



## ESTUDO COM VISTA A AVALIAR AS CONDIÇÕES DE SEGURANÇA EM PARQUES DE ESTACIONAMENTO SUBTERRÂNEOS COM A PRESENÇA DE VEÍCULOS MOVIDOS A GPL

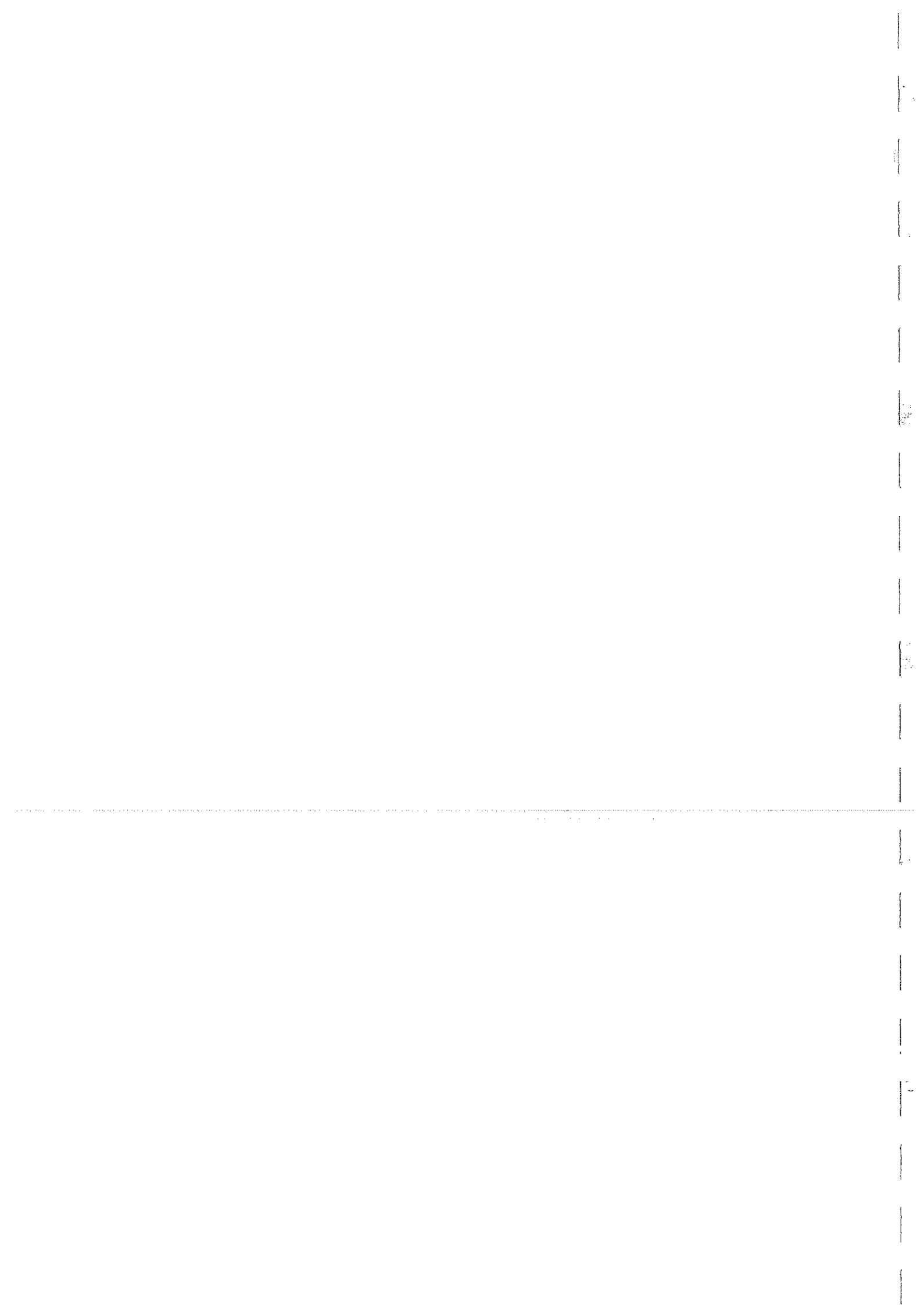
**Elaborado para:** APETRO - Associação Portuguesa de Empresas Petrolíferas  
Av. Engº Duarte Pacheco - Amoreiras - Torre 2, 6º piso, sala 1  
1070 - 102 LISBOA  
Portugal

**Elaborado por:** Consulsafety, Lda.  
Rua José Afonso, N.º 5 - 2ºEsq  
Laranjeiro  
2810-237 Almada  
Portugal

**Proposta N.º** 0162S2009\_APETRO\_Cenarios\_Rev1

**Revisão:** Original

**Data:** 23 Julho 2009



## Índice

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. METODOLOGIA</b> .....	<b>1</b>
2.1. RECOLHA DE ELEMENTOS COM VISTA À CARACTERIZAÇÃO DE CADA UM DOS SISTEMAS A ESTUDAR. ....	1
2.2. CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DE UM PARQUE DE ESTACIONAMENTO SUBTERRÂNEO .....	1
2.3. DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS PADRÃO .....	1
2.4. IDENTIFICAÇÃO DOS EVENTOS INICIADORES DOS ACIDENTES CREDÍVEIS .....	2
2.5. MODELIZAÇÃO DOS EFEITOS DOS INCIDENTES CREDÍVEIS E ANÁLISE DAS SUAS CONSEQUÊNCIAS POTENCIAIS	2
<b>3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE GÁS DE PETRÓLEO LIQUEFEITO</b> .....	<b>3</b>
3.1. CARACTERÍSTICAS DO GÁS DE PETRÓLEO LIQUEFEITO - GPL .....	3
3.2. CONCEÇÃO TÍPICA DO SISTEMA .....	3
<b>4. FACTORES DE RISCO</b> .....	<b>7</b>
4.1. RISCOS COM ORIGEM NOS SISTEMAS DE GPL.....	7
4.1.1. <i>Sobrepresão</i> .....	7
4.1.2. <i>Fugas por tubagens e acessórios do sistema</i> .....	8
4.1.3. <i>Fugas pelo reservatório</i> .....	11
4.2. RISCO DA EXPOSIÇÃO DOS VEÍCULOS AOS EFEITOS DE UM CENÁRIO CUJA ORIGEM É ALHEIA AO PRÓPRIO VEÍCULO	17
4.2.1. <i>Exposição a efeitos mecânicos externos</i> .....	17
4.2.2. <i>Exposição a nível de radiação anormal</i> .....	18
<b>5. FACTORES DE RISCO COM VEÍCULOS A GASOLINA</b> .....	<b>19</b>
5.1. FUGAS POR TUBAGENS E ACESSÓRIOS DO SISTEMA .....	19
5.2. RISCO DA EXPOSIÇÃO DOS VEÍCULOS AOS EFEITOS DE UM CENÁRIO CUJA ORIGEM É ALHEIA AO PRÓPRIO VEÍCULO	25
5.2.1. <i>Exposição a efeitos mecânicos externos</i> .....	26
5.2.2. <i>Exposição a nível de radiação anormal</i> .....	26
<b>6. CONCLUSÕES</b> .....	<b>27</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>29</b>

## Índice de Figuras

Figura 1 - Esquema do sistema de GPL de um veículo automóvel.....	4
Figura 2 - Rotura de tubagem de GPL. Cenários .....	9
Figura 3 - Massa explosiva em função do tempo.....	10
Figura 4 - Explosão de GPL. Sobrepresão em função da distância .....	11
Figura 5 - Falha de PSV. Taxa de libertação de GPL .....	14

Elaborado por:



APETRO  
Estudo de Risco - Veículos de GPL em  
Parques de Estacionamento  
Subterrâneos

Figura 6 - Variação da massa explosiva em função do tempo.....	15
Figura 7 - Explosão de nuvem de GPL. Sobrepressão em função da distância.....	16
Figura 8 - Rotura de tubagem de gasolina. Massa libertada em função do tempo.....	21
Figura 9 - Taxa de vaporização da gasolina para os diferentes cenários.....	22
Figura 10 - Explosão de vapores de gasolina. Sobrepressão em função da distância.....	24
Figura 11 - Incêndio de derrame de gasolina. Radiação incidente em função da distância.....	25

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Condições ambientais utilizadas .....	2
Tabela 2 - Principais seguranças num sistema GPL.....	6
Tabela 3 - Efeitos da explosão.....	11
Tabela 4 - Efeitos da explosão - Regime de ventilação 0,1 m/s.....	17
Tabela 5 - Efeitos da explosão - Regime de ventilação 0,5 m/s.....	17
Tabela 6 - Comparação da frequência/probabilidade de falhas de tubagens entre os sistemas a gasolina e GPL .....	19
Tabela 7 - Taxa de vaporização da gasolina (em kg/s) .....	20
Tabela 8 - Áreas máximas dos derrames (m <sup>2</sup> ) .....	21
Tabela 9 - Massa de vapores inflamáveis no domínio de inflamabilidade (kg) .....	23
Tabela 10 - Efeitos da explosão de vapores de gasolina.....	23
Tabela 11 - Efeitos do incêndio de derrame de gasolina .....	24
Tabela 12 - Comparação da Frequência/Probabilidade de ocorrência de incidentes com sistemas de GPL e Gasolina.....	27

## 1. INTRODUÇÃO

O presente relatório tem por objectivo apresentar os resultados do estudo de análise quantitativa dos riscos efectuada a veículos com motores alimentados a gás de petróleo liquefeito (GPL) quando estacionados ou em circulação em parques de estacionamento subterrâneos por comparação com veículos com motores alimentados a gasolina.

A base do estudo efectuado assentou na modelação dos acidentes credíveis de ocorrer com origem em sistemas de GPL, sem ter em conta a probabilidade de ocorrência de cada um dos eventos iniciadores. Após a determinação dos efeitos comparados dos acidentes resultantes de cada um dos sistemas em análise, foi feita uma análise dos eventos iniciadores e caracterizada a respectiva probabilidade/frequência de ocorrência com recurso a bases de dados de fiabilidade de sistemas, equipamentos e componentes.

Não foram tidos em consideração, por se considerarem fora do âmbito do presente estudos, os aspectos relacionados com os eventuais riscos/benefícios ambientais e para a saúde humana decorrentes da utilização de um ou do outro sistema.

## 2. METODOLOGIA

Os trabalhos que estão na origem do presente relatório foram executados de acordo com a metodologia a seguir indicada.

### 2.1. RECOLHA DE ELEMENTOS COM VISTA À CARACTERIZAÇÃO DE CADA UM DOS SISTEMAS A ESTUDAR.

Foram recolhidos elementos referentes aos combustíveis presentes e aos sistemas de alimentação dos motores, nomeadamente tipos de reservatório, tubagens, condições de funcionamento e medidas de segurança incluídas.

### 2.2. CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DE UM PARQUE DE ESTACIONAMENTO SUBTERRÂNEO

Com vista a caracterizar as condições ambientais típicas de um parque de estacionamento subterrâneo, foram recolhidos os parâmetros ambientais relevantes para a modelação dos incidentes envolvendo a libertação dos combustíveis em análise. Assim, procedeu-se à recolha dos valores de temperatura e velocidade do vento em diversos locais (ver Anexo A) do **Parque de Estacionamento da Mundicenter** (Amoreiras) em duas condições de funcionamento, sendo uma em que apenas se encontrava em funcionamento a “ventilação geral” do parque e uma outra em que se encontravam já em funcionamento, para além da ventilação geral, os ventiladores de impulso existentes no referido parque.

Para a recolha destes elementos, utilizou-se um termoanemómetro Kestrel 3000 devidamente calibrado. Os valores obtidos nos diversos pontos de leitura encontram-se no Anexo A.

### 2.3. DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS PADRÃO

A partir dos dados ambientais recolhidos foram caracterizadas duas condições ambientais representativas do parque de estacionamento e que serviram de base à modelação dos efeitos dos incidentes envolvendo cada um dos sistemas. Assim, foram tipificadas para cada um dos pisos

Elaborado por:



APETRO

Estudo de Risco - Veículos de GPL em  
Parques de Estacionamento  
Subterrâneos

considerados (Piso -1 e Piso -2) duas condições tipo que diferem entre si, essencialmente, nos regimes de velocidade do ar (associada aos regimes de ventilação) e à temperatura. No que se refere à humidade não se consideraram diferenças porquanto a variação observada foi reduzida e o factor humidade não é relevante para os tipos de cenário a modelar, atendendo às características das substâncias em presença.

Os valores das condições ambientais consideradas para a modelação dos efeitos dos incidentes seleccionados são os que se apresentam na Tabela 1.

Tabela 1 - Condições ambientais utilizadas

Condição	Velocidade do vento (m/s)		Temperatura (°C)	
	Piso -1	Piso -2	Piso -1	Piso -2
Sem ventiladores de impulso	0,1	0,2	21,3	22,6
Com ventiladores de impulso	0,5	0,5	22,9	22,3

Com base nos valores acima, consideraram-se duas situações tipo para um parque de estacionamento subterrâneo em que apenas varia a velocidade do vento, assumindo-se uma temperatura de 22°C:

- Velocidade de vento 0,1m/s
- Velocidade de vento 0,5m/s

## 2.4. IDENTIFICAÇÃO DOS EVENTOS INICIADORES DOS ACIDENTES CREDÍVEIS

Tendo por base a concepção dos sistemas em análise, foram identificados os eventos iniciadores susceptíveis de causar acidentes graves com veículos em parques de estacionamento subterrâneos associados a cada sistema considerado. Para este efeito foram considerados os eventos que possam, de forma directa ou indirecta, estar na origem da perda de contenção de um reservatório e que tenha como consequência a fuga/libertação do seu conteúdo dando início a um cenário de acidente ou agravando uma situação já existente.

## 2.5. MODELAÇÃO DOS EFEITOS DOS INCIDENTES CREDÍVEIS E ANÁLISE DAS SUAS CONSEQUÊNCIAS POTENCIAIS

Com base nos eventos iniciadores identificados, nas condições de operação dos sistemas em análise e das condições ambientais caracterizadas, foram modelados os efeitos resultantes das fugas libertações susceptíveis de ocorrer envolvendo quer o GPL, quer a gasolina. Para este efeito recorreu-se aos modelos matemáticos de efeitos desenvolvidos/compilados pelo TNO (organização Holandesa semi-governamental para a investigação de ciência aplicada) e constantes no *package* informático designado por Effects 8.0.1 (ferramenta para a determinação dos efeitos indesejáveis da libertação de substâncias perigosas).

A partir dos efeitos determinados com recurso aos modelos matemáticos aplicáveis, foram estimadas as consequências previsíveis quer para as pessoas quer para outros bens e equipamentos presentes que possam, porventura, estarem sujeitos à acção dos efeitos dos eventos tratados. Para a conversão dos efeitos em consequências, foram seguidos os modelos constantes na publicação do TNO designada por *Methods for determining possible damages* (Green Book) que fornece as ferramentas necessárias para converter os efeitos físicos em consequências.

Elaborado por:



APETRO  
Estudo de Risco - Veículos de GPL em  
Parques de Estacionamento  
Subterrâneos

## 3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE GÁS DE PETRÓLEO LIQUEFEITO

### 3.1. CARACTERÍSTICAS DO GÁS DE PETRÓLEO LIQUEFEITO - GPL

O gás de petróleo liquefeito (GPL) é uma designação genérica atribuída a uma família de hidrocarbonetos ligeiros, normalmente C2 a C5. De uma forma mais restrita, a designação GPL aplica-se ao propano ( $C_3H_8$ ), ao butano ( $C_4H_{10}$ ) ou a uma mistura destes hidrocarbonetos. À temperatura e pressão ambiente o GPL encontra-se no estado gasoso.

O GPL é armazenado sob pressão como um líquido praticamente incolor com uma densidade da ordem de metade da densidade da água ( $\approx 0,56$ ). Em condições normais, a pressão no interior do reservatório em que o GPL é armazenado é a pressão de vapor correspondente à temperatura a que se encontra. A título indicativo, a uma temperatura de  $40^\circ\text{C}$ , a pressão de vapor do GPL varia <sup>1</sup>entre os 0,52 MPa (5,2 bar) e os 1,55 MPa (15,5 bar) dependendo da proporção de propano e de butano na mistura. Como referência de uma composição tipo, a pressão de vapor do GPL auto a  $23^\circ\text{C}$  é da ordem dos 0,46 MPa (4,6 bar).

O ponto de ebulição do GPL varia entre os  $-42^\circ\text{C}$  e os  $0^\circ\text{C}$ , dependendo da proporção de propano e de butano na mistura.

Em caso de exposição às condições atmosféricas normais como ocorre, por exemplo, em caso de fuga, o GPL vaporiza rapidamente aumentando de volume na transição de líquido para gás. Como valor indicativo, o aumento de volume devido à vaporização é da ordem das 250 vezes. Os vapores de GPL são mais densos que o ar e formam com este misturas inflamáveis em concentrações entre os 2% e os 10% de volume de gás em relação ao volume de ar.

### 3.2. CONCEPÇÃO TÍPICA DO SISTEMA

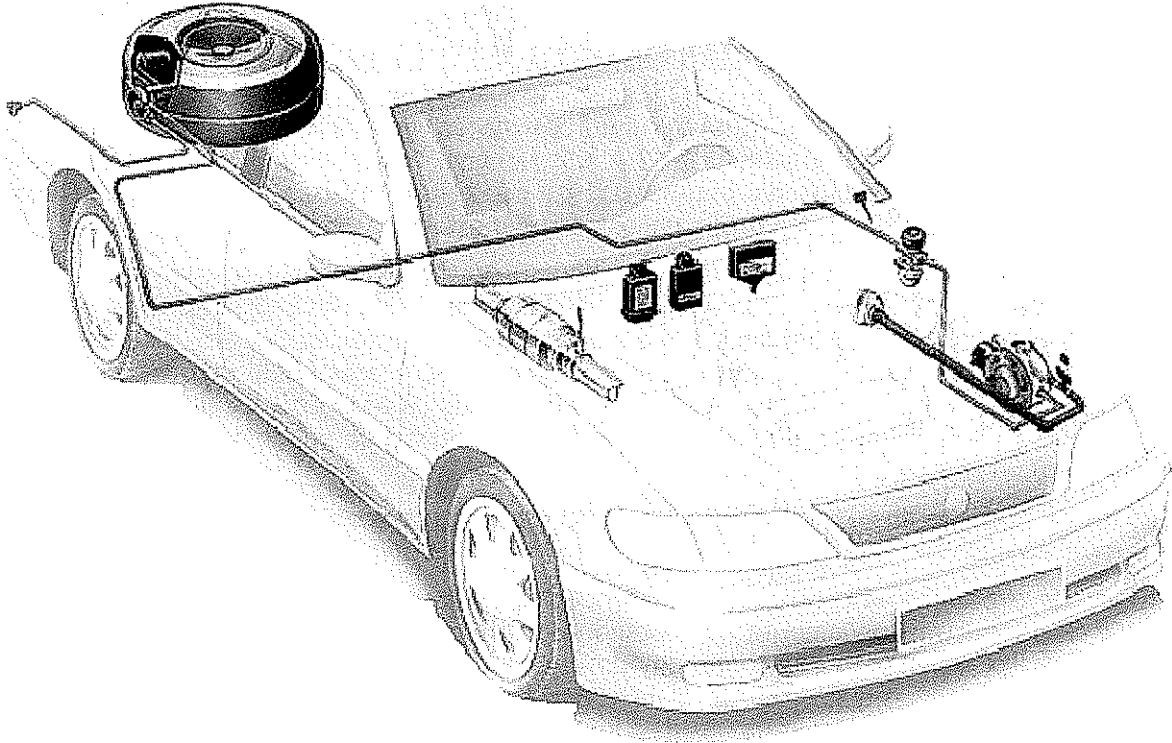
O gás de petróleo liquefeito pode ser vaporizado e queimado num motor de ignição como seja um motor típico a gasolina.

Os reservatórios de GPL têm uma forma cilíndrica ou toroidal têm uma capacidade que varia entre os 10 e os 100 litros, dependendo do veículo e são normalmente instalados na bagageira. Todo o sistema é fechado (sem comunicação com o exterior) e pressurizado.

Em funcionamento, o GPL é fornecido ao motor sob controlo de um sistema electrónico de alimentação que adapta instantaneamente os caudais necessários em função das necessidades do motor. O GPL é fornecido sob a forma líquida pelo reservatório através de uma linha de alimentação que atravessa longitudinalmente o veículo, por debaixo do chassis até ao compartimento do motor. No compartimento do motor o GPL passa por um regulador de pressão onde é vaporizado indo, em seguida, alimentar o motor onde é queimado.

Os principais equipamentos que compõem um sistema de alimentação de gás petróleo liquefeito (GPL) em veículos automóveis são (Figura 1):

<sup>1</sup> De acordo com o Decreto-lei N.º 89/2008, de 30 Maio, que estabelece as normas referentes às especificações técnicas aplicáveis aos combustíveis



**Figura 1 - Esquema do sistema de GPL de um veículo automóvel**

▪ **O depósito de GPL**

Os depósitos devem cumprir com os requisitos legais e normativos aplicáveis e possuir, como tal, características de resistência mecânica que garantam a sua segurança enquanto recipientes sob pressão. Em regra a sua pressão de projecto é igual ou superior a 3,0 MPa (30 bar) e têm uma pressão de rotura igual ou superior a 6,75 MPa (67,5 bar), ou seja (2,25 x Pressão de projecto).

Os depósitos são submetidos a tratamento térmico de recozimento de modo a eliminar as suas tensões internas e dispõem de uma série de orifícios, dispostos segundo uma geratriz, para acoplamento da válvula de enchimento, da válvula de saída ou de alimentação ao motor (com tubagem e dispositivo de excesso de caudal), para o indicador de nível (que não pode ser eléctrico) e para a válvula de segurança em caso de sobrepressão.

A instalação de um depósito num veículo obedece a um conjunto de requisitos e normas nomeadamente no que se refere à sua localização, sua protecção contra pancadas e vibrações, rigidez e resistência dos dispositivos de fixação, ventilação do espaço onde são instalados e sua comunicação com o habitáculo do veículo.

▪ **Dispositivos de controlo e de segurança do depósito de GPL**

Os componentes dos depósitos fixos devem cumprir com os requisitos legais e normativos aplicáveis não sendo admissíveis fugas em condição normal de funcionamento com um débito superior aos valores estipulados.



Em regra, os depósitos possuem os seguintes acessórios:

- **Válvula de retenção de 80%.** Dispositivo que limita o enchimento do depósito a 80% da sua capacidade em água e actua como válvula de não retorno;
- **Indicador de nível.** Dispositivo que indica o nível de líquido no depósito;
- **Válvula de segurança de sobrepessão.** Dispositivo que limita o aumento de pressão no depósito acima de um valor pré-definido;
- **Válvula de excesso de caudal.** Dispositivo que corta o fluxo de GPL em caso de rotura de tubagem;
- **Dispositivo fusível de segurança de sobrepessão<sup>2</sup>.** Dispositivo que protege o depósito contra a rotura quando este esteja exposto à acção directa das chamas, evacuando o GPL a uma temperatura e/ou pressão pré-definidas, evitando a rotura catastrófica do depósito;
- **Alojamento estanque.** Dispositivo que protege os componentes incorporados no depósito de pequenas agressões físicas e, ao mesmo tempo, recolhe e conduz qualquer fuga que possa ocorrer para o exterior do veículo, se necessário através de uma tubagem e um escape apropriados;
- **Vaporizador/regulador de pressão.** Dispositivo que vaporiza o GPL e reduz/regula a pressão de saída para um valor pré-definido independentemente das variações da pressão de entrada e/ou do caudal;
- **Válvula de corte.** Dispositivo accionado à distância instalado no compartimento do motor que controla a alimentação de GPL ao vaporizador/regulador de pressão;
- **Dispositivo de injeção de gás ou injector.** Dispositivo que fornece uma quantidade controlada de GPL ao motor;
- **Unidade de mistura de gás;**
- **Unidade de doseamento de gás.** Dispositivo que mede e/ou distribui o GPL em fase gasosa ao motor;
- **Tubagens flexíveis e tubagens de gás.** Conduitas flexíveis destinadas a conduzir o GPL líquido ou gasoso a várias pressões de um ponto a outro;
- **Unidade electrónica de controlo.** Dispositivo que controla a alimentação de GPL ao motor e corta automaticamente a alimentação eléctrica às válvulas de corte do sistema se o motor parar e/ou é seleccionado outro combustível;
- **Linha de combustível.** Tubo ou mangueira que fornece combustível aos dispositivos de injeção;
- **Unidade de enchimento.** Dispositivo instalado no exterior do veículo para ligar a tomada de enchimento e permitir o abastecimento do depósito de GPL.

A Tabela 2 resume os principais dispositivos de segurança que integram um sistema de GPL num veículo e descreve sumariamente as respectivas funções.

<sup>2</sup> A instalação deste dispositivo de segurança não se encontra ainda generalizada, encontrando-se o mesmodisponível sobretudo em sistemas mais recentes.

Tabela 2 - Principais seguranças num sistema GPL

Dispositivo	Localização	Função/Actuação
Reservatório	No limite frontal da bagageira	De forma cilíndrica ou toroidal, projectado de acordo com os critérios aplicáveis a recipientes sob pressão. Apresenta um elevado grau de resistência a roturas provocadas por impactos ou à perfuração. A sua localização reduz significativamente a probabilidade de sofrer impactos directos graves mesmo em caso de acidente grave
Válvula de segurança de sobrepressão	No reservatório	Previne aumentos excessivos da pressão que poderiam por em causa a integridade estrutural do reservatório através da descarga de GPL para atmosfera, pela traseira do veículo, quando a pressão interna do reservatório se aproxima da sua pressão de projecto.
Dispositivo fusível de segurança de sobrepressão <sup>3</sup>	No reservatório	Dispositivo que protege o depósito contra a rotura quando este esteja exposto à acção directa das chamas, evacuando o GPL a uma temperatura e/ou pressão pré-definidas, evitando a rotura catastrófica do depósito
Limitador automático de enchimento	No reservatório	Interrompe automaticamente o enchimento quando o nível do líquido atinge 80% do volume do reservatório. Previne o sobreenchimento e a rotura devida à expansão térmica.
Válvula de não retorno	Bocal de enchimento	Previne fugas de GPL a partir do reservatório no caso da mangueira de enchimento não se encontrar devidamente acoplada.
Válvula de excesso de caudal	Saída do reservatório para o sistema de alimentação	Isola o reservatório em caso de fuga por uma tubagem
Válvulas de solenóide	Saída do reservatório e entrada do vaporizador	Interrompem automaticamente o fluxo de GPL quando o motor pára.

<sup>3</sup> A instalação deste dispositivo de segurança não se encontra ainda generalizada, encontrando-se o mesmodisponível sobretudo em sistemas mais recentes.

## 4. FACTORES DE RISCO

No presente estudo serão analisados os factores de risco associados à presença de veículos alimentados a GPL em parques de estacionamento subterrâneos em duas vertentes:

- Risco de ocorrências com origem no próprio veículo como sejam, por exemplo, fugas de combustível por falhas estruturais ou de sistemas de segurança;
- Risco da exposição dos veículos aos efeitos de um cenário cuja origem é alheia ao próprio veículo, como seja, por exemplo, um incêndio que ocorra numa zona próxima.

### 4.1. RISCOS COM ORIGEM NOS SISTEMAS DE GPL

Em termos gerais, pode considerar-se que **em condições normais de funcionamento** os riscos específicos associados à utilização de GPL como combustível para veículos automóveis são a pressão a que o sistema se encontra (sendo o gás liquefeito se encontra a uma pressão em equilíbrio com a sua tensão de vapor referente à temperatura a que se encontra) e a possibilidade de ocorrência de uma fuga de gás que possa originar uma mistura explosiva no parque de estacionamento subterrâneo.

#### 4.1.1. SOBREPRESSÃO

No depósito, uma sobrepressão pode ocorrer por dois motivos:

- Sobreenchimento do depósito
- Aumento da temperatura

Em relação a estes dois factores, a concepção do sistema acima descrito considera já as seguintes seguranças:

- O sobreenchimento do depósito é evitado através dos dispositivos previstos para o efeito, nomeadamente a válvula de retenção de 80% e o dispositivo de nível máximo de enchimento pelo que esta situação apenas poderá ocorrer em caso de falha simultânea de ambos os dispositivos seguida, no caso de aumento da pressão, da falha da válvula de segurança de sobrepressão.

A falha em simultâneo dos dispositivos de sobreenchimento do depósito, ainda que tendo um valor muito baixo, encontra-se fora do âmbito do presente estudo já que se considera que a operação de abastecimento de um veículo não é efectuada em parques de estacionamento subterrâneos.

No que se refere à falha da válvula de segurança de sobrepressão, que pode ser provocada por sobreenchimento ou por um qualquer outro motivo que leve a este fenómeno, os valores médios de falha destes tipo de equipamento (falha a abrir quando solicitado) são, de acordo com a base de dados de fiabilidade constante no documento *Process Equipment Reliability Data*, editado pelo *Center for Chemical Process Safety* do *American Institute of Chemical Engineers*, da ordem das **0,212 falhas por cada mil solicitações**.

Admitindo que, independentemente dos motivos, este equipamento é chamado a actuar, em média, uma vez por mês e considerando que esta solicitação ocorre sempre em parques de estacionamento subterrâneos, a probabilidade de ocorrer uma falha deste equipamento que origine uma sobrepressão anormal no interior do depósito é de:

$2,54 \times 10^{-3}/\text{ano}$

- O aumento de temperatura é relevante já que conduz a um aumento de pressão, sendo a situação mais relevante o veículo movido a GPL estar exposto à acção de um incêndio que ocorra na proximidade.

Neste caso, para além da válvula de segurança por sobrepressão, o depósito encontra-se ainda protegido por um dispositivo mecânico contra sobrepressões que previne o colapso do depósito evacuando o GPL a uma temperatura e pressão pré-definidas.

De acordo com a publicação *Layer of Protection Analysis* editado pelo *Center for Chemical Process Safety* do *American Institute of Chemical Engineers* a probabilidade média de falha deste tipo de dispositivo é da ordem dos  $1 \times 10^{-2}/\text{ano}$  pelo que a probabilidade de ocorrer uma falha catastrófica de um reservatório exposto a uma temperatura elevada será da ordem de:

$2,54 \times 10^{-5}/\text{ano}$

Note-se que neste valor não se inclui a probabilidade de ocorrência do evento que leva à solicitação dos elementos de protecção considerados pelo que a probabilidade de ocorrência do cenário, incluindo as suas causas será ainda muito menor.

#### 4.1.2. FUGAS POR TUBAGENS E ACESSÓRIOS DO SISTEMA

O facto do sistema de armazenamento e de alimentação de combustível ao motor dos veículos se encontrar, nos veículos a GPL, em pressão obriga a que se tenha de considerar a possibilidade de ocorrência de uma fuga, em condições normais de funcionamento.

As fugas de gás podem ser perigosas porque têm o potencial de formar atmosferas potencialmente explosivas que poderão estar na origem de um incêndio ou explosão no caso do veículo se encontrar no interior ou num espaço pouco ventilado, como é o caso de um parque de estacionamento subterrâneo. Para controlar esta situação, os sistemas de GPL possuem uma válvula de controlo electrónico instalada no depósito que fecha automaticamente quando o motor pára ou se ocorrer uma fuga numa tubagem de ligação. Isto é, quando estacionado, ainda que o circuito de gás se encontre sob pressão, o mesmo encontra-se isolado à saída do depósito pelo que qualquer fuga que possa ocorrer será sempre de dimensão muito reduzida.

Com efeito, admitindo que todo o GPL líquido existente nas tubagens entre o depósito e o vaporizador seria libertado no caso de ocorrer uma fuga e considerando as tubagens de maior diâmetro utilizadas (8 mm), a quantidade de gás libertado seria inferior a 0,13 kg.

Com vista a determinar o potencial impacto deste incidente foi modelada a rotura de uma tubagem de ligação entre o depósito e o vaporizador considerando-se dois cenários: a rotura total da tubagem e uma rotura parcial da tubagem, correspondente a um orifício com 20% do diâmetro da tubagem.

A Figura 2 apresenta a massa de GPL libertada em função do tempo para as duas situações consideradas.

APETRO  
Análise de Risco a Sistemas de GPL para Veículos em Parques de Estacionamento Enterrados  
Rotura de tubagem de GPL – Massa libertada em função do tempo

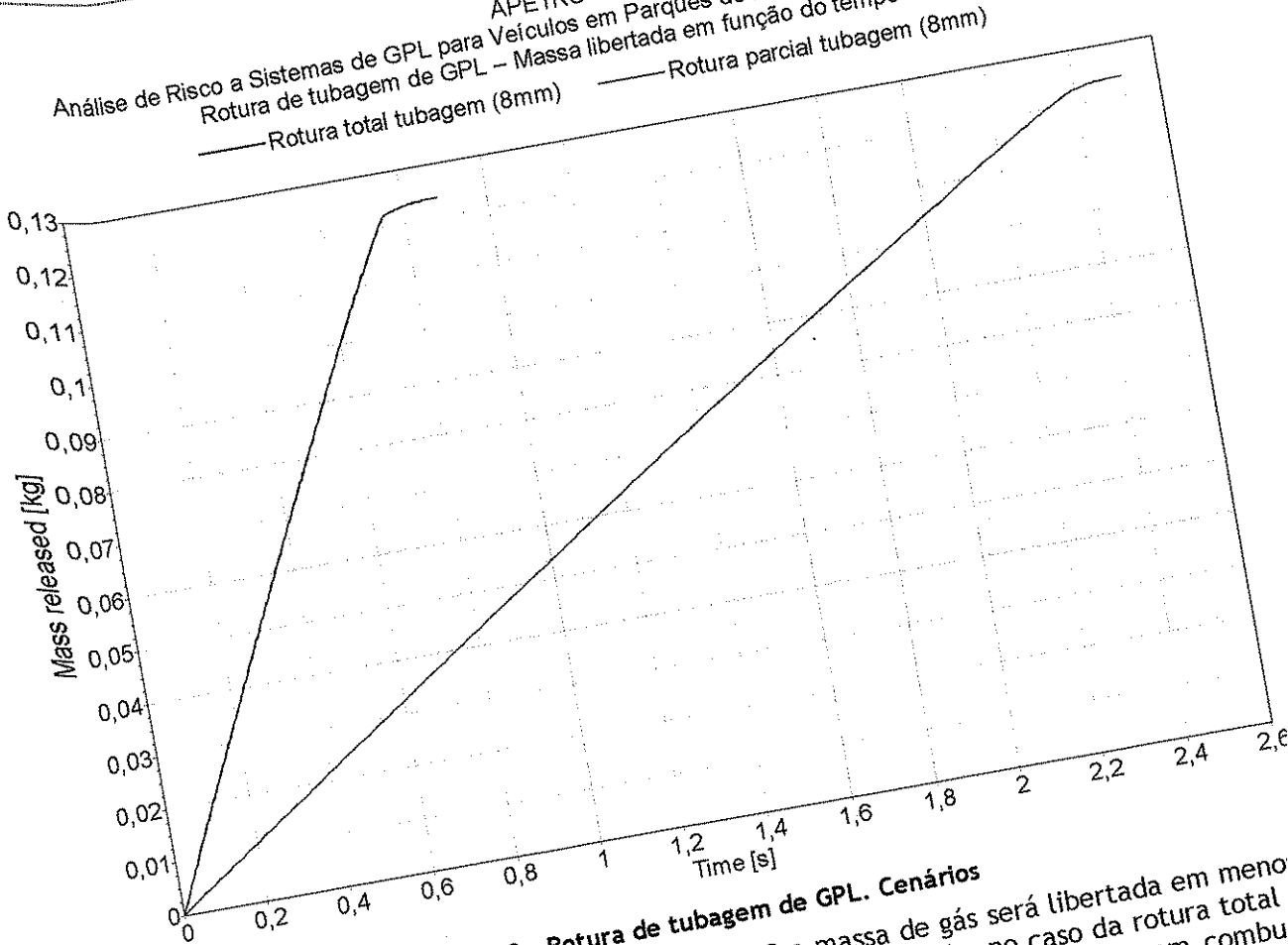


Figura 2 - Rotura de tubagem de GPL. Cenários

Como se pode verificar analisando o gráfico da Figura 2 a massa de gás será libertada em menos de três segundos, no caso da rotura parcial, e em menos de um segundo, no caso da rotura total que o fenómeno de o jacto de libertação adquirir energia de activação e ficar em combustão ancorado no ponto de libertação e provocar a propagação do fogo a outros componentes do veículo, assim, a hipótese de uma nuvem com origem no gás libertado adquirir energia de activação e explodir, provocando danos, é muito pouco provável por não haver tempo para tal.

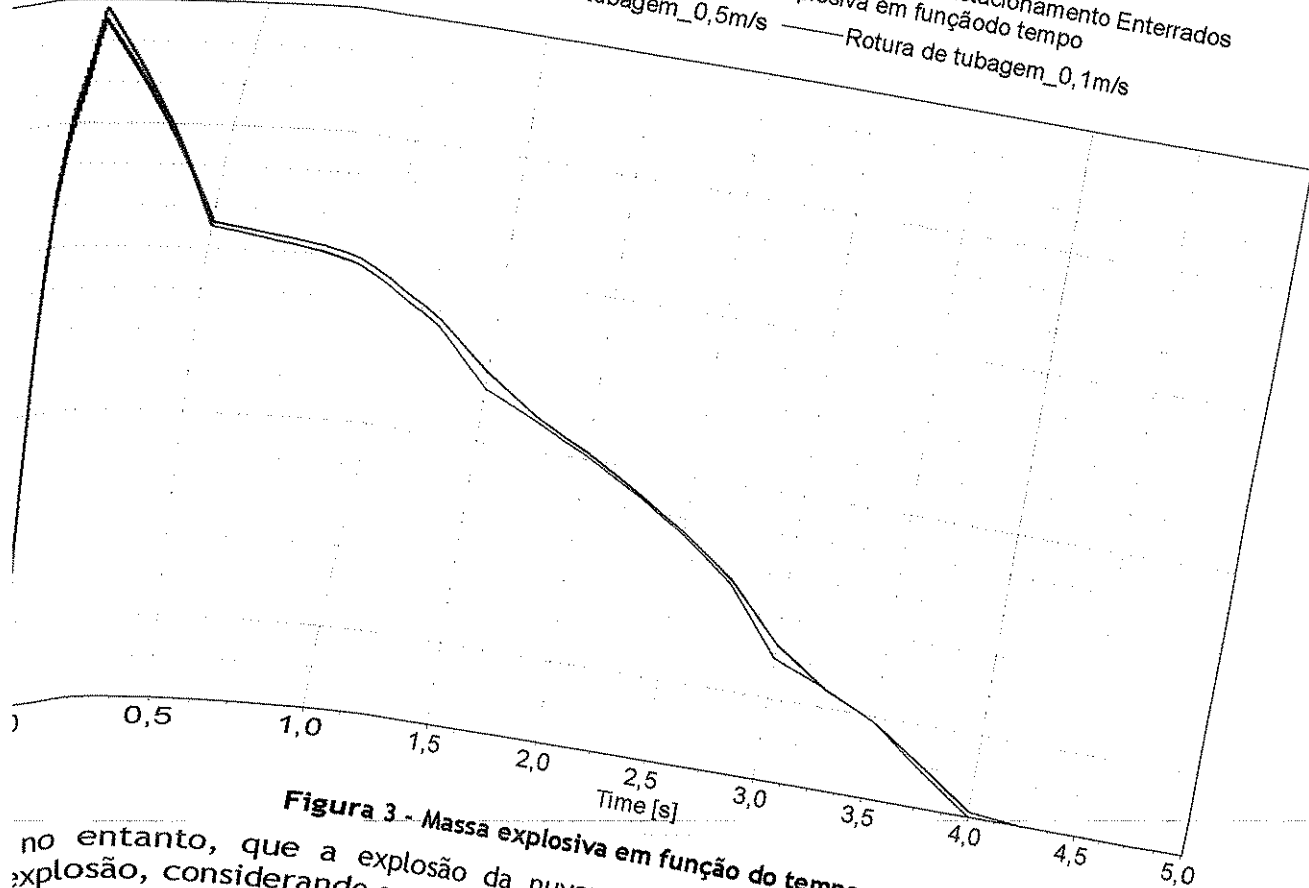
Modelando a libertação de GPL com vista a determinar a quantidade de gás que poderia dentro do domínio de inflamabilidade verificou-se (Figura 3) que só existem condições para uma explosão até 4 segundos após a libertação, isto é, a probabilidade de a nuvem adquirir energia de activação é extremamente reduzida. Verifica-se ainda que, para a condição de velocidade de 0,1m/s, a quantidade máxima de GPL que se encontrará em qualquer momento dentro do domínio de inflamabilidade é inferior a 0,085 kg, o que ocorre a cerca de 0,5 segundos após a libertação. Para a condição em que a velocidade do ar é 0,5m/s, a quantidade máxima de GPL que se encontrará em qualquer momento dentro do domínio de inflamabilidade é inferior a 0,1 kg, o que ocorre a cerca de 0,3 segundos após a libertação. Isto é, neste cenário a velocidade do ar é determinante para o seu desenvolvimento.

Elaborado por:



a zona em que se admite que possa existir uma atmosfera inflamável resultante deste sistema numa área aproximadamente elíptica com a dimensão de 1,7 m x 0,9 m, isto é, a área ocupada pelo veículo. Neste sentido, atendendo à muito curta duração do regime de deflagração, considera-se muito pouco provável que possa ocorrer uma explosão de origem na rotura da tubagem de GPL.

**Análise de Risco** APETRO  
 Risco a Sistema de GPL para Veículos em Parques de Estacionamento Enterrados  
 Rotura de tubagem de GPL - Massa explosiva em função do tempo



**Figura 3 - Massa explosiva em função do tempo**

no entanto, que a explosão da nuvem de GPL possa ser possível, foi modelada a explosão, considerando-se a quantidade máxima susceptível de estar presente (0,085kg), não se encontraria numa situação de confinamento parcial (20%) e que a explosão ocorrerá de deflagração, atendendo à inexistência de turbulência ou outras condições que regime de explosão. Foi, assim, assumido um rendimento da explosão de 30%.  
 lições verifica-se (Figura 4) que a onda de pressão originada pela explosão atingirá um valor de 52 mbar no local da explosão sendo de admitir danos ligeiros em equipamentos e vidros, por exemplo) até cerca de 7 m do local da explosão, distância a que se ocorra um valor de sobrepressão de 10 mbar.  
 gerais, recorrendo aos valores típicos para representar os efeitos de uma explosão, tem-se:

Tabela 3 - Efeitos da explosão

$\Delta p$ (bar)	Efeito	Distância (m)
0,3	Destruição generalizada. Possíveis danos para elementos estruturais	NA
0,1	Destruição significativa de equipamentos, tubagens e estruturas ligeiras. Elementos estruturais não são afectados	NA
0,03	Destruição de vidros. Equipamentos e estruturas ligeiras ou com superfícies significativas são afectadas	2
0,01	Destruição de 10% de vidros. Limiar teórico dos efeitos de uma explosão	7

APETRO

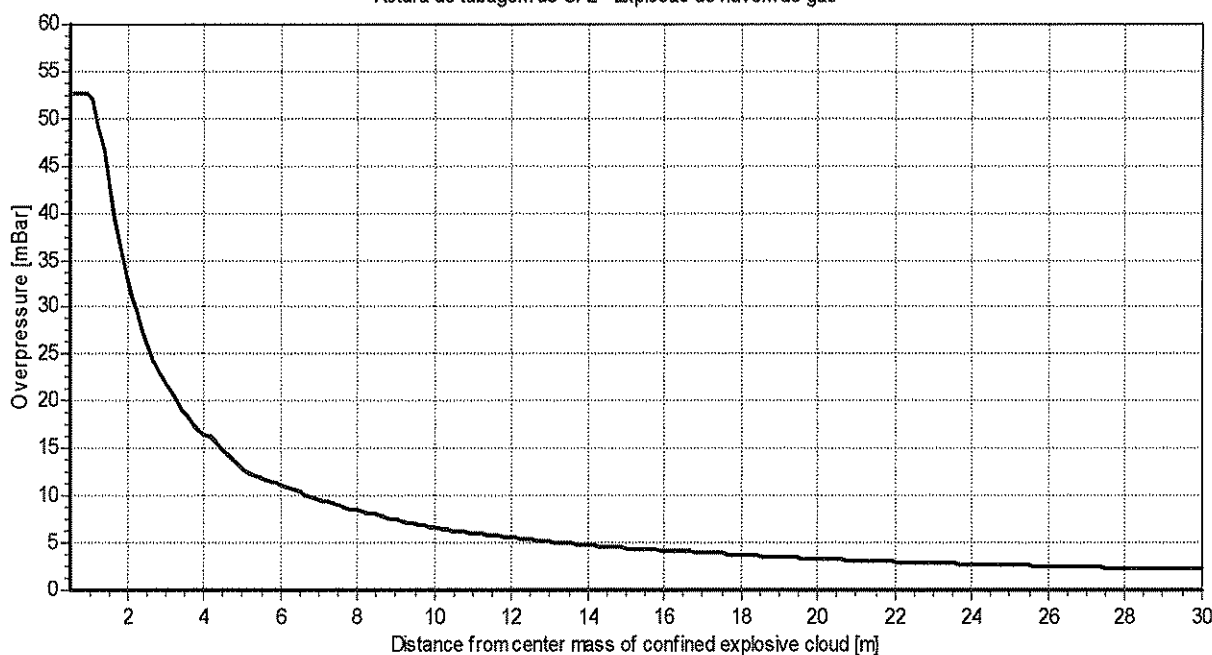
 Análise de Risco a Sistemas de GPL para Veículos em Parques de Estacionamento Enterrados  
 Rotura de tubagem de GPL - Explosão de nuvem de gás


Figura 4 - Explosão de GPL. Sobrepressão em função da distância

#### 4.1.3. FUGAS PELO RESERVATÓRIO

Como já referido, os reservatórios de GPL instalados nos veículos automóveis são elementos extremamente resistentes e são submetidos no seu processo de fabrico a vários e cuidadosos processos e ensaios com vista a assegurar a sua integridade estrutural. Adicionalmente a sua localização no veículo protege os reservatórios de acções mecânicas como sejam impactos ou vibrações, o que minimiza a probabilidade de ocorrer uma fuga por falha estrutural ou por acção mecânica externa.

A literatura científica especializada refere como valores de probabilidade de falha estrutural *a frio* (isto é, falha com origem em falha do próprio equipamento sem qualquer acção externa, nomeadamente aumento de temperatura) de reservatórios de GPL valores da ordem de:

Elaborado por:



APETRO

 Estudo de Risco - Veículos de GPL em  
 Parques de Estacionamento  
 Subterrâneos

- $5,46 \times 10^{-8}$ /ano, de acordo com o estudo *Risk Assessment of Incidents of LPG Cars Parked in Underground Garages and Comparison With Petrol Cars* efectuado em Itália;
- 0,0004/milhão de veículos estacionados de forma permanente, de acordo com o estudo *Risk Comparison of LPG and Petrol Vehicles in Public Car Parks*, efectuado pelo TNO - Institute for Environmental Sciences, na Holanda.

Em termos genéricos, a base de dados de fiabilidade constante no documento *Process Equipment Reliability Data*, editado pelo *Center for Chemical Process Safety* do *American Institute of Chemical Engineers*, atribui uma probabilidade de  $1,24 \times 10^{-6}$  para a falha de reservatórios metálicos pressurizados, enquanto que na publicação *Layer of Protection Analysis* editado pelo *Center for Chemical Process Safety* do *American Institute of Chemical Engineers* a probabilidade média de falha residual de um reservatório metálico sob pressão tipo de dispositivo varia entre o valor  $1 \times 10^{-5}$  e  $1 \times 10^{-7}$ .

Analisando os valores acima, verifica-se que existe consistência entre as diversas fontes podendo concluir-se que a probabilidade de ocorrência de uma falha de um reservatório de GPL instalado num veículo automóvel estacionado num parque de estacionamento subterrâneo é muito baixa devendo ser considerada mais no campo das possibilidades do que nas probabilidades.

No que se refere ao reservatório, subsiste a possibilidade de ocorrência de uma fuga pela ligação de um acessório ao mesmo ou por falha do próprio acessório, por exemplo, uma válvula de segurança.

Quanto ao primeiro caso, fuga por uma ligação de acessório ao reservatório, há que ter em consideração o facto de os mesmos serem instalados em alojamentos estanques que, para além de protegerem os acessórios de pequenas agressões físicas e ambientais, recolhem e conduzem qualquer fuga que possa ocorrer para o exterior do veículo, se necessário através de uma tubagem e um escape apropriados. Neste caso, as condições de libertação serão, considerando o pior cenário, em tudo semelhantes à já modelada libertação por tubagem de ligação, quer no que diz respeito à probabilidade de ocorrência, quer no que se refere aos efeitos e consequências.

No que se refere a falha de acessório acoplado ao reservatório, deverá ser tida em conta a válvula de segurança de sobrepressão que, em caso de falha, poderá ocasionar uma fuga prolongada de GPL para a atmosfera envolvente do veículo.

A literatura científica refere, em termos de probabilidade de ocorrência deste cenário os seguintes valores:

- $9,97 \times 10^{-4}$ /ano, de acordo com o estudo *Risk Assessment of Incidents of LPG Cars Parked in Underground Garages and Comparison With Petrol Cars* efectuado em Itália;
- 20/milhão de veículos estacionados de forma permanente, de acordo com o estudo *Risk Comparison of LPG and Petrol Vehicles in Public Car Parks*, efectuado pelo TNO - Institute for Environmental Sciences, na Holanda.

Em termos genéricos, a base de dados de fiabilidade constante no documento *Process Equipment Reliability Data*, editado pelo *Center for Chemical Process Safety* do *American Institute of Chemical Engineers*, atribui uma probabilidade de  $2,41 \times 10^{-3}$  para a falha de válvulas de segurança com mola, enquanto que na publicação *Layer of Protection Analysis* editado pelo *Center for Chemical Process Safety* do *American Institute of Chemical Engineers* a probabilidade média de abertura inopinada de válvula de segurança varia entre o valor  $1 \times 10^{-2}$  e  $1 \times 10^{-4}$ .

Apesar de ser um valor francamente superior ao da falha estrutural de um reservatório este valor é, ainda, um valor de probabilidade muito baixo.



Neste sentido, considera-se ser este o pior cenário mais provável de ocorrer envolvendo uma libertação de GPL.

Considera-se assim para efeitos de modelação a falha catastrófica de uma válvula de segurança, correspondendo à sua abertura total por tempo indeterminado, provocando a libertação total do GPL existente no tanque.

Nestas condições tem-se:

#### Condições de libertação

- Capacidade do reservatório - 100 L (56 kg)
- Quantidade de GPL no reservatório - 80 L (44,8 kg)
- Diâmetro do orifício de descarga - 8mm
- Pressão - Correspondente à tensão de vapor à temperatura a que se encontra o GPL no interior do depósito.

Com base nos dados acima, prevê-se um caudal de descarga médio de 0,108 kg/s durante um tempo representativo da descarga de 375 segundos conforme se pode ver na Figura 5.

Modelando a libertação de GPL com vista a determinar a quantidade de gás que poderia estar dentro do domínio de inflamabilidade verificou-se (Figura 6) que existem condições para ocorrer uma explosão até cerca de 800 segundos após a libertação, para um regime de ventilação mais baixo (0,1 m/s), ou até cerca de 200 segundos após a libertação, para um regime de ventilação mais elevado (0,5 m/s) isto é, a probabilidade de a nuvem adquirir energia de activação é relativamente reduzida e terá uma duração, nas piores condições, de pouco mais de 13 minutos após o início da libertação.

Verifica-se ainda que, para a condição de velocidade do ar 0,1m/s, a quantidade de GPL que se encontrará dentro do domínio de inflamabilidade é, 60 segundos após o início da libertação, de cerca de 5,5 kg, aumentando progressivamente a quantidade de GPL no domínio de inflamabilidade até 165 segundos após a libertação, em que se prevê que a quantidade de GPL no domínio de inflamabilidade seja de cerca de 13,6kg.

Para a condição em que a velocidade do ar é 0,5m/s, a quantidade máxima de GPL que se encontrará dentro do domínio de inflamabilidade é, 60 segundos após o início da libertação, de cerca de 3,95kg. Este valor aumenta até aos 4,47kg, cerca de 130 segundos após o início da libertação, começando a dispersar-se até zero, ao fim de cerca de 200 segundos

Por sua vez, a zona em que se admite que possa existir uma atmosfera inflamável resultante deste evento consiste numa área aproximadamente elíptica com as seguintes dimensões:

- Para o regime de ventilação 0,1m/s - 21,1m x 3,1m
- Para o regime de ventilação 0,5 m/s - 36,3m x 1,5m

Verifica-se neste cenário que o regime de ventilação tem um papel muito importante no controlo da massa explosiva quer em termos da quantidade de GPL que se pode encontrar no domínio de inflamabilidade, quer no tempo de persistência da nuvem inflamável.

APETRO  
Análise de Risco a Sistemas de GPL para Veículos em Parques de Estacionamento Enterrados  
Falha da PSV de GPL – Taxa de libertação em função do tempo

— APETRO\_Fuga\_PSV

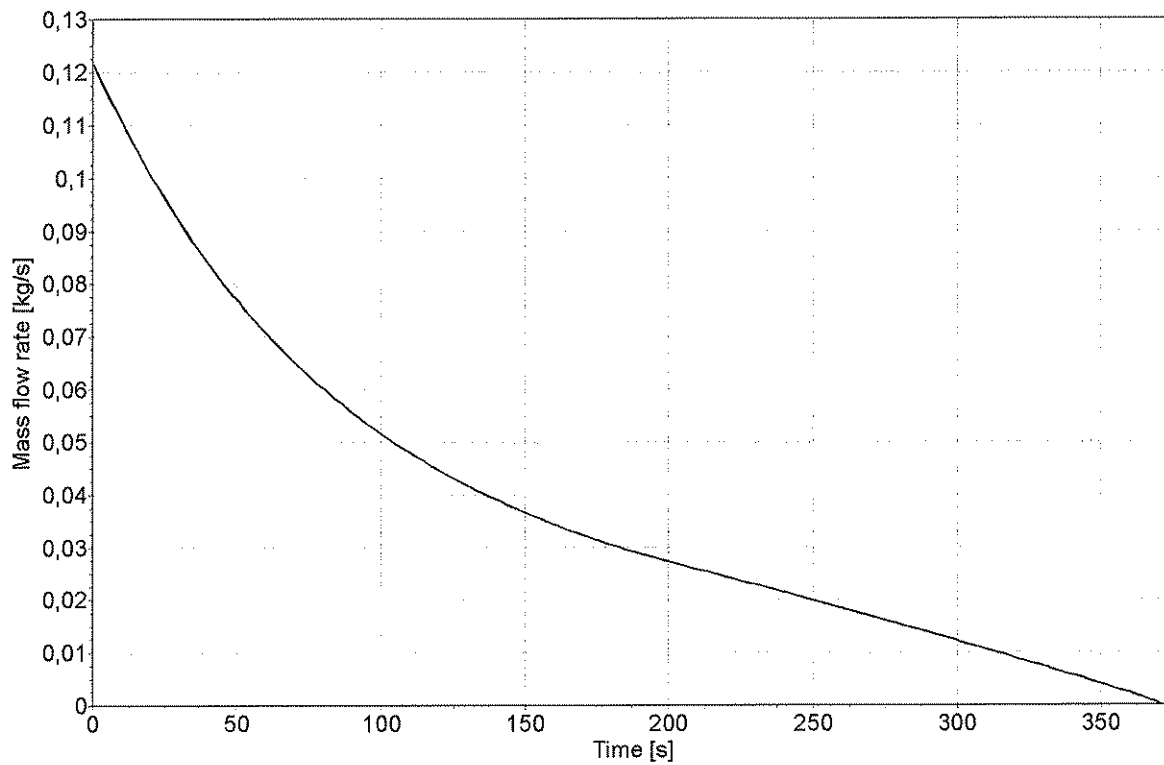


Figura 5 - Falha de PSV. Taxa de libertação de GPL

APETRO  
 Análise de Risco a Sistemas de GPL para Veículos em Parques de Estacionamento Enterrados  
 Falha de PSV de GPL – Massa explosiva em função do tempo

— Fuga PSV\_0,5m/s — Fuga PSV\_0,1m/s

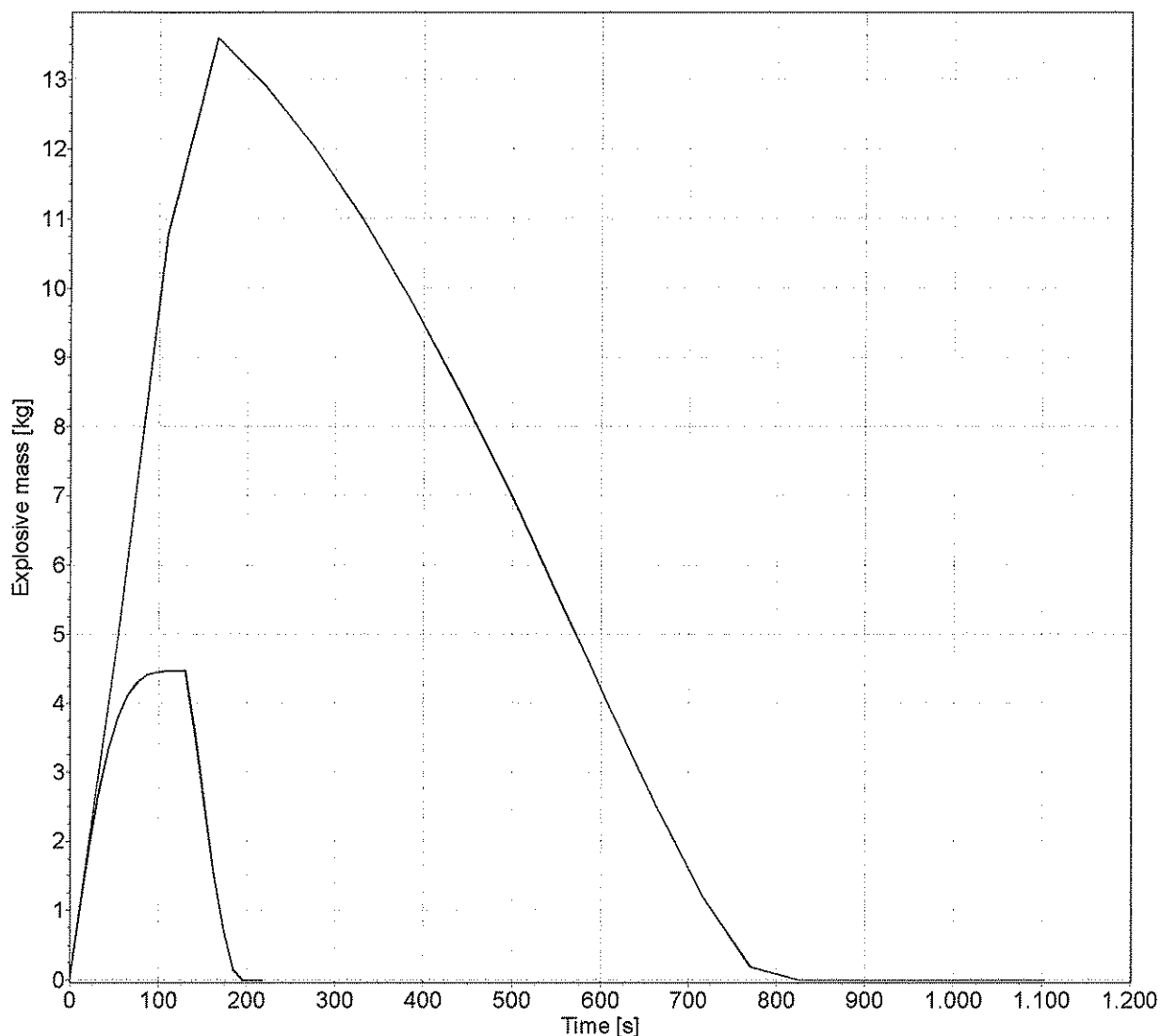
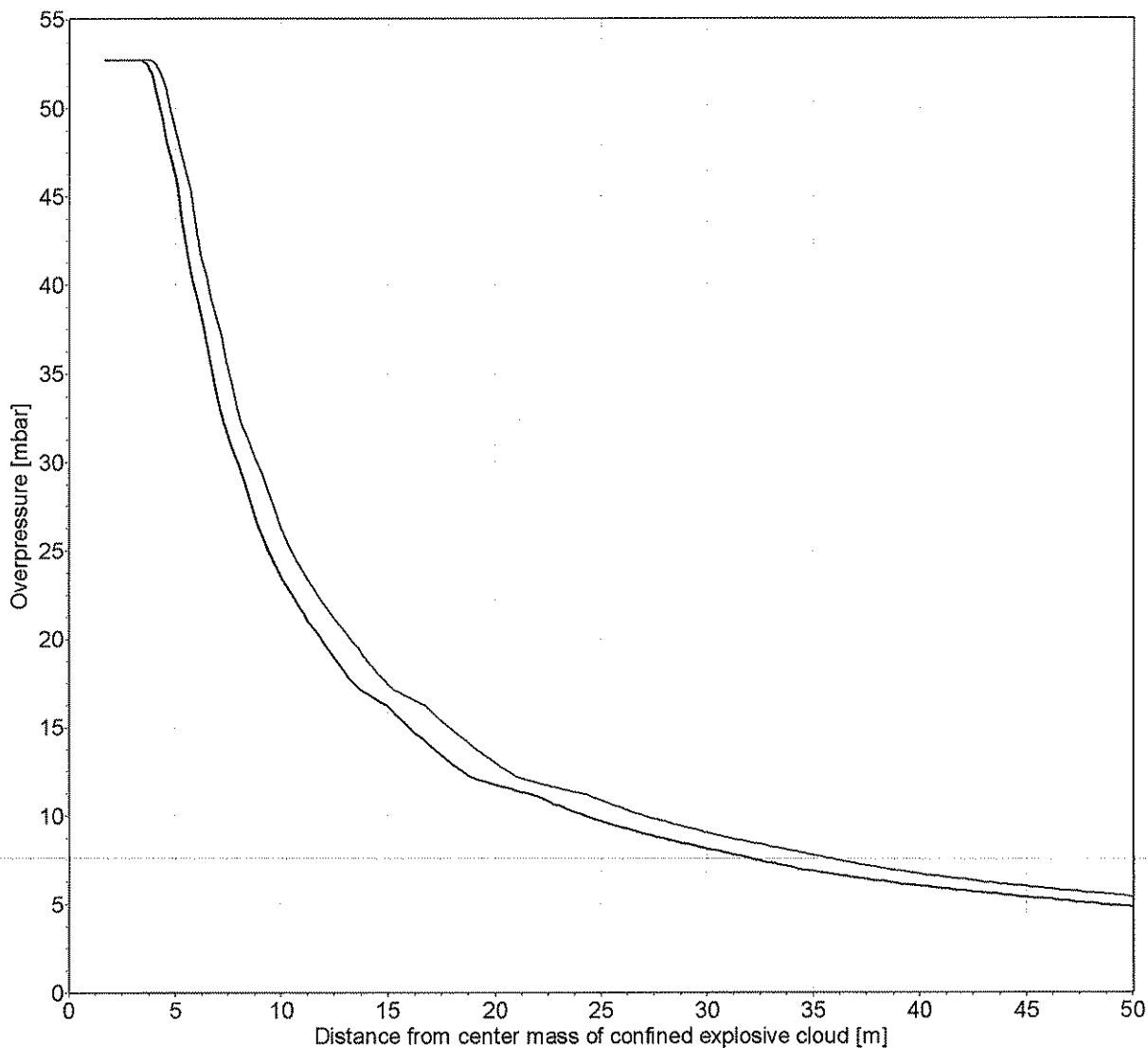


Figura 6 - Variação da massa explosiva em função do tempo

Assumindo o tempo de 60 segundos após o início da libertação como sendo aquele em que a nuvem pode adquirir energia de activação obtêm-se os seguintes efeitos resultantes da explosão (Figura 7) em que se considerou que a nuvem se encontraria numa situação de confinamento parcial (20%) e que a explosão ocorrerá em regime de deflagração, atendendo à inexistência de turbulência ou outras condições que agravem o regime de explosão. Foi, assim, assumido um rendimento da explosão de 30%.

**APETRO**  
**Análise de Risco a Sistemas de GPL para Veículos em Parques de Estacionamento Enterrados**  
**Falha de PSV de GPL – Explosão de GPL - Sobrepressão em função da distância**

— PSV\_0,5m/s — PSV\_0,1m/s



**Figura 7 - Explosão de nuvem de GPL. Sobrepressão em função da distância**

Em termos gerais, recorrendo aos valores típicos para representar os efeitos de uma explosão, tem-se para o regime de ventilação 0,1 m/s (Tabela 4) e para o regime de ventilação 0,5 m/s (Tabela 5):

**Tabela 4 - Efeitos da explosão - Regime de ventilação 0,1 m/s**

$\Delta p$ (bar)	Efeito	Distância (m)
0,3	Destruição generalizada. Possíveis danos para elementos estruturais	NA
0,1	Destruição significativa de equipamentos, tubagens e estruturas ligeiras. Elementos estruturais não são afectados	NA
0,03	Destruição de vidros. Equipamentos e estruturas ligeiras ou com superfícies significativas são afectadas	9
0,01	Destruição de 10% de vidros. Limiar teórico dos efeitos de uma explosão	27

**Tabela 5 - Efeitos da explosão - Regime de ventilação 0,5 m/s**

$\Delta p$ (bar)	Efeito	Distância (m)
0,3	Destruição generalizada. Possíveis danos para elementos estruturais	NA
0,1	Destruição significativa de equipamentos, tubagens e estruturas ligeiras. Elementos estruturais não são afectados	NA
0,03	Destruição de vidros. Equipamentos e estruturas ligeiras ou com superfícies significativas são afectadas	8
0,01	Destruição de 10% de vidros. Limiar teórico dos efeitos de uma explosão	24

## 4.2. RISCO DA EXPOSIÇÃO DOS VEÍCULOS AOS EFEITOS DE UM CENÁRIO CUJA ORIGEM É ALHEIA AO PRÓPRIO VEÍCULO

No que se refere ao risco da exposição de veículos aos efeitos de um cenário cuja origem é alheia ao próprio veículo, consideram-se dois cenários tipo:

- A afectação do sistema de GPL pelos efeitos mecânicos de um fenómeno externo (colapso de uma estrutura ou explosão, por exemplo); e
- Exposição do veículo a um nível de radiação térmica anormal, como seja o decorrente de um incêndio que ocorra num veículo próximo.

### 4.2.1. EXPOSIÇÃO A EFEITOS MECÂNICOS EXTERNOS

Como já foi referido, considera-se neste cenário tipo a exposição de um sistema de GPL instalado num veículo aos efeitos mecânicos de um fenómeno externo, considerando-se como sendo os mais prováveis os decorrentes da variação de sobrepressão ou os efeitos de vibrações ou projecção de fragmentos com origem no colapso de uma estrutura, de um sismo ou de uma explosão que ocorra na proximidade do veículo.

Os efeitos destas acções mecânicas sobre o sistema de GPL de um veículo far-se-ão sentir sobretudo ao nível do reservatório e/ou das tubagens ou outros órgãos do sistema, considerando-se as tubagens como sendo, neste caso, o elemento mais sensível do sistema.

No que se refere ao depósito, a sua rigidez estrutural intrínseca, a sua localização e as soluções adoptadas para a sua fixação permitem assumir que muito dificilmente o reservatório será afectado por acções mecânicas externas, mesmo que de grande intensidade como o demonstram vários estudos e dados estatísticos.

Quando comparados com outros sistemas de combustível, os reservatórios de GPL são muito mais resistentes e menos susceptíveis de serem perfurados em caso de acidente.

No que se refere às tubagens estas são mais susceptíveis de originar fugas quando comparadas com as tubagens de outros sistemas de combustível. No entanto, ao contrário da generalidade dos restantes sistemas de combustível, os sistemas de GPL estão protegidos com válvulas de não retorno, válvulas de corte e/ou válvulas de excesso de caudal o que faz com que uma fuga significativa por um sistema de GPL seja muito menos provável do que no caso de um qualquer outro sistema de alimentação.

Assim, no caso de uma acção mecânica externa, os efeitos sobre um veículo movido a GPL serão, no limite, em tudo semelhantes aos referidos em 4.1.2.

#### 4.2.2. EXPOSIÇÃO A NÍVEL DE RADIAÇÃO ANORMAL

O cenário tipo mais frequente para esta situação resulta da ocorrência de um incêndio na proximidade de um veículo com sistema a GPL em que o mesmo se encontra exposto à energia libertada e, conseqüentemente, sofre um aumento de pressão, associado a um aumento das tensões internas a que se encontra submetido.

Com vista a avaliar os efeitos da exposição de um sistema de GPL a um nível de radiação incidente anormal foram efectuados vários ensaios com fogos reais, realizados por várias entidades europeias. De entre os vários testes efectuados, refere-se o que deu origem ao relatório *Safety of the LPG Tanks Overfilling & Fire Teste Report* elaborado pelo *Consorzio GPL Autotrazione*, em Itália.

Neste contexto, foram efectuados vários ensaios em que reservatórios de GPL, com várias configurações e tipos de acessórios, foram sujeitos à acção de um incêndio externo, avaliando-se, em condições de ensaio normalizadas as respectivas conseqüências.

De cinco ensaios efectuados, apenas num se registou o colapso do reservatório, sendo que o mesmo ocorreu após 28 minutos de exposição aos efeitos directos de um incêndio encontrando-se, na altura, as paredes do reservatório a uma temperatura de cerca de 650°C.

Em todos os restantes ensaios, os dispositivos de segurança existentes (válvulas de sobrepressão e dispositivo de segurança de sobrepressão) foram suficientes para prevenir o colapso do reservatório.

Um outro conjunto de ensaios foi efectuado pelo TNO - Institute for Environmental Sciences, na Holanda que esteve na origem do relatório *Bonfire tests automotive LPG tanks* (Anexo XXX). Neste conjunto de testes, foram efectuados nove ensaios de exposição de reservatórios de GPL com diversos níveis de enchimento, posição e acessórios, à acção directa dos efeitos das chamas e foram avaliadas as respectivas conseqüências.

Dos nove ensaios efectuados verificou-se o colapso do reservatório em dois dos ensaios sendo que num deles ocorreu apenas quando apenas existia gás no interior do reservatório e o outro ocorreu

num reservatório de 300 L, cheio a 80%, configuração que não é praticada em veículos automóveis ligeiros.

Em todas as restantes situações os dispositivos de segurança existentes (válvulas de sobrepressão e dispositivo de segurança de sobrepressão) foram suficientes para prevenir o colapso do reservatório.

Neste sentido, não se considera que a exposição de veículos alimentados a GPL a condições extremas de temperatura, nomeadamente as decorrentes de um incêndio com origem estranha ao veículo, apresente um nível de risco significativo.

## 5. FACTORES DE RISCO COM VEÍCULOS A GASOLINA

À semelhança dos sistemas a GPL, os riscos associados aos veículos alimentados a gasolina, quando em parques de estacionamento subterrâneos, advêm de:

- Ocorrências com origem no próprio veículo como sejam, por exemplo, fugas de combustível por falhas estruturais de reservatórios ou de tubagens;
- Risco da exposição dos veículos aos efeitos de um cenário cuja origem é alheia ao próprio veículo, como seja, por exemplo, um incêndio que ocorra numa zona próxima.

Sendo os sistemas a gasolina sistemas abertos e não pressurizados, não será efectuada a comparação no que se refere ao aumento de pressão por esta não ocorrer em condições normais de funcionamento do sistema.

### 5.1. FUGAS POR TUBAGENS E ACESSÓRIOS DO SISTEMA

Os sistemas de alimentação a gasolina são, regra geral, mais simples e mais sujeitos à ocorrência de incidentes que os sistemas de alimentação a GPL.

De acordo com o estudo *Risk Comparison of LPG and Petrol Vehicles in Public Car Parks*, efectuado pelo TNO - Institute for Environmental Sciences, na Holanda a frequência de incidentes de falha de tubagens de sistemas de alimentação a gasolina é da ordem das 360/milhão de veículos estacionados de forma permanente, contra 0,013 dos sistemas de GPL.

Em termos genéricos, a base de dados de fiabilidade constante no documento *Process Equipment Reliability Data*, editado pelo *Center for Chemical Process Safety* do *American Institute of Chemical Engineers*, atribui uma probabilidade de  $2,35 \times 10^{-4}$  para a falha de tubagens metálicas (sistema de GPL) contra  $3,86 \times 10^{-3}$  de tubagens flexíveis reforçadas (como são as frequentemente usadas em sistemas de gasolina).

Comparando os dois sistemas obtém-se (Tabela 6):

Tabela 6 - Comparação da frequência/probabilidade de falhas de tubagens entre os sistemas a gasolina e GPL

Fonte/Situação	Sistema GPL	Sistema Gasolina
TNO - Institute for Environmental Sciences / Frequência de falha de tubagens por milhão de veículos estacionados	0,012 - 0,014	360
<i>Process Equipment Reliability Data</i> / Probabilidade de falha/ano de tubagem tipo	$2,35 \times 10^{-4}$	$3,86 \times 10^{-3}$

O facto do sistema de armazenamento e de alimentação de combustível ao motor dos veículos se encontrar, nos veículos a gasolina, à pressão atmosférica reduz não só a probabilidade de ocorrência de uma fuga como a sua dimensão.

À semelhança das fugas de GPL, as fugas de gasolina podem ser perigosas porque têm o potencial de formar atmosferas potencialmente explosivas que poderão estar na origem de um incêndio ou explosão no caso do veículo se encontrar no interior ou num espaço pouco ventilado, como é o caso de um parque de estacionamento subterrâneo.

Com vista a determinar o potencial impacto deste incidente foi modelada a rotura de uma tubagem de gasolina associada ao reservatório considerando-se dois cenários: a rotura total da tubagem e uma rotura parcial da tubagem, correspondente a um orifício com 20% do diâmetro da tubagem.

Para efeitos de modelação, considerou-se uma tubagem com um diâmetro de 8mm ligada a um reservatório com 60 L de gasolina.

Neste cenário, atendendo a que, regra geral, não existem válvulas de corte, ocorrerá um derrame contínuo, embora a um caudal baixo. No caso da rotura total de tubagem, o caudal médio de libertação é de 0,033 kg/s e decorrerá durante cerca de 1430 segundos, libertando-se uma massa de gasolina de 46,18 kg.

No caso de rotura parcial de tubagem ocorrerá um derrame contínuo, embora a um caudal baixo. No caso da rotura total de tubagem, o caudal médio de libertação é de 0,013 kg/s e decorrerá durante cerca de 3550 segundos, libertando-se uma massa de gasolina de 46,18 kg.

A Figura 8 apresenta a massa de gasolina libertada em função do tempo para as duas situações consideradas.

Como primeira diferença a salientar entre os cenários de rotura de tubagem de GPL e de tubagem de gasolina, salienta-se a duração do cenário e a quantidade de produto libertada, sendo em ambos os casos muito superior no caso dos sistemas a gasolina. Isto é, em regra, a rotura de uma tubagem de gasolina implica, para as mesmas condições, uma maior quantidade libertada e manutenção de uma atmosfera potencialmente inflamável durante mais tempo.

Modelando as libertações de gasolina com vista a determinar a quantidade de vapores que poderia estar dentro do domínio de inflamabilidade verificaram-se os seguintes valores de taxa de vaporização da gasolina para as duas condições de ventilação consideradas e dois cenários de rotura (Tabela 7).

Tabela 7 - Taxa de vaporização da gasolina (em kg/s)

Cenário	Ventilação	
	0,1m/s	0,5m/s
Rotura total de tubagem (8mm)	0,008	0,014
Rotura parcial de tubagem (8mm)	0,004	0,007

A Figura 9 representa a evolução das taxas de vaporização de gasolina para os diversos cenários considerados.

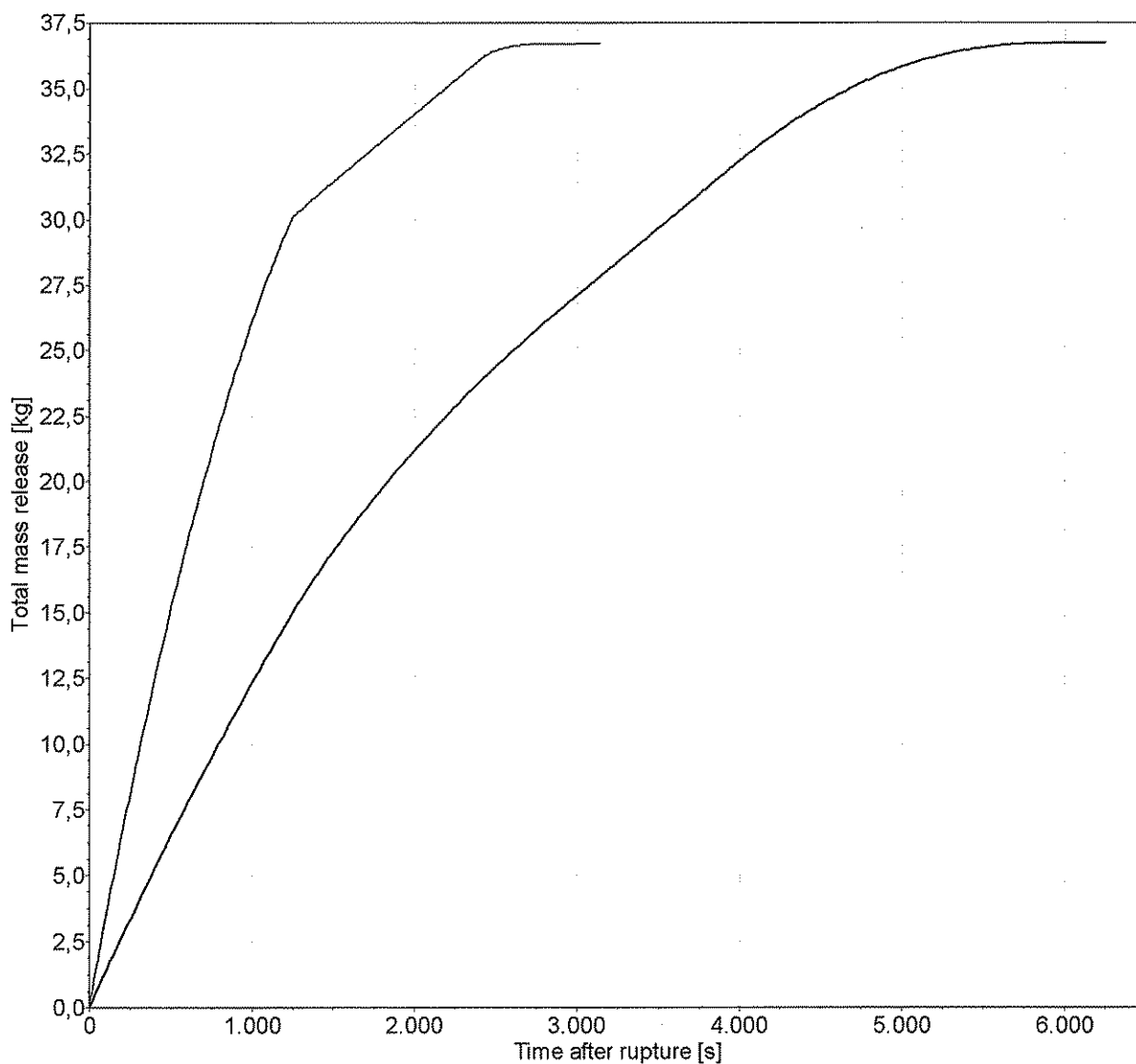
As áreas máximas que os derrames decorrentes de cada um dos cenários podem atingir encontram-se resumidas na Tabela 8.



**Tabela 8 - Áreas máximas dos derrames (m<sup>2</sup>)**

Cenário	Ventilação	
	0,1m/s	0,5m/s
Rotura total de tubagem (8mm)	7,5	6,9
Rotura parcial de tubagem (8mm)	4,7	3,5

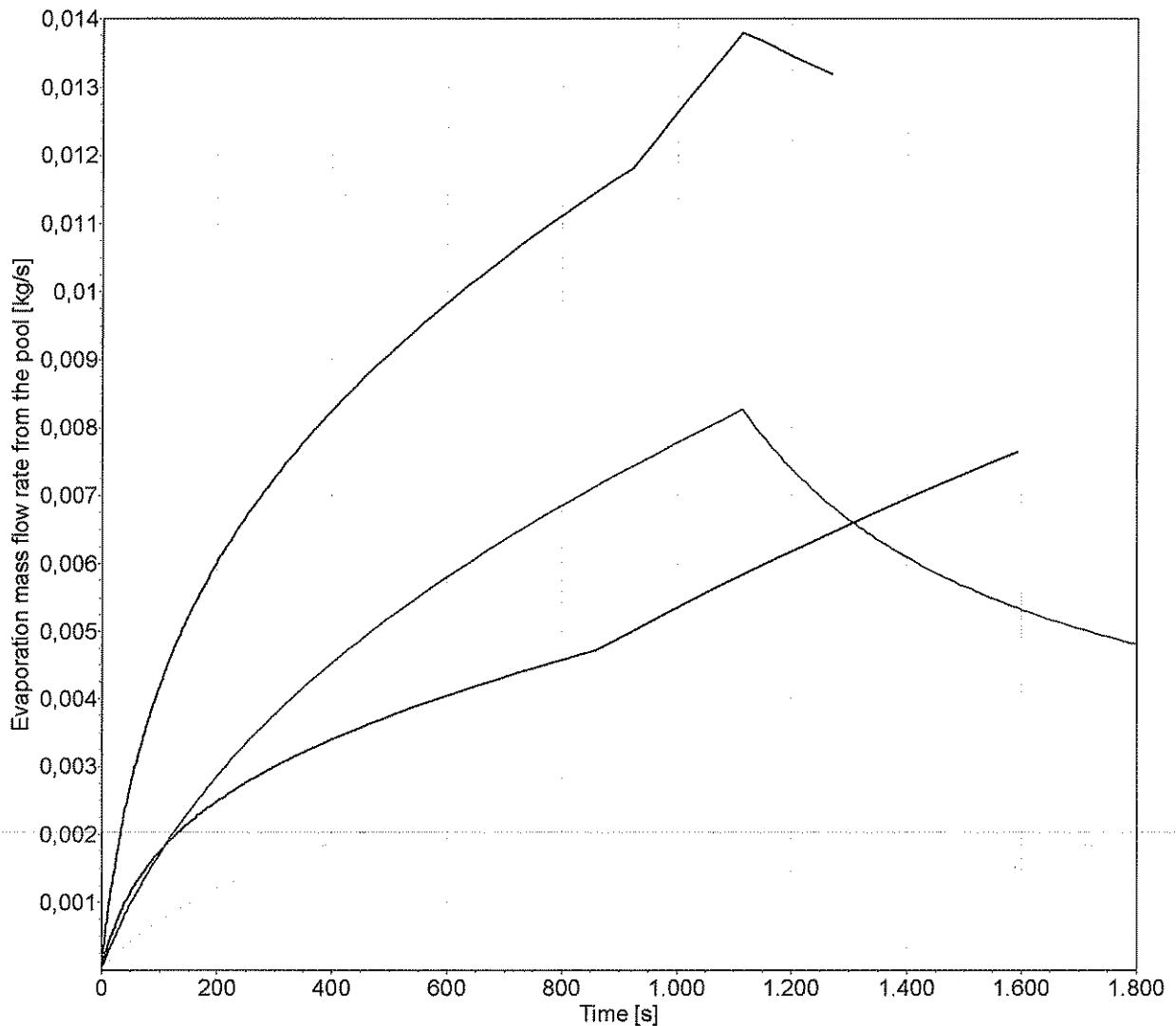
APETRO  
 Análise de Risco a Sistemas de GPL para Veículos em Parques de Estacionamento Enterrados  
 Rotura de tubagem de gasolina – Massa libertada em função do tempo  
 — Rotura parcial tubagem (8mm) — Rotura total tubagem (8mm)



**Figura 8 - Rotura de tubagem de gasolina. Massa libertada em função do tempo**

**APETRO**  
 Análise de Risco a Sistemas de GPL para Veículos em Parques de Estacionamento Enterrados  
 Rotura de tubagem de gasolina – Taxa de vaporização em função do tempo

— Rotura parcial (0,5m/s) — Rotura total (0,1m/s) — Rotura total (0,5m/s)  
 Rotura parcial (0,1m/s)



**Figura 9 - Taxa de vaporização da gasolina para os diferentes cenários**

Com base nos valores obtidos na modelação do derrame e vaporização foi modelada a dispersão de vapores de gasolina de modo a obter a massa de vapores inflamáveis que se poderiam encontrar no domínio de inflamabilidade e dar origem a uma explosão. Atendendo a que estes cenários são cenários com uma duração muito mais prolongada do que os cenários envolvendo GPL, foi assumido que se deveria efectuar o cálculo ao fim de um tempo compatível com a duração do cenário, tendo sido fixado o tempo de 15 minutos (900 segundos).

A Tabela 9 apresenta a quantidade de vapores inflamáveis de gasolina no domínio de inflamabilidade para cada um dos cenários/situações considerados.

Elaborado por:



**Tabela 9 - Massa de vapores inflamáveis no domínio de inflamabilidade (kg)**

Cenário	Ventilação	
	0,1m/s	0,5m/s
Rotura total de tubagem (8mm)	0,093	0
Rotura parcial de tubagem (8mm)	0,0007	0

Verifica-se, assim, que apenas no regime de ventilação mais baixo é teoricamente possível formar-se uma atmosfera explosiva. No entanto, para além da explosão, subsiste a possibilidade de ser fornecida energia de activação ao próprio derrame, originando um incêndio.

No caso da dispersão de vapores inflamáveis no domínio de inflamabilidade, a zona em que se admite que possa existir uma atmosfera inflamável resultante deste evento consiste numa área aproximadamente elíptica com a dimensão de 2,9m x 1,5 m, isto é, praticamente a área ocupada pelo veículo.

Admitindo, no entanto, que a explosão da nuvem de gasolina pode ocorrer, foi modelada a respectiva explosão, considerando-se a quantidade máxima susceptível de estar presente (0,093kg), que a nuvem se encontraria numa situação de confinamento parcial (20%) e que a explosão ocorrerá em regime de deflagração, atendendo à inexistência de turbulência ou outras condições que agravem o regime de explosão. Foi, assim, assumido um rendimento da explosão de 30%.

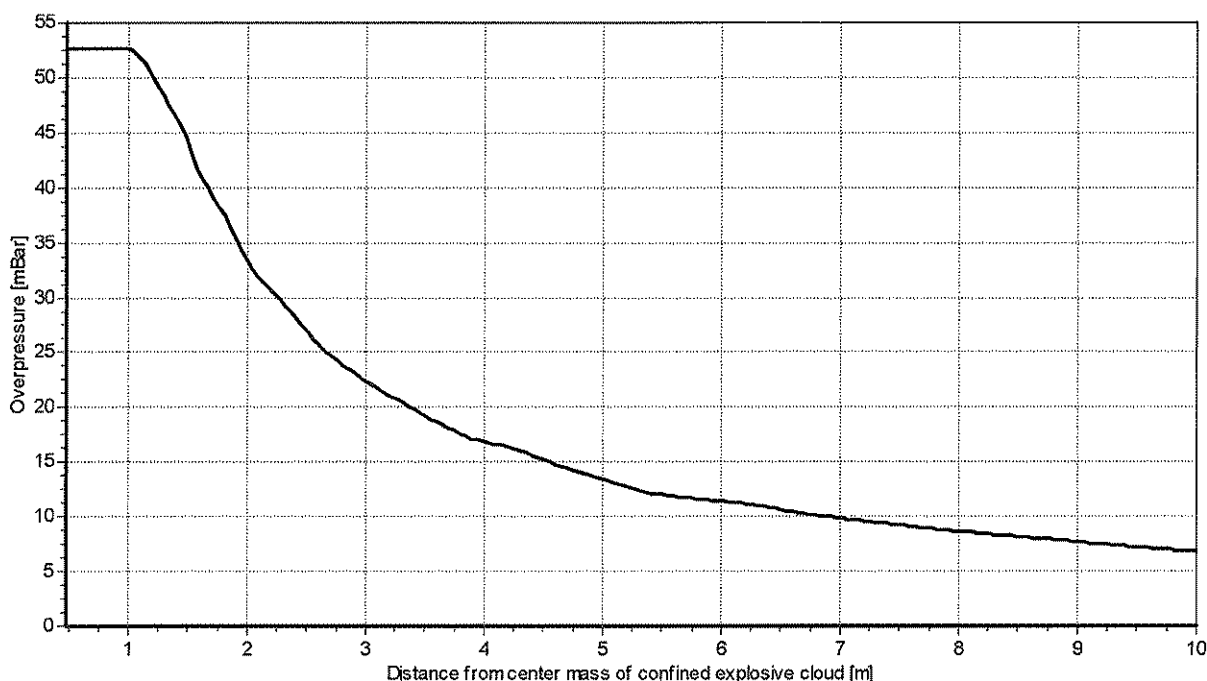
Nestas condições verifica-se (Figura 10) que a onda de pressão originada pela explosão atingirá um valor máximo de 53 mbar no local da explosão sendo de admitir danos ligeiros em equipamentos e estruturas leves (vidros, por exemplo) até cerca de 7 m do local da explosão, distância a que se prevê que ocorra um valor de sobrepressão de 10 mbar.

Em termos gerais, recorrendo aos valores típicos para representar os efeitos de uma explosão, tem-se (Tabela 10):

**Tabela 10 - Efeitos da explosão de vapores de gasolina**

$\Delta p$ (bar)	Efeito	Distância (m)
0,3	Destruição generalizada. Possíveis danos para elementos estruturais	NA
0,1	Destruição significativa de equipamentos, tubagens e estruturas ligeiras. Elementos estruturais não são afectados	NA
0,03	Destruição de vidros. Equipamentos e estruturas ligeiras ou com superfícies significativas são afectadas	2,3
0,01	Destruição de 10% de vidros. Limiar teórico dos efeitos de uma explosão	7

**APETRO**  
 Análise de Risco a Sistemas de GPL para Veículos em Parques de Estacionamento Enterrados  
 Rotura de tubagem de gasolina - Explosão de vapores de gasolina - Sobrepressão em função da distância



**Figura 10 - Explosão de vapores de gasolina. Sobrepressão em função da distância**

Comparando os valores dos efeitos de uma explosão de gasolina com os valores da explosão de GPL, modelados nas mesmas condições, verifica-se que são, em tudo equivalentes.

Como referido, apesar de ser pouco provável a ocorrência de uma explosão é de admitir que, em caso de derrame, este possa adquirir por causa fortuita a energia de activação necessária para que se inicie a combustão dando assim origem a um incêndio.

Os efeitos de um incêndio com origem num derrame de gasolina nas condições acima referidas encontram-se resumidos na Tabela 11.

**Tabela 11 - Efeitos do incêndio de derrame de gasolina**

E (kW/m <sup>2</sup> )	Efeito	Distância (m)
> 25	Destruição generalizada. Possíveis danos para elementos estruturais	NA
12,5	Destruição significativa de equipamentos, tubagens e estruturas ligeiras. Limiar teórico do “efeito dominó”	0,7
4	Suficiente para causar dor em humanos quando expostos por períodos acima de 20 segundos. 0% de fatalidades	1,9
1,6	Limiar do desconforto em humanos para exposições prolongadas	3,5

A Figura 11 apresenta os gráficos da variação dos níveis de radiação incidente em função da distância.

Elaborado por:



**APETRO**  
 Estudo de Risco - Veículos de GPL em  
 Parques de Estacionamento  
 Subterrâneos

APETRO  
 Análise de Risco a Sistemas de GPL para Veículos em Parques de Estacionamento Enterrados  
 Rotura de tubagem de gasolina – Incêndio de derrame. Radiação incidente em função da distância

— Rotura total (8mm)    — Rotura parcial (8mm)

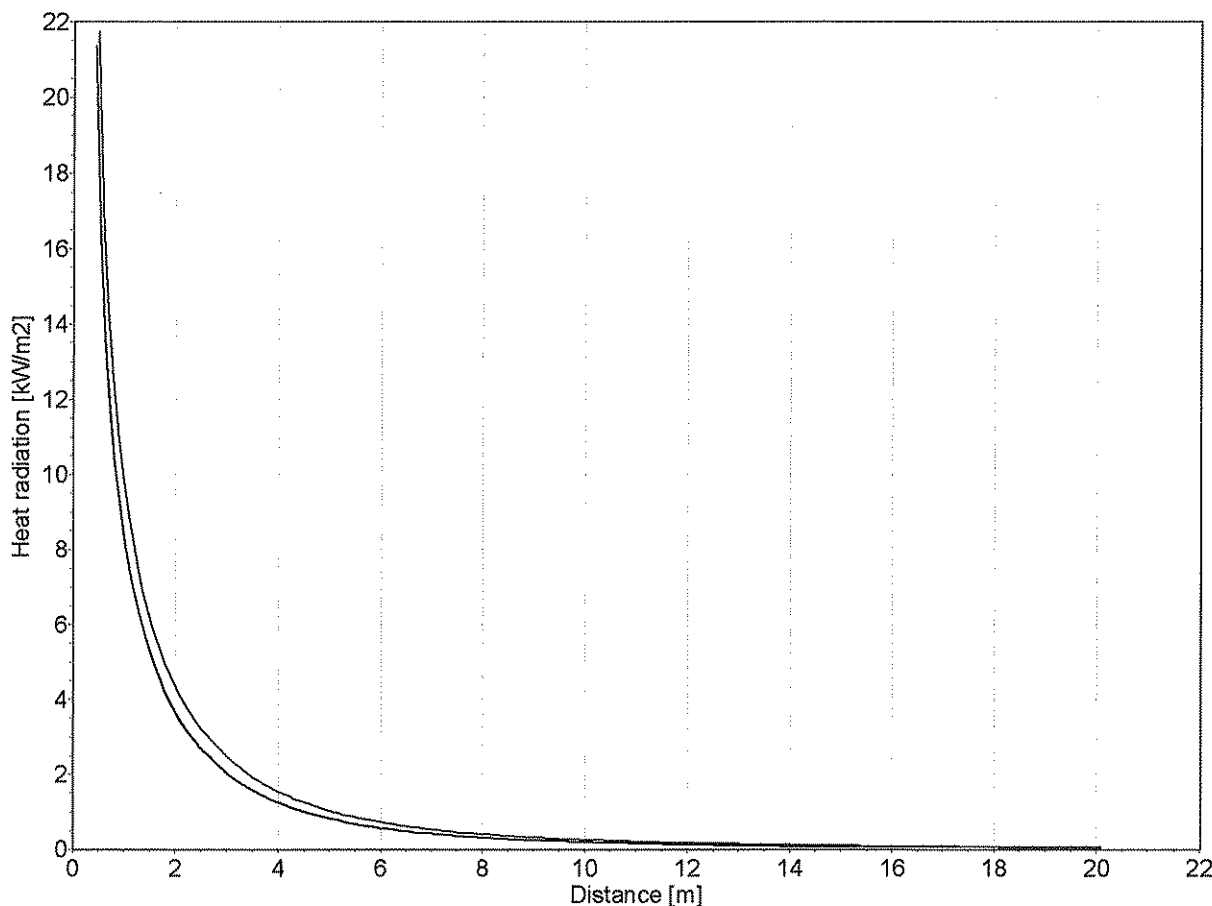


Figura 11 - Incêndio de derrame de gasolina. Radiação incidente em função da distância

Analisado os valores acima, é razoável concluir que, numa primeira fase, os danos resultantes do incêndio de um derrame de gasolina fiquem confinados ao veículo que originou o derrame. No entanto, é possível que em caso de demora na intervenção o incêndio se propague ao próprio, aumentando de intensidade e, como consequência, a veículos e áreas contíguas ao veículo afectado.

## 5.2. RISCO DA EXPOSIÇÃO DOS VEÍCULOS AOS EFEITOS DE UM CENÁRIO CUJA ORIGEM É ALHEIA AO PRÓPRIO VEÍCULO

No que se refere ao risco da exposição de veículos aos efeitos de um cenário cuja origem é alheia ao próprio veículo, consideram-se dois cenários tipo:

- A afectação do sistema de gasolina pelos efeitos mecânicos de um fenómeno externo (colapso de uma estrutura ou explosão, por exemplo); e

- Exposição do veículo a um nível de radiação térmica anormal, como seja o decorrente de um incêndio que ocorra num veículo próximo.

### 5.2.1. EXPOSIÇÃO A EFEITOS MECÂNICOS EXTERNOS

À semelhança dos sistemas de GPL, considera-se neste cenário tipo a exposição de um sistema de gasolina instalado num veículo aos efeitos mecânicos de um fenómeno externo, considerando-se como sendo os mais prováveis os decorrentes da variação de sobrepressão ou os efeitos de vibrações ou projecção de fragmentos com origem no colapso de uma estrutura, de um sismo ou de uma explosão que ocorra na proximidade do veículo.

Os efeitos destas acções mecânicas sobre o sistema de gasolina de um veículo far-se-ão sentir sobretudo ao nível do reservatório e/ou das tubagens ou outros órgãos do sistema, considerando-se as tubagens como sendo, neste caso, o elemento mais sensível do sistema.

Contrariamente aos sistemas de GPL, os sistemas de gasolina instalados em veículos automóveis não obedecem a critérios específicos de rigidez estrutural, de localização ou de fixação de modo a minimizar os efeitos mecânicos externos.

Os reservatórios, sendo atmosféricos, são de concepção menos resistente e mais susceptíveis de serem perfurados em caso de acidente.

Quanto às tubagens, o facto de não se encontrarem permanentemente sob pressão permitiria, em princípio, admitir que a probabilidade de ocorrência de fugas seria inferior aos sistemas de GPL. No entanto, os dados estatísticos disponíveis (ver Tabela 6) apontam em sentido contrário o que poderá dever-se ao tipo de materiais, soluções de montagem, entre outros factores.

Adicionalmente, contrariamente aos sistemas de GPL os sistemas de gasolina não têm a obrigatoriedade de protecção com válvulas de não retorno, válvulas de corte e/ou válvulas de excesso de caudal o que faz com que uma fuga que possa ocorrer num sistema de gasolina, apesar de ocorrer com um caudal reduzido, decorra durante um período prolongado o que faz com que a quantidade libertada seja, em regra bastante superior.

Neste sentido, no caso de uma acção mecânica externa, os efeitos sobre um veículo movido a gasolina serão, no limite, em tudo semelhantes aos referidos em 4.1.25.1.

### 5.2.2. EXPOSIÇÃO A NÍVEL DE RADIAÇÃO ANORMAL

O cenário tipo mais frequente para esta situação resulta da ocorrência de um incêndio na proximidade de um veículo com sistema a gasolina em que o mesmo se encontra exposto à energia libertada, sendo os sistemas a gasolina menos resistentes a estes efeitos que os sistemas a GPL.

Apesar de não ser previsível o rebentamento de um reservatório, já que o sistema não é hermético, é possível a sua rotura por enfraquecimento das suas paredes. Tal dará origem a um derrame do conteúdo para o solo o que poderá originar um incêndio ou agravar as consequências de um evento já em curso.

## 6. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos na modelação dos diversos cenários pode deduzir-se que os efeitos dos incidentes envolvendo sistemas de GPL e de gasolina são comparáveis sendo que no caso dos sistemas a gasolina acresce a possibilidade de incêndio de derrame, situação que não foi considerada credível no caso de GPL.

A resistência exigida aos reservatórios e demais componentes dos sistemas de GPL para fazer face à pressão a que estão permanentemente sujeitos pela presença do gás liquefeito constitui uma vantagem em caso de impactos e colisões devido à sua menor deformabilidade e rigidez. Adicionalmente, a incorporação dos dispositivos de segurança obrigatórios nos sistemas de GPL tornam estes sistemas suficientemente seguros quanto à eventualidade de ocorrência de sobrepressões e eventuais colapsos estruturais motivados por estes eventos.

No que se refere à possibilidade de ocorrência de fugas, os seus efeitos são limitados devido à instalação das válvulas de corte e de excesso de caudal para além do que uma hipotética fuga de gás será sempre de quantidades muito limitadas e com uma duração muito pequena o que reduz, de forma significativa, a probabilidade de se constituir uma atmosfera inflamável e que esta adquira energia de activação, sobretudo quando comparado com sistemas a gasolina.

Considerando que o risco resulta da combinação dos factores efeitos/consequências dos cenários credíveis, afectado da respectiva probabilidade de ocorrência, verifica-se, quanto a este aspecto uma tendência para uma menor probabilidade de ocorrência de incidentes em sistemas de GPL do que em sistemas de gasolina, como indicam os resultados do estudo *Risk Comparison of LPG and Petrol Vehicles in Public Car Parks*, efectuado pelo TNO - Institute for Environmental Sciences, na Holanda que se resumem na Tabela 12.

**Tabela 12 - Comparação da Frequência/Probabilidade de ocorrência de incidentes com sistemas de GPL e Gasolina**

Incidente	Frequência por 10 <sup>6</sup> veículos estacionado	
	GPL	Gasolina
Falha de tubagens	0,012 - 0,014	360
Falha simultânea de válvulas	0,09 - 0,11	NA
Falha de acessório do tanque	5,0 - 7,0	NA
Abertura inopinada de válvula de segurança	20	NA
Explosão do reservatório	0,0004	NA
Colapso do reservatório	NA	22

Da análise da Tabela 12 verifica-se que, nas condições em que existe comparação, a frequência/probabilidade de ocorrência de incidentes com sistemas a gasolina é superior à mesma frequência/probabilidade de ocorrência de incidentes com sistemas a GPL donde ser aceitável considerar os riscos decorrentes da presença de veículos parqueados em parques de estacionamento subterrâneos, equipados com um ou outro sistema, equivalentes.

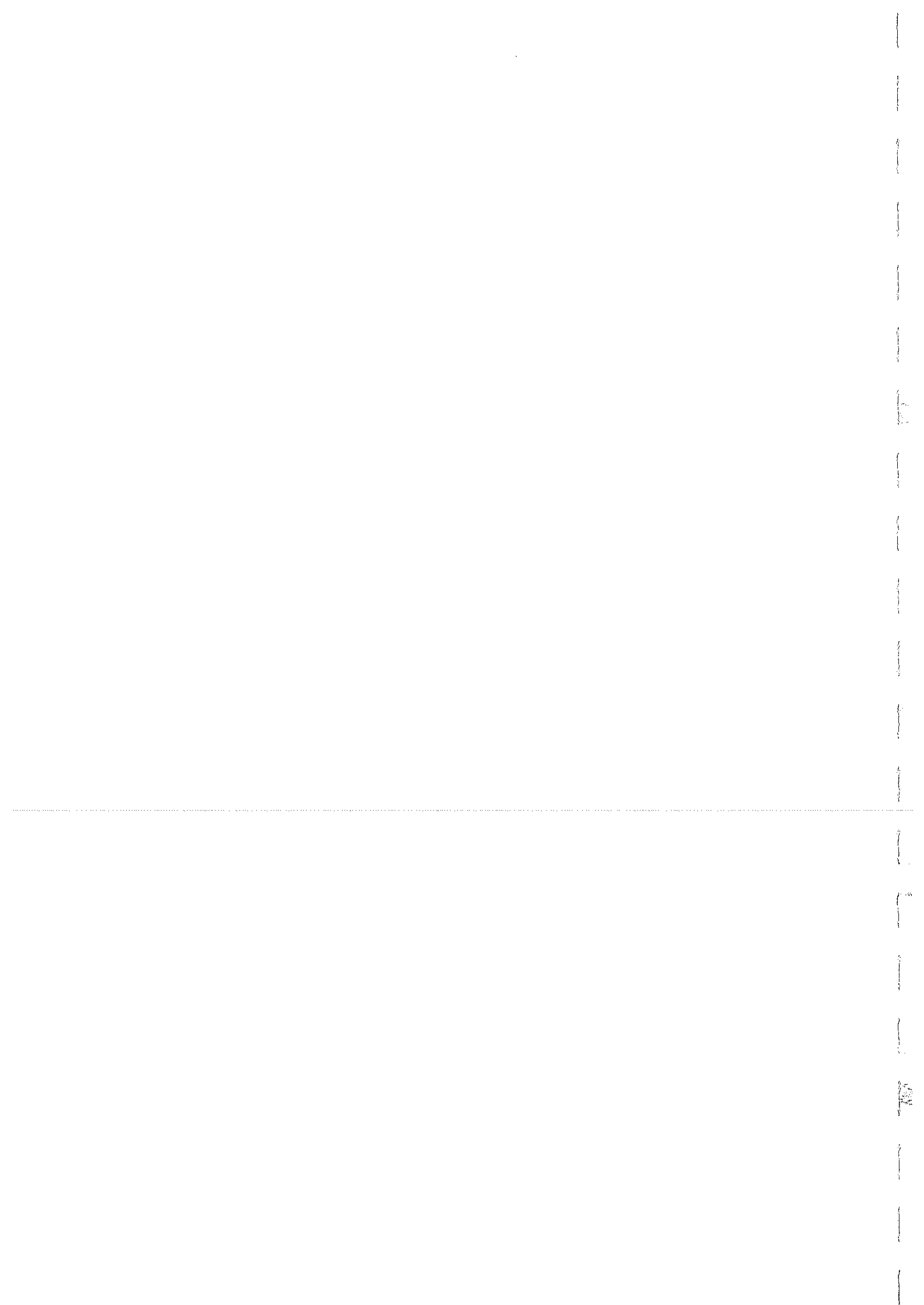
Assim, analisados os factores que influenciam a segurança na utilização de GPL como combustível para veículos automóveis em parques de estacionamento subterrâneos em condições normais de

funcionamento e comparando os cenários credíveis de incidentes com os cenários credíveis referentes a sistemas de gasolina bem como as respectivas probabilidades de ocorrência pode concluir-se que ambos os sistemas são, no mínimo, comparáveis não se verificando para os sistemas de GPL níveis de risco mais elevados do que aqueles que estão associados aos sistemas de gasolina, partindo do pressuposto (válido para ambos os sistemas) que são cumpridos os aspectos relacionados com o projecto, fabrico, montagem e manutenção prescritos pela regulamentação e pelos fabricantes/instaladores.



## BIBLIOGRAFIA

- CCPS (1989) - Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis
- LESS (2005) - Lees' Loss Prevention in the Process Industries - Hazard Identification, Assessment and Control - 3<sup>rd</sup> Edition
- TNO (2005) - Guideline for Quantitative Risk Assessment (Purple Book)
- Spouge, John (1999 - Risk Assessment of LPG Fuelled Vehicles), Det Norske Veritas
- Automotive LPG Consortium (1998) - Safety of the LPG Tanks Overfilling & Fire Test Report
- N/A - Risk Assessment of Incidents of LPG Cars Parked in Underground Garages and Comparison with Petrol Cars
- Molag, M & Elbers, S. J. (1999) - Bonfire tests automotive LPG tanks (TNO)
- Hoorelbeke, P. (2000) - Safety of LPG Vehicles (Det Norske Veritas)
- Steen, M & Molag, M. (1998) - Risk Comparison of LPG and Petrol Vehicles in Public Car Parks (TNO)
- REPSOL YPF (2007) - Estudio de la seguridad en el uso del GPL en motores. Uso vehicular terrestre
- TNO Safety software EFFECTS - Version 8 (2009) - User and reference manual
- TNO (2005) - Methods for the Calculation of Physical Effects due to releases of hazardous materials (liquids and gases) (Yellow Book)



# Anexo A

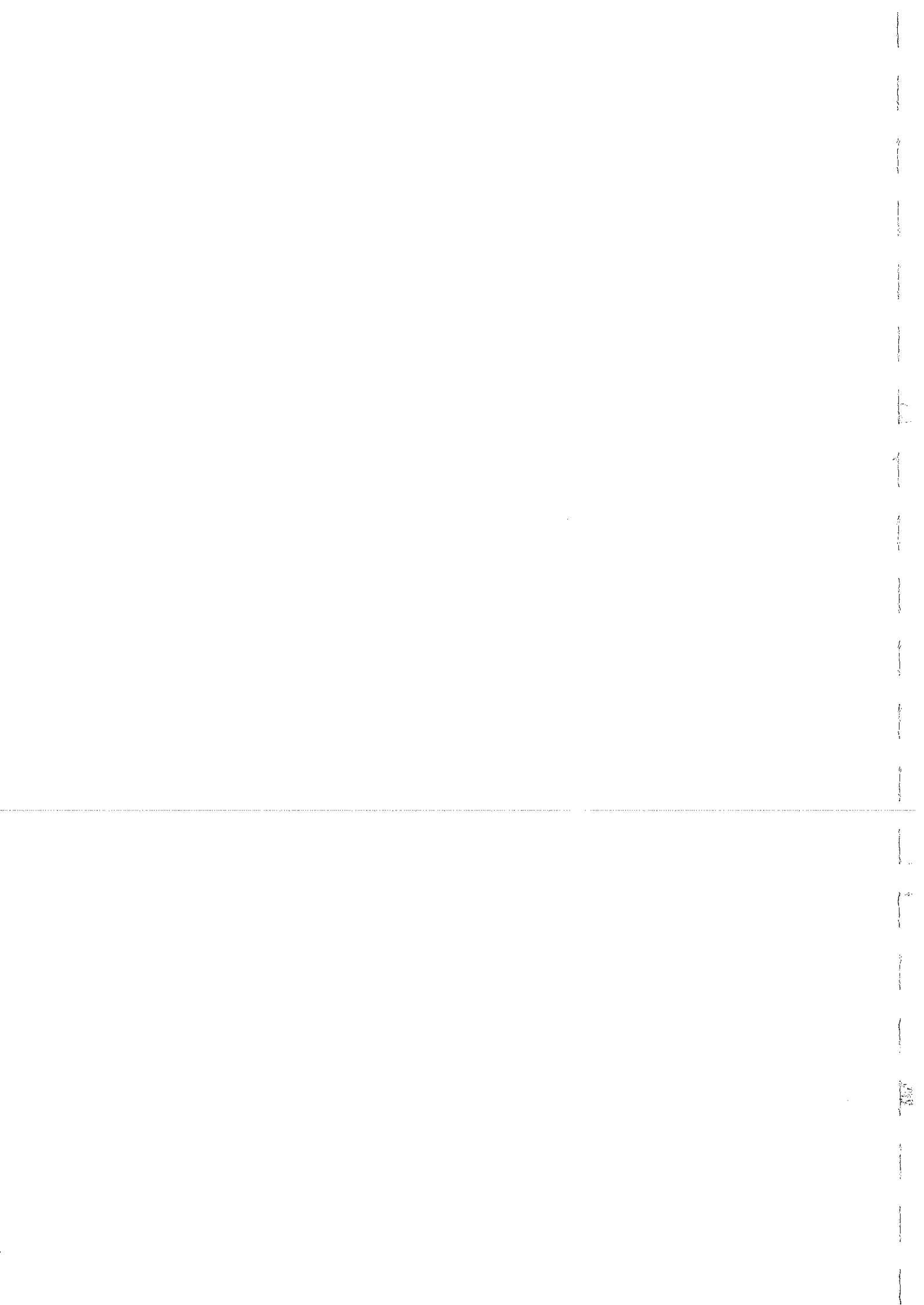
## Pontos de Medição e Valores Obtidos

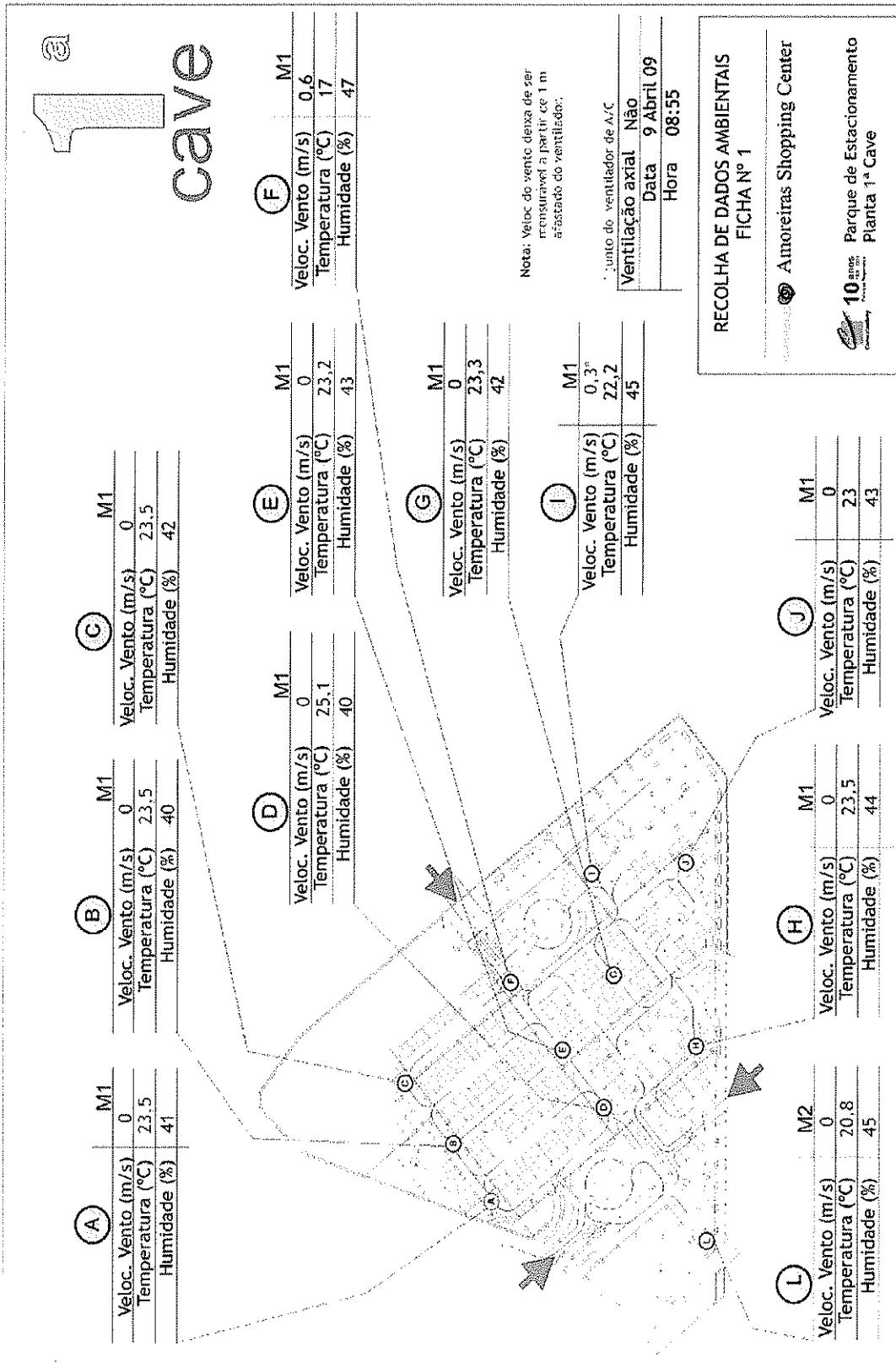
---

Elaborado por:



APETRO  
Estudo de Risco - Veículos de GPL em  
Parques de Estacionamento  
Subterrâneos





Elaborado por:



**APETRO**  
Estudo de Risco - Veículos de GPL em  
Parques de Estacionamento  
Subterrâneos

# 1 cave

<b>A</b>	M2	Veloc. Vento (m/s)	0,4
		Temperatura (°C)	23,4
		Humidade (%)	40

<b>B</b>	M2	Veloc. Vento (m/s)	0,4
		Temperatura (°C)	23,3
		Humidade (%)	39

<b>C</b>	M2	Veloc. Vento (m/s)	0,3
		Temperatura (°C)	23,5
		Humidade (%)	40

<b>D</b>	M2	Veloc. Vento (m/s)	0,5
		Temperatura (°C)	21,8
		Humidade (%)	41

<b>E</b>	M2	Veloc. Vento (m/s)	0,7
		Temperatura (°C)	18,7
		Humidade (%)	46

<b>F</b>	M2	Veloc. Vento (m/s)	0,6
		Temperatura (°C)	16,2
		Humidade (%)	47

<b>G</b>	M2	Veloc. Vento (m/s)	1,1
		Temperatura (°C)	24,9
		Humidade (%)	38

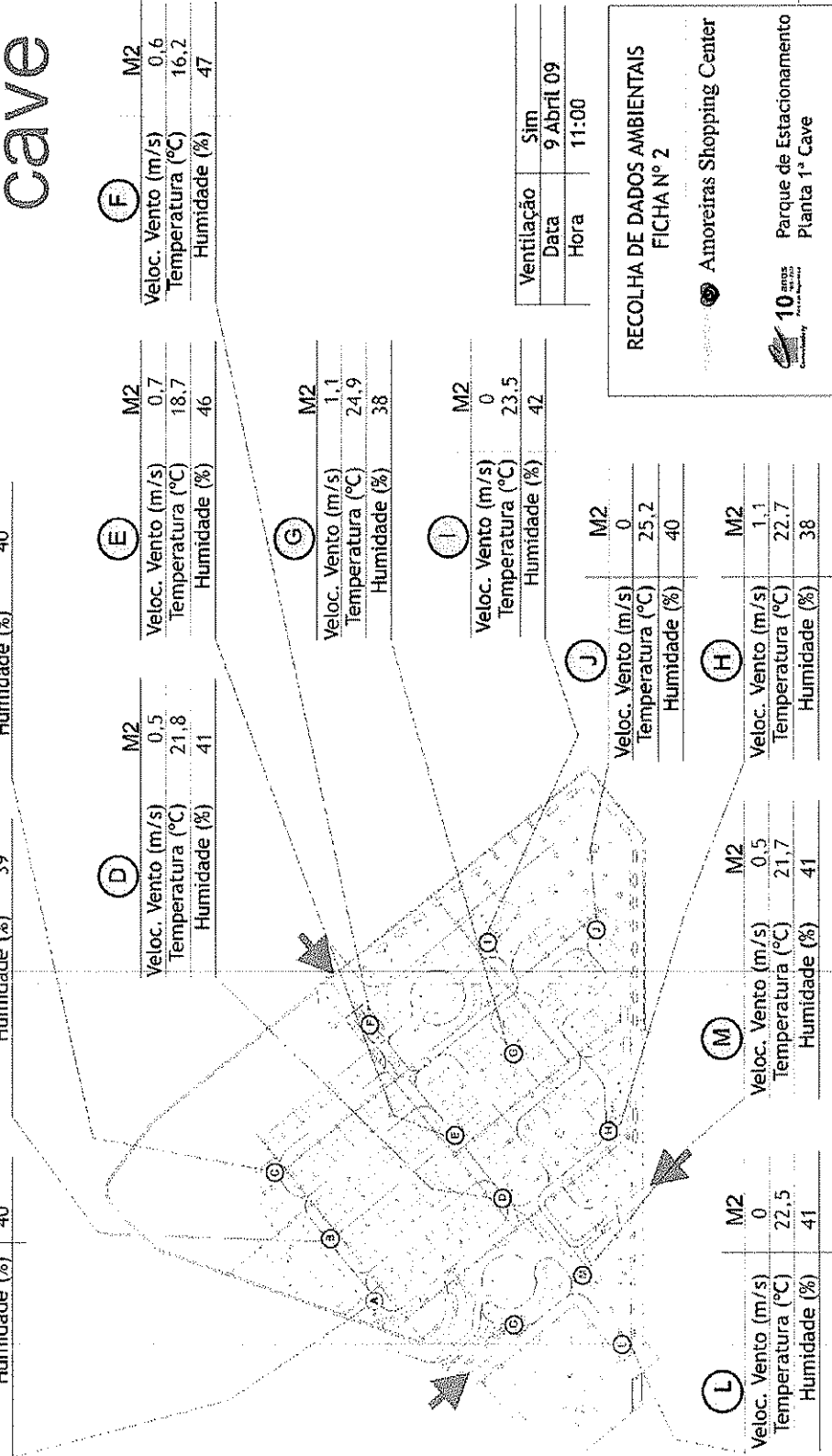
<b>I</b>	M2	Veloc. Vento (m/s)	0
		Temperatura (°C)	23,5
		Humidade (%)	42

<b>J</b>	M2	Veloc. Vento (m/s)	0
		Temperatura (°C)	25,2
		Humidade (%)	40

<b>H</b>	M2	Veloc. Vento (m/s)	1,1
		Temperatura (°C)	22,7
		Humidade (%)	38

<b>M</b>	M2	Veloc. Vento (m/s)	0,5
		Temperatura (°C)	21,7
		Humidade (%)	41

<b>L</b>	M2	Veloc. Vento (m/s)	0
		Temperatura (°C)	22,5
		Humidade (%)	41



Ventilação	Sim
Data	9 Abril 09
Hora	11:00

**RECOLHA DE DADOS AMBIENTAIS**  
FICHA Nº 2

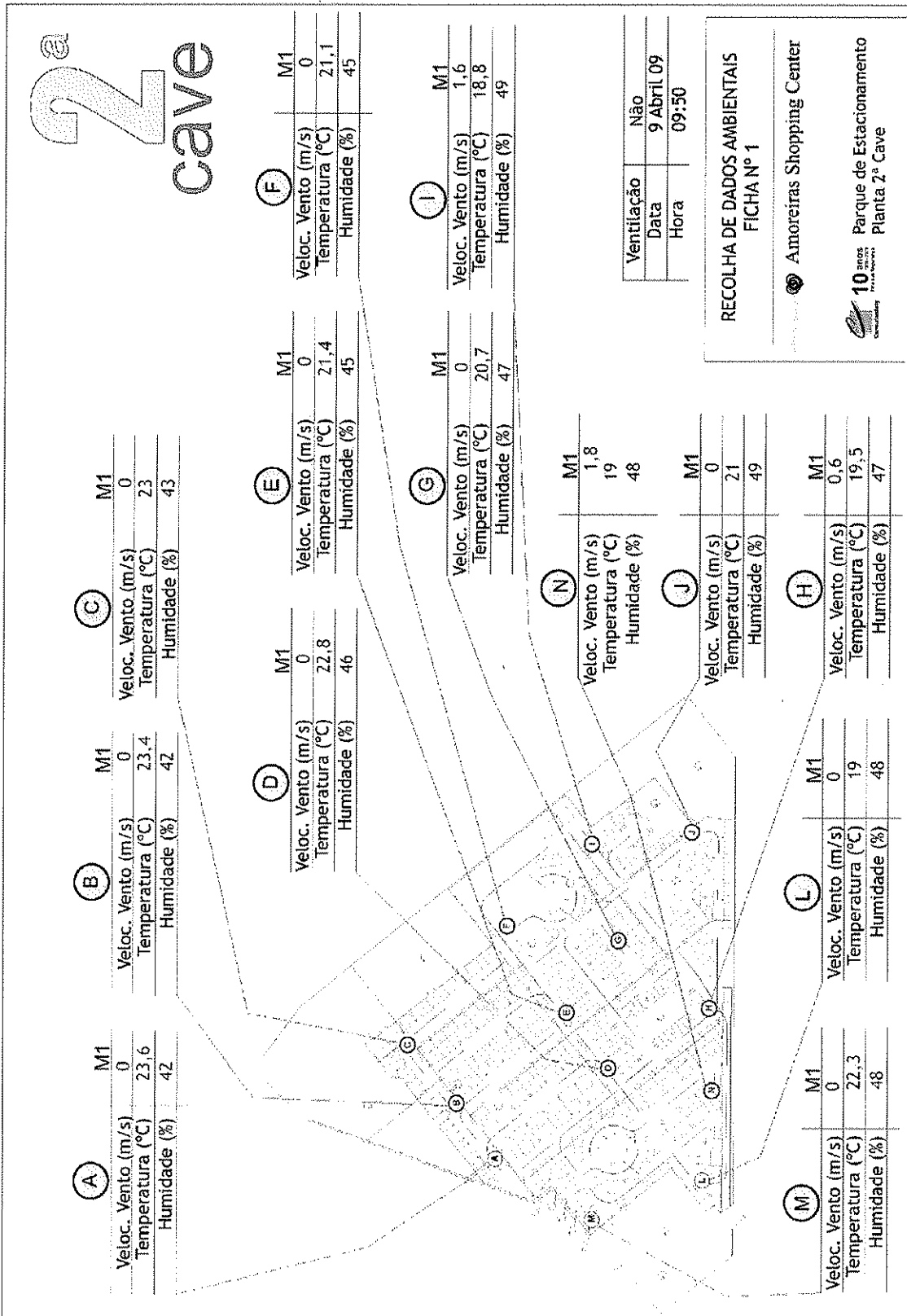
Amoreiras Shopping Center

10 anos  
Parque de Estacionamento  
Planta 1ª Cave

Elaborado por:



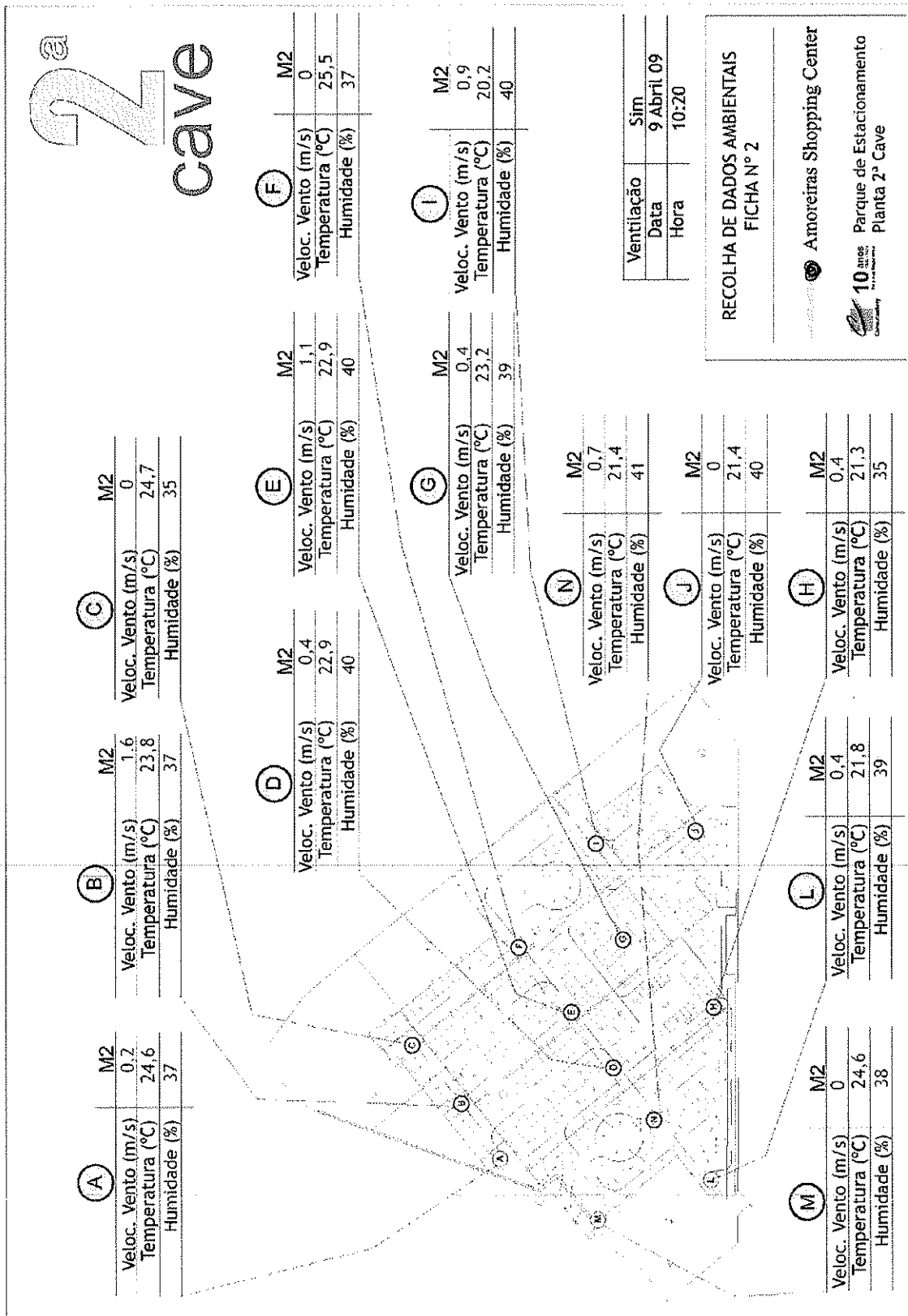
**APETRO**  
Estudo de Risco - Veículos de GPL em  
Parques de Estacionamento  
Subterrâneos



Elaborado por:



**APETRO**  
 Estudo de Risco - Veículos de GPL em  
 Parques de Estacionamento  
 Subterrâneos



Elaborado por:



**APETRO**  
 Estudo de Risco - Veículos de GPL em  
 Parques de Estacionamento  
 Subterrâneos