



# **CENTRO DE GEOTECNIA**

## **ANÁLISE DO DESCRITOR VIBRAÇÕES E DA ANÁLISE DE RISCO DO RECAPE SOBRE O PROLONGAMENTO DA LINHA AZUL DO METROPOLITANO DE LISBOA, ENTRE AMADORA-ESTE E REBOLEIRA**



**Metropolitano de Lisboa**

**Abril de 2009**

# **ANÁLISE DO DESCRITOR VIBRAÇÕES E DA ANÁLISE DE RISCO DO RECAPE SOBRE O PROLONGAMENTO DA LINHA AZUL DO METROPOLITANO DE LISBOA, ENTRE AMADORA-ESTE E REBOLEIRA**

## **ÍNDICE GERAL**

|                                                                                                                                                                                           |          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                                                                                                                                   | <b>1</b> |
| <b>PARTE 1 – VIBRAÇÕES.....</b>                                                                                                                                                           | <b>2</b> |
| 1. CONTEÚDOS DO RECAPE .....                                                                                                                                                              | 2        |
| 2. ANÁLISE GERAL DOS CONTEÚDOS DO RECAPE E DO EIA DO ESTUDO PRÉVIO DO PROJECTO DE EXECUÇÃO DO PROLONGAMENTO DA LINHA AZUL ENTRE AMADORA-ESTE E REBOLEIRA PARA O DESCRITOR VIBRAÇÕES ..... | 3        |
| 3. CARACTERIZAÇÃO DA SITUAÇÃO ACTUAL DO EIA DO ESTUDO PRÉVIO E RESUMIDO NO RECAPE .....                                                                                                   | 4        |
| 3.1. Introdução.....                                                                                                                                                                      | 4        |
| 3.2. Metodologia de avaliação das vibrações no EIA do Estudo Prévio.....                                                                                                                  | 11       |
| 3.3. Resumo da Caracterização da Situação Actual, apresentada no RECAPE..                                                                                                                 | 12       |
| 4. PREVISÃO E AVALIAÇÃO DOS IMPACTES AMBIENTAIS .....                                                                                                                                     | 13       |
| 4.1. Introdução.....                                                                                                                                                                      | 13       |
| 4.2. Impactes na Fase de Construção .....                                                                                                                                                 | 14       |
| 4.3. Impactes na Fase de Exploração .....                                                                                                                                                 | 16       |
| 5. MEDIDAS DE MINIMIZAÇÃO E VALORIZAÇÃO DE IMPACTES .....                                                                                                                                 | 17       |
| 5.1. Considerações gerais .....                                                                                                                                                           | 17       |
| 5.2. Fontes de Vibração na Fase de Construção.....                                                                                                                                        | 18       |
| 5.3. Fontes de Vibração na Fase de Exploração.....                                                                                                                                        | 18       |
| 5.4. Medidas de Minimização .....                                                                                                                                                         | 19       |
| 6. MONITORIZAÇÃO DE VIBRAÇÕES .....                                                                                                                                                       | 20       |
| 6.1. Preâmbulo.....                                                                                                                                                                       | 20       |
| 6.2. Conceitos básicos .....                                                                                                                                                              | 21       |
| 6.3. Monitorização contínua.....                                                                                                                                                          | 24       |
| 6.4. Plano Geral de Monitorização apresentado pelo RECAPE .....                                                                                                                           | 25       |

## **PARTE 2 – ANÁLISE DE RISCO**

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. CONTEÚDOS DO RECAPE .....                                                                          | 27 |
| 2. ENQUADRAMENTO E CRITÉRIOS DE ANÁLISE DE RISCO.....                                                 | 28 |
| 2.1. Interacção das actividades das acções de construção e exploração do túnel<br>com o ambiente..... | 28 |
| 2.2. Método quantitativo na análise de risco.....                                                     | 29 |
| 2.3. Método qualitativo na análise de risco.....                                                      | 33 |
| 3. ANÁLISE DO CONTEÚDO DO RECAPE.....                                                                 | 34 |
| 3.1. Factor de risco.....                                                                             | 34 |
| 3.2. Causas e ponderação da probabilidade (P).....                                                    | 37 |
| 3.3. Sistemas de detecção e efeitos de gravidade.....                                                 | 38 |
| 4. CONCLUSÕES.....                                                                                    | 40 |
| 5. BIBLIOGRAFIA.....                                                                                  | 41 |

## **ANÁLISE DO DESCRITOR VIBRAÇÕES E DA ANÁLISE DE RISCO DO RECAPE SOBRE O PROLONGAMENTO DA LINHA AZUL DO METROPOLITANO DE LISBOA, ENTRE AMADORA-ESTE E REBOLEIRA**

### **INTRODUÇÃO**

O presente relatório é emitido pelo Centro de Geotecnia do Instituto Superior Técnico (adiante designado por CEGEO), tendo como base os termos da Proposta CEGEO – Ref.ª 270, apresentada em 16/10/2008, a qual foi aprovada pelo Metropolitano de Lisboa, E.P., através do fax nº 624341, de 30-10-2008.

O relatório desenvolve um conjunto de capítulos relacionados com o estudo de Vibrações e Análise de Risco, incluídos no Relatório de Conformidade Ambiental do Projecto de Execução (RECAPE) do Prolongamento da Linha Azul entre as estações de Amadora-Este e Reboleira. A metodologia deste trabalho foi aprovada pela Agência Portuguesa do Ambiente, através do seu ofício nº 015844, de 4 de Novembro de 2008.

De acordo com as actividades atribuídas à Agência Portuguesa do Ambiente, preconiza-se a obediência a um conjunto de princípios que vão nortear a natureza dos serviços desenvolvidos pelo CEGEO neste âmbito. Os principais aspectos a considerar nesse contexto são, de acordo com a legislação portuguesa, os seguintes:

- a) Apoiar a definição da política ambiental e acompanhar a execução e avaliação dos resultados alcançados;
- b) Apoiar e acompanhar as estratégias de integração do ambiente nas políticas do sector dos transportes ferroviários;
- c) Assegurar e manter o sistema de informação de referência para os dados ambientais e coordenar a produção do indicador vibrações;
- d) Assegurar a recolha, tratamento e análise da informação relativa ao descritor ambiental vibrações e elaborar o correspondente relatório;
- e) Participação nos procedimentos de consulta pública, em articulação, no que se refere aos projectos de nível regional, com as comissões de coordenação e desenvolvimento regional;
- f) Promover as estratégias e coordenar os programas de acção para o controlo de vibrações transmitidas aos terrenos, obras de arte e outras estruturas, com especial enfoque nas áreas urbanas;
- g) Promover as estratégias e coordenar os planos e programas de acção relativos à aplicação do regime de prevenção e controlo das vibrações, com particular atenção no que se refere às áreas urbanas.

O processo de AIA, tal como se encontra definido pelo Decreto-Lei n.º 69/2000, de 3 de Maio, compreende cinco fases:

- a) Selecção de projectos;
- b) Definição do âmbito;
- c) Estudo de Impacte Ambiental (EIA);
- d) Apreciação técnica do EIA;
- e) Decisão.

O presente estudo corresponde à alínea d) Apreciação técnica do EIA, no que diz respeito à temática das vibrações e da análise de risco. Este EIA incidiu sobre o projecto do Prolongamento da linha-férrea do Metropolitano de Lisboa, elaborado na fase de Estudo Prévio.

Encontrando-se o presente estudo numa etapa final, este Relatório tem como objectivo apresentar os resultados da análise feita ao Relatório de Conformidade Ambiental do Projecto de Execução, emitido pela empresa AMBIENTAR, Consultores em Ambiente, Lda., de acordo com o solicitado pela Secretaria de Estado do Ambiente, sobre as metodologias adoptadas e os resultados obtidos para o descritor vibrações, assim como para a análise de risco apresentada.

Para assegurar os objectivos propostos, divide-se o presente parecer técnico em duas partes, correspondentes a cada uma das temáticas a analisar. Assim, a Parte 1 incidirá exclusivamente sobre a análise efectuada do descritor ambiental Vibrações, enquanto que a Parte 2 sobre a Análise de Risco.

## **PARTE 1 – VIBRAÇÕES**

### **1.CONTEÚDOS DO RECAPE**

No RECAPE em apreço, foi elaborado o Anexo XVI com o objectivo de dar resposta aos quesitos estipulados pelo Secretário de Estado do Ambiente, em 26 de Julho de 2007, através da respectiva Declaração de Impacte Ambiental (DIA), que se apresenta no Anexo XIII do mesmo documento, em particular no que respeita ao estudo elaborado para o descritor ambiental Vibrações e para a Análise de Risco.

No que concerne às vibrações, que se encontra no capítulo 2, após a Introdução, efectua-se uma identificação de quatro Pontos de Monitorização para o estudo da Situação de Referência (ou Actual) e, de forma resumida, apresentam-se os valores obtidos na campanha de monitorização efectuada.

De seguida, identificam-se, de forma qualitativa, os impactes ambientais esperados quer na Fase de Obra, quer na Fase de Exploração do Projecto, comparando-os com alguns critérios existentes de incomodidade (LNEC) e de danos estrutural (Norma Portuguesa 2074). Este capítulo finda com as Conclusões acerca da temática.

No que respeita ao Plano de Monitorização, o mesmo consta do Anexo XVIII do RECAPE em apreço, sendo que é apresentado um Plano Geral de Monitorização para os diferentes descritores ambientais, no qual se incluem as Vibrações.

## **2. ANÁLISE GERAL DOS CONTEÚDOS DO RECAPE E DO EIA DO ESTUDO PRÉVIO DO PROJECTO DE EXECUÇÃO DO PROLONGAMENTO DA LINHA AZUL ENTRE AMADORA-ESTE E REBOLEIRA PARA O DESCRITOR VIBRAÇÕES**

O RECAPE em pauta corresponde ao relatório técnico emitido pela empresa AMBIENTAR, Consultores em Ambiente, Lda. em Novembro de 2008, sendo que o mesmo teve como base o EIA do Estudo Prévio do mesmo Projecto.

O referido EIA do Estudo Prévio, emitido pela empresa PROCESL, Lda, em Outubro de 2006, era constituído por 13 Capítulos, sendo o descritor vibrações abordado de forma isolada.

Realiza-se inicialmente um enquadramento do descritor vibrações, face aos referidos critérios, em termos de enquadramento legal, que se encontram abordados para futuras análises. Tais critérios são os seguintes:

- Em termos de incomodidade humana: Recomendações do Laboratório Nacional de Engenharia Civil e Norma ISO 2631.
- Em termos de dano estrutural: Norma Portuguesa 2074.

Encontram-se também expostos sob a forma de tabelas, os valores obtidos em campanhas de monitorização efectuadas *in situ*, considerados no projecto.

No capítulo 6 do referido EIA do Estudo Prévio, é efectuada a previsão da evolução da situação actual sem projecto. Para este ponto, relativamente ao descritor ambiental vibrações, não é efectuada uma previsão adequada da evolução da situação sem projecto, não considerando, desta forma, a evolução crescente em Portugal, da utilização de meios de transporte terrestres, como por exemplo, na movimentação de bens e serviços.

Em termos de identificação, previsão e avaliação de Impactes Ambientais referentes às vibrações (Capítulo 7.11), a mesma é efectuada sem considerar o tipo de terreno de fundação, embora o mesmo seja referido, apresentando apenas, como base numa evolução particular dos níveis de vibração ao longo das várias fases do projecto. Como se sabe, o fenómeno de propagação dinâmica é altamente dependente do tipo de terrenos sobre os quais se desenvolve a implementação do projecto, da distância dos receptores à fonte e, neste caso, da energia cinética libertada pela circulação das composições.

Para além deste facto, não é efectuada qualquer previsão quantitativa durante o desenrolar do empreendimento (fases de construção e de exploração).

Relativamente às medidas de minimização e monitorização, é efectuada apenas uma descrição de possíveis aplicações de sistemas anti-vibráteis já aplicados em outras obras do Metropolitano de Lisboa, não existindo, no entanto qualquer indicação de eventuais receptores sensíveis que possam justificar a aplicação de tais sistemas.

Nos parágrafos seguintes, realizar-se-á uma análise detalhada de cada um dos capítulos que, nesta fase dos trabalhos, se referirá à Caracterização da Situação Actual e Evolução da Situação Actual Sem Projecto.

O RECAPE em estudo tenta responder aos quesitos propostos pelo Secretário de Estado do Ambiente, em 26 de Julho de 2007, através da respectiva Declaração de Impacte Ambiental (DIA), procurando abordar o assunto através de complementação de informações sobre tais quesitos.

### **3.CARACTERIZAÇÃO DA SITUAÇÃO ACTUAL DO EIA NO ESTUDO PRÉVIO E RESUMIDO NO RECAPE**

#### **3.1.INTRODUÇÃO**

O estudo da caracterização da situação de referência (ou actual) deverá envolver um exercício de análise, considerando a medição e descrição das componentes de um dado descritor ambiental, identificadas como sendo significativamente afectadas. O principal objectivo da caracterização da situação actual é o de coligir informações e dados, bem como caracterizar as condições (físicas, ecológicas, sociais, etc.) que existem no presente e as que poderão existir no futuro se o projecto não for implementado. Esta previsão toma em linha de conta mudanças resultantes de eventos naturais e de outras actividades humanas que são independentes do projecto proposto. Com este conhecimento, podem ser atingidos três objectivos principais (Sarsby, 2000):

- Previsão e avaliação de potenciais impactes ambientais;
- Determinação de parâmetros operacionais e de emissões, considerados normais e planeamento das medidas de minimização e mitigação;
- Detecção de quaisquer mudanças ambientais resultantes da implementação do projecto.

Desta forma, apresentam-se nos parágrafos seguintes os comentários relativos à caracterização da situação actual efectuada, tendo em conta os objectivos anteriormente descritos.

##### **3.1.1.Enquadramento e critérios de avaliação das vibrações**

No que respeita às vibrações, dever-se-á preconizar a adopção do enquadramento legal estabelecido pela Legislação Portuguesa no que diz respeito a efeitos dos fenómenos vibratórios sobre edificações (Norma Portuguesa 2074) e, dada a lacuna legislativa existente no nosso País relativamente à incomodidade humana, usar a Norma ISO 2631.

Para além disso, no que se refere à incomodidade dos seres humanos perante as vibrações, são ainda utilizáveis os critérios de incomodidade estabelecidos pelo LNEC.

Por razões de esclarecimento, nos parágrafos seguintes apresentam-se, resumidamente, os principais aspectos referentes à Norma Portuguesa 2074 (promulgada através da Portaria n.º 457/83 de 19 de Abril) que estabelece a “Avaliação da Influência em

Construções de Vibrações Provocadas por Explosões ou Solicitações Similares”, visando limitar os efeitos nocivos sobre estruturas construídas, que as vibrações podem provocar. Descrevem-se, também, os critérios da Norma Internacional ISO 2631, referente à incomodidade humana.

### 3.1.2.A Norma Portuguesa 2074

Em Portugal, encontra-se em vigor a Portaria n.º 457/83, de 19 de Abril, que institui a Norma Portuguesa n.º 2074, “Avaliação da Influência em Construções de Vibrações Provocadas por Explosões ou Solicitações Similares”, que visa limitar os efeitos nocivos que as vibrações provocadas por quaisquer fontes.

De uma maneira conservadora, esta norma permite calcular a velocidade da vibração admissível de pico ( $v_L$ , em cm/s), através do produto de três factores:

$$v_L = \alpha \cdot \beta \cdot \gamma$$

em que o primeiro se refere ao tipo de terreno, o segundo à natureza da construção e o terceiro ao número de fenómenos vibratórios por dia (ver Tabela 1).

Tabela 1 – Valores para  $V_L$  dados pela NP 2074, tendo em consideração os factores relevantes, onde  $\gamma = 1$  para menos de 3 eventos diários e  $\gamma = 0,7$  para mais de três.

| TIPOS DE CONSTRUÇÃO<br>(que afectam os valores da constante $\beta$ ) | CARACTERÍSTICAS DO TERRENO (que afectam os valores da constante $\alpha$ )                                            |                |                                                                                                                                                    |                |                               |                |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------------------------------|----------------|
|                                                                       | Solos incoerentes; areias e misturas areia-seixo bem graduadas; areias uniformes; solos coerentes moles e muito moles |                | Solos coerentes muito duros, duros e de consistência média; solos incoerentes compactos; areias e misturas areia-seixo graduadas; areias uniformes |                | Rocha e solos coerentes rijos |                |
|                                                                       | $c_p \leq 1.000$ m/s                                                                                                  |                | $1.000$ m/s $< c_p < 2.000$ m/s                                                                                                                    |                | $c_p \geq 2.000$ m/s          |                |
|                                                                       | $\gamma = 1,0$                                                                                                        | $\gamma = 0,7$ | $\gamma = 1,0$                                                                                                                                     | $\gamma = 0,7$ | $\gamma = 1,0$                | $\gamma = 0,7$ |
| Construções sensíveis                                                 | 2,50                                                                                                                  | 1,75           | 5,00                                                                                                                                               | 3,50           | 10,00                         | 7,00           |
| Construções correntes                                                 | 5,00                                                                                                                  | 3,50           | 10,00                                                                                                                                              | 7,00           | 20,00                         | 14,00          |
| Construções reforçadas                                                | 15,00                                                                                                                 | 10,50          | 30,00                                                                                                                                              | 21,00          | 60,00                         | 42,00          |

Segundo a NP 2074, o valor máximo admissível alcança os 60 mm/s, incorporando mesmo assim um elevado factor de segurança, justificável para a prevenção de danos em estruturas.

### 3.1.3.A Norma ISO 2631

Em Portugal, para a avaliação das vibrações admissíveis quanto ao conforto das populações, não existem normas oficiais, pelo é recomendável aplicar os procedimentos estabelecidos pela Norma ISO 2631, cujo conteúdo resultou de um grupo de trabalho com especialistas de vários países integrados no âmbito da *International Standardization Organization*, com sede na Suíça.

Esta Norma foi publicada pela primeira vez em 15 de Janeiro de 1978, seguindo-se actualizações em 1989, 1997 e 2003, e estabelece procedimentos de medição e critérios de aceitabilidade para vibrações que afectam o conforto humano, fornecendo níveis aceitáveis em função do tipo de vibração, do período diurno ou nocturno e da área de ocupação do prédio.

Trata-se, portanto, de uma Norma Internacional destinada à “Avaliação da Exposição Humana às Vibrações de Corpo Inteiro”, que define e fornece valores numéricos dos limites de exposição a vibrações transmitidas ao corpo humano, na amplitude de frequências entre 1 e 80 Hz, para vibrações periódicas e não periódicas. Nenhuma parte desse documento deve ser extrapolada para frequências fora da banda 1 a 80 Hz.

Os limites admissíveis de vibração são definidos para os três critérios geralmente reconhecíveis de preservação do conforto, eficiência de trabalho e segurança ou saúde, denominados, respectivamente: nível de conforto, nível de eficiência (fadiga) e limite de exposição. Estes limites estão especificados em termos de frequência vibratória, grandeza de aceleração, tempo de exposição e a direcção da vibração em relação ao tronco humano.

Esta Norma Internacional é aplicável apenas a situações em que os indivíduos gozam de condições normais de saúde, isto é, considerados capazes de realizarem as actividades habituais da vida.

Em termos de conteúdo, a Norma está dividida em duas partes principais (Tabela 2).

Tabela 2 – Partes da Norma Internacional ISO 2631 - Avaliação da exposição humana à vibração de corpo inteiro

| PARTE      | ANO  | DESIGNAÇÃO                                               |
|------------|------|----------------------------------------------------------|
| ISO 2631-1 | 1997 | Requisitos gerais                                        |
| ISO2631- 2 | 2003 | Relativamente a vibração induzida por impacto em prédios |

A norma ISO 2631-1 define métodos de medição das vibrações de corpo inteiro e indica os principais factores que se combinam para determinar o grau de aceitabilidade à exposição da vibração. Possui ainda informações e orienta quanto aos possíveis efeitos da vibração sobre a saúde, o conforto, o limite de percepção, na faixa de 0.5 a 80Hz, e o enjoo, para frequências entre 0.1 e 0.5 Hz.

Em relação ao conforto humano, esta Norma apresenta um consenso sobre a relação entre a severidade da vibração e o conforto humano e fornece um método adequado e conveniente para estabelecimento da severidade subjectiva das vibrações em prédios, sem entretanto estabelecer limites específicos de aceitação.

Já a norma ISO 2631-2 apresenta um guia para aplicação da ISO 2631-1 sobre a resposta humana à vibração dos prédios, incluindo curvas ponderadas, em função da frequência, de igual nível de perturbação para os seres humanos, assim como métodos de medição a serem utilizados. Este padrão sugere que, para ambientes específicos, é

possível avaliar o efeito das vibrações sobre o conforto das pessoas usando o valor quadrático médio (eficaz) da aceleração ou velocidade vibratória ponderada, medida num período representativo em relação ao comportamento da fonte de excitação. Essa ponderação é feita em função da frequência, de acordo com curvas estabelecidas conforme o eixo em que a vibração atinge o corpo humano nas posições em pé, sentado ou deitado.

Em termos de referências, a Norma ISO 2631-2:2003 estabelece como indispensáveis as seguintes normas:

- ISO 8041, “Human response to vibration – Measuring instrumentation”;
- IEC 61260:1995, “Electroacoustics – Octave-band and fractional-octave-band filters”.

Dado que a última versão de 2003 desta norma não apresenta valores numéricos máximos admissíveis para a amplitude de vibração, é obrigatório reportarmo-nos às versões anteriores.

Em versões anteriores, a ISO 2631 apresenta uma tabela experimental utilizada em diversos países, com níveis de intensidade de vibração dos prédios considerados satisfatórios, dando assim uma contribuição para a divulgação do estado da arte sobre o assunto.

A direcção de propagação das vibrações relaciona-se com um sistema de coordenadas do corpo humano em posição anatómica normal, da forma seguinte: segundo o eixo Z no sentido dos pés à cabeça, o eixo X no sentido das costas ao peito e o eixo Y no sentido do lado direito ao esquerdo (Figura 1).

A Norma ISO 2631 indica que se devem realizar medições tão perto quanto possível do ponto ou área na qual a vibração é transmitida ao corpo. Se a pessoa estiver em pé no chão ou sentada numa plataforma sem qualquer material elástico entre o corpo e a estrutura de sustentação, o sensor de vibrações deverá ser fixado àquela estrutura, constituindo esta condição a mais desfavorável (Fernandes, J. C, et al. 1978).

Deve-se ainda medir a vibração na superfície estrutural que suporta as pessoas, no(s) ponto(s) de maior intensidade, tipicamente: no centro da laje dos pisos, para vibrações verticais e nos pisos próximo às paredes, por exemplo nos vãos das portas e janelas, para vibrações horizontais (Maior, P, et al., 2001).

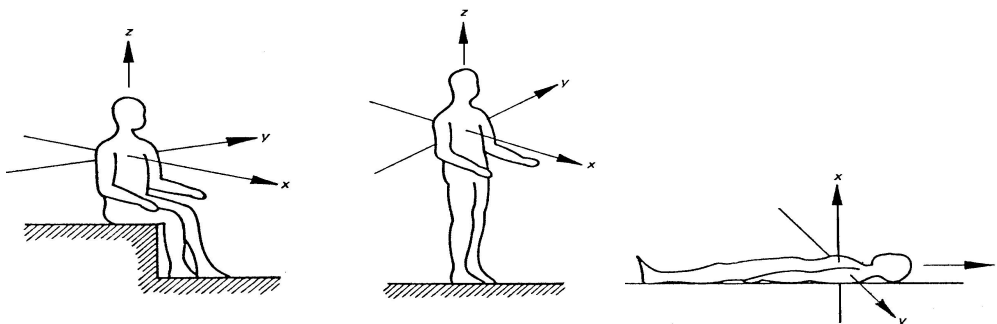


Figura 1 – Direcções do sistema de coordenadas para vibrações em seres humanos.

Quando existir qualquer elemento elástico, é recomendável interpor alguma forma de suporte rígido entre o sujeito e o elemento elástico. Se não for possível medir a vibração no ponto de absorção do homem, então as características de transmissão do elemento elástico devem ser determinadas e consideradas ao determinar a vibração real transmitida ao corpo.

A ISO 2631-2 (1997) considera que a grandeza física que mede a intensidade de um fenómeno vibratório deverá ser principalmente a aceleração, mas pode também ser a velocidade de vibração ou o deslocamento, em qualquer dos casos deve ser expresso como um valor médio quadrático (RMS) denominado também como Valor Eficaz (VE) em mm/s, que resulta da raiz quadrada da média dos quadrados, para serem comparados com os limites dados nesta Norma Internacional, ou seja:

$$VE = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}},$$

onde T é a duração da medição em segundos e V(t) é a velocidade de vibração ponderada / filtrada em mm/s.

O equipamento de medição deve ter resposta plana na faixa de 1 a 80 Hz, com resolução do valor eficaz da velocidade de vibração melhor que 0.3 mm/s e a incerteza da medida deve estar dentro da faixa de + ou - 10 %. O aparelho deve ser calibrado conforme recomendação do fabricante ou após a ocorrência de algum dano ou, no mínimo, a cada 12 meses de uso (Maiores, P *et al.*, 2001).

A Norma ISO 2631 considera que é importante mencionar características do equipamento usado tais como: sensibilidade à frequência, propriedades dinâmicas (por exemplo, a constante de tempo), amplitude dinâmica e resolução do equipamento e, quando apropriado, a precisão do rectificador de valor eficaz, a avaliação de frequência, gravação, análise de frequência ou outras operações, conforme possam ser efectuadas após o sinal.

Nas versões anteriores da Norma ISO 2631 de 1997, eram apresentados três limites de exposição do corpo humano à vibração: limite de conforto, limite de fadiga e limite de exposição. A partir da versão de 1997 desta Norma, tais limites não são citados, deixando assim a avaliação da incomodidade em função dos cálculos de valor dose de vibração (VDV) e valor dose de vibração estimado (eVDV).

Estes dois últimos são idênticos aos utilizados pela norma BS 6841 (1987).

Em relação aos efeitos da vibração na saúde, a ISO 2631 (1997) apresenta um gráfico (Figura 2) que determina uma zona de cuidado para períodos entre 4 e 8 horas, para os quais ocorrem a maioria das exposições ocupacionais.

A equação da recta (A) é dada pela fórmula seguinte:

$$a_{w1} \cdot T_1^{1/2} = a_{w2} \cdot T_2^{1/2}$$

sendo  $a_{w1}$  e  $a_{w2}$  os valores da aceleração r.m.s. compensada, segundo a direcção de medição, para a primeira e a segunda exposição, respectivamente e  $T_1$  e  $T_2$  são as durações correspondentes.

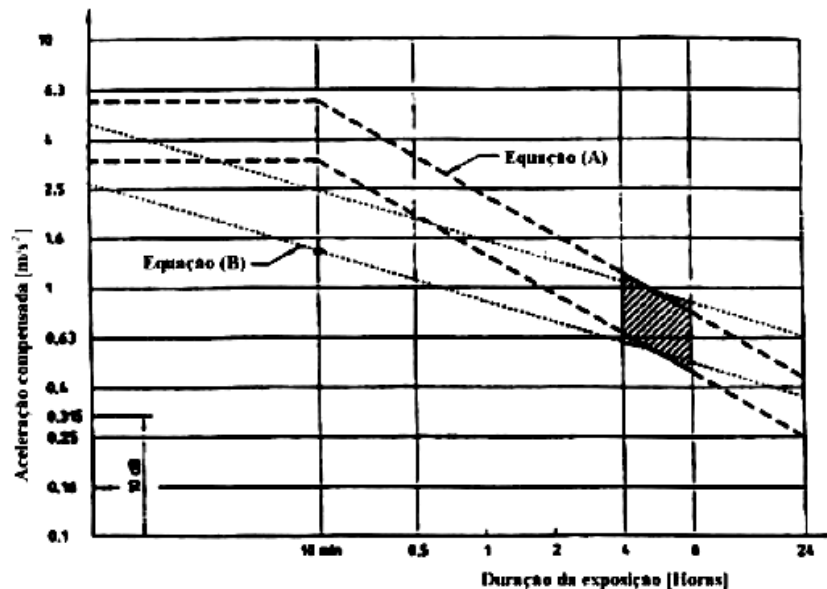


Figura 2 – Variação da aceleração das vibrações com o tempo de exposição, segundo a Norma ISO 2631, de 1997.

Quando a exposição da vibração consistir em dois ou mais períodos de exposição sob diferentes magnitudes e durações, a energia da magnitude equivalente de vibração correspondente à duração total de exposição pode ser determinada pela equação seguinte:

$$a_{we} = \left[ \frac{\sum a_{wi}^2 T_i}{\sum T_i} \right]^{1/2}$$

sendo  $a_w$  a magnitude equivalente da vibração (aceleração do r.m.s. em  $m/s^2$ ) e  $a_{wi}$  a magnitude da vibração (aceleração do r.m.s. em  $m/s^2$ ) para a duração da exposição  $T_i$ .

Utilizando-se um valor dose de vibração estimado (eVDV) pode-se determinar os limites de exposição para a saúde, conforme o gráfico anterior. Por exemplo, o eVDV para a curva (A) em relação aos seus limites inferiores e superiores na zona de cuidado é de 8,5 e 17  $m/s$ , respectivamente.

Dado que a versão de 1997 tem objectivos definidos relativos à saúde (exposições ocupacionais) e não aos efeitos de incomodidade humana, é preferível recorrer às versões anteriores para quantificar estes últimos.

Assim, em face das finalidades do presente estudo, a normalização existente leva a considerar os limites admissíveis de vibrações que se correlacionam com a incomodidade, os quais se apresentam resumidos na Tabela 3.

Tabela 3 – Extracto dos valores admissíveis das vibrações para pessoas situadas em diversos tipos de locais, segundo a Norma ISO 2631, de 1997

| TIPOS DE LOCAIS | PERÍODO      | LIMIAR DE INCOMODIDADE HUMANA ÀS VIBRAÇÕES |
|-----------------|--------------|--------------------------------------------|
| Hospitais       | Dia ou noite | 0.10 mm/s                                  |
| Residências     | Dia          | 0.20 a 0.40 mm/s                           |
|                 | Noite        | 0.14 mm/s                                  |
| Escritórios     | Dia ou noite | 0.40 mm/s                                  |
| Oficinas        | Dia ou noite | 0.80 mm/s                                  |

Na Tabela 4 e Figura 3 apresentam-se todos os valores limite contemplados nesta Norma Internacional.

Perante o exposto, e pela avaliação efectuada no Estudo de Impacte Ambiental em apreço, verifica-se que estas constatações não foram contempladas.

Desta forma, sugere-se que para estudos da mesma natureza se efectue uma uniformização dos critérios a considerar, contemplando os sugeridos pela Norma Portuguesa 2074, presente na Legislação Portuguesa e os critérios admitidos pela Norma Internacional ISO 2631-2:1989 cujos valores admissíveis para a amplitude de vibração são apresentados na Tabela 3.

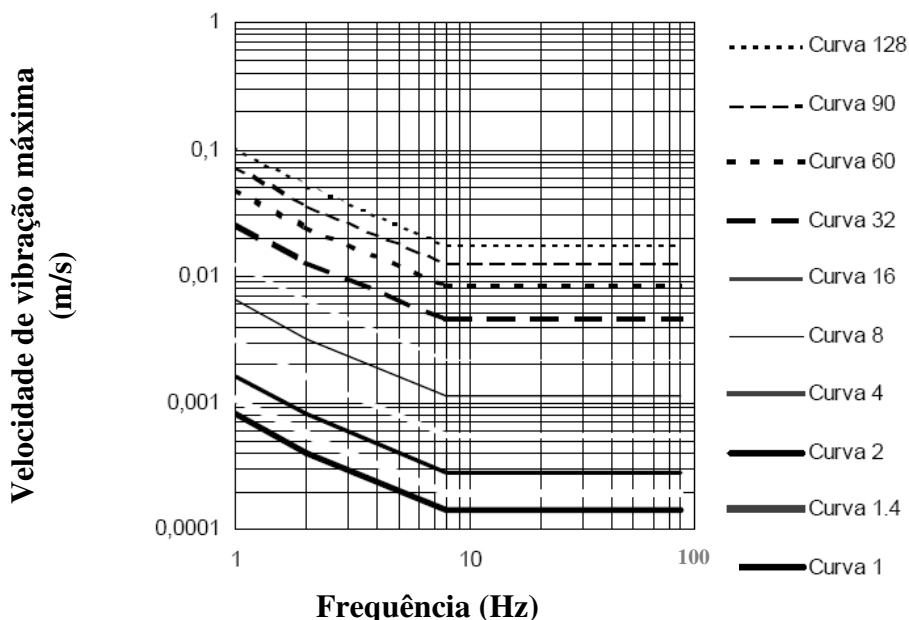


Figura 3 – Curvas das amplitudes satisfatórias da velocidade de vibração máxima segundo a ISO 2631-2:1989.

Tabela 4 – Curvas características da amplitude de vibração máximas segundo a Norma ISO2631-2:1989 (Ver Figura 3).

| LOCAL                                                                  | HORA         | VIBRAÇÃO CONTÍNUA OU INTERMITENTE (mm/s) | EXCITAÇÃO TRANSIENTE DE VIBRAÇÕES COM VÁRIAS OCORRÊNCIAS AO DIA (mm/s) |
|------------------------------------------------------------------------|--------------|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Áreas críticas de trabalho (hospitais, laboratórios de precisão, etc.) | Dia<br>Noite | 1                                        | 1                                                                      |
| Residências                                                            | Dia          | 2 a 4                                    | 30 a 90                                                                |
|                                                                        | Noite        | 1.4                                      | 1.4 a 20                                                               |
| Escritórios                                                            | Dia          | 4                                        | 60 a 128                                                               |
|                                                                        | Noite        | 8                                        | 90 a 128                                                               |

### 3.2.METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DAS VIBRAÇÕES NO EIA DO ESTUDO PRÉVIO

No Estudo de Impacte Ambiental do Estudo Prévio do Prolongamento da Linha Azul entre Amadora-Este e Reboleira, no que diz respeito à caracterização da situação actual para as vibrações, foram contemplados apenas 4 pontos de medição, tendo em consideração vários factores, nomeadamente:

- O traçado da linha metroviária;
- Função dos edifícios (residenciais ou patrimoniais).

Todos os pontos de medição encontram-se perfeitamente identificados em termos de características gerais de construção e respectivas funções.

Relativamente aos parâmetros de caracterização dos fenómenos vibratórios, foi utilizado o parâmetro velocidade eficaz de vibração,  $v_{ef}$ .

Em termos das metodologias de medição, segundo a maior parte das normas internacionais, nos edifícios, dever-se-á procurar que todos os locais onde se proceda à instalação dos geofones sejam solidários com a estrutura e, consequentemente, com a fundação do edifício. Nesse sentido os geofones deverão instalados sistematicamente nas imediações de pilares, tais como soleiras em cantaria de portas (Figura 4), de modo a não considerar locais em que existia apreciável efeito atenuador dos materiais de revestimento, designadamente nas madeiras, presentes nos pisos (soalhos flutuantes) e nas molduras das janelas.

Na Figura 4, encontram-se ilustrados os locais onde se deverá proceder à instalação dos geofones no interior dos prédios monitorizados.

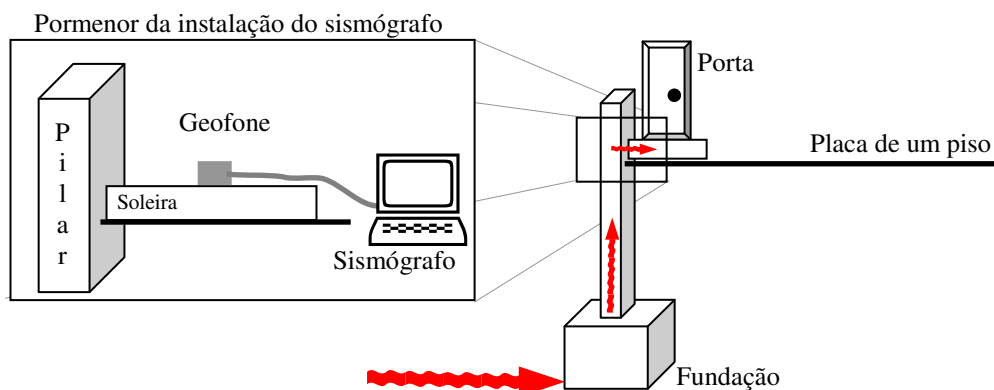


Figura 4 – Esquema geral de localização do local de registo (sem escala).

Segundo o que é possível verificar no Relatório emitido pela empresa PROCESL, esta metodologia não foi adoptada (quadro 5.20, página 126/282) sendo que foi utilizada uma metodologia análoga à medição de ruídos, utilizando-se inclusivamente, equipamentos utilizados para a utilização dessas grandezas (ruído) que, tendo em conta o fenómeno físico, não são comparáveis com o fenómeno vibratório.

Desta forma, considera-se que não se encontram cumpridas as regras estipuladas pelas normas nacionais e internacionais.

Verifica-se que foram identificadas as fontes de vibração monitorizadas, sendo exclusivamente devidas a tráfego rodoviário pesado, como seria expectável. Dever-se-á, ainda, identificar a natureza deste último, incluindo a distinção entre viaturas ligeiras e pesadas e as respectivas velocidades de circulação. Esta diferenciação torna-se importante dado que a amplitude de vibração é função da energia cinética dos veículos que provocam este fenómeno.

Dado que, como foi referido anteriormente, para o fenómeno vibratório contribuem grandemente a energia cinética (para o caso da passagem de viaturas no caso de tráfego rodoviário, por exemplo) e a distância, tais factores devem ser quantificados, de modo a poder caracterizar a fonte e o percurso efectuado pelas ondas.

### **3.3.RESUMO DA CARACTERIZAÇÃO DA SITUAÇÃO ACTUAL, APRESENTADA NO RECAPE**

No RECAPE em apreço, efectua-se um resumo dos resultados obtidos para as Vibrações na Situação de Actual, sem o projecto, em termos de um parâmetro designado por Valor Eficaz de Vibração ( $v_{ef}$ ).

Para além disso, foram apenas considerados, tal como no EIA do Estudo Prévio, quatro Pontos de Monitorização, considerados como críticos no traçado. Tais pontos, apenas consideram edifícios/estruturas existentes sobre o traçado da via do metropolitano.

Não obstante, os valores obtidos são comparados com os critérios de incomodidade humana e dano estrutural, sendo todos incluídos na faixa de admissibilidade segura.

## 4. PREVISÃO E AVALIAÇÃO DOS IMPACTES AMBIENTAIS

### 4.1. INTRODUÇÃO

Para efectuar a previsão e avaliação de impactes ambientais, deverão ser assegurados, entre outros, os seguintes itens:

- A identificação, a descrição e a quantificação (sempre que possível), dos potenciais impactes negativos, directos e indirectos, decorrentes da implementação do Projecto no que se refere às vibrações;
- A identificação e avaliação dos impactes associados à execução do Projecto para o descritor vibrações, devendo ser diferenciadas as Fases de Construção e de Exploração;
- Deverá ser efectuada a classificação dos impactes segundo diversos critérios de classificação: Natureza, Incidência, Ocorrência, Duração, Dimensão Espacial, Reversibilidade, Magnitude e Significância;
- Devem ser indicadas as técnicas e métodos de previsão adoptados para avaliação dos impactes e sua fundamentação científica, que deverão corresponder aos tecnicamente mais adequados no âmbito das metodologias e modelos existentes.

Para o descritor ambiental vibrações, deverão ser garantidos os seguintes conteúdos:

- Caracterização das tipologias de emissões de vibrações normalmente associadas a empreendimentos metroviários e seu enquadramento face às variáveis que as condicionam (velocidade, frequência e condições de propagação);
- Indicação de critérios de incomodidade causada por vibrações para seres humanos;
- Identificação de áreas susceptíveis de sofrer impactes das vibrações transmitidas ao solo, integrando a identificação de zonas/distâncias à via susceptíveis de risco de incomodidade causada por vibrações;
- Definição de áreas onde poderá ser considerada a necessidade de instalação de infra-estruturas de protecção contra as vibrações.

Perante estes conteúdos indicados, mostra-se importante a realização da caracterização dinâmica dos terrenos atravessados pelo projecto de construção do prolongamento em apreço. Essa caracterização pode ser feita através da determinação de leis de propagação de vibrações, que podem ser traduzidas sob a forma de equações empíricas do tipo:

$$V = a W^b D^c$$

onde V corresponde à velocidade de vibração de pico (mm/s) correspondente à resultante de três componentes no espaço (nas direcções vertical, radial e transversal), W à energia cinética dos veículos (kJ) e D à distância (m), tendo em consideração os tipos de litologias presentes.

As constantes ‘a’, ‘b’ e ‘c’ são coeficientes numéricos a determinar para cada estação e dependem essencialmente do tipo de fonte de vibrações e da natureza do terreno atravessado.

Tais constantes podem ser determinadas através de técnicas de regressão estatística simples, sempre baseadas na análise matemática realizada sobre uma base de dados proveniente de medições sistemáticas efectuadas na região em estudo, em que se registem as três variáveis (V, W e D) acima referidas.

#### **4.2.IMPACTES NA FASE DE CONSTRUÇÃO**

No EIA do Estudo Prévio apresentado pela empresa PROCESL, não foram apresentadas quaisquer análises relativamente à previsão e avaliação de impactes ambientais de carácter negativo associados aos fenómenos vibratórios.

Desta forma, é apenas esboçado um critério de avaliação baseado numa campanha de monitorização que se mostra insuficiente e em pressupostos não quantificados.

Refira-se que grande parte dos projectos de natureza geotécnica, envolvem a análise de vibrações provenientes de várias origens e criadas por distintas fontes de geração dessas mesmas vibrações.

Todos estes processos são caracterizados pela transmissão de vibrações, geradas nas respectivas fontes e propagam-se através dos meios vizinhos (Paneiro & Dinis da Gama, 2007).

Desta forma, observa-se na Figura 5 um ábaco que mostra a ordem de grandeza das vibrações oriundas das principais obras civis, o qual é originário da norma inglesa BS 5228, Part 4, 1996, citada por Sarsby, 2000.

Assim, caso se efectue a caracterização dinâmica dos terrenos atravessados pelo projecto, torna-se possível efectuar uma previsão da variação das amplitudes de vibração com a distância e, através das normas nacionais e internacionais existentes, efectuar a sua comparação, incluindo nomeadamente uma quantificação dos Impactes Ambientais.

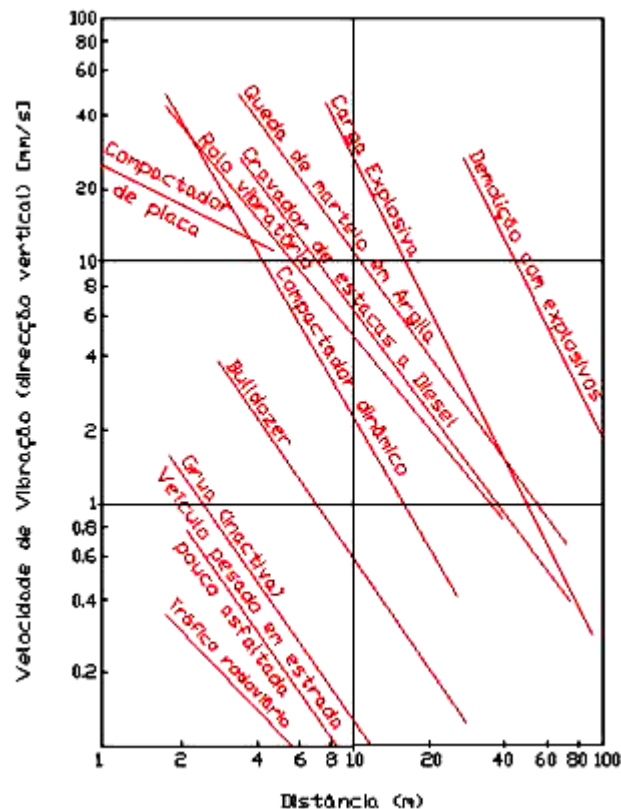


Figura 5 – Velocidade vibratória de acções características das obras, em função da distância, segundo Norma Inglesa BS 5228, Part 4, 1996

A referida quantificação na fase de construção do empreendimento poderá então ser efectuada através das seguintes relações (Paneiro & Dinis da Gama 2003) após a realização de um zonamento do traçado tendo em consideração a constância de certos parâmetros:

$$I_{V_o} = \frac{V_o}{V_{ref}} \text{ e } F_v = \frac{V_o}{V_a}$$

em que  $I_{V_o}$  corresponde ao Índice de Afecção Ambiental na fase de obra e relaciona a velocidade de vibração típica produzida pelos métodos de construção utilizados ( $V_o$ ) e a velocidade de vibração média obtida na situação actual (usada como referência) e  $F_v$  ao Factor de Ponderação para as Vibrações, relacionando as solicitações típicas de obra ( $V_o$ ) com as velocidades admissíveis por critérios de dano ou incomodidade existentes.

Assim, não só é possível obter uma quantificação ambiental conforme a situação anterior ao projecto, como também (tendo como referência as Normas disponíveis do sector) caracterizar qualquer segmento de eixo que exista nas alternativas de traçado.

No RECAPE tal situação encontra-se complementada, embora através da analogia com o fenómeno Ruído esperando-se, portanto, um aumento significativo dos Impactes Ambientais pela realização de trabalhos à superfície, envolvendo operações e equipamentos ruidosos.

Para além disso, são referidas algumas medidas minimizadoras dos impactes ambientais associadas a este descritor, como foi o exemplo da alteração de algumas unidades construtivas do projecto.

Para a justificação dos possíveis impactes ambientais durante a Fase de Obra, foi utilizado como base os dados obtidos na fase de obra da Empreitada ML 644/04 - Execução dos toscos entre a Estação do Oriente e a Estação do Aeroporto, da Linha Vermelha do Metropolitano de Lisboa, E.P., partindo do pressuposto que o comportamento dinâmico dos terrenos na zona da Obra em apreço é análogo ao anterior.

Em termos de análise quantitativa considera-se que a metodologia aplicada poderá dar uma visão geral dos impactes associados a esta fase, dado que a metodologia de construção é idêntica. No entanto, para efectuar uma quantificação absoluta, requeria-se um estudo mais exaustivo de caracterização dinâmica dos terrenos da área e adjacente à área a intervencionar, a partir do qual, se poderiam efectuar previsões mais fiáveis acerca dos pontos potencialmente impactantes. Para além, disso, no que se refere ao descritor vibrações, tal quantificação poderia auxiliar de forma mais precisa, algumas das medidas correctivas entretanto propostas na DIA.

No entanto, para o caso em estudo e dadas as similaridades do presente projecto com projectos anteriores, a análise entretanto equacionada no RECAPE considera-se aceitável.

#### **4.3.IMPACTES NA FASE DE EXPLORAÇÃO**

Na fase de exploração, é considerada como fonte de vibração a circulação das composições metroviárias.

Chama-se a atenção para o facto de, no EIA do Estudo Prévio, não ser indicada qualquer fonte bibliográfica que possa levar aos pressupostos apontados. Para além deste facto, desconhece-se o tipo de terreno considerado para a determinação da atenuação apresentada, nomeadamente se o comportamento será similar aos dos terrenos atravessados pelos traçados em estudo.

Nesse EIA, não são também apresentados quaisquer critérios de incomodidade e uma relação grau de sensibilidade humana/distância, respectivamente, na qual também não se encontra referenciado qualquer fenómeno de atenuação.

Na Figura 2 do EIA do Estudo Prévio são apresentados os edifícios expostos ao fenómeno vibratório (em paralelo como fenómeno de ruído) tendo em consideração os critérios comentados anteriormente, para o eixo do traçado. No entanto, para além dos receptores de maior sensibilidade considera-se que para fins do estudo, haja a necessidade de abranger toda a gama de funções dos vários edifícios existentes (construções sensíveis, correntes, reforçadas, escolas, laboratórios, residências, etc.), na área de estudo.

Segundo as análises efectuadas, os critérios apresentados revestem-se de baixa acuidade científica, não se encontrando totalmente esclarecidos os pressupostos utilizados.

O RECAPE do Projecto de Execução do Prolongamento da Linha Azul entre Amadora-Este e Reboleira complementa substancialmente o estudo efectuado no EIA do Estudo Prévio que, como referido, apresentava algumas lacunas de informação.

Tal complemento baseou-se em estudos anteriores, efectuados em áreas residenciais (Alvalade, Lisboa) embora não sejam constantes os comportamentos dinâmicos dos vários tipos de terrenos afectados.

Já a quantificação na fase de construção do empreendimento poderá ser efectuada através das seguintes relações (Paneiro & Dinis da Gama 2003) após a realização de um zonamento do traçado, tendo em consideração a constância de certos parâmetros:

$$I_{V_e} = \frac{V_e}{V_{ref}} \text{ e } F_v = \frac{V_e}{V_a}$$

em que  $I_{V_e}$  corresponde ao Índice de Afecção Ambiental na fase de exploração e relaciona a velocidade de vibração típica produzida pela circulação das composições ferroviárias ( $V_e$ ) e a velocidade de vibração média obtida na situação actual (usada como referência) e  $F_v$  ao Factor de Ponderação para as Vibrações, relacionando as solicitações típicas da circulação das referidas composições ( $V_e$ ) com as velocidades admissíveis por critérios de dano, ou incomodidade humana, existentes.

Assim, poder-se-á obter uma quantificação ambiental conforme a situação anterior ao projecto, como também tendo como referência as Normas a considerar para cada segmento do traçado da via.

Chama-se ainda a atenção para a necessidade de efectuar uma caracterização do comportamento dos terrenos “in situ” realizados por meio de ensaios geotécnicos para determinação dos respectivos parâmetros, nomeadamente da atenuação dinâmica das ondas sísmicas.

## **5.MEDIDAS DE MINIMIZAÇÃO E VALORIZAÇÃO DE IMPACTES**

### **5.1.CONSIDERAÇÕES GERAIS**

É conhecido o facto de que vibrações da ordem de 0,3 mm/s são sensíveis para o homem e que maiores a 1mm/s provocam desconforto. Também é conhecido que vibrações que geram velocidades maiores que 10mm/s provocam danos estruturais.

Estas valiosas experiências permitem tomar como parâmetro base a denominada velocidade vibratória crítica ( $v_c$ ) que permite estabelecer medidas de minimização do impacto ambiental vibratório pela construção e exploração da linha de Metropolitano.

A velocidade vibratória crítica pode ser quantificada por meio da equação seguinte:

$$v_c = \frac{\sigma}{\rho \cdot \mu}$$

onde  $\sigma$  é a tensão dinâmica,  $\rho$  é a massa volúmica e  $\mu$  é a velocidade de propagação das vibrações através dos terrenos.

Esta velocidade vibratória crítica permite definir e normalizar os VLA<sub>s</sub> (Valores Limite Admissíveis) e que constituem um valor fundamental para o controle ambiental vibratório (Decreto-Lei nº 69/2000).

Como já foi referido, a velocidade vibratória crítica, também é possível quantificar mediante a equação:

$$v_c = a W^b D^c$$

onde: a, b, c são coeficientes a serem obtidos com testes "in situ" e utilizando processo estatístico, W é a energia cinética (kJ) da fonte geradora de vibrações e D a distância (m).

Das equações (1) e (2) resulta a distância crítica  $D_c$  desde a fonte de vibração à área de impacte ambiental que é dada pela relação:

$$D_c = \left[ \frac{\sigma}{\rho \cdot \mu \cdot a \cdot W^b} \right]^{1/c}$$

Esta expressão matemática permite calcular a que distância deverá ser colocada a fonte de vibrações produzindo uma energia cinética W, de modo que não ocasione danos (materializados por fracturas ou colapsos) sobre elementos estruturais que possuam uma resistência mecânica à tracção de valor  $\sigma$ .

## 5.2. FONTES DE VIBRAÇÃO NA FASE DE CONSTRUÇÃO

No processo de construção inerente à obra, a geração de vibrações pode ser provocada pela escavação mecânica em rocha ou solo, pela remoção dos escombros resultantes dessa escavação, pelas operações de perfuração e de sondagem, pelos métodos escolhidos para escavação e pelo funcionamento de variados equipamentos utilizados.

Estas vibrações são caracterizadas pela transmissão de ondas que se propagam através do meio circundante (rocha, solo) podendo provocar danos ou gerar impactes ambientais relacionados com edificações sensíveis próximas, estruturas frágeis localizadas nas vizinhanças, actividades humanas, etc.

## 5.3. FONTES DE VIBRAÇÃO NA FASE DE EXPLORAÇÃO

A geração de vibrações será provocada principalmente pelo tráfego das composições que podem provocar efeitos ambientais sensíveis às pessoas e até danos estruturais a edificações, através de criação e da propagação de facturas pré-existentes ou originando novas fracturas, particularmente se o traçado das vias se localizar relativamente próximo de tais edificações.

#### **5.4.MEDIDAS DE MINIMIZAÇÃO**

As medidas de minimização do impacte ambiental vibratório deverão contribuir para implementar um processo de prevenção e controle quer na etapa de construção, quer na etapa de exploração.

Assim na etapa de construção devem-se usar processos de escavação cuja energia cinética permita garantir uma distância maior que a distância crítica  $D_c$  devidamente estabelecida em face de estruturas vizinhas pré-existentes. Esta distância deve também verificar-se para todo equipamento e meios de execução da obra.

Uma acção indispensável é a constante monitorização das vibrações que permita conservar velocidade vibratória sempre abaixo dos seus valores críticos.

Na etapa da exploração deve-se dimensionar a capacidade do comboio cuja energia cinética permita conservar uma distância maior que as sucessivas distâncias críticas.

O fluxograma seguinte, apresentado na Figura 6, contém os principais aspectos da metodologia sugerida para a mitigação de vibrações.

A nível geral, deverão ainda ser respeitados os princípios gerais da prevenção, que preconizam o isolamento ou o confinamento da origem das vibrações.

Esse isolamento pode ser realizado, como é prática nas linhas recentes do Metropolitano de Lisboa, pela implementação de mantas antivibráteis em segmentos do traçado da via onde os impactes ambientais são mais significativos.

Desta forma, poder-se-á estabelecer que os segmentos onde esta técnica poderá ser aplicada correspondem aqueles em que o Índice de Afectação Ambiental para as Vibrações durante a fase de exploração é superior a 1.

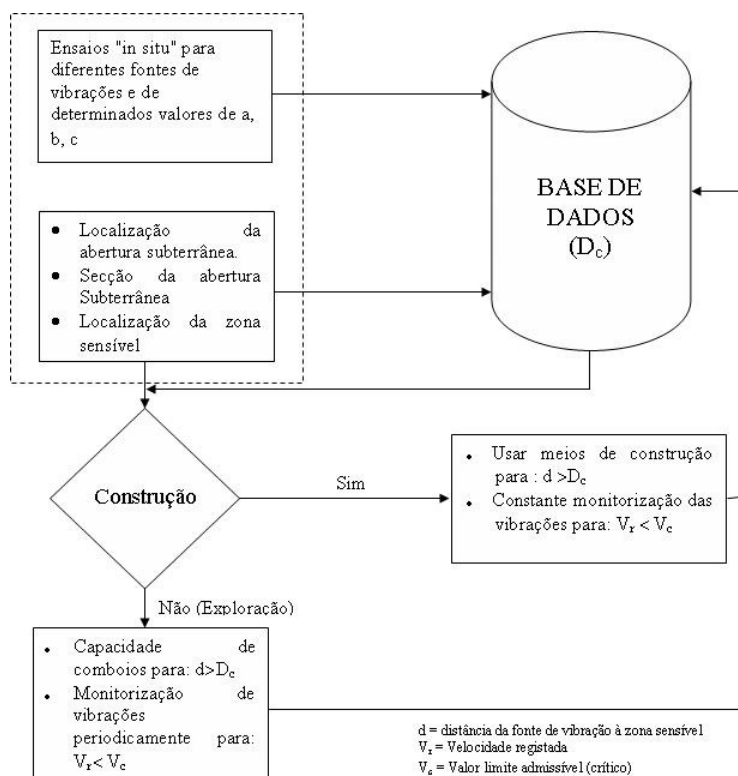


Figura 6 - Processo de implementação das medidas de minimização dos impactos ambientais resultantes de vibrações

## 6.MONITORIZAÇÃO DE VIBRAÇÕES

### 6.1.PREÂMBULO

A realização de obras conduz a impactos ambientais que, cada vez mais, devem ser controlados e reduzidos aos valores admissíveis na legislação. As diversas acções envolvidas, desde trabalhos de escavação, de contenção e de estabilização até aos efeitos comuns da execução de obras (como são os ruídos, as vibrações, a geração de poeiras, etc.) encontram crescente oposição da opinião pública, estando submetidas a rigorosas medidas de monitorização dos seus efeitos pelas leis vigentes.

Por outro lado, a responsabilização dos prevaricadores passa pelo registo dos dados monitorizados em condições rotineiras de trabalho, sem pré-aviso ou indicação explícita das medições, o que hoje se consegue com instrumentação permanentemente activa e localizada nas imediações dessas mesmas obras.

No caso específico das vibrações originadas pelas obras, é de particular importância aferir os seus efeitos na estabilidade das estruturas vizinhas, que por vezes já se encontram em condições deficientes.

É reconhecido pelos especialistas que os efeitos nocivos das vibrações dependem fundamentalmente da respectiva amplitude e frequência, havendo ainda a considerar as

propriedades dissipativas dos terrenos em que as mesmas se propagam. Determinadas amplificações localizadas podem ocorrer em consequência das condições naturais dos terrenos de fundação, com destaque para a presença de água.

A correlação entre a magnitude das vibrações e os danos em estruturas é reconhecida universalmente, sendo objecto de legislação especial na maioria dos países (em Portugal foi promulgada em 1983 a NP2074 que estabelece os limites admissíveis para diferentes estruturas assentes sobre diversos tipos de terrenos).

A forma mais utilizada para medir os parâmetros físicos relacionados com as vibrações é através da utilização de sismógrafos portáteis colocados nas estruturas vizinhas durante um certo período de tempo. Estas medições, por serem esporádicas, não permitem obter um registo histórico desses eventos.

Neste sentido, o registo permanente de vibrações e a detecção da sua origem reveste-se de grande importância, não só para o apuramento de responsabilidades mas, fundamentalmente para a realização de estudos científicos que possam aferir com rigor os seus efeitos nas estruturas. Actualmente, o estudo do comportamento dos terrenos é feito através da detonação de pequenas cargas detonantes, permitindo determinar as leis de atenuação características de cada tipo de solo e, posteriormente, planificar os planos de fogo e acautelar os seus efeitos nas estruturas. Também o recurso à queda de objectos de peso conhecido permite aquilatar esses mesmos comportamentos.

No entanto, devido ao facto de não existir uma monitorização contínua, torna-se impossível determinar com rigor se certos danos nos edifícios são provocados pelos trabalhos nas obras ou, se a sua origem está relacionada, por exemplo, com o movimento do tráfego ou, até, com a ocorrência de um pequeno sismo natural.

As tendências contemporâneas apontam para a implementação de um sistema de monitorização contínuo para registo de vibrações numa zona urbana onde decorrem trabalhos de escavações e disponibilizá-los na Web para consulta generalizada.

## **6.2. CONCEITOS BÁSICOS**

A medição de vibrações permite determinar as características do movimento que sofre uma dada estrutura ao ser percorrida por uma solicitação dinâmica (seja por resultar de uma carga aplicada num intervalo de tempo muito curto, seja por a sua intensidade variar rapidamente com o tempo).

Numerosos fenómenos conhecidos enquadram-se dentro deste contexto, como sejam os abalos sísmicos, a cravação de estacas de fundação, o impacto ou choque mecânico sobre os terrenos, como acontece nas acções de escavação por martelos hidráulicos ou por detonações de substâncias explosivas ou ainda em resultado do tráfego de viaturas pesadas, nos estudos de propagação de ondas em brocas metálicas de perfuração, nas fundações de máquinas alternativas e de turbinas, etc.

Em todos estes fenómenos há a considerar um mecanismo inicial que transfere uma tensão dinâmica aos terrenos, por vezes conduzindo à sua rotura nas imediações do

ponto de aplicação dessa tensão, e libertando ainda uma energia de deformação elástica que diverge desse ponto sob a forma de uma onda de tensão, a qual se propaga com uma velocidade que depende das propriedades do terreno.

Tal propagação ondulatória corresponde à vibração das partículas constituintes dos terrenos ou das estruturas afectadas, quando atravessadas pela frente da onda, e cuja intensidade diminui com o aumento da distância percorrida, até se dissipar completamente.

Duas velocidades distintas são consideradas no estudo destes fenómenos: a de propagação das ondas ao longo dos materiais afectados ( $c$ ) e a velocidade de vibração das partículas que são sucessivamente deslocadas pela passagem da frente de onda ( $v$ ).

A relação entre estas duas grandezas pode ser estabelecida de modo simples se for considerada uma propagação unidireccional, por exemplo em resultado de um impacto aplicado na extremidade de uma barra. No interior de um elemento de volume dessa barra verifica-se que a deformação  $\varepsilon$  das partículas deslocadas pela perturbação ondulatória é dada simplesmente por:

$$\varepsilon = \frac{v}{c}$$

Admitindo que o corpo constituinte da barra se comporta elasticamente (respeitando a conhecida lei de Hooke) a tensão dinâmica correspondente a tal deformação é determinada por:

$$\sigma = E\varepsilon$$

onde  $E$  representa o módulo de elasticidade desse corpo.

Uma vez que a velocidade de propagação das ondas longitudinais através de uma barra se expressa por

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

em que  $\rho$  traduz a massa volúmica do corpo, resulta por substituição a seguinte relação fundamental que explicita o valor da tensão dinâmica associada à onda:

$$\sigma = \rho cv$$

Esta equação mostra que a tensão dinâmica é directamente proporcional à velocidade vibratória das partículas, sendo o produto  $\rho c$  (conhecido por impedância característica, uma propriedade dinâmica dos corpos sólidos) o factor de proporcionalidade.

A importância desta expressão é essencial para a compreensão dos mecanismos de deformação e de rotura que podem afectar uma estrutura sujeita a propagações ondulatórias, uma vez que a tensão dinâmica que a atinge por efeito das vibrações deve

ser comparada com a magnitude da respectiva resistência (também expressa em unidades de pressão, como  $\sigma$ ).

Outro conceito essencial desta propagação é o de atenuação, ou seja, a diminuição da tensão associada à onda com a distância de propagação.

Para tal mecanismo de atenuação contribuem o simples efeito geométrico da propagação da onda (bem evidenciado quando se considera, por exemplo, a detonação de uma carga esférica no interior de um maciço rochoso), além dos fenómenos de perdas de energia por atrito e por dissipação de calor.

Assim, qualquer onda reduz os seus efeitos com a distância que vai percorrendo, até se atenuar completamente para efeitos práticos.

Tomando o caso da detonação de uma carga explosiva de peso  $Q$ , os seus efeitos registados numa estrutura situada à distância  $D$  do centro da carga, são avaliados por uma velocidade vibratória fornecida pela expressão:

$$v = aQ^b D^c$$

onde  $a$ ,  $b$ ,  $c$  são coeficientes numéricos dependentes do tipo de terreno onde ocorre a propagação, do tipo de substância explosiva e do diagrama de fogo utilizado (necessariamente  $c$  é negativo).

Assim, a protecção de danos às estruturas é feita do seguinte modo:

- Conhecida a natureza da estrutura (reforçada, corrente ou sensível) e o tipo de terreno onde se dá a propagação, determina-se a sua máxima velocidade vibratória admissível (para tal são utilizados critérios de dano estrutural consagrados, como por exemplo o da Norma Portuguesa 2074);
- Determinada a distância  $D$  entre o ponto de detonação e o ponto de registo de vibrações (que deve ser ligado a um elemento da estrutura a proteger), calcula-se a carga  $Q$  que satisfaz a equação acima indicada, desde que se conheçam naturalmente os coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  sendo essa a carga máxima admissível.

A importância desta expressão, que se baseia em sucessivas determinações efectuadas no terreno através de cargas teste, está no facto de poder servir de padrão comparativo com quaisquer velocidades vibratórias que alcancem a estrutura durante a sua vida útil, de modo a estabelecer quais aquelas que ultrapassam os limites aceitáveis, identificando desse modo os eventos responsáveis por danos observáveis.

Tais exigências de protecção de estruturas (sejam elas sensíveis ou quaisquer outras localizadas nas proximidades de fontes produtoras de vibrações) necessitam assim de uma monitorização contínua, que deverá ser levada a cabo nas melhores condições de segurança e de economia.

Na actualidade, as campanhas de registo de vibrações resultantes de obras e de outras causas, são frequentemente realizadas com o recurso a sismógrafos de engenharia

providos de geofones (ou sensores) que se aplicam durante períodos de tempo relativamente curtos, através de equipas especializadas que actuam com o conhecimento de todos os intervenientes do processo construtivo (dono da obra, empreiteiro, projectista e fiscalização).

Na sequência dos registos de campo são elaborados relatórios técnicos em que ficam explicitas as correlações entre cargas, distâncias e velocidades de vibração. Dado o conhecimento das velocidades admissíveis pelas estruturas a proteger, deduz-se se as cargas aplicadas foram ou não excessivas, explicando assim os efeitos observados nas estruturas.

É óbvio que tais análises circunscrevem-se ao intervalo de tempo em que foram efectuados registos, não cobrindo evidentemente todas as situações de obra, que seriam obtidas se o registo fosse permanente e contínuo. Desse modo, não será possível atribuir responsabilidades por danos verificados fora do período em que se efectuaram as medições, precisamente aquele em que todos os intervenientes estavam informados sobre a realização dos registos de vibrações.

Nestas circunstâncias, existem grandes vantagens no processo de monitorização contínua de vibrações em estruturas próximas de acções de escavação e de construção, especialmente se o mesmo for caracterizado por possuir uma disseminação aberta dos resultados, para todos os interessados no problema.

### **6.3. MONITORIZAÇÃO CONTÍNUA**

Dos equipamentos de registo de vibrações existentes no mercado que possam atender a esta última condição de acessibilidade generalizada, verifica-se que todos eles se caracterizam por exigirem um conjunto completo formado por sismógrafo + geofone + transmissão de dados + disponibilização em rede.

Devido ao facto de o sismógrafo constituir o item de equipamento mais dispendioso de todo este conjunto justifica-se plenamente a procura de alternativas de monitorização que o dispensem junto a cada ponto de registo de vibrações.

Os sistemas de registos de vibrações mais avançados presentemente têm em vista a redução de custos de monitorização de vibrações em zonas urbanas, bem como a monitorização permanente de tais fenómenos permitindo criar uma base de dados com o histórico de todos os registos ocorridos nas zonas sobre vigilância. Por outro lado, disponibiliza, de uma forma simples, a informação do registo de vibrações à população afectada por tais fenómenos, podendo esta defender os seus legítimos direitos de protecção do seu património.

O objectivo deste estudo é identificar os componentes necessários ao desenvolvimento de um sistema de informação para registo contínuo de vibrações urbanas, que possa ser consultado através da Web.

A tendência actual tem como principal objectivo a disponibilização de informação interna e externamente, de forma a permitir o acesso à informação relevante a um custo baixo de implementação e manutenção.

Este objectivo genérico pode ser dividido em pequenos objectivos técnicos:

- Processo de medição das grandezas físicas automatizado;
- Transmissão, processamento e arquivo automatizado;
- Arquivo numa base de dados estruturada;
- Disponibilização dos dados numa interface Web, de acesso público via Internet;
- Acesso interno a algoritmos de processamento específico sobre os dados adquiridos;
- Emissão de relatórios automáticos relativos à detecção de eventos.

E alguns objectivos operacionais:

- Utilização de produtos e tecnologias standard de mercado;
- Flexibilidade de configuração do sistema de medida e de processamento;
- Baixo custo de manutenção.

Parte da solução, passa pela colocação em locais estratégicos de unidades remotas que procedam à aquisição no local das vibrações e as envie remotamente para uma base de dados colocada num servidor Web. A base de dados guarda todos os parâmetros necessários para a caracterização das vibrações. Posteriormente, qualquer entidade autorizada poderá consultar essa base de dados, através de um browser, pela selecção dos locais e período pretendidos.

Desta forma, na situação de obra, poderão ser utilizados geofones tridimensionais piezoeléctricos, que devem ser instalados nos estaleiros e em estruturas consideradas sensíveis ( $\beta = 0,5$  segundo a NP2074) ao longo do traçado das vias.

Finalmente, para a situação de exploração, poder-se-á justificar monitorização contínua para locais do traçado muito sensíveis, designadamente ao nível das estações.

#### **6.4. PLANO GERAL DE MONITORIZAÇÃO APRESENTADO PELO RECAPE**

Para o descritor ambiental Vibrações, o Plano Geral de Monitorização Ambiental apresentado no Anexo XVIII do RECAPE, inclui um conjunto de pressupostos, medidas e critério adequados ao acompanhamento dos impactes negativos usualmente associados quer na Fase de Construção, quer na Fase de Exploração.

Para a Fase de Construção, com referência a cada uma das medidas e critérios indicados, considera-se o seguinte:

- *Actividades Críticas da Construção*: Na Fase de Construção, as actividades contempladas são adequadas, sendo estas as que oferecem fontes de vibração mais intensas;

- *Parâmetros, Técnicas e Metodologias:* Os parâmetros indicados mostram-se adequados sendo o mais importante aquele que corresponde à obtenção dos valores da velocidade máxima de vibração (PVS, em mm/s), sendo este o parâmetro aceite na generalidade das normas nacionais e internacionais, bem como a frequência dominante em cada um dos registos efectuados.
- *Pontos de Amostragem:* Tal como se encontra contemplado, os pontos de amostragem localizam-se nas mesmas posições espaciais, quer na situação de referência, quer na Fase de Construção do projecto. Refira-se que as monitorizações devam ser efectuadas em estruturas da vizinhança do traçado e não exclusivamente sobre o traçado. Deverão ainda ser definidos, como pontos de monitorização, os edifícios (indicando a rua e o n.º de porta) potencialmente ocupados por receptores sensíveis e que estejam junto da linha;
- *Periodicidade:* A periodicidade considerada no Plano de Monitorização Ambiental na Fase de Construção mostra-se adequada;
- *Resultados:* No que respeita aos resultados obtidos, considera-se que os propostos no RECAPE para a fase em análise se encontram ajustados.

Da mesma forma apresentada nos pontos anteriores, elaboram-se as seguintes considerações, desta feita, para cada uma das medidas e critérios indicados no Plano de Monitorização Ambiental para a Fase de Exploração:

- *Actividades Críticas na Exploração:* Os períodos de registo contemplados são adequados, sendo particularmente críticos no que respeita às vibrações produzidas pela circulação das composições metroviárias, nas horas de ponta e períodos nocturnos;
- *Parâmetros, Técnicas e Metodologias:* Os parâmetros indicados mostram-se adequados, sendo o mais importante aquele que corresponde à obtenção dos valores da velocidade máxima de vibração (PVS, em mm/s), valor este que é o parâmetro aceite na generalidade das normas nacionais e internacionais, bem como a frequência dominante em cada um dos registos efectuados;
- *Pontos de Amostragem:* Tal como se encontra contemplado, os pontos de amostragem encontram-se coincidentes em todas as fases do projecto. Refira-se que as monitorizações devam ser efectuadas em estruturas da vizinhança do traçado e não exclusivamente sobre o traçado. Deverão ser definidos, desta forma, como pontos de monitorização, os edifícios (indicando a rua e o n.º de porta) potencialmente ocupados por receptores sensíveis e que estejam junto da linha;
- *Periodicidade:* A periodicidade considerada no Plano de Monitorização Ambiental na Fase de Exploração mostra-se adequada;
- *Resultados:* No que respeita aos resultados obtidos, considera-se que os propostos no RECAPE para esta fase do projecto se encontram ajustados.

Refira-se, por fim, que o Plano de Monitorização Ambiental, que contempla todas as fases do projecto, se mostra adequado às necessidades de avaliação ambiental. Considerando a existência de tecnologias para minimização do efeito das vibrações

provenientes da circulação das composições sobre os receptores sensíveis, nomeadamente a eficiência dos sistemas anti-vibráteis, que hoje em dia são sistematicamente aplicados, considera-se que o plano de monitorização proposto poderá estar preparado para detectar eventuais ausências de conformidade deste descritor ambiental.

## **PARTE 2 – ANÁLISE DE RISCO**

### **1. CONTEÚDOS DO RECAPE**

O Anexo XIII do RECAPE sobre o Prolongamento da Linha Azul entre Estação Amadora Este e Reboleira aborda o descritor Vibrações e a Análise de Risco. No que diz respeito a esta última, ela encontra-se incluída no capítulo 3 e compreende os seguintes aspectos:

- Introdução;
- Metodologia;
- Análise e determinação;
- Identificação do risco;
- Criticidade e periodicidade do risco;
- Conclusões gerais

Na parte da Introdução refere que a análise de risco foi baseada nas análises similares efectuadas pelo promotor do projecto e por ele adoptadas para projectos similares pelo ML. Menciona também que a análise de risco efectuada destina-se sobretudo a identificar os incidentes passíveis de gerar impactes ambientais negativos, comparar e classificar os riscos a ele associados para as actividades significativas e permitindo, consequentemente, estruturar as medidas de minimização correspondentes. Finalmente, indica que na Análise de Risco não se incluíram os riscos de segurança durante a fase de construção, por estar abrangido no Decreto-Lei n.º 273/200, de 29 de Outubro.

No que diz respeito à metodologia aplicada, indica que a análise de risco utilizada seguiu a metodologia denominada FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*), calculando um parâmetro designado por Número de Prioridade de Risco ( $NPR = P \times D \times G$ ) baseado na probabilidade (P), a detectabilidade (D) e a gravidade (G) do fenómeno.

Para factores de risco com gravidade elevada e probabilidade média ou elevada, calcula-se também a denominada Criticabilidade ( $C = P \times G$ ).

No que concerne à análise e determinação do risco é utilizado o Número de Prioridade de Risco (NPR) que é calculado usando escalas qualitativas de 1 a 10 para as três variáveis (probabilidade, detectabilidade e gravidade), apresentando uma escala de valores do NPR com a respectiva qualificação (muito baixa, baixa, média, elevada e muito elevada), referindo que por norma, se o NPR for superior a 100 (limiar de aceitabilidade) deverão ser determinadas acções para reduzir este valor.

Seguidamente, o RECAPE considera que as acções que apresentam maior gravidade se concentram nas fases de construção e de exploração, sendo que no domínio dos acidentes existiriam três tipos:

- Acidentes raros com material circulante (colisão, descarrilamento, queda de passageiros para a via);
- Incêndios (nas composições, na via ou na Estação);
- Acidentes com passageiros.

O RECAPE refere que em 97% dos casos esses acidentes são, por ordem decrescente, os seguintes: entalamento das pessoas na porta do comboio no embarque e/ou desembarque; quedas nas escadas rolantes; mãos presas no comboio aquando da abertura; quedas durante o embarque e/ou desembarque; quedas para via e entalamento entre o cais e o comboio.

Em cinco tabelas (Tabelas 10, 11, 12, 13 e 14) são identificados os denominados factores de risco em número de 11 para a fase da obra e 8 para a fase de exploração. Nestas tabelas encontra-se a ponderação dos valores de P, D e G que permitem calcular o NPR e C, correspondentes aos que denomina factores/descriptores ambientais e sócio-económicos (sócio-economia, geologia e património).

O RECAPE refere ainda que os acidentes raros com material circulante (FRE1), os incêndios (FRE2) e os acidentes com passageiros (FRE3) foram avaliados com base na recolha de elementos estatísticos e estudos do ML.

Na respectiva conclusão indica-se que a fase de obra apresenta maiores riscos e com gravidade superior aos da fase de exploração.

Salienta-se que, para o empreendimento em estudo, na fase da construção os factores de risco a considerar são: afectação pelas vibrações causadas na construção do túnel aos bens imobiliários e o Aqueduto das Águas Livres, e a indução de acidentes causados pela presença dos estaleiros e frentes de obra. Sobre a minimização de vibrações nesta fase, indica que a sua minimização para distâncias reduzidas (< 5 metros) até níveis imperceptíveis é difícil.

Conclui-se que, na fase de exploração, os riscos apresentariam duas consequências directas e distintas: diminuição da qualidade do serviço devido ao tempo de espera e pela diminuição da acessibilidade, e danos pessoais e materiais que podem ser graves.

Em relação aos valores de NPR conclui-se que caracterizam a fase da exploração com riscos baixos e, consequentemente, com elevados níveis de segurança.

## **2.ENQUADRAMENTO E CRITÉRIOS DE ANÁLISE DE RISCO**

### **2.1.Interacção das actividades das acções de construção e exploração do túnel com o ambiente**

Nas obras subterrâneas existem, entre as componentes do ambiente subterrâneo, uma interacção que leva a que qualquer alteração das condições naturais destes componentes podem causar impactes ambientais e pôr em causa a vida humana (ver Figura 7).

Esta interacção entre os componentes ambientais permite caracterizar os factores e riscos presentes durante a construção das obras subterrâneas ou túneis, sem obviar algum descritor ambiental que pode ser muito importante durante o processo construtivo.

Um dos problemas críticos em túneis pouco profundos e construídas em zonas urbanas é o aspecto geotécnico que se pode manifestar através das deformações, deslocamentos ou subsidências.

Outro problema que tem que ver com o comportamento dinâmico dos solos e rochas são as vibrações transmitidas pelos processos da escavação utilizados para escavar maciços rochosos, que normalmente causa incomodidade humana.

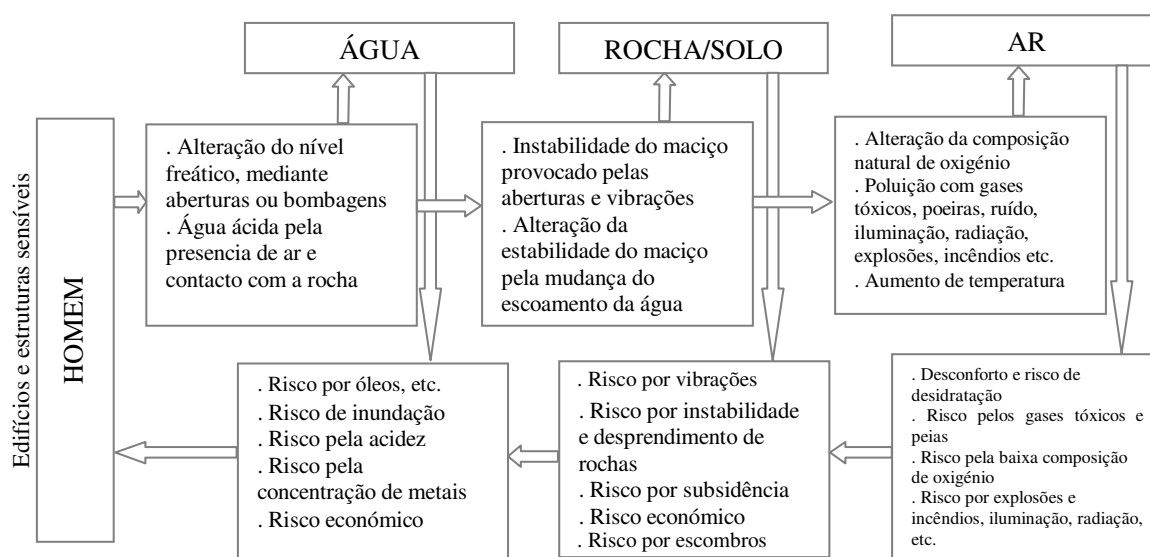


Figura 7 – Interacção entre os componentes físico-químicos e o homem na construção de obras subterrâneas (Navarro Torres, et. al., 2005)

No que diz respeito à qualidade do ar que circula na atmosfera subterrânea é preciso ter em consideração a poluição devido a emissões diesel e poeiras.

## 2.2. Método quantitativo na análise de risco

A análise de risco pode ser implementada através de procedimentos quantitativos ou qualitativos.

A análise quantitativa é baseada nos valores numéricos das consequências potenciais e da probabilidade de ocorrência dos eventos adversos. Neste tipo de análise podem-se incluir o método estatístico, o método de Monte Carlo, o ETA (Event Tree Analysis) e a FTA (Fault Tree Analysis).

Por exemplo, o método de Monte Carlo (Figura 8) é um procedimento de modelação numérica que usa a geração de números aleatórios para simular os processos que

determinam o evento em estudo, sendo este evento repetido várias vezes, substituindo as variáveis pelos dados predeterminados aleatoriamente, de forma a obter conclusões de tipo estatístico.

O método estatístico para a análise de risco do descritor de vibrações baseado na Lei de Propagação da Vibração e o erro padrão respectivo que resulta da aplicação da regressão múltipla linear, tendo com referência as Normas em vigor como a Norma Portuguesa 2074 e a norma ISO 2631.

$$v = aQ^b D^{-c} \quad (1)$$

$$v_s = v_r + m v_r = aQ^b D^{-c} \quad (2)$$

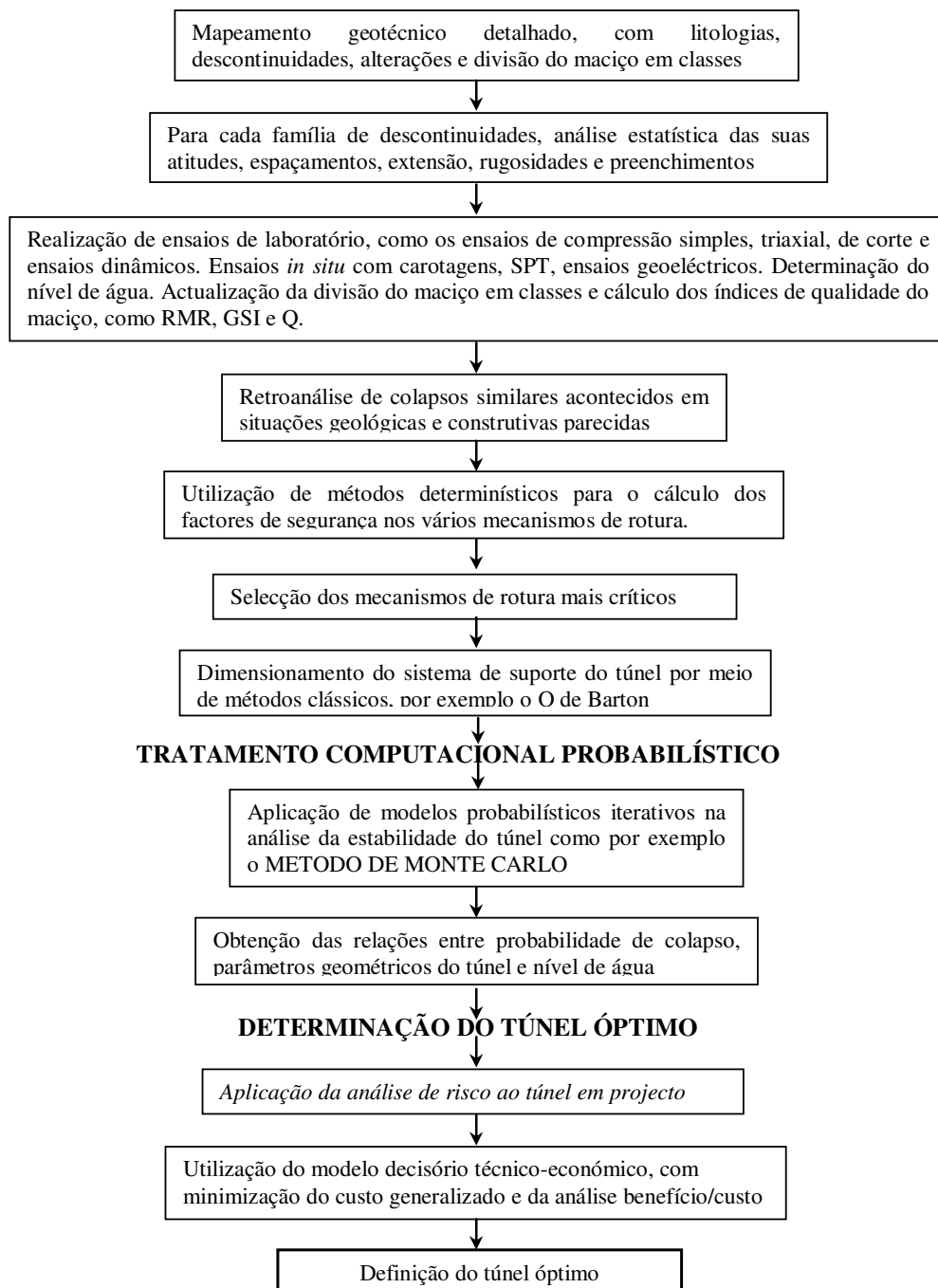


Figura 8 – Diagrama de fluxo para determinação o modelo geomecânico de um túnel e aplicação do método de Monte Carlo (D. Gama, 1998)

$$v_i = v_r - mv_r = aQ^b D^{-c} \quad (3)$$

onde  $v$  é a velocidade de vibração de partículas,  $a, b, c$  são coeficientes obtidos utilizando regressão múltipla linear,  $Q$  é a carga explosiva ou energia transmitida ao terreno,  $D$  é a distância entre a fonte de vibração e o ponto de registo ou ponto de avaliação,  $V_r$  é a velocidade obtida conforme NP 2074 ou ISO 2631,  $m$  é o erro padrão da regressão,  $V_s$  é o valor superior da velocidade de vibração admissível e  $V_i$  o valor inferior da velocidade de vibração admissível.

A aplicação das equações apresentada permite definir, por exemplo, a quantidade de carga explosiva por retardo admissível para uma distância determinada ou definir níveis de risco baixo médio e alto (Figura 9).

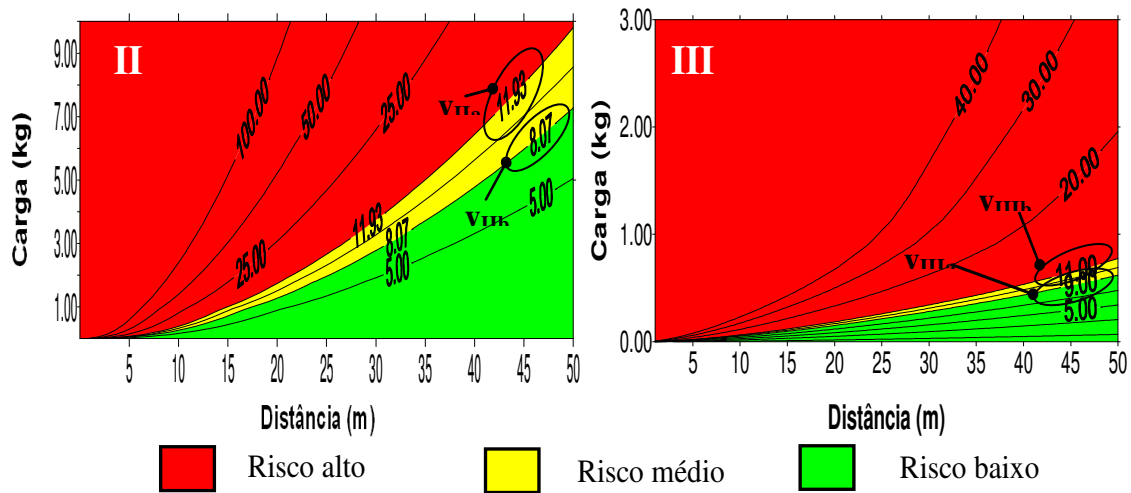


Figura 9 – Exemplo da variação de velocidade vibratória com cargas explosivas e distâncias

Outro procedimento utilizável baseia-se na consideração da distribuição normal da probabilidade, também denominada distribuição de Gauss, como critério para estabelecer a velocidade de vibração admissível. A distribuição normal  $f(x)$  é dada pela seguinte equação:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{x}}{\sigma}\right)^2} \quad (4)$$

onde  $x$  é variável contínua,  $\bar{x}$  é o valor médio da variável e  $\sigma$  é o desvio padrão. Neste caso  $x$  corresponde à velocidade de vibração de partículas e  $\bar{x}$  à velocidade de vibração admissível determinado segundo as normas em vigor.

As três propriedades principais do desvio padrão são: ser simétrica relativamente a  $\bar{x}$  e de ter pontos de inflexão em  $\bar{x} + \sigma$  e em  $\bar{x} - \sigma$ , e ser unimodal onde a moda é  $\bar{x}$ .

No caso da distribuição normal 68,27% dos valores da variável caem no interior do intervalo definido por  $\bar{x} \pm \sigma$ , 95,45% no intervalo  $\bar{x} \pm 2\sigma$ , e 99,73% no intervalo  $\bar{x} \pm 3\sigma$ .

Um valor inferior ao desvio padrão significa que a dispersão dos valores da variável à volta do valor médio é reduzida, enquanto que um valor alto do desvio padrão indica uma elevada dispersão. A área sob a distribuição normal é sempre unitária.

Uma alternativa interessante é apresentar os mesmos resultados em função da probabilidade acumulada, que fornece a probabilidade que a variável assuma um valor inferior ou igual ao valor seleccionado. A função de probabilidade acumulada é o integral da correspondente função de distribuição da probabilidade.

Um exemplo do procedimento probabilístico aplicado ao túnel de Metro de Porto é o indicado nas Figuras 10 e 11.

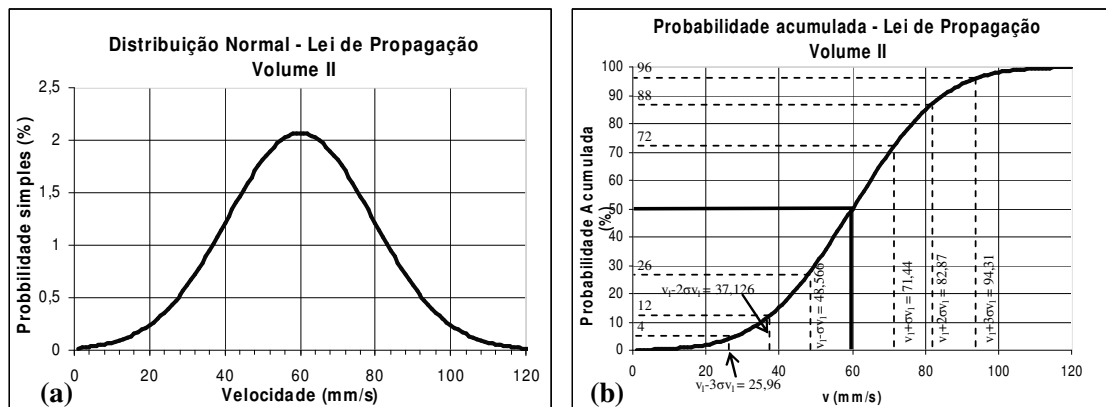


Figura 10 – Distribuição da probabilidade normal e acumulada para as leis de propagação das vibrações determinadas na zona da estação Bolhão do Metro do Porto

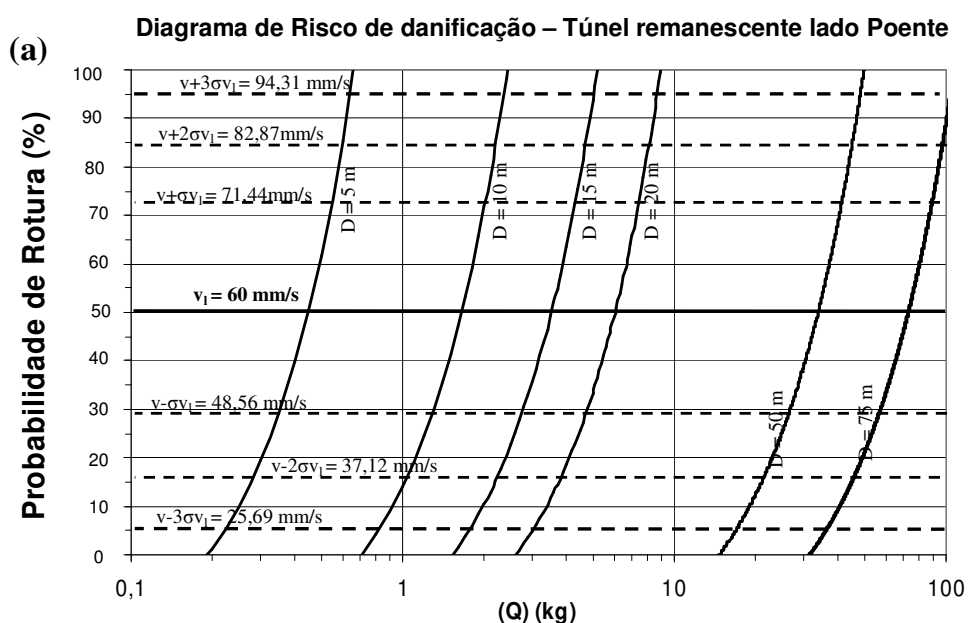


Figura 11 – Diagrama de probabilidade de danos nas aduelas do túnel da estação Bolhão

### 2.3. Método qualitativo na análise de risco

A análise qualitativa associa a cada evento a analisar um índice qualitativo (por exemplo de 1 a 5), quer para a probabilidade, quer para o respectivo dano e finalmente representa matricialmente o risco como uma combinação das probabilidades e classes de danos.

Assim, pode-se obter uma classificação dos eventos não desejados e é possível identificar os acontecimentos críticos, não críticos ou aqueles que precisam uma avaliação mais detalhada. Um exemplo do método qualitativo é o FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) e uma variante deste método é o FMECA (*Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*).

O método FMEA, que se pode traduzir como Análise dos Modos de Colapso e de seus Efeitos, foi inicialmente desenvolvido com a finalidade de auxiliar no diagnóstico e previsão de falhas de equipamentos (HELMAN, 1995 APUD FERRARI, MARTINS E TOLEDO, 2001).

Este método baseia-se nos seguintes conceitos:

- Colapso ou falha, que é a cessação da aptidão de um elemento ou do sistema para cumprir uma das funções para a qual foi projectado;
- Modo de rotura, corresponde à forma como a falha é observada num elemento do sistema;
- Causa da rotura, são os acontecimentos que conduzem aos modos de colapso ou de falha;
- Efeito de um modo de rotura, consiste no conjunto de consequências associadas à perda de aptidão de um elemento para cumprir a função requerida.

A FMEA é uma técnica indutiva que analisa sistematicamente todos os modos de falhas de um sistema e identifica os efeitos resultantes destas falhas sobre outros itens e sobre o sistema de maneira geral. Cada modo de falha é considerado individualmente como uma ocorrência independente, sem qualquer relação com outras falhas do sistema, salvo os efeitos subsequentes que possa ocasionar.

Esta técnica foi desenvolvida com os seguintes objectivos:

- Identificar os modos de falhas dos itens de um sistema;
- Avaliar os efeitos das falhas;
- Reduzir a probabilidade da ocorrência de falhas em projectos de novos produtos ou processos;
- Reduzir a probabilidade de falhas potenciais (ou seja, que ainda não tenham ocorrido) em produtos ou processos já em operação;
- Aumentar a confiabilidade de produtos ou processos já em operação por meio da análise das falhas que já ocorreram;
- Reduzir os riscos de erros e aumento da qualidade em procedimentos administrativos.

A metodologia FMEA é utilizada na elaboração de projectos, identificando todos os modos de falhas críticas, para que estes possam ser eliminados ou minimizados no estágio inicial do desenvolvimento do sistema. Nas instalações militares americanas a aplicação desta metodologia é obrigatória para elaboração de projectos bélicos.

Esta metodologia foi desenvolvida com um enfoque no projecto de novos produtos e processos, a metodologia FMEA, mas posteriormente, passou a ser aplicada de diversas maneiras. Assim, é utilizada para diminuir as falhas de produtos e processos existentes e para diminuir a probabilidade de falha em processos administrativos.

A FMEA pode ser aplicada em vários níveis, ou seja, componentes, equipamentos ou sistema etc. e pode ser usada em:

- Na fase de projecto de sistemas visando detectar possíveis falhas e melhorar a confiabilidade do sistema;
- Na revisão de segurança de sistemas e unidades em operação procurando verificar a propagação das falhas sobre os outros componentes do sistema e as implicações para a segurança das instalações;
- No contexto de uma análise global de riscos, tanto de sistemas na fase de projecto, como de sistemas em operação ou em fase de ampliação.

Para a implementação do estudo de FMEA são necessários os passos indicados na Figura 12.

### 3. ANÁLISE DO CONTEÚDO DO RECAPE

#### 3.1. Factor de risco

Para a análise de riscos nas Tabelas 10, 11, 13 e 14 consideraram maior quantidade de factores de risco da parte sócio-economia do que a geologia, solos e hidrogeologia (ver Tabela seguinte).

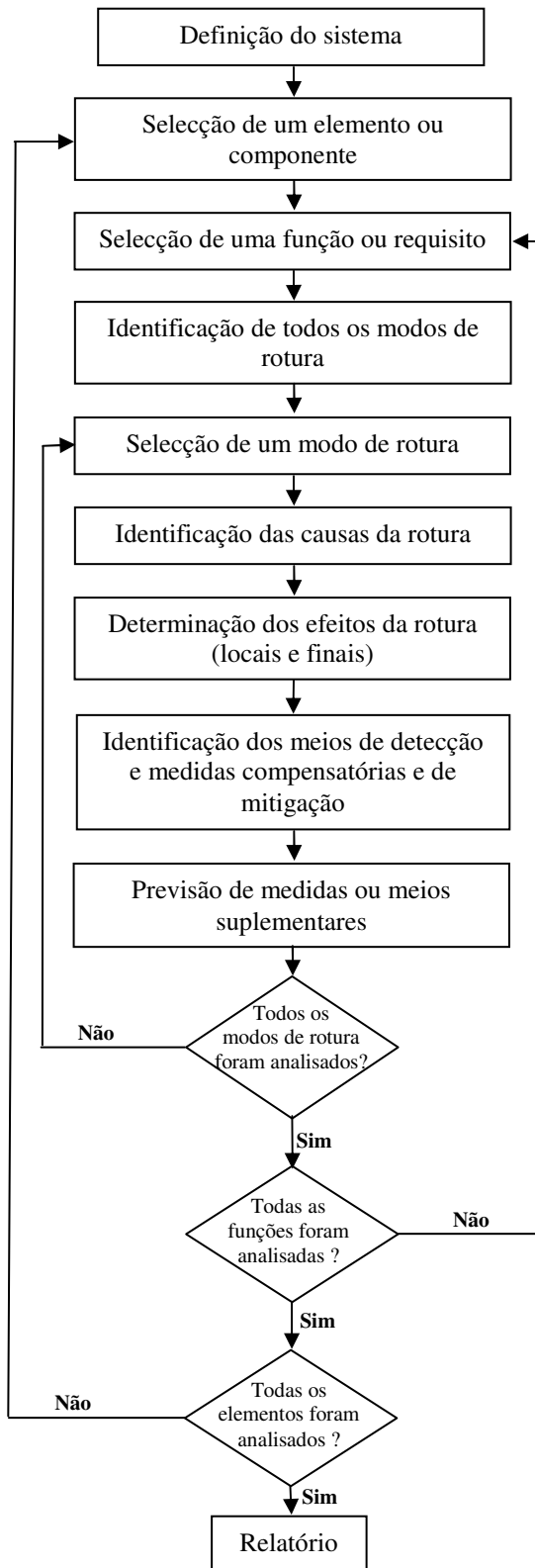
Tabela 1 – Factores de risco considerados no RECAO na análise de risco

| Componentes           | Obra                          | Exploração                    |
|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Socioeconomia         | <i>FRC1, FRC2, FRC3, FRC4</i> | <i>FRE1, FRE2, FRE3, FRE4</i> |
| Geologia e Geotecnia  | FRC5, FRC6                    | -                             |
| Águas subterrâneas    | FRC8, FRC9                    |                               |
| Ar                    | FRC10                         |                               |
| Solos e hidrogeologia | FRC11, FRC12                  | -                             |
| Património            | FRC13                         | -                             |

É o seguinte o significado dos símbolos:

**FRC1** – Rotura ou dano em infraestruturas instaladas no subsolo (serviços afectados)

## FRC2 – Incidentes relacionados com o funcionamento dos vários estaleiros e com consequências para a população



1. Definição do âmbito do sistema a ser analisado. O sistema é sistematicamente separado ou dividido nas suas componentes básicas.
2. Descrição das funções de cada componente e das suas interações com os outros componentes do sistema.
3. Seleção de um elemento ou de um componente.
4. Seleção de uma função ou requisito de desempenho do elemento ou do componente.
5. Identificação de todos os modos de rotura potencial de cada componente e de cada função em análise, e determinação das condições de operação sob as quais a rotura pode ocorrer.
6. Seleção de um primeiro modo de rotura.
7. Identificação das causas deste modo de rotura, as quais podem ser múltiplas.
8. Determinação dos efeitos locais (no elemento ou na componente ou nas suas proximidades) e finais (no sistema global) das roturas potenciais no sistema.
9. Identificação dos meios ou dos métodos de detecção do modo de rotura e das medidas compensatórias e de mitigação (redundâncias, alarmes e sistemas de aviso e alerta) para prevenir a ocorrência, ou limitar os seus efeitos.
10. Previsão das medidas ou dos meios suplementares, caso a avaliação do risco o mostrar necessário.
11. Seleção de um novo modo de rotura e retoma da análise no ponto 7.
12. Logo que todos os modos de rotura tenham sido examinados, selecção de uma nova função e retoma da análise no ponto 5.
13. Logo que todos os estados de funcionamento tenham sido considerados, escolha de um novo elemento ou de uma nova componente do sistema e retoma da análise no ponto 4.
14. Ordenação das roturas potenciais de acordo com vários aspectos, como a segurança, os custos e a operacionalidade.
15. Actuação para reduzir o risco associado às roturas potenciais, de acordo com o princípio ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*).
16. Registo e documentação dos processos para as equipas de revisão e de gestão do risco, de uma forma facilmente lida e tratada.
17. Monitorização do desempenho do sistema, de modo a refinar a análise e manter os documentos actualizados, para revisão presente ou futura.

Figura 12 – Fases do processo FMEA(Segundo Dupak, 2001, em Caldeira, 2005)

- FRC3** – Acidentes de tráfego relacionados com a movimentação de máquinas e veículos pesados afectos à obra
- FRC4** – Vibrações nas edificações na envolvente do projecto
- FRE1** – Acidentes com material circulante (colisão entre composições, colisão de composição com objecto ou pessoa na via, descarrilamento).
- FRE2** – Incêndios nas composições, na via ou nas estações.
- FRE3** – Acidentes com passageiros (entalamento nas portas no embarque ou desembarque, mão presa na abertura das portas do comboio, quedas durante o embarque e desembarque, quedas em escadas rolantes, entalamento entre o cais e o comboio).
- FRE4** – Vibrações nas edificações nas zonas correspondente a troços de baixo recobrimento.
- FRE5** – Interrupção da circulação.
- FRE6** – Interrupção do funcionamento do sistema de ventilação
- FRE7** – Falhas no sistema de drenagem
- FRE8** – Interrupção do funcionamento das escadas rolantes ou dos ascensores
- FRC5** – Sobre-fracturação do maciço rochoso
- FRC6** - Deformações, assentamentos e subsidências
- FRC8** – Variações do nível freático
- FRC9** – Contaminação das águas subterrâneas
- FRC10** – Poluição da atmosfera subterrânea
- FRC11** – Rotura ou dano na rede de drenagem de águas residuais
- FRC12** – Derrames de óleos, combustível e outros poluentes nos estaleiros e frentes de obra.
- FRC13** – Vibrações no aqueduto das Águas Livres

Na parte da Identificação do Risco (3.4) e criticidade e prioridade do risco (3.4) afirma-se que os factores FRC1 e FRC2 conforme a experiências e estudos do ML são muito reduzidos, mas não entanto estão considerados quer na fase de obra quer na fase de exploração.

O RECAPE considera um dos problemas críticos das obras subterrâneas que é relativamente a deformações, assentamentos e subsidências que constituem os riscos geotécnicos (FRC6) que no caso desta obra pode ter uma grande incidência. Relativamente a este aspecto considera ainda a denominada sobre-fracturação do maciço rochoso e vibrações (FRE4, FRC5 e FRC8).

O RECAPE relaciona a denominada sobre-fracturação do maciço com a utilização de explosivos para desmonte com plano de fogo inadequado, mas este aspecto tecnicamente é conhecido como sobre-escavação que tem uma repercussão muito localizada e só na zona periférica do túnel.

Encontra-se ainda contemplado o risco de contaminação das águas subterrâneas (FRC8 e FRC9), mas não o risco de poluição do ar da atmosfera subterrânea (FRC10).

Finalmente, o RECAPE não considera os problemas de poluição do ar devido a emissões diesel e emissão de poeiras durante o processo construtivo subterrâneo, que constituem o risco de poluição do ar da atmosfera subterrânea.

### 3.2. Causas e ponderação da probabilidade (P)

Relativamente à obtenção dos valores das probabilidades, o RECAPE considera causas internas e externas e, ainda, no caso dos factores FRC1, FRC2 e FRC3 aplicáveis à fase de construção e os factores FRE1, FRE2 e FRE3 à fase de exploração, atribuindo a falha ou erro humano/negligência e erro cadastral (Tabela 2).

Tabela 2 – Causas dos distintos factores de risco e valores de P identificados no RECAPE

| Fase/Outros          | Factores de risco | Causas                                                           |                                       | P     |
|----------------------|-------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-------|
|                      |                   | Internas                                                         | Externas                              |       |
| Construção           | FRC1, FRC2 e FRC3 | Falha humana/negligência                                         | Cadastral e falha humana              | 4,3,5 |
|                      | FRC4              | Equipamento usado                                                | Factores locais/Tipologia construções | 7     |
| Exploração           | FRE1, FRE2 e FRE3 | Avárias/falha humana                                             | Queda pessoas/falha humana            | 1,1,6 |
|                      | FRE4              | Circulação composições                                           | —                                     | 3     |
|                      | FRE5, FRE6, FRE8  | Avaria e manutenção deficiente                                   | Falha eléctrica e sabotagem           | 6,4,7 |
|                      | FRE7              | Entupimento/Manutenção deficiente                                | Falha eléctrica/Pluviosidade          | 5     |
| Geologia e Geotecnia | FRC5              | Uso inadequado plano de fogo explosivo                           | —                                     | 2     |
|                      | FRC6              |                                                                  |                                       | 1     |
| Águas subterrâneas   | FRC8              | Escavações e fracturação da rocha                                | -                                     | 1     |
|                      | FRC9              | Avaria de equipamentos<br>Acidente                               | -                                     | 6     |
| Ar                   | FRC10             | Operações de corte e utilização de maquinaria e veículos em obra | -                                     | 8     |
| Solos e hidrologia   | FRC11, FRC12      | Falha humana/negligência ou acidente                             | Falha cadastral para FRC6             | 8,8   |
| Património           | FRC13             | Execução dos trabalhos                                           | Geologia do terreno                   | 8     |

No caso da FRC4 considera a execução dos trabalhos, equipamentos usados e os factores locais e tipologia das construções.

No que diz respeito a FRC5 (Sobre-fracturação do maciço rochoso) a sobreescavação não acontece por causa do desmonte com plano de fogo inadequado, mas sim é influenciado pelos factores geológicos (resistência do maciço, orientação e espaçamento das juntas, influência de água subterrânea, tensão in situ) e parâmetros de desmonte de

rochas (tipo de explosivo e factor de potência, tempo de retardo, erro na perfuração, diâmetro e comprimento dos furos, etc.) na zona periférica do túnel. Como foi referido esta ocorrência é local e não tem maior relevância no aspecto ambiental.

Na parte de solos e hidrogeologia na FRC11 considera como factor de risco a rotura ou dano na rede de drenagem de águas residuais, mas não considera os riscos devido a variações do nível freático e da contaminação de águas subterrâneas e atribui como causas as falhas na execução dos trabalho e falha cadastral.

Em relação ao factor FRC13 (Vibrações no Aqueduto das Águas Livres) considera como causa externa só a tipologia das formações geológicas e presença de água, mas na realidade há mais outros factores como o tipo de construção e a frequência de solicitações e a distância ao aqueduto.

Esta análise, mostra de que a caracterização das causas foram em muitos casos incompletas ou imprecisas e consequentemente os valores de probabilidade definidos não representam um valor confiável, podendo variar inclusivamente em função do técnico que realiza a análise.

### 3.3.Sistemas de detecção e efeitos de gravidade

Quer na parte de sistemas de detecção quer na parte de efeitos/gravidade determinados no RECAPE (Tabela 3 e Tabela 4) observa-se que existe certa imprecisão e incongruência entre os factores e sistemas de detecção e efeitos/gravidade.

Por exemplo, na parte de FCR4 (Vibrações nas edificações na envolvente do projecto) se considera como sistema de detecção só as reclamações da população e como efeitos/gravidade a afectação às estruturas, quando devia incluir também os sistemas de monitorização e incomodidade humana, respectivamente.

Outro exemplo é relativamente a FRC5 (Sobre-fracturação do maciço rochoso) que na parte de sistemas de detecção considera medição de deformações e deslocamentos e na parte de efeitos/gravidade, a instabilidade e o desabamento. Nesta parte existe uma incoerência entre o factor de risco e os sistemas de detecção e efeitos, pois uma sobreescavação nem sempre provoca deformações e deslocamentos e consequentemente colapso. Os sistemas de controle para este caso estão relacionados com medições topográficas, fotográficas e rios laser e as consequências (danos) são expressos normalmente em prejuízos económicos para o dono de obra.

Reafirmo que nesta parte faltou incluir o risco geotécnico que sim está relacionado com deformações, deslocamentos e subsidências.

Também nos factores de risco FRC11 (Rotura ou dano na rede de drenagem de águas residuais) e FRC12 (Derrames de óleos, combustível e outros poluentes nos estaleiros e frentes de obra) nota-se uma total imprecisão pois confunde-se a hidrogeologia com redes de drenagem de águas residuais (domínio da hidrologia); pois a hidrogeologia é o

ramo da geologia que estuda as águas subterrâneas quanto ao seu movimento, volume, distribuição e qualidade. Essa imprecisão de conceitos conduz a sistemas de detecção e efeitos inexactos.

Tabela 3 – Sistemas de detecção e valores de D determinados no RECAPE

| Fase/Outros          | Factores de risco      | Sistemas de detecção                                                                                                             | D       |
|----------------------|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Construção           | FRC1, FRC2 e FRC3      | Reconfirmação cadastral, rigorosa vigilância e gestão dos estaleiros, supervisão                                                 | 4,2,7   |
|                      | FRC4                   | Reclamação da população                                                                                                          | 6       |
| Exploração           | FRE1, FRE2 e FRE3      | Sistemas de sinalização e de comunicação, detectores de incêndios, controlo do fecho de portas das composições                   | 2,2,2   |
|                      | FRE4                   | Reclamação da população                                                                                                          | 2       |
|                      | FRE5, FRE6, FRE7, FRE8 | Controlo pelos inspectores de linha e posto de comando central                                                                   | 1,2,1,3 |
| Geologia e Geotecnia | FRC5                   | Medição de deformações e deslocamentos                                                                                           | 2       |
|                      | FRC6                   |                                                                                                                                  | 2       |
| Águas subterrâneas   | FRC8                   | Aparecimento de exurgências nas paredes de corte                                                                                 | 1       |
|                      | FRC9                   | Observação atenta do operador                                                                                                    | 6       |
| Ar                   | FRC10                  | Aumento visível da quantidade de material particulado (poeiras) e cheiros a combustível na atmosfera interior (área de trabalho) | 4       |
| Solos e hidrologia   | FRC11, FRC12           | Falha humana/negligência ou acidente<br>Falha cadastral para FRC6                                                                | 8,8     |
| Património           | FRC13                  | Reclamação da EPAL, intervenção do IGESPAR                                                                                       | 5       |

Precisamente no RECAPE falta incluir a parte de hidrogeologia sendo que será um aspecto muito importante quando se realiza a abertura subterrânea existindo risco de alterações do nível freáticos e contaminação das águas subterrâneas.

Tabela 4 – Efeitos/Gravidade e valores de G determinados no RECAPE

| Fase/outros | Factores de risco      | Efeitos/Gravidade                                                                                  | G       |
|-------------|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Construção  | FRC1, FRC2 e FRC3      | Inundações, fugas de gás ou explosão, electrocussão, etc., Acidentes com danos humanos e materiais | 6,6,7   |
|             | FRC4                   | Afectação de estruturas edificadas, desabamento                                                    | 7       |
| Exploração  | FRE1, FRE2 e FRE3      | Acidentes com danos humanos e materiais                                                            | 10,8,4  |
|             | FRE4                   | Incomodidade humana                                                                                | 5       |
|             | FRE5, FRE6, FRE7, FRE8 | Paralisação comboios, redução do caudal de ar, inundações, diminuição da qualidade de serviço      | 3,4,5,3 |

|                      |              |                                                                                                            |     |
|----------------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Geologia e Geotecnia | FRC5         | Instabilidade e desabamento do maciço                                                                      | 6   |
|                      | FRC6         |                                                                                                            | 4   |
| Águas subterrâneas   | FRC8         | Anomalia do abastecimento de água de origem subterrânea local.<br>Diminuição eventual da qualidade da água | 3   |
|                      | FRC9         |                                                                                                            | 6   |
| Ar                   | FRC10        | Incomodidade sistemática dos trabalhadores<br>Problemas respiratórios e de visão                           | 8   |
| Solos e hidrologia   | FRC11, FRC12 | Contaminação solos e águas superficiais e subterrâneas                                                     | 4,3 |
| Património           | FRC13        | Afectação da estrutura Aqueduto                                                                            | 9   |

Relativamente à ponderação dos valores de D e G é óbvio ver que não são precisos pelas causa de imprecisões e incoerências e pelo facto de ser uma técnica qualitativa que da motivo a dar valores baseados na opinião do responsável da análise. Um exemplo de isto é dar uma ponderação de D=2 e G= 5 para o descritor FRC4 e FRE4 (vibrações) e D=2 e G=6 para o descritor FRC5 (sobre-fracturação do maciço).

Existindo este tipo de impressões e pela particularidade do método qualitativo, os valores de NPR (Número de Prioridade de Risco) e C (Criticabilidade) calculados não representam cenários fiáveis.

#### 4. CONCLUSÕES

Os dois aspectos abordados no presente relatório (descritor Vibrações na Parte 1 e Análise de Risco na Parte 2) sobre o conteúdo do RECAPE em causa, conduziram à elaboração de numerosas apreciações técnicas que, em suma, permitem considerar o documento em causa como susceptível de ser aceite pelos órgãos responsáveis.

Algumas discrepâncias detectadas, assim como as distintas metodologias adoptadas na análise do conteúdo do RECAPE, essencialmente caracterizadas pela preferência de métodos quantitativos *versus* a via qualitativa tradicional, não são de molde a proporcionar visões opostas a respeito da importância relativa dos impactes ambientais previsíveis para as fases de construção e de exploração do projecto, nem sobre a generalizada e reduzida influência que as vibrações assumirão no desenrolar do empreendimento.

Em relação à Análise de Risco, não existem desacordos no concernente à abordagem teórica do problema, embora pudessem ter sido exercitadas formulações menos especulativas do que as utilizadas no RECAPE, cuja utilização não produziu reflexos significativos sobre a relatividade das magnitudes dos impactes ambientais inerentes ao empreendimento.

Lisboa, 23 de Abril de 2009



C. Dinis da Gama, Prof. Cat. do IST  
Presidente do Centro de Geotecnia

## 5. BIBLIOGRAFIA

- Anflor, C. T. (2003). “Estudo da Transmissibilidade da Vibração no Corpo Humano na Direção Vertical e Desenvolvimento de um Modelo Biodinâmico de Quatro Graus de Liberdade”. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
- Bacci, D. C., Landim, P. M. B., Eston, S. M., Iramina, W. S. (2003). “Principais Normas e Recomendações para o Controle de Vibrações Provocadas pelo Uso de Explosivos em Áreas Urbanas – Parte I”. Esc. Minas, Ouro Preto, Brasil.
- Bacci, D. C., Landim, P. M. B., Eston, S. M., Iramina, W. S. (2003). “Principais Normas e Recomendações para o Controle de Vibrações Provocadas pelo Uso de Explosivos em Áreas Urbanas – Parte II”. Esc. Minas, Ouro Preto, Brasil.
- Bernardo, P. A. M. (2004). “Impactes Ambientais do Uso de Explosivos na Escavação, com Ênfase nas Vibrações”. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Minas. I.S.T. – U.T.L., Lisboa.
- Dahlberg, T. (2003). “Railway Track Dynamics – A Survey”. Oil Mechanics/IKP, Linkoping University. SE-581 83 Linkoping, Sweeden.
- Dinis da Gama (2002). “Environmental baseline studies of vibrations in urban areas”. Proceedings of Eurock 2002, Funchal, Editors C. Dinis da Gama and L. Ribeiro e Sousa, SPG, pp. 481-488.
- Dinis da Gama, C. (2003). “Vibrações dos Terrenos: Da Geração ao Controle”. Textos de apoio ao curso “Vibrações em Geotecnia – Geração, Monitorização, Impactes Ambientais, Critérios de Dano e sua Mitigação. Curso da FUNDEC (Coordenador: C. Dinis da Gama). 24 e 25 de Junho de 2003, I.S.T. Lisboa.
- Kolsky, H. (1963). “Stress Waves in Solids”. Dover Publications, Inc. Nova Iorque, E.U.A.
- Lee, W. H. K., Kanamori, H., Jennings, P. C., Kisslinger, C. (2002). “International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology”. Part A. Academic Press. London
- Longo, S. (2006). Análise de risco de colapso de túneis sob o efeito de causas externas. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Minas. I.S.T., Lisboa.
- Paneiro, G. (2003). “Quantificação do Descritor Vibrações em Estudos de Impacte Ambiental”. Textos de apoio ao curso “Vibrações em Geotecnia – Geração, Monitorização, Impactes Ambientais, Critérios de Dano e sua Mitigação. Curso da FUNDEC (Coordenador: C. Dinis da Gama). 24 e 25 de Junho de 2003, I.S.T. Lisboa.
- Paneiro, G. (2005). “Vibrações Admissíveis em Seres Humanos e Suas Repercussões não Projecto de Vias Anti-Vibráteis”. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Georrecursos. I. S. T., Lisboa.