

MINISTÉRIO DO EQUIPAMENTO, DO PLANEAMENTO E DA ADMINISTRAÇÃO DO TERRITÓRIO

Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NÃO CONFIDENCIAL

CENTRO DE ESTUDOS E EQUIPAMENTO DE ENGENHARIA SÍSMICA

Proc. 260/11/13292

COMPORTAMENTO SÍSMICO DE CONDUTAS ENTERRADAS

RELATÓRIO 190/98 — C3ES

Lisboa, Julho de 1998

COMPORTAMENTO SÍSMICO DE CONDUTAS ENTERRADAS

RESUMO

O presente estudo tem por objectivo apresentar uma metodologia para a avaliação dos efeitos da propagação das ondas sísmicas em condutas de água enterradas. Essa avaliação é efectuada em termos do campo de deformações (extensões axiais e curvaturas), a serem impostas nas condutas, para diferentes valores máximos de aceleração e velocidade da acção sísmica associados a diferentes períodos de retorno.

A metodologia desenvolvida é aplicada à cidade de Lisboa considerando as características locais do terreno, diversos diâmetros de tubagens e ambas as situações de condutas contínuas ou com juntas.

SEISMIC BEHAVIOUR OF BURIED PIPELINES

ABSTRACT

The purpose of the present study is to describe a methodology to evaluate the effects of the propagation of seismic waves in buried water pipelines. This evaluation is carried out in terms of the deformation field (axial strains and curvatures), affecting the pipelines, for different peak ground acceleration and velocity associated to different return period of seismic action.

The developed methodology is applied to the city of Lisbon taking into account the characteristics of the soils, the pipeline diameters and both situations of pipelines with and without joints.

COMPORTEMENT SISMIQUE DES CONDUITES ENTERREES

RÉSUMÉE

Cette étude à pour objectif de présenter la méthode d'évaluation des effets de propagation des ondes sismiques sur les conduites d'eau enterrées. Cette évaluation sera effectuée en termes de champ de déformation, extension axiale et courbure, imposée aux conduites, pour des valeurs maximales d'accélération et vitesse de l'action sismique, associés aux différentes périodes de retour.

La méthode développée à été appliqué a la ville de Lisbonne, en tenant compte des caractéristiques locales du terrain, des divers diamètres de tubes, et de l'existence, ou non, de jonctions.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE QUADROS	IV
1. INTRODUÇÃO	1
2. METODOLOGIA DE QUANTIFICAÇÃO	5
2.1. Avaliação da casualidade sísmica	5
2.1.1 Os dados de base	5
2.1.2 Modelo de zonas de geração sísmica	6
2.1.3 As ocorrências no espaço	7
2.1.4 As ocorrências no tempo	8
2.1.5 A distribuição de magnitudes	9
2.1.6 Atenuação da intensidade do movimento sísmico	11
2.1.7 Modelo Matemático para a Análise Probabilística da Casualidade Sísmica	13
2.1.8 Critérios de Avaliação de Segurança	16
2.2. Modelos para avaliação do comportamento sísmico de condutas enterradas	18
2.2.1 Hipóteses de modelação	18
2.2.2 Condutas contínuas	20
2.2.3 Condutas com juntas	24
3. APLICAÇÃO À CIDADE DE LISBOA	27
3.1 Avaliação da casualidade sísmica	27
3.2 Zonamento sísmico de Lisboa para deformações do terreno	29
4. CONCLUSÕES	35
REFERÊNCIAS	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Mapa de epicentros da região analisada, ano 33 a 1991, magnitudes superiores ou iguais a 3.5 e modelo de zonas de geração sísmica adoptado no presente trabalho (Sousa et al., 1997)	7
Figura 2.2 – Relação entre o período de retorno e o período de vida, para diversas probabilidades de não excedência.	18
Figura 2.3 –Esquema da propagação das ondas de Rayleigh (adaptado de Oliveira, C.S., 1977).	20
Figura 2.4 – Esquema das deformações por flexão impostas ao nível das juntas devido à propagação das ondas sísmicas.	25
Figura 3.1 – Curva de casualidade sísmica em aceleração vertical máxima para Lisboa.	28
Figura 3.2 – Curva de casualidade sísmica em velocidade horizontal máxima para Lisboa.	28
Figura 3.3 – Velocidade de propagação das ondas sísmicas de corte para as diferentes formações geológicas da cidade de Lisboa (Gomes Coelho, A. in SNPC; 1983).	29
Figura 3.4 – Mapeamento das extensões (deformações axiais e de flexão em mm/m) máximas expectáveis; 1000 anos de período de retorno; condutas contínuas enterradas em Lisboa com 1500 mm de diâmetro; acção sísmica tipo 1 (próximo).	32
Figura 3.5 – Mapeamento das extensões (deformações axiais e de flexão em mm/m) máximas expectáveis; 1000 anos de período de retorno; condutas contínuas enterradas em Lisboa com 1500 mm de diâmetro; acção sísmica tipo 2 (afastado).	32
Figura 3.6 – Mapeamento dos deslocamentos (mm) relativos máximos expectáveis nas juntas; 1000 anos de período de retorno; condutas enterradas em Lisboa com 1500 mm de diâmetro e troços com comprimento de 5m; acção sísmica tipo 2 (afastado).	34

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Valores do parâmetro λ_k (nº de sismos / ano) necessários à quantificação dos processo de ocorrência temporal em cada zona de geração (Sousa <i>et al.</i> , 1997)	8
Quadro 2.2 - Magnitude máxima de cada zona, data do sismo que lhe corresponde, valores de a_k e b_k da relação de Gutenberg-Richter e coeficiente de determinação da regressão (Sousa <i>et al.</i> , 1997)	10
Quadro 3.1 – Gamas de variação da velocidade de propagação das ondas sísmicas de corte [m/s] para a cidade de Lisboa.....	29
Quadro 3.2 – Deformações axiais uniformes [mm/m] máximas para as acções sísmicas tipo 1 e 2 e para diversos períodos de retorno e terrenos.	30
Quadro 3.3 – Curvaturas máximas [$\times 10^{-6} / m$] para as acções sísmicas tipo 1 e 2 e para diversos períodos de retorno e terreno.	30
Quadro 3.4 – Extensões [mm/m] máximas expectáveis, para 1000 anos de período de retorno, para condutas contínuas enterradas em Lisboa, acções sísmicas tipo 1 e 2, para diversos diâmetros e terrenos.	31
Quadro 3.5 – Deslocamentos [mm] relativos máximos expectáveis nas juntas para 1000 anos de período de retorno, acção sísmica tipo 2, diâmetro das condutas de 1500 mm, para diversos terrenos em Lisboa.	33

1. INTRODUÇÃO

No âmbito do estudo multidisciplinar “Especificação de materiais para a rede de abastecimento de água” o Departamento de Hidráulica do LNEC solicitou ao Centro de Estudos e Equipamentos de Engenharia Sísmica (C3ES) que caracterizasse o efeito da propagação das ondas sísmicas em condutas de água enterradas na cidade de Lisboa.

No presente relatório apresenta-se, de forma detalhada, o desenvolvimento matemático da metodologia utilizada na contribuição do C3ES para o referido estudo e que, dada a sua extensão, não foi inserido no documento final compilado pelo Departamento de Hidráulica.

O comportamento de condutas enterradas em sismos recentes indicam que os danos que estas sofreram tiveram origem em movimentos permanentes do terreno e/ou nos efeitos do movimento transiente do mesmo (efeitos da propagação das ondas sísmicas) (Ballantyne, 1995).

Os movimentos permanentes do terreno estão directamente relacionados com as suas características geotécnicas, podendo ser causados, por exemplo, pela liquefacção dos solos ou pelo assentamento do terreno.

O presente estudo tem por objectivo apresentar uma metodologia para a avaliação dos efeitos da propagação das ondas sísmicas em condutas de água enterradas. Essa avaliação será efectuada em termos do campo de deformações (extensões axiais e curvaturas), a serem impostas nas condutas, para diferentes períodos de retorno. Efeitos dos movimentos permanentes deverão ser abordadas caso a caso, saindo for a do âmbito deste estudo.

Conforme se demonstrará os elementos necessários para a aplicação da metodologia são:

- (i) A caracterização da acção sísmica em termos de valores de velocidade e aceleração máximas, recorrendo-se a modelos probabilísticos que descrevem o processo de ocorrência de sismos da região em estudo, e a modelos de atenuação que permitem sintetizar as características dos movimentos sísmicos intensos para classes genéricas de terrenos superficiais.
- (ii) A caracterização das propriedades mecânicas dos terrenos dessa região em termos da velocidade de propagação das ondas sísmicas superficiais.

- (iii) O diâmetro e comprimento das tubagens entre juntas, pois, em função destes parâmetros, serão determinadas as deformações que as condutas deverão acomodar, quer ao longo do comprimento da tubagem, quer nas juntas.
- (iv) O período de vida médio das condutas.

A metodologia desenvolvida é aplicada à cidade de Lisboa tendo como produtos finais mapas e quadros de casualidade sísmica, expressos em termos do campo de deformações (extensões axiais e curvaturas) para um período de retorno determinado, para tubagens de um dado diâmetro, nas situações de ausência e presença de juntas.

Para terminar a presente introdução e salientar a oportunidade de estudos desta natureza, referem-se, brevemente, alguns ensinamentos retirados de sismos recentes nos quais roturas das redes de abastecimento de água afectaram áreas urbanas importantes.

Por exemplo, no sismo de Loma Prieta, nos EUA, em 1989, verificou-se uma maior concentração de danos na rede de água nas zonas em que ocorreu liquefacção (O'Rourke, 1986). De acordo com este autor, os deslocamentos de longo período nos locais em que ocorreu liquefacção terão sido a causa da rotura da rede de abastecimento de água no sismo de Loma Prieta. O incêndio pós-sismo foi controlado graças à existência de uma rede móvel apoiada por barcos.

No sismo de Northridge, nos EUA, em 1994, ocorreram danos significativos em reservatórios construídos de acordo com regulamentos desactualizados (O'Rourke, 1986).

No sismo de Kobe, no Japão, em 1995, os danos na rede de água foram provocados principalmente por movimentos permanentes do terreno (liquefacção e deslizamento de terrenos). Além disso, verificaram-se perdas de água elevadas em consequência da rotura das condutas em edifícios severamente danificados. Todos os 86 reservatórios que abasteciam a cidade de Kobe ficaram vazios num período de 24h. A rotura da rede de abastecimento teve graves consequências no combate a incêndios (O'Rourke, 1986).

Naturalmente os efeitos dos sismos sobre as redes de abastecimento de água dependem não só da intensidade da acção sísmica mas também dos materiais constitutivos das suas tubagens. Genericamente são quatro os tipos de materiais mais correntes: plásticos, metálicos (ferro fundido e aço), betão e fibrocimento.

Daqueles estudos pode ainda concluir-se que, em geral, na quantificação dos efeitos da acção sísmica sobre estruturas enterradas podem desprezar-se os efeitos dinâmicos que as vibrações do solo introduzem nas mesmas havendo necessidade de se avaliar a contribuição pseudo-estática dos efeitos induzidos pela propagação de ondas no solo nas tubagens. Assim, condutas que possuam menor capacidade de deformação para absorverem os movimentos transientes dos terrenos são as mais vulneráveis. Apesar de existir uma certa dispersão nas situações observadas nos sismos recentes, parece haver uma tendência para que as tubagens mais afectadas sejam as de fibrocimento e as de ferro fundido pouco dúctil. Por outro lado, a presença de juntas pode aumentar a capacidade das condutas se adaptarem às deformações do terreno desde que tenham a possibilidade de nelas acomodar uma concentração das deformações impostas pelos movimentos do terreno.

2. METODOLOGIA DE QUANTIFICAÇÃO

2.1. Avaliação da casualidade sísmica

2.1.1 Os dados de base

A caracterização da sismicidade de uma dada região, passa pelo conhecimento da história sísmica da mesma, nomeadamente do instante de ocorrência de cada sismo, da sua localização, intensidade e outras características. Esta informação encontra-se compilada nos catálogos sísmicos locais, regionais e mundiais. Para completar a informação de natureza sísmica deverá ser possível identificar as falhas activas da região em estudo, mesmo aquelas de actividade reduzida, uma vez que também estas poderão contribuir, embora com uma probabilidade menor, para a ocorrência de sismos. Com esta informação deverá ser possível delinear, na região em estudo, um modelo de zonas de geração sísmicas e calcular os parâmetros das distribuições que as caracterizam.

Para caracterizar o processo de ocorrência foi utilizado o Catálogo Sísmico da Região Ibérica (Sousa *et al.*, 1992) e informação sobre a neotectónica da região de Portugal Continental (Cabral, 1993).

O Catálogo seleccionado para caracterizar a casualidade sísmica de Portugal Continental contem 5394 sismos e o primeiro evento nele registado ocorreu no ano 33 d.C., embora a sua magnitude e epicentro sejam desconhecidos. Na figura 2.1 apresenta-se uma mapa de epicentros da região analisada.

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

Devido aos diferentes mecanismos de geração de sismos que afectam o território de Portugal Continental, serão considerados neste estudo dois cenários diferentes para a avaliação da sua acção: o primeiro é representativo dos sismos de magnitude moderada, a pequena distância focal e com conteúdo de frequências elevadas, contemplado no RSA (1983)

pela *acção sísmica tipo 1*, e o segundo é representativo de sismos de maior magnitude, a maior distância focal e com conteúdo de frequências mais baixas, contemplado no RSA (1983) pela *acção sísmica tipo 2*.

2.1.2 Modelo de zonas de geração sísmica

Considere-se um dado local (por exemplo a cidade de Lisboa) que pode ser afectado por sismos que ocorrem num dado território. O primeiro passo da metodologia para a avaliação probabilística da acção sísmica consiste em dividir a região sísmica em análise esse território em zonas de geração sísmica, as quais delimitam regiões que partilham as mesmas características sismológicas, tectónicas e geológicas. Neste contexto, uma zona de geração sísmica representa uma região da crosta aproximadamente homogénea no que respeita às distribuições que caracterizam a sua actividade sísmica.

Uma vez construído o modelo de zonas de geração, a exposição de determinado local à acção dos sismos resultará da soma da casualidade associada a cada uma das zonas.

A partir dos dados atrás referidos foi desenvolvido, em trabalhos anteriores (Sousa, 1996, Sousa e Oliveira, 1997) o modelo de zonas de geração adoptado no presente estudo (ver figura 2.1). Este é constituído por doze zonas, sendo dez de grande expressão geográfica e duas de menor dimensão. A individualização destas duas zonas, a 5A e a 6A, prende-se com o facto de apresentarem uma grande concentração espacial de sismos e de estarem associadas às principais estruturas que historicamente têm produzido os maiores sismos sentidos no continente. A maioria das zonas foram modeladas por áreas de grandes dimensões, devido à dificuldade em relacionar os epicentros com as falhas cartografadas na carta neotectónica.

De seguida apresenta-se a caracterização do processo sísmico de ocorrência, no espaço, tempo e grandeza. Tal como no que respeita ao modelo de zonas de geração, a modelação do processo sísmico de ocorrência também foi desenvolvida em trabalhos anteriores (Sousa, 1996, Sousa e Oliveira, 1997, Sousa *et al.*, 1997).

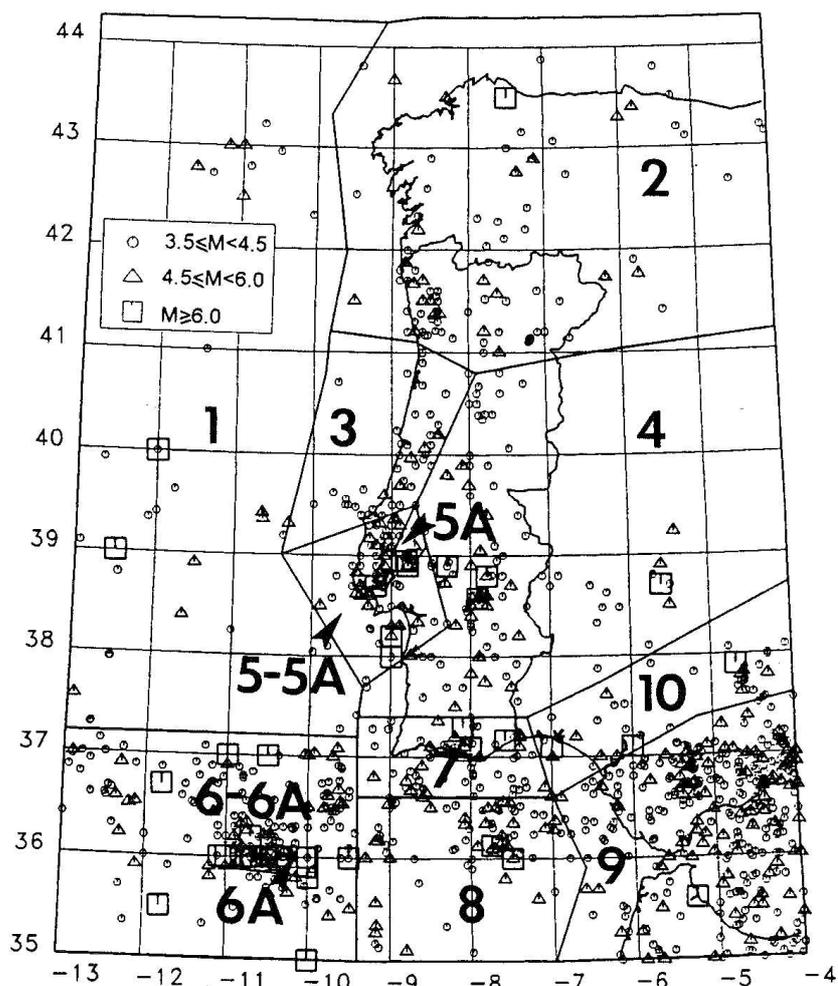


Figura 2.1 - Mapa de epicentros da região analisada, ano 33 a 1991, magnitudes superiores ou iguais a 3.5 e modelo de zonas de geração sísmica adoptado no presente trabalho (Sousa et al., 1997) .

2.1.3 As ocorrências no espaço

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

2.1.4 As ocorrências no tempo

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

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

$$P(N_t = n, \lambda t) = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^n}{n!}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \infty. \quad (2.1)$$

A caracterização da ocorrência temporal de sismos de acordo com o processo de Poisson pressupõe que a sequência de acontecimentos num catálogo sísmico seja aleatória, e que nenhuma ocorrência seja afectada pelos acontecimentos passados nem venha a afectar os acontecimentos futuros. Assim, as réplicas e os fenómenos premonitores foram identificados e eliminados do Catálogo Sísmico, recorrendo-se para isso a janelas empíricas de tempo, magnitude e distância, calibradas para a situação portuguesa (Sousa *et al.*, 1997).

Além disso, para assegurar que a distribuição de magnitudes do Catálogo não se encontra enviesada quer pelo desconhecimento da magnitude dos sismos das épocas históricas, quer pelo facto do Catálogo não ser completo na gama de magnitudes baixas nas épocas antigas, o processo de ocorrência no tempo foi estudado exclusivamente para o período instrumental (período posterior a 1909), e para magnitudes superiores a 3.45, sendo depois extrapolado para o histórico. Desta forma, está a admitir-se a estacionaridade do processo de ocorrência temporal.

No quadro 2.1 apresentam-se as taxas anuais de ocorrência de sismos, λ_k , para o período instrumental e para cada zona de geração.

Quadro 2.1 - Valores do parâmetro λ_k (n° de sismos / ano) necessários à quantificação dos processo de ocorrência temporal em cada zona de geração (Sousa et al., 1997).

Zona	λ_k	Zona	λ_k	Zona	λ_k
1	0.50	5-5A	0.70	7	0.77
2	1.14	5A	0.26	8	0.86
3	0.54	6-6A	1.59	9	3.97
4	1.37	6A	0.71	10	0.57

2.1.5 A distribuição de magnitudes

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

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

$$\log N_k(m) = a_k + b_k \cdot m, \quad (2.2)$$

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

A expressão 2.2 escreve-se usualmente na forma:

$$N_k(m) = e^{\alpha_k - \beta_k \cdot m}, \quad (2.3)$$

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

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

$$F_{M(k)}(m) = P(M < m \mid m_0 \leq M \leq m_1) = \frac{1 - e^{-\beta_k(m-m_0)}}{1 - e^{-\beta_k(m_1-m_0)}}, \quad m_0 \leq m \leq m_1, \quad (2.4)$$

em que m_0 é o limiar mínimo de magnitude abaixo do qual se considera que um sismo não causa estragos do ponto de vista da engenharia e m_1

designa-se por magnitude do sismo máximo provável, a qual é fundamentada por estudos de sismotectónica e paleosismicidade:

A respectiva função densidade de probabilidade vem dada por:

$$f_{M(k)}(m) = \frac{\beta_k e^{-\beta_k(m-m_0)}}{1 - e^{-\beta_k(m_1-m_0)}}, \quad m_0 \leq m \leq m_1. \quad (2.5)$$

Para todas as zona de geração, escolheu-se o valor de magnitude 3.45 para o parâmetro m_0 das expressões 2.4 e 2.5.

Para além dos limites inferiores de truncatura, adoptou-se a magnitude do sismo mais intenso que ocorreu no passado, com epicentro na zona analisada, para a truncatura superior, m_1 , da distribuição de probabilidade da magnitude (equações 2.4 e 2.5).

Conhecidos os limites de truncatura e seleccionando do catálogo histórico e instrumental, os sismos com magnitude superior a 3.45, os parâmetros a_k e b_k da relação de frequência-magnitude de Gutenberg-Richter (expressão 2.2) foram estimados pelo método dos mínimos quadrados, para cada zona de geração.

No quadro 2.2 reúnem-se os parâmetros estimados para caracterizar as distribuições de magnitude de cada zona de geração. Apresenta-se ainda a data do sismo correspondente à magnitude máxima de cada zona. O valor da actividade apresentada, \hat{a}_k , corresponde ao limiar inferior de truncatura da distribuição de magnitudes.

Quadro 2.2 - Magnitude máxima de cada zona, data do sismo que lhe corresponde, valores de a_k e b_k da relação de Gutenberg-Richter e coeficiente de determinação da regressão (Sousa et al., 1997).

Zona	m_1	Data do sismo	\hat{a}_k ($M=3.45$)	\hat{b}_k	R^2
1	7.0	1724.10.12	0.4908	-0.6636	0.9776
2	6.0	1916.12.03	1.6329	-0.8415	0.9702
3	5.6	1940.10.03	0.5825	-0.8940	0.9510
4	7.0	1504.04.05	1.7833	-0.8370	0.9573
5-5A	7.2	1858.11.11	0.9388	-0.9497	0.9664
5A	7.0	1531.01.26	0.3148	-0.7585	0.9175
6-6A	6.6	1915.07.11	1.6352	-0.6442	0.9769
6A	8.5	1755.11.01	0.1471	-0.3373	0.8839
7	7.8	1722.12.17	1.3004	-0.9213	0.9147
8	7.1	1964.03.15	0.8735	-0.6431	0.8811
9	6.2	1909.01.21	9.7550	-1.2233	0.9304
10	7.0	1719.03.06	0.7180	-0.8664	0.9619

2.1.6 Atenuação da intensidade do movimento sísmico

A intensidade do movimento do solo aumenta com a energia libertada na fonte (magnitude do sismo) e diminui geralmente com a distância ao epicentro, uma vez que as ondas sísmicas são atenuadas no meio em que se propagam.

Uma lei de atenuação é uma relação empírica que exprime a dependência entre a intensidade do movimento do solo e uma série de variáveis explicativas, como sejam a distância à fonte e a energia nela libertada. A forma geral de um modelo de atenuação é:

$$Y = m_Y(M, R, \mathbf{w}) + \varepsilon_Y, \quad (2.6)$$

em que

- Y é a intensidade do movimento do solo que se pretende prever,
- $m_Y(M, R, \mathbf{w})$ é o valor estimado pelo modelo matemático,
- R é a distância entre a fonte e o local em análise,
- M é a variável que descreve a grandeza do sismo que pode ser a magnitude ou a intensidade epicentral,
- \mathbf{w} é um vector de variáveis que pode caracterizar a fonte, a propagação das ondas no meio, ou mais usualmente as condições do local onde é medida a intensidade do movimento e
- ε_Y é uma variável aleatória que representa as flutuações em Y não explicadas pelas variáveis do modelo, bem como os erros de medição da variável dependente.

Admite-se que os valores de ε_Y se distribuem independentemente uns dos outros, são independentes das variáveis explicativas do modelo e seguem uma distribuição normal de média nula e variância constante, ou seja, $\varepsilon_Y \sim N(0, \sigma_{\varepsilon_Y})$. Desta forma assume-se que a distribuição da variável Y em torno do valor central, $\bar{Y} = m_Y(M, R, \mathbf{w})$, é gaussiana e independente da grandeza do sismo e da distância do seu epicentro ao local analisado.

Devida à carência de registos instrumentais em Portugal, apresentam-se duas soluções para modelar a atenuação do movimento do solo: (i) adoptar a intensidade macrossísmica, ($Y \equiv I$), como variável dependente nos modelos de atenuação recorrendo-se a dados de sismos portugueses, ou (ii) adoptar uma grandeza instrumental para a variável Y e

utilizar leis de atenuação estimadas a partir de bases de dados mundiais de movimentos sísmicos intensos, que se considerem representativos dos processos de atenuação que ocorrem no Continente Português.

A segunda solução afigura-se a mais adequada para o presente trabalho, pois nele pretende avaliar-se probabilisticamente a sismicidade que afecta a cidade de Lisboa em termos do campo de deformações (extensões axiais e curvaturas), a serem impostas nas condutas. Conforme adiante se demonstrará (secção 2.2), as séries temporais de extensões axiais e curvaturas são funções lineares dos registos de velocidade e aceleração do movimento do solo, respectivamente.

Recentemente, Ambraseys *et al.* (1996) e Ambraseys e Simpson (1996) publicaram leis de atenuação que permitem prever as ordenadas espectrais da aceleração absoluta a partir da magnitude das ondas superficiais, da distância e das condições geológicas locais, propondo o seguinte modelo:

$$\log(a_j) = C_{1,j} + C_{2,j} \cdot M + C_3 \cdot R + C_{4,j} \cdot \log(R) + C_{A,j} \cdot S_A + C_{S,j} \cdot S_S + \sigma_j P, \quad (2.7)$$

em que

- a_j é a aceleração para cada frequência j , dada em g,
- $R = \sqrt{d^2 + h_{0,j}^2}$ na qual d é a menor distância entre a estação e a projecção da rotura da falha e $h_{0,j}$ é uma constante a ser determinada juntamente as restantes constantes, para cada frequência,
- o termo $C_{3,j} \cdot R$ define a atenuação causada pelos materiais anelásticos do meio e o termo $C_{4,j} \cdot \log(R)$ define a atenuação geométrica das ondas sísmicas,
- S_A e S_S contemplam as condições geológicas do local em análise, as quais se reconhece influenciarem a forma e a amplitude do espectro de resposta, e
- σ_j é o desvio padrão de $\log(a_j)$ e a constante P toma os valores 0 e 1 para o valor médio e para o quantilho de 84%, respectivamente.

A lei de atenuação em aceleração espectral acima apresentado será utilizada para modelar os processos de atenuação que podem ocorrer no Continente Português, independentemente da sua origem tectónica.

Para estimar os coeficientes do modelo de atenuação apresentado na expressão 2.7, Ambraseys *et al.* (1996) e Ambraseys e Simpson (1996)

utilizaram uma base de dados com cerca de 420 registos triaxiais, gerados por 157 sismos da Europa e regiões adjacentes.

Os referidos autores efectuaram uma análise de regressão em dois passos, tendo como as variáveis explicativas a magnitude das ondas superficiais e a distância e como variável dependente a aceleração absoluta em ordenadas espectrais (em g), para um amortecimento crítico de 5%, na gama dos 0.1 aos 2.0. Numa fase inicial os autores obtiveram soluções com valores inaceitáveis para o coeficiente anelástico $C_{3,j}$, pelo que a análise de regressão foi efectuada de novo obrigando este coeficiente a ser nulo.

Os efeitos das condições geológicas locais foram contemplados dividindo os locais dos registos em três categorias: rocha (velocidade média das ondas de corte, $V_s > 750$ m/s, para profundidades até aos 30 m sob o local), solo rijo (360 m/s $\leq V_s \leq 750$ m/s) e solo mole ($V_s < 360$ m/s). Os resíduos da regressão foram então utilizados para prever a dependência das condições geológicas locais, usando um modelo dicotómico para as constantes S_A e S_S .

Os mesmos autores apresentam ainda modelos de atenuação para os picos das acelerações horizontal a_h e vertical a_v , utilizando a mesma base de dados e o método de regressão atrás descrito:

$$\log(a_h) = -1.48 + 0.266 \cdot M_S - 0.922 \cdot \log(R) + 0.117 \cdot S_A + 0.124 S_S + 0.25P, \quad (2.8)$$

em que $R = \sqrt{d^2 + 3.5^2}$, e

$$\log(a_v) = -1.74 + 0.273 \cdot M_S - 0.954 \cdot \log(R) + 0.076 \cdot S_A + 0.058 S_S + 0.26P, \quad (2.9)$$

em que $R = \sqrt{d^2 + 4.7^2}$.

2.1.7 Modelo Matemático para a Análise Probabilística da Casualidade Sísmica

O modelo matemático desenvolvido por Cornell (Cornell, 1968), para o cálculo da casualidade sísmica baseia-se no teorema da probabilidade total:

$$P(A) = \int_{\mathbf{x}} P(A | \mathbf{x}) f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x}, \quad (2.10)$$

em que A é o acontecimento cuja probabilidade se pretende calcular e \mathbf{X} é um vector de variáveis aleatórias contínuas das quais A depende.

No caso particular do cálculo da casualidade sísmica, o acontecimento A representa o facto da intensidade de um efeito qualquer do sismo, designada por Y , exceder um dado nível de intensidade y , num dado local durante um sismo, ou seja, $A \equiv Y > y$, e a integração é feita para todos os valores de \mathbf{X} para os quais a intensidade Y excede y .

As variáveis aleatórias do vector \mathbf{X} , do qual Y depende, são aquelas que caracterizam o sismo, desde a sua origem até ao local em estudo, bem como a sua interacção com o local em estudo, ou seja, o vector \mathbf{X} inclui todas as variáveis aleatórias contabilizadas no modelo geral de atenuação (expressão 2.6).

Considere-se que os acontecimentos capazes de afectar o local em análise ocorrem numa região sísmica constituída por n zonas de geração, sendo cada uma delas designada arbitrariamente por zona k . Considere-se ainda que um sismo, com origem nessa zona k , é capaz de causar o efeito genérico traduzido pela intensidade do movimento do solo Y . Assumindo que as variáveis aleatórias do vector \mathbf{X} são estatisticamente independentes, então o teorema da probabilidade total permite calcular a probabilidade de excedência de um nível Y_0 de intensidade de referência:

$$P(Y > Y_0)_{(k)} = \int_{RM} \int P(Y > Y_0 | m, r)_{(k)} f_{M(k)}(m) f_{R(k)}(r) dm dr . \quad (2.11)$$

Para se calcular a taxa média, ω_k , de ocorrência de sismos na zona de geração k que originam no local intensidades superiores ou iguais a um determinado nível de referência Y_0 , bastará multiplicar a probabilidade dada pela expressão anterior por λ_k , que representa o número médio de ocorrências, na unidade de tempo, nessa zona de geração sísmica, ou seja:

$$\omega_k = \lambda_k \int_{RM} \int P(Y > Y_0 | m, r)_{(k)} f_{M(k)}(m) f_{R(k)}(r) dm dr . \quad (2.12)$$

Saliente-se que nestas expressões, a probabilidade condicional dada por $P(Y > Y_0 | m, r)_{(k)}$ depende, exclusivamente, dos diferentes tipos de leis de atenuação das intensidades dos movimentos sísmicos, em cada zona de geração, e das incertezas a elas associadas.

Se em vez de um único parâmetro do movimento do solo Y , a análise probabilística da casualidade sísmica for efectuada para uma descrição espectral da intensidade do movimento no local, e se os valores das

ordenadas espectrais forem independentes, a expressão 2.12 pode ser generalizada para a ordenada j (Campos-Costa, 1997):

$$\omega_{k,j} = \lambda_k \int_{RM} \int P(Y_j > Y_{0,j} | m, r)_{(k)} f_{M(k)}(m) f_{R(k)}(r) dm dr . \quad (2.13)$$

No presente caso a lei de atenuação é expressa pela equação 2.7 e como já foi atrás referido esta expressão será utilizada para todas as zonas de geração do território continental português:

$$P(Y_j > Y_{0,j} | m, r)_{(k)} = P(a_j > a_{0,j} | m, r) = 1 - \Phi \left(\frac{a_{0,j} - C_{1,j} - C_{2,j}M - C_{3,j}R - C_{4,j} \log(R) - C_{A,j}S_A - C_{S,j}S_s}{\sigma_j} \right). \quad (2.14)$$

A função densidade de probabilidade $f_{M(k)}(m)$, ou distribuição da grandeza do sismo, é deduzida a partir das relações de frequência-magnitude determinadas para cada zona de geração (equação 2.5). A função $f_{R(k)}(r)$ é a função densidade de probabilidade da distância hipocentral obtida a partir da distribuição espacial dos epicentros da zona k e da relação desta zona com o local em análise.

O cálculo final da distribuição de probabilidade de serem excedidos, pelo menos uma vez, determinados níveis de aceleração espectral $a_{0,j}$, na unidade de tempo, devido à ocorrência aleatória de sismos em qualquer das n zonas de geração que contribuem para a sismicidade sentida no local, baseia-se na propriedade do processo de Poisson de não ser afectado pela agregação de processos de Poisson independentes.

Assim, supondo que o processo de ocorrências no tempo é independente de zona para zona, isto é, o facto de ter ocorrido um sismo numa determinada zona de geração não condiciona o processo de ocorrências em qualquer outra zona de geração, então, as taxas de ocorrência poderão ser somadas para obter a taxa de ocorrência de um processo geral de Poisson do acontecimento $a_j > a_{0,j}$:

$$P(a > a_{0,j}) = 1 - e^{-\sum_{k=1}^n \omega_{k,j}} . \quad (2.15)$$

Neste contexto, o acontecimento $a_j > a_{0,j}$ corresponde a verificar-se, pelo menos uma vez, no local em análise, uma intensidade superior ao nível de referência $a_{0,j}$.

Quando a unidade de tempo é o ano a expressão anterior fornece a probabilidade anual de excedência.

2.1.8 Critérios de Avaliação de Segurança

Genericamente, entende-se por avaliação da segurança de uma estrutura o cálculo da probabilidade dos danos nela verificados excederem determinados valores associados a estados limites, como sejam a abertura de fendas ou o colapso total da estrutura.

Quando se projecta uma estrutura, ou se verifica a segurança de uma já existente, terão que ser especificados certos quantilhos das acções e das resistências de forma a que os requisitos relativos a cada um dos estados limites sejam cumpridos para um certo valor de probabilidade de não excedência no período de vida útil médio da estrutura.

Nos códigos utilizados no projecto de estruturas de edifícios e pontes estes conceitos estão implícitos numa regra simples de dimensionamento, em que as resistência R correspondentes ao quantilho de 5⁰/₁₀₀ deverão ser superiores aos efeitos das acções S associadas ao quantilho de 95% multiplicados por 1.5. Na prática esta regra conduz a probabilidades de excedência do estado limite ($S \geq R$) em torno de 10^{-5} , num período de vida útil médio da estrutura 50 anos (RSA, 1983).

No presente contexto, o estado limite que importa considerar é aquele em que o funcionamento do sistema fica comprometido e o fornecimento de água é interrompido total, ou parcialmente.

A rede é conduzida a este estado limite, pelas consequências de uma dada acção sísmica a quantificar no capítulo 3 recorrendo à metodologia apresentada no presente capítulo. Os efeitos dessa acção sísmica exprimem-se pela rotura das paredes da conduta devido às tensões aí originadas, ou por deformações excessivas nas juntas, isto é deformações superiores às que estas podem acomodar.

Naturalmente, na especificação das probabilidades deste estado limite ser atingido há que considerar as distribuições de probabilidade que descrevem a aleatoriedade das acções sísmicas e das “resistências” que no caso em estudo estão relacionadas, como se referiu, com as tensões limites do material e com as deformações máximas nas juntas.

Compete ao decisor, em função da sua avaliação de risco e utilidade, escolher o valor da probabilidade do estado limite, acima expresso, ser excedido (Campos-Costa, 1994).

Dada a natureza aleatória da acção sísmica e o contexto probabilístico em que o problema foi formulado, justifica-se a necessidade de fornecer nos estudos de caracterização da acção sísmica num dado local, não só a intensidade da acção, como também a probabilidade dessa intensidade ser excedida num período de referência dado, em geral coincidente com o período de vida útil médio da estrutura.

Por outro lado, define-se período de retorno, Tr , como sendo o inverso da probabilidade anual de ser excedido, pelo menos uma vez, no local em análise um determinado nível de intensidade, Y_0 , o que matematicamente se traduz por:

$$Tr(Y_0) = \frac{1}{P(Y > Y_0)} = \frac{1}{1 - e^{-\sum_{k=1}^n \omega_k}} = \frac{1}{1 - P(Y \leq Y_0)}. \quad (2.16)$$

A transformação da distribuição de probabilidade anual na distribuição de probabilidade referente a um período de referência τ , em anos, é feita de acordo com a equação:

$$P(Y \leq Y_0)|_{\tau} \cong \left[1 - \frac{1}{Tr(Y_0)} \right]^{\tau}. \quad (2.17)$$

Na figura 2.2 apresenta-se uma forma expedita de se obter o período de retorno em função de um determinado período de referência (ou de vida útil médio), para diversas probabilidades de excedência. Para ilustrar apresentam-se três casos de utilização da figura 2.2 para relacionar as três grandezas referidas.

Exemplo 1 – Para assegurar uma probabilidade de excedência de, por exemplo, 5.0%, durante um período de vida $\tau = 50$ anos, é necessário considerar a acção sísmica com intensidade correspondente ao período de retorno de 975 anos.

Exemplo 2 – Assegurando a mesma probabilidade de 5.0%, mas alterando o período de vida τ para 100 anos, é necessário considerar a acção sísmica menos gravosa, com intensidade correspondente ao período de retorno de 1950 anos.

Exemplo 3 – Alterando agora a probabilidade de excedência para 10.0% e mantendo o período de vida τ em 100 anos, é necessário considerar a acção sísmica de maior intensidade, correspondente ao período de retorno de 950 anos.

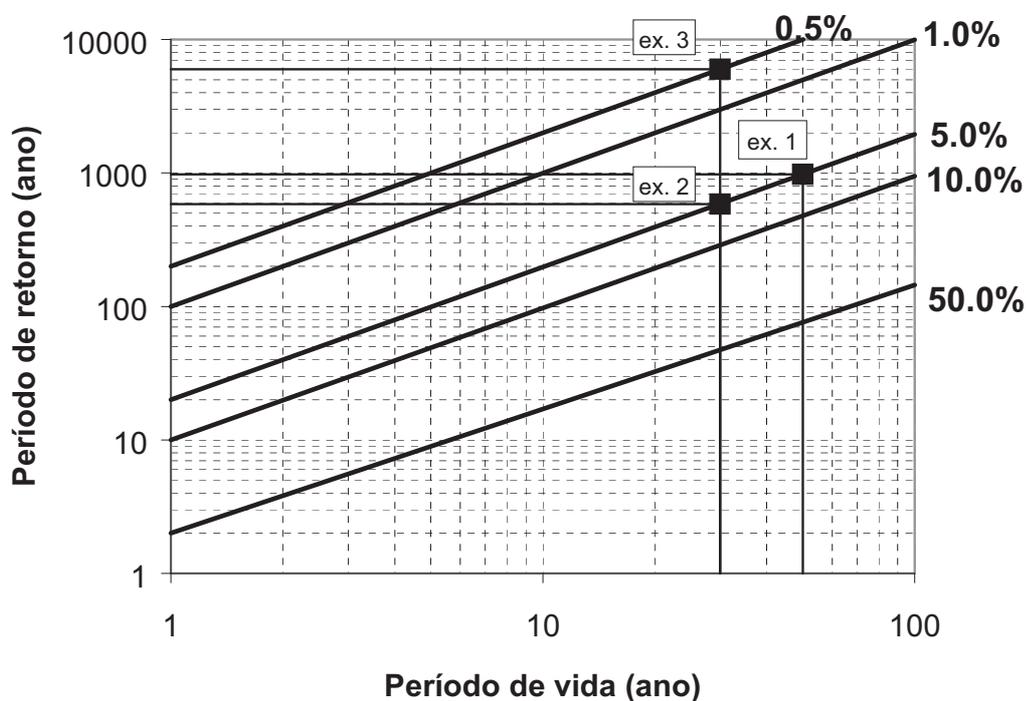


Figura 2.2 – Relação entre o período de retorno e o período de vida, para diversas probabilidades de não excedência.

2.2. Modelos para avaliação do comportamento sísmico de condutas enterradas

2.2.1 Hipóteses de modelação

Em geral, a avaliação do comportamento sísmico de condutas faz-se através da análise das deformações máximas nelas impostas devidas, unicamente, ao efeito dos movimentos pseudo-estáticos decorrentes da passagem de ondas sísmicas. De facto, de acordo com o Eurocódigo 8 (CEN, 1997) existem argumentos teóricos indicando que as forças de inércia resultantes da interacção entre as condutas e o solo são muito menores do que as forças induzidas pela deformação do solo, o que permite reduzir o problema da interacção solo-conduta a um problema estático. Assim, considera-se que as condutas são deformadas pela passagem de uma onda, sem se considerarem os efeitos dinâmicos.

Tendo em atenção as massas de terreno e de canalizações envolvidas na passagem de uma frente de onda, pode considerar-se que as características de propagação não serão alteradas pela pequena perturbação do meio introduzida pela existência das mesmas. Adicionalmente, admite-se que os comprimentos de onda das ondas sísmicas são muito superiores às distâncias entre juntas.

Conforme se referiu, no dimensionamento ou na verificação de segurança para o estado limite considerado (não funcionamento do sistema de abastecimento), importa ter em atenção duas situações:

- (i) a correspondente à excedência de uma extensão limite do material da conduta, ou
- (ii) a correspondente à excedência do valor de deformação limite ao nível das juntas.

Para modelar os efeitos da acção sísmica associados ao primeiro caso, é ainda necessário admitir que as condutas são suficientemente flexíveis e que as tensões de corte que se desenvolvem entre a superfície exterior das condutas e o terreno envolvente são relativamente baixas quando comparadas com as tensões de atrito nessa interface. Desta forma, as condutas adoptam, sem deslizamentos ou interacção, a deformação do solo, o que constitui uma hipótese conservativa implicando uma avaliação por excesso das deformações das condutas.

Pelo contrário, no segundo caso admite-se que as condutas são pouco flexíveis e que, portanto, toda a deformação da rede causada pelo campo de deslocamentos do solo se concentra ao nível das juntas.

Admite-se portanto uma compatibilidade perfeita entre os campos de deformações das condutas e do terreno circundante no primeiro caso, e entre os campos de deslocamentos do terreno e das juntas, no segundo caso. De qualquer forma, a avaliação da segurança sísmica das condutas de água enterradas reduz-se à estimativa do campo de deslocamentos decorrente da passagem das ondas sísmicas.

Os vários tipos de ondas sísmicas (volúmicas, superficiais), possuem diferentes velocidades de propagação e originam diferentes movimentos das partículas do meio (paralelos e ortogonais à direcção de propagação, elípticos). Assim, a síntese dos movimentos sísmicos intensos não estacionários num determinado local resulta da combinação dos diferentes tipos de onda (ver figura 2.3).

À semelhança de outros trabalhos e autores (CEN; 1997, Clough e Penzien, 1993, Costa *et al.*, 1997, O'Rourke, 1996) considera-se apenas um tipo de onda na síntese dos movimentos sísmicos no local, facto que constitui uma aproximação conservativa.

As ondas adoptadas são as superficiais de Rayleigh, que conforme se exhibe na figura 2.3, induzem deformações axiais e de curvatura das secções transversais das condutas.

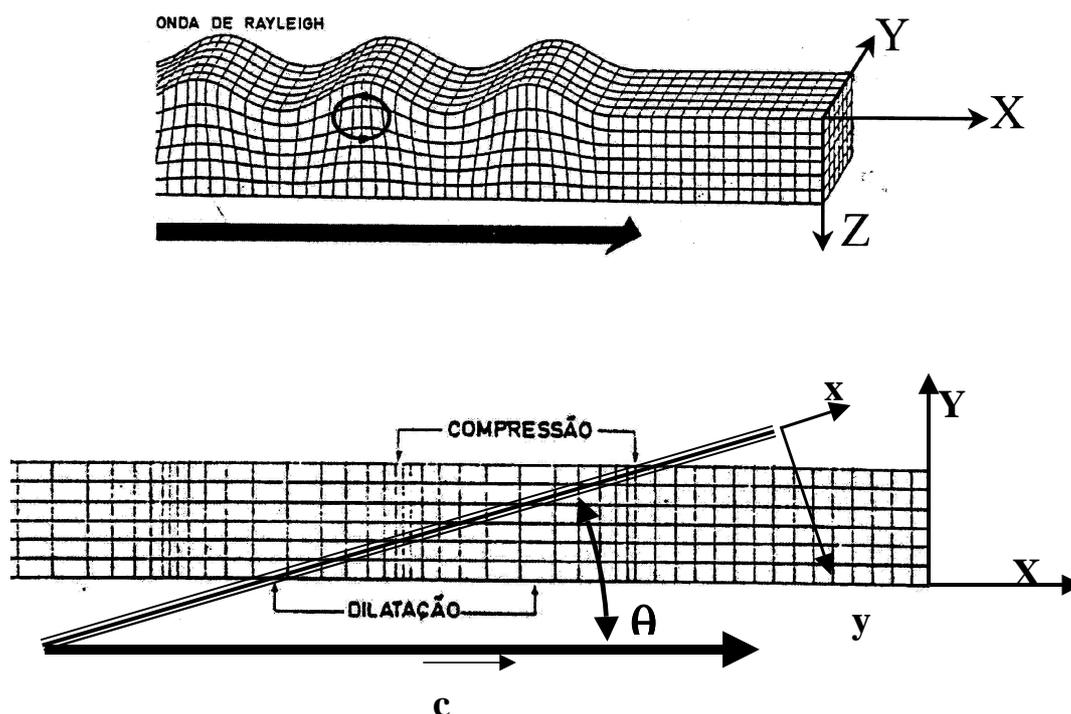


Figura 2.3 –Esquema da propagação das ondas de Rayleigh (adaptado de Oliveira, C.S., 1977).

2.2.2 Condutas contínuas

Tendo por referência a figura 2.3 considere-se o campo dos movimentos das partículas no plano XZ, nas direcções horizontal (X) e vertical (Z), originados pela componente harmónica, com frequência ω_n , de uma onda de Rayleigh que se propaga na direcção X com a velocidade c. As componentes de deslocamentos, velocidades e acelerações, na direcção vertical $V_n(\cdot)$, $\dot{V}_n(\cdot)$ e $\ddot{V}_n(\cdot)$ e horizontal $U_n(\cdot)$, $\dot{U}_n(\cdot)$ e $\ddot{U}_n(\cdot)$ desses movimentos serão dadas por:

$$\begin{aligned}
V_n(X,t) &= \frac{-a_V(i \cdot \omega_n)}{\omega_n^2} \exp\left[i \cdot \omega_n \left(t - \frac{X}{c}\right)\right] & U_n(X,t) &= \frac{-a_U(i \cdot \omega_n)}{\omega_n^2} \exp\left[i \cdot \omega_n \left(t - \frac{X}{c}\right)\right] \\
\dot{V}_n(X,t) &= \frac{a_V(i \cdot \omega_n)}{i \cdot \omega_n} \exp\left[i \cdot \omega_n \left(t - \frac{X}{c}\right)\right] & \dot{U}_n(X,t) &= \frac{a_U(i \cdot \omega_n)}{i \cdot \omega_n} \exp\left[i \cdot \omega_n \left(t - \frac{X}{c}\right)\right] \\
\ddot{V}_n(X,t) &= a_V(i \cdot \omega_n) \cdot \exp\left[i \cdot \omega_n \left(t - \frac{X}{c}\right)\right] & \ddot{U}_n(X,t) &= a_U(i \cdot \omega_n) \cdot \exp\left[i \cdot \omega_n \left(t - \frac{X}{c}\right)\right]
\end{aligned} \tag{2.18}$$

em que $a_V(i \cdot \omega_n)$ e $a_U(i \cdot \omega_n)$ são as coeficientes da transformada de Fourier discreta para a frequência ω_n das acelerações horizontais e verticais, respectivamente.

Supondo que uma conduta no plano XY forma um ângulo θ com a direcção de propagação (ver figura 2.3), os deslocamentos das partículas do meio no novo referencial da conduta xyz (em que $z \equiv Z$), com o eixo x definido ao longo do eixo longitudinal de uma conduta, escrevem-se:

$$\begin{aligned}
\vec{v}_n(x,t) &= \frac{-a_V(i \cdot \omega_n)}{\omega_n^2} \exp\left[i \cdot \omega_n \left(t - \frac{x \cdot \cos\theta}{c}\right)\right] \vec{z} \\
\vec{u}_n(x,t) &= \frac{-a_U(i \cdot \omega_n) \cdot \cos\theta}{\omega_n^2} \exp\left[i \cdot \omega_n \left(t - \frac{x \cdot \cos\theta}{c}\right)\right] \vec{x} + \frac{a_U(i \cdot \omega_n) \cdot \sin\theta}{\omega_n^2} \exp\left[i \cdot \omega_n \left(t - \frac{x \cdot \cos\theta}{c}\right)\right] \vec{y}
\end{aligned} \tag{2.19}$$

Para se determinarem as deformações axiais uniformes ao longo da coordenada x da conduta, devido à mesma componente harmónica ω_n , basta diferenciar, em ordem a x , o campo de deslocamentos na direcção longitudinal, ou seja:

$$\varepsilon_a(x,t)_n = \frac{\partial u_n(x,t)_x}{\partial x} = \frac{a_U(i \cdot \omega_n) \cdot (\cos\theta)^2}{i \cdot c \cdot \omega_n} \exp\left[i \cdot \omega_n \left(t - \frac{x \cdot \cos\theta}{c}\right)\right] \tag{2.20}$$

Agrupando os termos desta expressão tem-se:

$$\varepsilon_a(x,t)_n = \left[\frac{(\cos\theta)^2}{c} \exp\left(-i \cdot \omega_n \cdot \frac{x \cdot \cos\theta}{c}\right) \right] \cdot \left[\frac{a_U(i \cdot \omega_n)}{i \cdot \omega_n} \exp(i \cdot \omega_n \cdot t) \right] \tag{2.21}$$

O segundo termo do produto desta expressão representa o coeficiente da transformada de Fourier discreta, para a frequência ω_n , das velocidades do movimento sísmico na direcção de propagação. O primeiro termo, transforma esta componente de velocidade numa deformação axial uniforme (constante ao longo da secção transversal da conduta).

Note-se que o facto do primeiro termo não ser uma função do tempo, permite dizer que as histórias das componentes harmónicas das extensões possuem a mesma amplitude ao longo da conduta, verificando-se apenas atrasos no tempo que são função do ângulo θ , da velocidade c e da distância x entre os pontos onde se comparam aquelas histórias.

As histórias das deformações axiais uniformes podem ser obtidas através da sobreposição das diferentes componentes harmónicas dadas em (2.21), ou seja:

$$\varepsilon_a(x,t) = \sum_n \left[\frac{(\cos \theta)^2}{c} \exp\left(-i \cdot \omega_n \cdot \frac{x \cdot \cos \theta}{c}\right) \right] \cdot \dot{a}_U(i \cdot \omega_n) \cdot \exp(i \cdot \omega_n \cdot t) \quad (2.22)$$

Como a transformação expressa em (2.21) não altera as fases entre as diferentes componentes harmónicas das velocidades, conclui-se que a história das deformações axiais uniformes é igual à história de velocidades multiplicada por um factor constante. Este factor é igual ao módulo do primeiro termo do produto representado no segundo membro daquela expressão, isto é, a história da deformações axial uniforme vem simplificada para:

$$\varepsilon_a(x,t) = \frac{(\cos \theta)^2}{c} \cdot \sum_n \dot{a}_U(i \cdot \omega_n) \cdot \exp(i \cdot \omega_n \cdot t) \quad (2.23)$$

ou seja:

$$\varepsilon_a(t) = \frac{(\cos \theta)^2}{c} \cdot \dot{U}(t) \quad (2.24)$$

De realçar que a história da deformação axial uniforme de uma conduta, afectada pela propagação de ondas de Rayleigh, é proporcional à componente horizontal da velocidade das partículas do meio e depende apenas da velocidade de propagação c dessas ondas e do ângulo θ entre a conduta e a direcção de propagação das ondas sísmicas. Naturalmente, o valor máximo da deformação axial uniforme será atingido quando o ângulo θ for nulo e quando a componente horizontal da velocidade das partículas do meio atingir o seu valor máximo:

$$\varepsilon_a^{\max} = \frac{\dot{U}_{\max}}{c} \quad (2.25)$$

Para se determinarem as curvaturas ao longo da conduta, devido a uma componente harmónica ω_n do movimento vertical é necessário diferenciar duas vezes, em ordem a x , o campo de deslocamentos na direcção vertical, ou seja:

$$\chi(x, t)_n = \frac{\partial^2 v_n(x, t)}{\partial x^2} = \left[\frac{(\cos \theta)^2}{c^2} \cdot \exp\left(-\frac{i \cdot \omega_n \cdot x \cdot \cos \theta}{c}\right) \right] \cdot [a_V(i \cdot \omega_n) \cdot \exp(i \cdot \omega_n \cdot t)] \quad (2.26)$$

Considerações análogas às efectuadas para a deformações axiais uniformes permitem concluir que a história das curvaturas imposta à conduta pela propagação de ondas de Rayleigh, é proporcional à componente vertical da aceleração das partículas do meio e apenas depende da velocidade de propagação c dessas ondas e do ângulo θ entre a conduta e a direcção de propagação das ondas sísmicas:

$$\chi(t) = \frac{(\cos \theta)^2}{c^2} \cdot \ddot{V}(t) \quad (2.27)$$

O valor máximo da curvatura será atingido quando o ângulo θ for nulo e quando a componente vertical da aceleração das partículas do meio atingir o seu valor máximo:

$$\chi_{\max} = \frac{\ddot{V}_{\max}}{c^2} \quad (2.28)$$

A deformação axial de flexão sofrida pela conduta relaciona-se com a curvatura pela seguinte expressão:

$$\varepsilon_f(t) = \chi(t) \cdot z \quad \text{e} \quad \varepsilon_f^{\max} = \frac{R \cdot \ddot{V}_{\max}}{c^2} \quad (2.29)$$

sendo a variável z medida a partir do eixo longitudinal, variando entre $\pm R$, que é o raio exterior da conduta.

Verifica-se portanto que as extensões axiais máximas a qualquer altura z da secção transversal da conduta resultam de um estado de flexão

composta, cujas duas componentes (axial uniforme e de flexão) dependem, entre outros factores, dos valores máximos da velocidade e aceleração das componentes horizontal e vertical dos movimentos sísmicos intensos, respectivamente.

Assim, na avaliação dos valores máximos da extensão axial ao nível da superfície exterior da conduta ($z = \pm R$) haverá que estudar a simultaneidade entre valores máximos das duas componentes dos movimentos sísmicos referidos. No entanto tendo em atenção a natureza dinâmica (alternada) da história de extensões axiais, o majorante de tracção (+) e compressão (-) dessas extensões é dado pela soma dos valores máximos absolutos de ambas as deformações, ou seja:

$$\pm \varepsilon^{\max} \equiv \pm \left(\left| \varepsilon_a^{\max} \right| + \left| \varepsilon_f^{\max} \right| \right) \equiv \pm \left(\frac{|\dot{U}_{\max}|}{c} + \frac{R \cdot |\ddot{V}_{\max}|}{c^2} \right) \quad (2.30)$$

O valor das tensões axiais máximas de compressão e tracção podem ser deduzidas multiplicando as respectivas extensões pelo módulo de elasticidade E do material que constitui a conduta. Além disso, dada a natureza aleatória dos valores das componentes dos movimentos sísmicos (\dot{U}_{\max} e \ddot{V}_{\max}) esses valores de tensão estão também associados aos diferentes períodos de retorno T_r em que se quantifica a acção sísmica:

$$\sigma_c|_{T_r} = -E \cdot \varepsilon^{\max}|_{T_r} \quad \text{e} \quad \sigma_t|_{T_r} = E \cdot \varepsilon^{\max}|_{T_r} \quad (2.31)$$

em que os valores de $\varepsilon^{\max}|_{T_r}$ são função de $\dot{U}_{\max}|_{T_r}$ e $\ddot{V}_{\max}|_{T_r}$ tendo em conta a avaliação da casualidade sísmica e a velocidade c de propagação das ondas sísmicas na região em estudo.

2.2.3 Conduitas com juntas

Os valores obtidos através da expressão 2.30 são válidos no caso de se considerar que a conduta não possui juntas o que implica que toda a deformação do terreno circundante induza deformações iguais da conduta. Na presença de juntas, parte, ou a totalidade, da deformação do terreno será absorvida pela deformação axial uniforme e pela rotação das juntas.

Assim no dimensionamento das capacidades de deformação das juntas afigura-se razoável considerar a situação extrema que consiste em toda a deformação do terreno ser acomodada ao nível das juntas. Tal consideração corresponde a integrar as deformações axiais uniformes na distância d entre juntas ao longo do eixo longitudinal da conduta, com o objectivo de se estimar os deslocamentos diferenciais entre secções extremas de troços de condutas que se unem na mesma junta (d = comprimento de um troço de tubagem). Da mesma forma, para se obter as rotações relativas entre secções adjacentes à mesma junta, integra-se as curvaturas ao longo da distância entre juntas, conforme se esquematiza na figura 2.4.

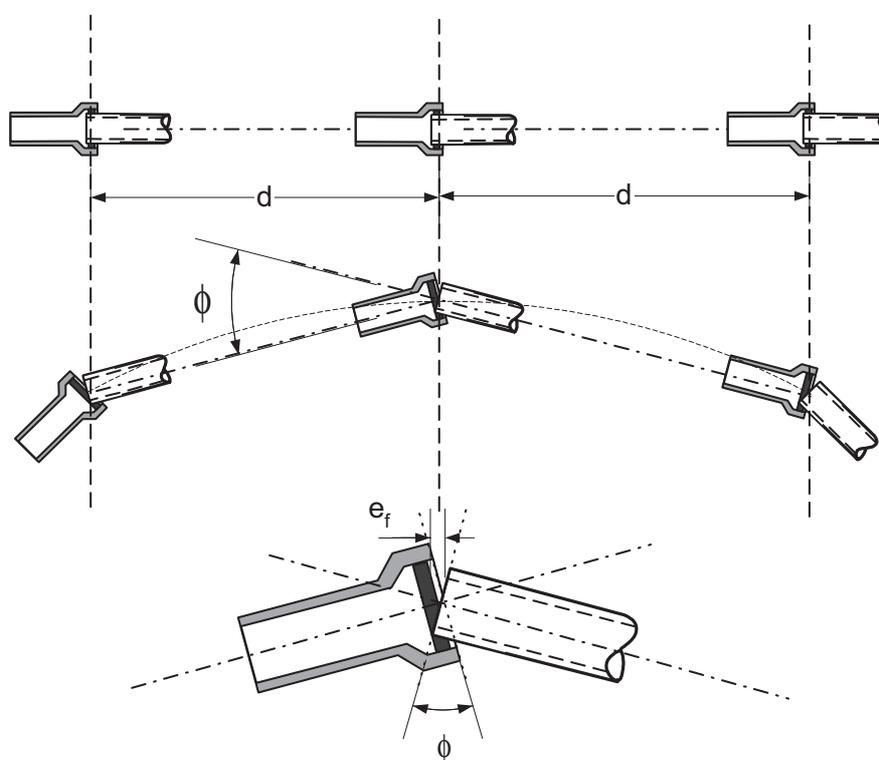


Figura 2.4 – Esquema das deformações por flexão impostas ao nível das juntas devido à propagação das ondas sísmicas.

Com base na hipótese enunciada no início deste capítulo de que o comprimento de onda das ondas sísmicas é muito superior às distâncias entre juntas, pode admitir-se a hipótese de que as deformações axiais e as curvaturas são uniformes ao longo daquela distância, ou seja, os deslocamentos relativos entre troços de condutas estimam-se com base na expressão seguinte:

$$e_{\max} = (e_a + e_f) = \varepsilon_a^{\max} \cdot d + 2 \cdot \sin\left(\frac{\Phi}{2}\right) \cdot R \approx (\varepsilon_a^{\max} + \chi_{\max} \cdot R) \cdot d = \varepsilon^{\max} \cdot d \quad (2.32)$$

em que a aproximação é válida para pequenas deformações.

Em resumo, para se calcular os deslocamentos relativos máximos das condutas ao nível da junta, para um dado período de retorno da acção sísmica, basta multiplicar a extensão máxima para esse período de retorno pelo comprimento de troços de condutas.

3. APLICAÇÃO À CIDADE DE LISBOA

3.1 Avaliação da casualidade sísmica

A avaliação da casualidade sísmica em Lisboa decorre da implementação computacional do modelo matemático para a quantificação probabilística da casualidade sísmica exposto no capítulo 2, recorrendo-se às estimativas dos parâmetros dos modelos probabilísticos para Portugal Continental apresentadas o mesmo capítulo.

O programa de cálculo automático existente no C3ES / LNEC resulta da adaptação do programa EQRISK, desenvolvido por McGuire (McGuire, 1976), por forma a permitir calcular espectros de resposta uniformes¹, para além de curvas de casualidade sísmica² para um dado local.

A avaliação probabilística da casualidade sísmica foi efectuada para um local de coordenadas 38.7° N, 9.2° W (Lisboa), e para os três tipos de condições geológicas locais contempladas nos modelos de atenuação de Ambraseys *et al.* (1996) e Ambraseys e Simpson (1996) tendo ainda sido considerados dois cenários, justificados na secção 2.1.1, para a sismicidade que afecta este local:

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

Como se explicitou na secção 2.2, a avaliação das deformações induzidas nas condutas devidas à propagação das ondas sísmicas pressupõe o conhecimento da componente vertical da aceleração de pico e da componente horizontal da velocidade máxima, para diversos períodos de retorno.

Na figura 3.1 apresentam-se as curvas de casualidade sísmica para a cidade de Lisboa em termos de acelerações de pico verticais e para as condições geológicas locais e acções sísmicas acima mencionadas.

¹ *Espectros de resposta uniformes* - Espectros cujas ordenadas possuem igual probabilidade de excedência, para um dado intervalo de tempo de referência.

² *Curva de casualidade sísmica* - Função de distribuição da grandeza que traduz o efeito do sismo num dado local, por exemplo, representação das probabilidades de excedência de diversos níveis de aceleração num dado local.

Na figura 3.2 são apresentados as curvas de casualidade sísmica para os valores máximos da velocidade no terreno. Estes valores foram obtidos a partir do espectro de resposta (coeficiente de amortecimento de 5%) com a aplicação de um factor de desamplificação de 1.9 (Newmark e Hall, 1969).

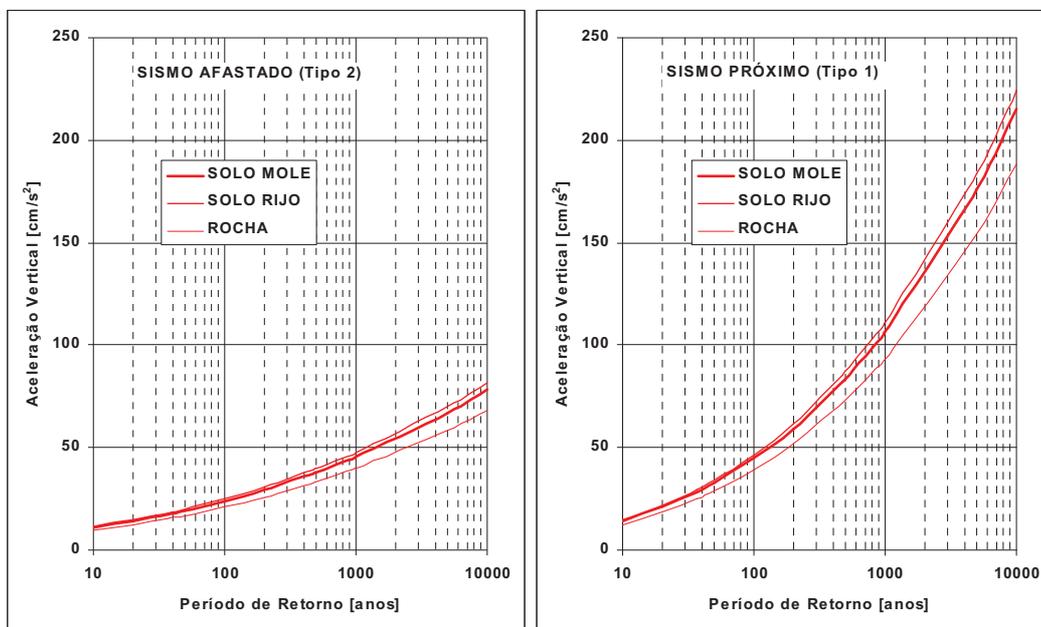


Figura 3.1 – Curva de casualidade sísmica em aceleração vertical máxima para Lisboa.

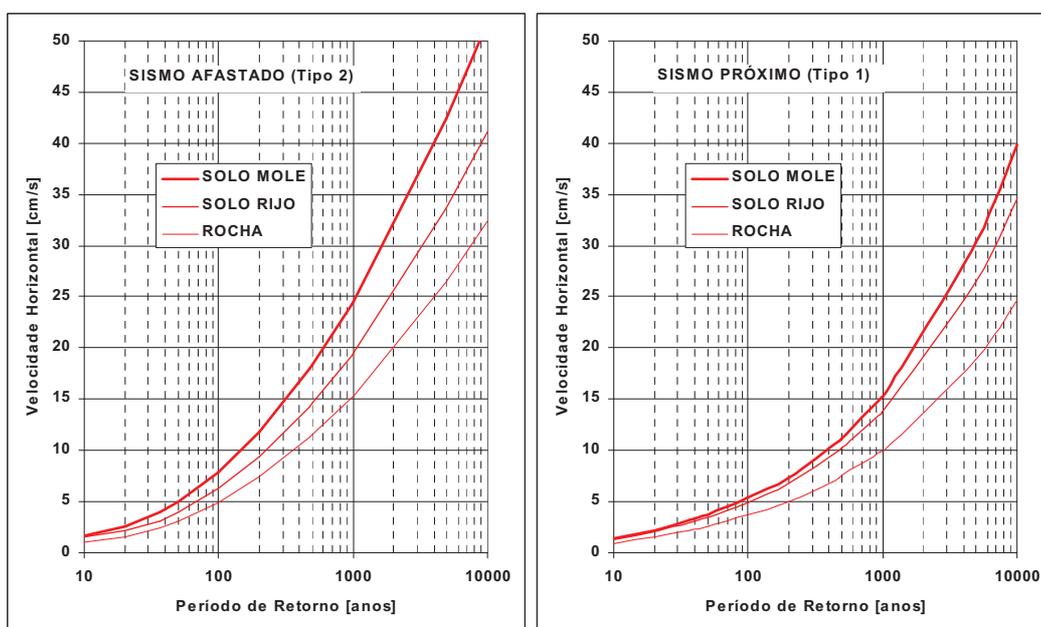


Figura 3.2 – Curva de casualidade sísmica em velocidade horizontal máxima para Lisboa.

3.2 Zonamento sísmico de Lisboa para deformações do terreno

Na figura 3.3 apresentam-se as velocidades V_s de propagação da onda sísmica para as diferentes formações geológicas existentes na cidade de Lisboa.

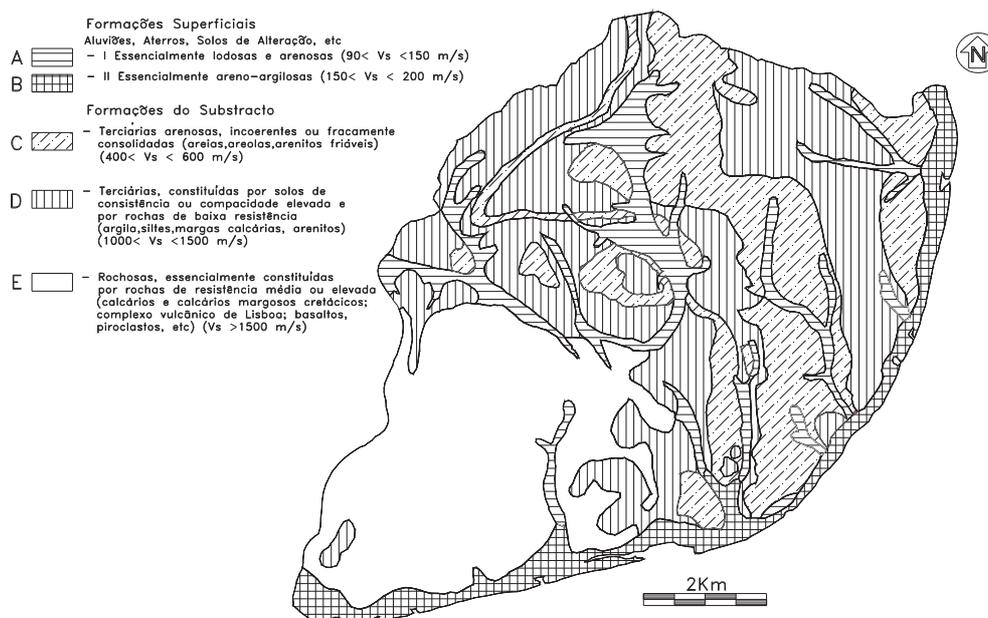


Figura 3.3 – Velocidade de propagação das ondas sísmicas de corte para as diferentes formações geológicas da cidade de Lisboa (Gomes Coelho, A. in SNPC; 1983).

No quadro 3.1 apresenta-se a relação entre a classificação das condições geológicas utilizadas nos modelos de atenuação e a classificação dos tipos de formação existentes em Lisboa em função da velocidade de propagação das ondas sísmicas de corte.

Quadro 3.1 – Gamas de variação da velocidade de propagação das ondas sísmicas de corte [m/s] para a cidade de Lisboa.

Classificação Geotécnica	Condições geológicas locais (modelo de atenuação)		
	Rocha	Solo Rijo	Solo Mole
A	-	-	$90 < V_s < 150$
B	-	-	$150 < V_s < 200$
C	-	$400 < V_s < 600$	-
D	$1000 < V_s < 1500$	-	-
E	$V_s > 1500$	-	-

No quadro 3.2 apresentam-se os valores máximos da deformação axial uniforme que podem ser excedidos, na cidade de Lisboa, para um dado período de retorno, devido à ocorrência de um sismo. A velocidade de propagação das ondas de Rayleigh foi tomada, para cada tipo de terreno, como sendo o limite inferior da respectiva classe.

Quadro 3.2 – Deformações axiais uniformes [mm/m] máximas para as acções sísmicas tipo 1 e 2 e para diversos períodos de retorno e terrenos.

Cenário	Tr ano	Terreno A 90 m/s	Terreno B 150 m/s	Terreno C 400 m/s	Terreno D 1000 m/s	Terreno E 1500 m/s
<i>Tipo 1 Próximo</i>	10	0.155	0.093	0.033	0.010	0.006
	50	0.419	0.251	0.086	0.026	0.017
	100	0.593	0.356	0.122	0.037	0.024
	500	1.240	0.744	0.257	0.075	0.050
	1000	1.699	1.019	0.345	0.099	0.066
<i>Tipo 2 Afastado</i>	10	0.187	0.112	0.038	0.011	0.007
	50	0.551	0.331	0.098	0.031	0.021
	100	0.878	0.527	0.157	0.049	0.033
	500	2.049	1.229	0.366	0.115	0.077
	1000	2.724	1.634	0.487	0.153	0.102

No quadro 3.3 apresentam-se os valores máximos das curvaturas que podem ser excedidos, na cidade de Lisboa, para um dado período de retorno, devido à ocorrência de um sismo.

Quadro 3.3 – Curvaturas máximas [$\times 10^6 / m$] para as acções sísmicas tipo 1 e 2 e para diversos períodos de retorno e terreno.

Cenário	Tr Ano	Terreno A 90 m/s	Terreno B 150 m/s	Terreno C 400 m/s	Terreno D 1000 m/s	Terreno E 1500 m/s
<i>Tipo 1 Próximo</i>	10	17.259	6.213	0.911	0.122	0.054
	50	40.667	14.640	2.146	0.288	0.128
	100	55.160	19.858	2.911	0.391	0.174
	500	103.321	37.196	5.452	0.732	0.325
	1000	131.358	47.289	6.931	0.931	0.414
<i>Tipo 2 Afastado</i>	10	13.346	4.804	0.704	0.095	0.042
	50	29.543	10.636	1.559	0.209	0.093
	100	46.889	16.880	2.474	0.332	0.148
	500	55.852	20.107	2.947	0.396	0.176
	1000	56.210	20.236	2.966	0.398	0.177

À semelhança dos critérios de avaliação de segurança de estruturas correntes de edifícios e pontes, adoptou-se o período de retorno de 1000 anos como o valor do quantilho que define a acção sísmica de projecto e verificação de segurança das condutas. Para um período de vida útil das condutas de água de 100 anos, o período de retorno de 1000 anos corresponde a uma probabilidade de cerca de 10% de serem excedidos pelo menos uma vez, em 100 anos e na cidade de Lisboa, os valores das deformações axiais uniformes e curvaturas apresentados nos quadros 3.2 e 3.3.

Tendo em conta os valores máximos das deformações axiais uniformes e curvaturas para os 1000 anos de período de retorno (quadros 3.2 e 3.3) e utilizando a expressão 2.30, apresentam-se, no quadro 3.4, as extensões axiais máximas para diferentes diâmetros das tubagens na cidade de Lisboa, na situação de inexistência de juntas.

No presente contexto os valores de extensões assim calculados (ver quadro 3.4) representam o valor de cálculo da parcela da acção sísmica a ter em conta no dimensionamento e verificação de segurança das condutas de água enterradas em Lisboa.

Os valores apresentados no quadro 3.4 são naturalmente válidos no caso de se considerar que a conduta não possui juntas o que implica que toda a deformação do terreno circundante induza deformações iguais na conduta.

Quadro 3.4 – Extensões [mm/m] máximas expectáveis, para 1000 anos de período de retorno, para condutas contínuas enterradas em Lisboa, acções sísmicas tipo 1 e 2, para diversos diâmetros e terrenos.

Cenário	Diâmetro <i>mm</i>	Terreno A <i>90 m/s</i>	Terreno B <i>150 m/s</i>	Terreno C <i>400 m/s</i>	Terreno D <i>1000 m/s</i>	Terreno E <i>1500 m/s</i>
<i>Tipo 1 Próximo</i>	200	1.71	1.02	0.35	0.10	0.07
	500	1.73	1.03	0.35	0.10	0.07
	1000	1.76	1.04	0.35	0.10	0.07
	1250	1.78	1.05	0.35	0.10	0.07
	1500	1.80	1.05	0.35	0.10	0.07
<i>Tipo 2 Afastado</i>	200	2.73	1.64	0.49	0.15	0.10
	500	2.74	1.64	0.49	0.15	0.10
	1000	2.75	1.64	0.49	0.15	0.10
	1250	2.76	1.65	0.49	0.15	0.10
	1500	2.77	1.65	0.49	0.15	0.10

Nos mapas das figuras 3.4 e 3.5 apresenta-se a distribuição espacial das extensões (mm/m) máximas expectáveis, para condutas com 1500 mm de diâmetro, enterradas na cidade de Lisboa, para 1000 anos de período de retorno e para a acção sísmica tipo 1 e 2, respectivamente, supondo a inexistência de juntas.

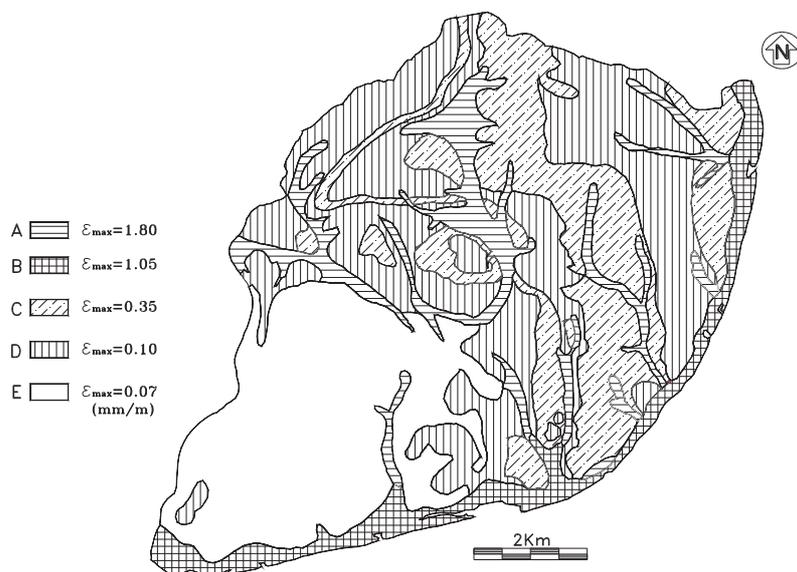


Figura 3.4 – Mapeamento das extensões (deformações axiais e de flexão em mm/m) máximas expectáveis; 1000 anos de período de retorno; condutas contínuas enterradas em Lisboa com 1500 mm de diâmetro; acção sísmica tipo 1 (próximo).

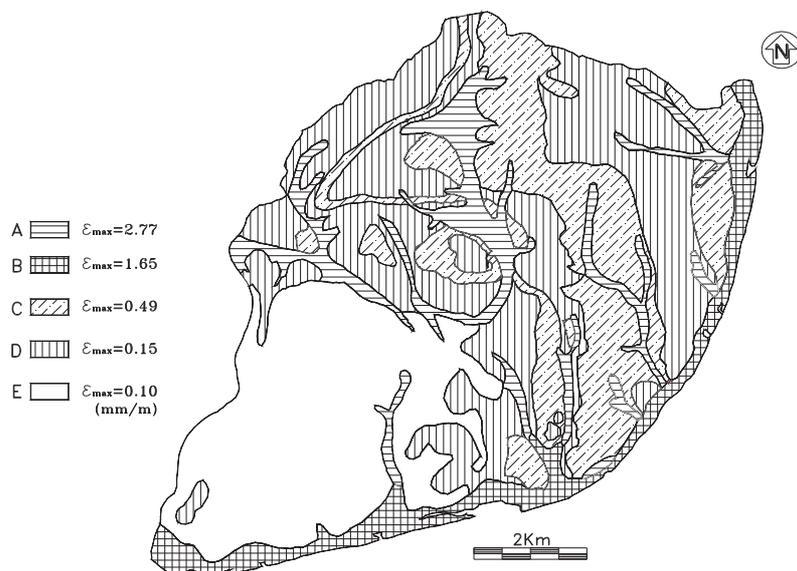


Figura 3.5 – Mapeamento das extensões (deformações axiais e de flexão em mm/m) máximas expectáveis; 1000 anos de período de retorno; condutas contínuas enterradas em Lisboa com 1500 mm de diâmetro; acção sísmica tipo 2 (afastado).

Na presença de juntas, basta aplicar a expressão 2.32 e multiplicar os valores da extensão máxima apresentados no quadro 3.4 pela distância entre juntas, para se obter deslocamentos relativos máximos expectáveis nas juntas para o período de retorno de 1000 anos.

No quadro 3.5 apresentam-se os valores expectáveis referidos para condutas de 1500 mm de diâmetro, localizadas em Lisboa, constituídas por troços de tubagem com os comprimentos de 4, 5, 6 e 7 m e considerando a acção sísmica tipo 2 e o período de retorno dos 1000 anos. Por exemplo, para uma conduita localizada em terreno A, constituída por troços de tubagem com o comprimento de 5 m, as juntas deverão ter, com probabilidade adequada, a capacidade de acomodar deslocamentos relativos de ± 14 mm.

Quadro 3.5 – Deslocamentos [mm] relativos máximos expectáveis nas juntas para 1000 anos de período de retorno, acção sísmica tipo 2, diâmetro das condutas de 1500 mm, para diversos terrenos em Lisboa.

Comprimento troço [m]	Terreno A 90 m/s	Terreno B 150 m/s	Terreno C 400 m/s	Terreno D 1000 m/s	Terreno E 1500 m/s
4	11.06	6.60	1.96	0.61	0.41
5	13.83	8.25	2.45	0.77	0.51
6	16.60	9.90	2.94	0.92	0.61
7	19.36	11.55	3.42	1.08	0.72

No caso dos troços de tubagem terem comprimentos diferentes dos contemplados poder-se-á obter os valores das distância entre secções extremas de troços de condutas adjacentes interpolando linearmente os valores apresentados no quadro 3.5.

Na figura 3.6 apresenta-se os deslocamentos relativos máximos expectáveis para condutas com 1500 mm de diâmetro, supondo a existência de juntas considerando a acção sísmica tipo 2 e o período de retorno dos 1000 anos.

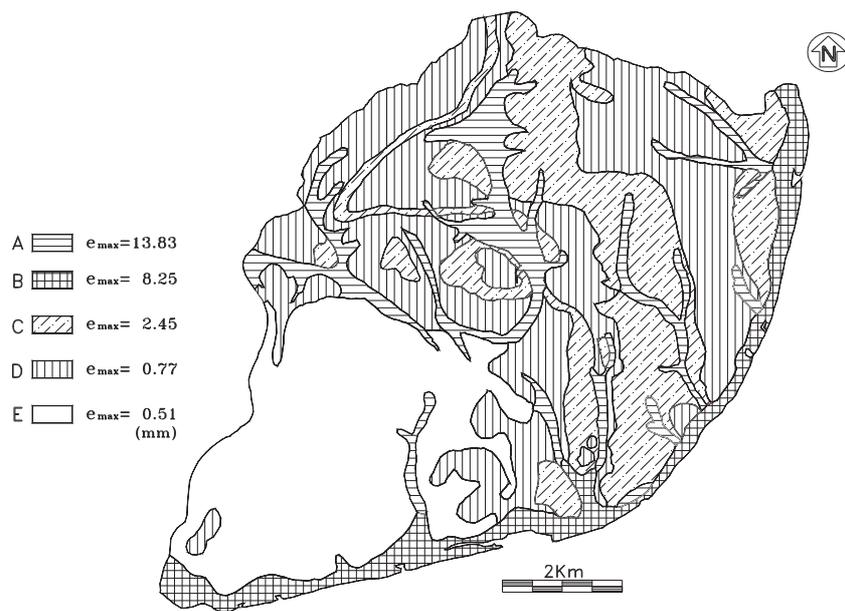


Figura 3.6 – Mapeamento dos deslocamentos (mm) relativos máximos expectáveis nas juntas; 1000 anos de período de retorno; condutas enterradas em Lisboa com 1500 mm de diâmetro e troços com comprimento de 5m; acção sísmica tipo 2 (afastado).

4. CONCLUSÕES

No capítulo 2 apresentou-se a metodologia e as estimativas dos parâmetros que permitem quantificar probabilisticamente, e numa base regional, a acção sísmica à superfície num local de coordenadas 38.7° N, 9.2° W (Lisboa).

No mesmo capítulo apresentaram-se os modelos que permitem estimar as deformações induzidas em tubagens contínuas, sem juntas, ou em troços de tubagem com juntas, para diferentes períodos de retorno (ou probabilidades de excedência), classes de terreno, diâmetros e comprimentos das tubagens entre juntas, explicando-se as hipóteses simplificativas adoptadas, as quais conduzem a majorantes dos valores reais.

No capítulo 3 quantificaram-se as deformações axiais uniformes máximas e curvaturas máximas, para as acções sísmicas tipo 1 e 2, para diversos períodos de retorno e para as diferentes condições geológicas da cidade de Lisboa. De realçar que não foram consideradas as situações de transição entre terrenos pertencentes a classes distintas.

A análise dos resultados permite concluir que:

1. O cenário afastado (acção sísmica tipo 2) é o dominante em termos dos valores das extensões máximas expectáveis em condutas enterradas na cidade de Lisboa.
2. A componente da curvatura é bastante inferior à componente das deformações axiais uniformes nos valores finais das extensões máximas. Consequentemente, a variação dos valores das extensões máximas com o diâmetro da conduta é reduzida.
3. Os valores das extensões máximas variam de forma apreciável com as condições geológicas da cidade de Lisboa, ou, dito de outra forma, o modelo é sensível à velocidade de propagação das ondas sísmicas.
4. Os movimentos relativos máximos expectáveis nas juntas variam significativamente com os comprimentos dos troços de tubagens.

À semelhança do RSA (1983) adoptou-se o período de retorno de 1000 anos como o valor do quantilho que define a acção sísmica de projecto e verificação de segurança das condutas, as quais se consideraram ter um período de vida útil de 100 anos. Desta forma, os resultados apresentados têm uma probabilidade de excedência de cerca de 10%, durante essa vida

útil, devido à ocorrência de um sismo com epicentro localizado quer na região continental Portuguesa, quer na região oceânica adjacente ao continente Português.

Nos mapas das figuras 3.5 e 3.6 sintetizam-se os principais resultados obtidos neste trabalho apresentando-se a distribuição espacial (i) das extensões máximas expectáveis supondo a continuidade das condutas e (ii) dos deslocamentos relativos máximos expectáveis supondo a existência de juntas de 5 em 5 m, admitindo, em ambos os casos, condutas com 1500 mm de diâmetro, enterradas na cidade de Lisboa e os 1000 anos de período de retorno da acção sísmica tipo 2 (cenário dominante).

Para diâmetros de conduta diferentes de 1500 mm dever-se-á consultar o quadro 3.4 para se obter os valores das extensões máximas expectáveis. No entanto, conforme já foi referido atrás, a variação das extensões com o diâmetro da conduta não é relevante, tendo por isso sido escolhida a situação mais gravosa, que corresponde ao maior diâmetro estudado, para desenhar os resultados sob a forma de mapa (figura 3.5).

Para condutas com troços de tubagem diferentes de 5 m dever-se-á consultar o quadro 3.5 para se obter os valores dos deslocamentos relativos máximos expectáveis nas juntas.

Para terminar refira-se que, no presente contexto, os valores de extensões e deslocamentos relativos agora estimados representam os valores dos “factores de agressividade” decorrentes da propagação das ondas sísmicas que deverão ser tidos em conta no dimensionamento e verificação de segurança das condutas de água enterradas em Lisboa.

REFERÊNCIAS

Araya, R. e Der Kiureghian, A.; 1988.

Seismic Hazard Analysis Improved Models, Uncertainties and Sensitivities. Report No. UCB/EERC 90/11, University of California, Berkeley.

Ambraseys, N.N. e Simpson, K.A.; 1996.

Prediction of Vertical Response Spectra in Europe. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 45: 401-412, John Wiley & Sons, Ltd.

Ambraseys, N.N; Simpson, K.A. e J.J. Bommer; 1996.

Prediction of Horizontal Response Spectra in Europe. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 45: 371-400, John Wiley & Sons, Ltd.

Ballantyne, D.P.E.; 1995.

Pipeline Performance Parameters for Earthquake Vulnerability. Proc. 6th U.S. - Japan Workshop on Earthquake Disaster Prevention for Lifeline Systems, pp. 317- 331, Osaka, Japão.

Cabral, J.; 1993.

Neotectónica de Portugal Continental. Tese de doutoramento em Geologia, Universidade de Lisboa.

Campos-Costa, A.; 1994.

A Acção dos sismos e o Comportamento das Estruturas. Tese de doutoramento em Engenharia Civil, Universidade do Porto.

Campos-Costa, A.; 1997.

European Seismic Hazard Scenarios. An Approach to the Definition of Input Motions for Testing and Reliability Assessment of Civil Engineering Structures. Estudo desenvolvido ao abrigo do Programa Europeu "Human Capital and Mobility". Relatório Joint Research Center, JRC, Ispra, Itália.

CEN; 1997.

Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 4: Silos, Tanks and Pipelines. Versão Porvisória.

Clough, R. W. e Penzien, J.; 1993.

Dynamics of Structures. 2^a Ed. Civil Engineering Series, McGraw-Hill International Editions.

Cornell, C. A.; 1968.

Engineering Seismic Risk Analysis. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 58, nº. 5 pp. 1503-1606.

Costa, J.; Costa, N. e Martins, N. ; 1997.

Estudo do Comportamento Sísmico de Conduitas de Gás Enterradas. Ordem dos Engenheiros, Lisboa.

Gutenberg, B. e Richter, C.F.; 1944.

Frequency of Earthquakes in California. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 34, no. 4, pp. 185 - 188.

McGuire, R. K.; 1976.

EQRISK, Evaluation of Earthquake Risk to Site. Open File Report 76-67. United States Department of the Interior Geological Survey. USA.

Newmark, N.M. e Hall, W.J.; 1969.

Seismic Design Criteria For Nuclear Reactor Facilities. Proc. 4th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago do Chile.

Oliveira, C.S.; 1977.

Sismologia, Sismicidade e Risco Sísmico. Aplicações em Portugal. Relatório NDA, Proc. 36/11/4394, LNEC, Lisboa.

O'Rourke, T.D.; 1996.

Lessons Learned for Lifeline Engineering from Major Urban Earthquake. Proc. 11WCEE Elsevier Science, Ltd., Paper No. 2172.

RSA; 1983.

Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes. Decreto-lei nº 235/83, Imprensa Nacional - Casa da Moeda, Lisboa.

SNPC; 1983.

Programa de Acções para Minimização do Risco Sísmico. Fase I. Primeiro Relatório Final, INMG, Lisboa.

Sousa, M.L.; 1996.

Modelos Probabilistas para a Avaliação da Casualidade Sísmica em Portugal Continental. Tese de Mestrado em Investigação Operacional e Engenharia de Sistemas. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa.

Sousa, M.L. e Oliveira, C.S.; 1997.

Hazard Mapping Based on Macroseismic Data Considering the Influence of Geological Condition. Natural Hazards 14: 207-225, Kluwer Academic Publishers.

Sousa, M. L., Oliveira, C. S. e Martins, A. M., 1992.

Compilação de Catálogos Sísmicos da Região Ibérica. Relatório 36/92, NDA, LNEC, 250 pp., Proc. 036/11/9295, Lisboa.

Sousa, M.L., Oliveira, R.C. e Oliveira, C.S., 1997

Análise Probabilística da Casualidade Sísmica em Portugal Continental, Investigação Operacional, vol. 17, pp. 3-21, Lisboa.

VISTOS

AUTORIA

**O ENGENHEIRO CHEFE DO
CENTRO
DE ESTUDOS E EQUIPAMENTOS
DE ENGENHARIA SÍSMICA**



Eduardo Cansado Carvalho



Alfredo Campos Costa

Investigador Auxiliar



Maria Luísa Nascimento e Sousa

Assistente de Investigação