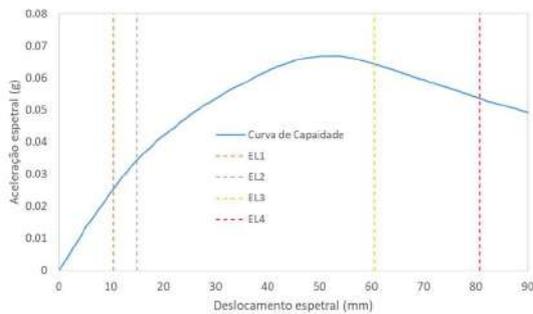
Modelo numérico do pórtico transversal tipo da escola no programa SeismoStruct: edifício principal (esq.); edifício secundário (dir.)

Os períodos de vibração da estrutura, obtidos através do modelo numérico, são:

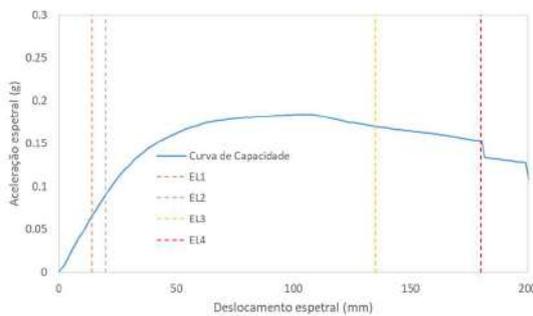
Períodos de vibração	Ed. Principal	Ed. Secundário
1º modo	1.01 s	0.56 s
2º modo	0.38 s	0.19 s
3º modo	0.25 s	0.12 s

**Curva de capacidade**

Edifício principal:



Edifício secundário:



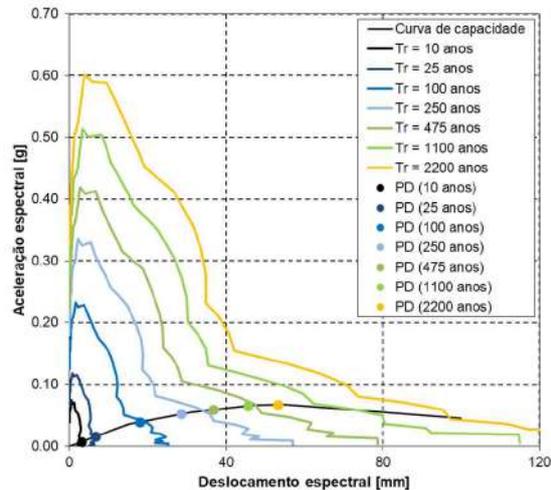
Os valores dos deslocamentos do topo associados aos estados limite são:

Estado limite	Ed. Principal	Ed. Secundário
Completamente Operacional	D= 10.5 mm	D= 14.0 mm
Operacional	D= 15.0 mm	D= 20.0 mm
Salvaguarda de Vida	D= 60.6 mm	D= 135.0 mm
Próximo do Colapso	D= 80.8 mm	D= 180.0 mm

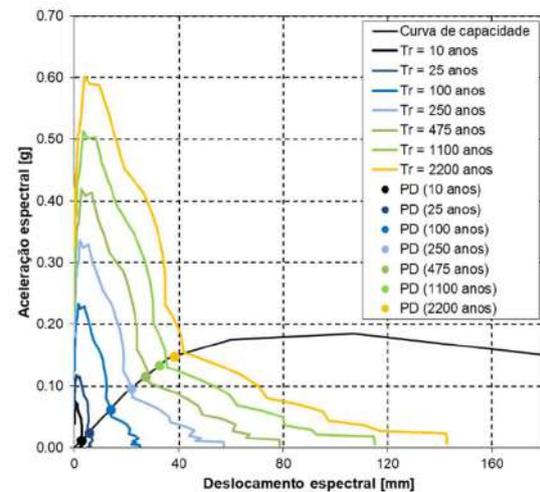
**Pontos de desempenho**

Determinação dos pontos de desempenho através do método do espectro de capacidade, para os sismos próximo e afastado e 25 períodos de retorno distintos.

Nas figuras abaixo apresentam-se apenas 7 dos 25 espectros de resposta considerados, para sismo próximo.



Pontos de desempenho: Edifício principal; Sismo próximo

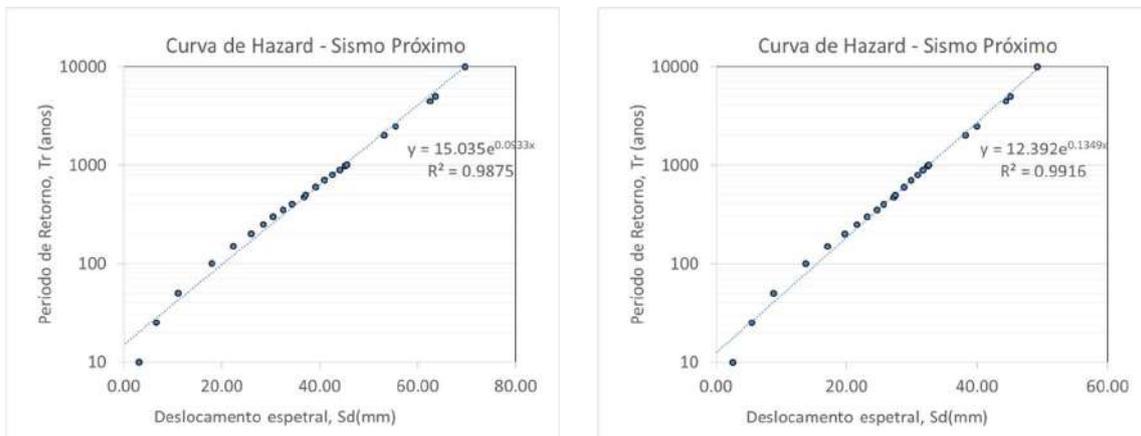


Pontos de desempenho: Edifício secundário; Sismo próximo



**Curva de Hazard e períodos de retorno**

As curvas de hazard, para sismo próximo podem assim ser determinadas sendo apresentadas de seguida.



Curva de Hazard para sismo próximo (condicionante): edifício principal (esq.); edifício secundário (dir.)

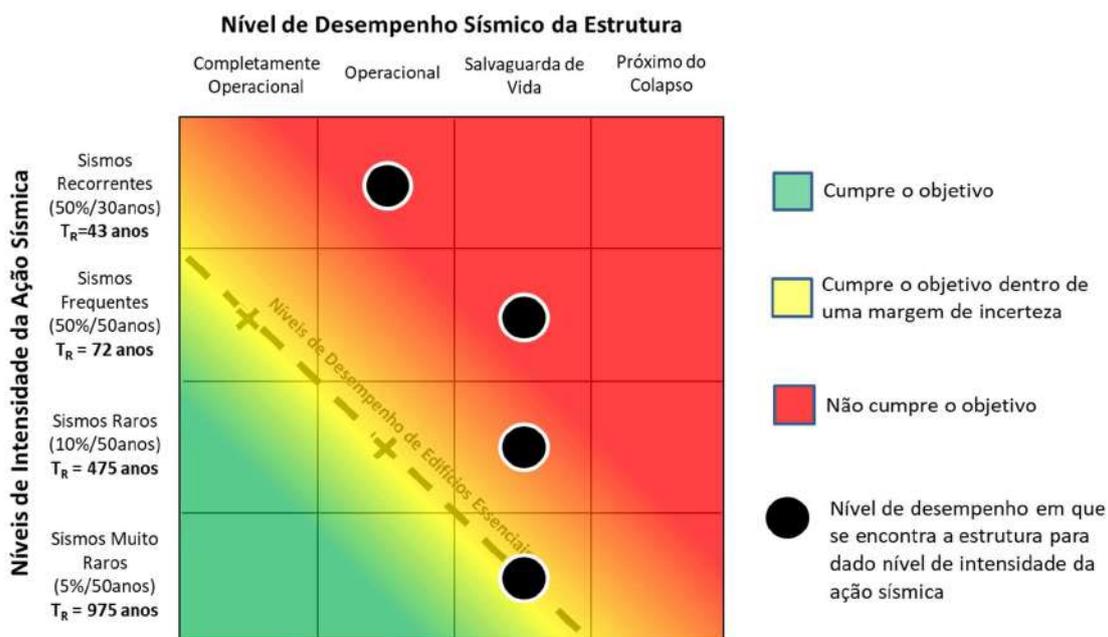
Os períodos de retorno associados aos estados limite definidos são:

	Período de retorno	Ed. Principal	Ed. Secundário
Estado limite	Completamente Operacional	40	82
	Operacional	61	184
	Salvaguarda de Vida	4291	>10000
	Próximo do Colapso	>10000	>10000

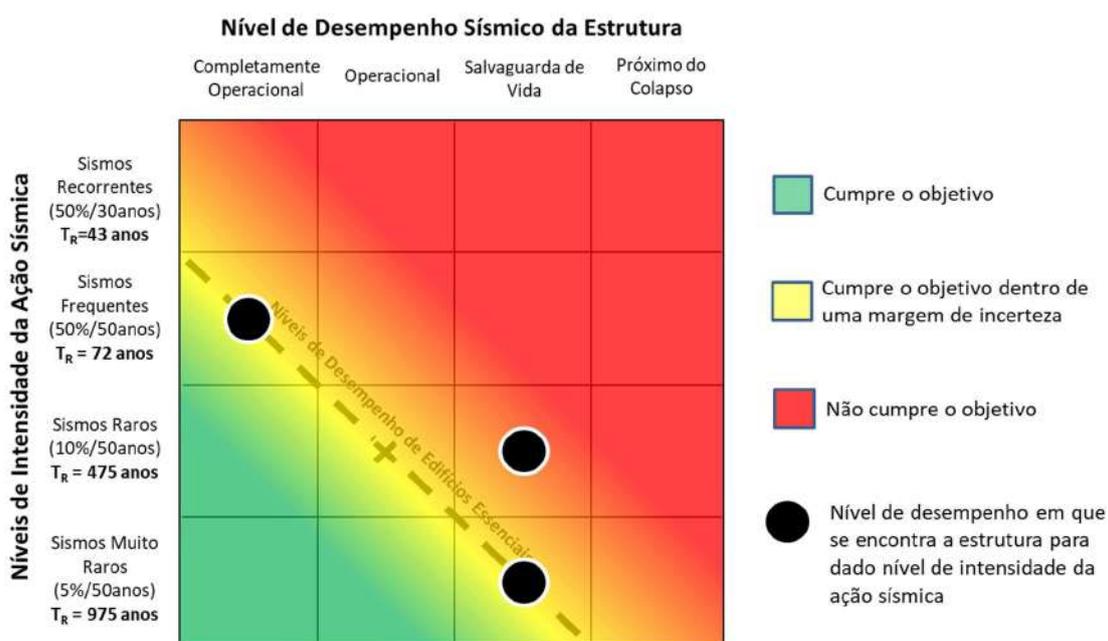
**Matriz de desempenho sísmico**

A matriz de desempenho sísmico, que descreve o comportamento da estrutura relativamente aos níveis e objetivos de desempenho definidos, é apresentada abaixo.

- Edifício principal



- Edifício secundário



### Conclusão

A análise aqui desenvolvida é baseada na prática construtiva e os materiais da época de construção da escola e um conjunto de dados recolhidos dos desenhos de estruturas do *Atlas of School Architecture in Portugal* e de visita à escola efetuada pelo NESDE.

Verifica-se que o comportamento da estrutura dos edifícios que constituem a escola (edifícios porticados em betão armado) relativamente aos níveis e objetivos de desempenho sísmico definidos é insatisfatório, em particular para sismos com probabilidade de ocorrência igual ou superior a 10% em 50 anos. Para sismos mais intensos a estrutura tem uma resposta conforme com os objetivos de desempenho definidos, não sendo verosímil que a estrutura se encontre próxima do colapso para nenhum destes níveis de intensidade da ação sísmica. Não obstante, os danos expectáveis para sismos mais frequentes poderão ser elevados, nomeadamente em elementos não estruturais, e comprometer a operacionalidade da escola.

No que diz respeito ao edifício principal, verifica-se que para um sismo com probabilidade de ocorrência de 50% em 30 anos a estrutura se encontra num nível de desempenho *operacional* (seria expectável que se encontrasse no nível de desempenho *completamente operacional*). Além disso, verifica-se que para um sismo com probabilidade de ocorrência de 50% em 50 anos a estrutura se encontra num nível de desempenho *salvaguarda de vida* (seria expectável que se encontrasse no nível de desempenho *completamente operacional*). Por outro lado, verifica-se que para um sismo com probabilidade de ocorrência de 10% em 50 anos a estrutura se encontra igualmente num nível de desempenho *salvaguarda de vida* (seria expectável que se encontrasse no nível de desempenho *operacional*). Por último, para um sismo com probabilidade de ocorrência de 5% em 50 anos a estrutura encontra-se também no nível de desempenho *salvaguarda de vida*, o que respeita (dentro de uma margem de incerteza que advém das limitações de informação desta análise) os objetivos de desempenho definidos. Assim, não é verosímil que a estrutura se encontre próxima do colapso para nenhum destes níveis de intensidade da ação sísmica.

Relativamente ao edifício secundário, verifica-se que sismos com probabilidade de ocorrência superiores a 50% em 50 anos a estrutura se encontra num nível de desempenho *completamente operacional*, o que respeita os objetivos de desempenho definidos. Por outro lado, verifica-se que para um sismo com probabilidade de ocorrência de 10% em 50 anos a estrutura se encontra igualmente num nível de desempenho *salvaguarda de vida* (seria expectável que se encontrasse no nível de desempenho *operacional*). Por último, para um sismo com probabilidade de ocorrência de 5% em 50 anos a estrutura encontra-se também no nível de desempenho *salvaguarda de vida*, o que respeita (dentro de uma margem de incerteza que advém das limitações de informação desta análise) os objetivos de desempenho definidos. Assim, à semelhança do que acontece para o edifício principal da escola, também não é verosímil que o edifício secundário se encontre próximo do colapso para nenhum destes níveis de intensidade da ação sísmica.

Tendo por base estas conclusões, é recomendado que a estrutura seja reforçada, nomeadamente no que diz respeito a elementos não estruturais que podem ser afetados por sismos de intensidade moderada a baixa, e que podem limitar a sua operacionalidade e causar perdas económicas elevadas.







[www.lnec.pt/](http://www.lnec.pt/)

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA • PORTUGAL  
tel. (+351) 21 844 30 00 • fax (+351) 21 844 30 11  
lnec@lnec.pt [www.lnec.pt](http://www.lnec.pt)