



REGIÃO AUTÓNOMA DOS AÇORES  
SECRETARIA REGIONAL DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E EQUIPAMENTOS  
**LABORATÓRIO REGIONAL DE ENGENHARIA CIVIL**  
DIRECÇÃO DE SERVIÇOS DE ESTRUTURAS E MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

**GERAÇÃO DE ACELEROGRAMAS  
ARTIFICIAIS COM BASE EM ESPECTROS DE  
POTÊNCIA COMPATÍVEIS COM ESPECTROS  
DE RESPOSTA REGULAMENTARES**

RELATÓRIO 85/2011

Trabalho realizado para  
Laboratório Regional de Engenharia Civil

Ponta Delgada, Setembro de 2011



REGIÃO AUTÓNOMA DOS AÇORES  
SECRETARIA REGIONAL DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E EQUIPAMENTOS  
**LABORATÓRIO REGIONAL DE ENGENHARIA CIVIL**  
DIRECÇÃO DE SERVIÇOS DE ESTRUTURAS E MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

**GERAÇÃO DE ACELEROGRAMAS ARTIFICIAIS COM BASE EM ESPECTROS DE POTÊNCIA  
COMPATÍVEIS COM ESPECTROS DE RESPOSTA REGULAMENTARES**

---

**IDENTIFICAÇÃO DO DOCUMENTO**

---

Relatório ID: LREC/DSEMC – RELATÓRIO 85/2011  
Proc. ID: Proc. 480  
LREC/CD - Cota ID: 550.34  
M44g  
Autor(s) ID: **Pedro M.B. Medeiros**  
Eng. Civil  
Visto(s) ID: **José Carlos Oliveira**  
O Director de Serviços de Estruturas e Materiais de Construção  
**António Pereira Alves Calado**  
O Director do Laboratório Regional de Engenharia Civil

---

---

**DECLARAÇÃO DE AUTENTICIDADE**

---

O Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC) declara que a cópia em formato PDF gravada no CD com ID LREC 85-11, constitui uma cópia integral e autêntica do documento acima identificado, encontrando-se em arquivo próprio do LREC o original em papel.

---

**GERAÇÃO DE ACELEROGRAMAS ARTIFICIAIS COM BASE EM ESPECTROS DE POTÊNCIA  
COMPATÍVEIS COM ESPECTROS DE RESPOSTA REGULAMENTARES**

**ÍNDICE**

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>6</b>
2.1	Definição das características da acção sísmica.....	8
2.2	Determinação do espectro de resposta de referência .....	9
2.3	Geração da função densidade espectral de potência a partir do espectro regulamentar.....	10
2.4	Geração de sinal aleatório estacionário.....	11
2.5	Transformação do sinal aleatório estacionário em não estacionário, com forma coerente com o tipo de sismo a gerar.....	12
2.6	Cálculo do espectro de resposta do acelerograma gerado artificialmente 14	
2.7	Determinação do factor de escala que minimiza o erro e garante as condições regulamentares de aceitação.....	14
<b>3</b>	<b>EXEMPLO DE APLICAÇÃO</b> .....	<b>16</b>
3.1	Acção sísmica tipo 1, Zona 1, terreno A .....	16
3.2	Acção sísmica tipo 2, Zona 2, terreno C .....	19
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>22</b>
<b>5</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>23</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A representação da acção sísmica por intermédio de espectros de resposta corresponde à forma de representação que correntemente se utiliza na prática do dimensionamento de estruturas de engenharia civil. É esta, aliás, a representação de referência considerada pelo Eurocódigo 8 [1]. Existem situações, no entanto, em que é necessário considerar directamente o efeito da variação das acelerações do solo no tempo. Alguns exemplos de situações deste tipo incluem:

- Determinação do comportamento de estruturas em regime linear, em que devido à proximidade das frequências próprias, uma análise por espectro de resposta não produz resultados aceitáveis.
- Determinação do comportamento em regime não linear de estruturas ou partes de estruturas, por via numérica;
- Determinação do comportamento de estruturas, ou parte, por via experimental para determinação do seu comportamento quando a condição de solicitação determinante seja a acção sísmica (p.ex. ensaios em mesa sísmica ou pseudodinâmicos);

É sobretudo a última situação, com implicações na utilização da parede de reacção da sísmica, que motivou o estudo e desenvolvimento do algoritmo de geração de acelerogramas artificiais apresentado neste documento.

O Eurocódigo 8 [1] permite, em função da informação disponível, a descrição do movimento sísmico através de:

- Acelerogramas registados;
- Acelerogramas artificiais;
- Acelerogramas simulados.

Os acelerogramas registados correspondem a registos de sismos prévios, escolhidos e manipulados numericamente por forma a compatibilizá-los com os espectros de resposta representativos das acções sísmicas que pretendem simular. A utilização de acelerogramas registados, nas avaliações do comportamento sísmico de edifícios localizados em Portugal, está bastante

condicionada pelo facto de existirem poucos acelerogramas obtidos de registos de vibrações sísmicas intensas, provocadas por sismos de elevada magnitude. Para dar resposta a esta condicionante, a alternativa é o recurso aos acelerogramas artificiais ou simulados.

Os acelerogramas simulados são gerados de forma numérica tendo em consideração os mecanismos na fonte, o caminho de propagação, as características da geologia local e todos os outros factores que condicionam o registo sísmico num determinado local. Apesar de defendidos como uma metodologia de simulação da acção sísmica mais fiável [2], a geração de acelerogramas simulados requer um nível de informação e conhecimentos geológicos que não são comuns na engenharia civil.

Os acelerogramas artificiais correspondem a séries temporais geradas aleatoriamente, com recurso a métodos numéricos, coerentes com os espectros de resposta representativos das acções sísmicas que pretendem simular. A geração de acelerogramas por esta via é mais apetecível na medida em que não requer uma quantidade de informação muito significativa e os métodos utilizados são mais próximos dos utilizados correntemente na engenharia civil.

Neste documento será apresentada a metodologia utilizada no desenvolvimento de um programa de cálculo automático que possibilita a geração de acelerogramas artificiais. Além da metodologia serão apresentados e avaliados dois exemplos de aplicação do programa quanto à conformidade dos resultados produzidos.

## 2 METODOLOGIA

A geração de acelerogramas artificiais compatíveis com os espectros de resposta de dimensionamento requer o conhecimento do espectro de resposta associado à acção sísmica, a duração da acção sísmica e o modo como esta evolui no tempo.

De acordo com o Eurocódigo 8 [1] só são considerados aceitáveis os acelerogramas artificiais que satisfaçam as seguintes condições:

1. A geração dos acelerogramas seja feita com base nos espectros de resposta elástica definidos no Eurocódigo 8;
2. A duração for compatível com a magnitude e com as características do acontecimento sísmico relevantes para o estabelecimento de  $a_g$ , com um mínimo de 10 segundos para a parte estacionária do acelerograma;
3. A média dos valores da resposta espectral com período nulo não deve ser inferior a  $a_g \cdot S$ ;
4. Nenhum valor do espectro de resposta elástico médio com 5% de amortecimento, calculado a partir do acelerograma artificial, deverá ser inferior a 90% do valor correspondente ao espectro de resposta elástico regulamentar, nos períodos entre  $0.2 T_1$  e  $2T_1$ , em que  $T_1$  corresponde ao período fundamental da estrutura, na direcção de actuação da acção sísmica.

Foram identificados vários métodos para a geração de acelerogramas artificiais passíveis de serem traduzidos em programas de cálculo automático. O método utilizado para a criação do programa de cálculo automático - **ArtSisGen** – apresentado neste documento, combina as propostas de Clough [3], Guerreiro [4] e Estêvão [5]. A metodologia proposta produz resultados compatíveis com as condições do Eurocódigo 8 [1], ao mesmo tempo que tira partido de algum *software* previamente desenvolvido no LREC [6,7].

A metodologia proposta inclui as seguintes etapas:

1. Geração de um espectro de resposta de referência, contra o qual é comparado o espectro de resposta do acelerograma gerado;

2. Geração da função densidade espectral de potência a partir do espectro de resposta de referência;
3. Geração de um sinal aleatório, estacionário, com gama de frequências compatível com a função densidade espectral de potência;
4. Transformação do sinal anterior em sinal não estacionário, com recurso a função de modulação;
5. Geração de espectro de resposta, a partir do sinal gerado na etapa 1, e comparação com o espectro de referência;
6. Realizar, se necessário, a multiplicação do espectro por um factor de escala por forma a garantir o cumprimento das condições de aceitação do regulamento.

A Fig. 1 descreve sucintamente o processo de geração de acelerogramas artificiais proposto e que foi implementado no programa de cálculo automático denominado **ArtSisGen**. Nas subsecções seguintes são descritas cada uma das etapas do processo.

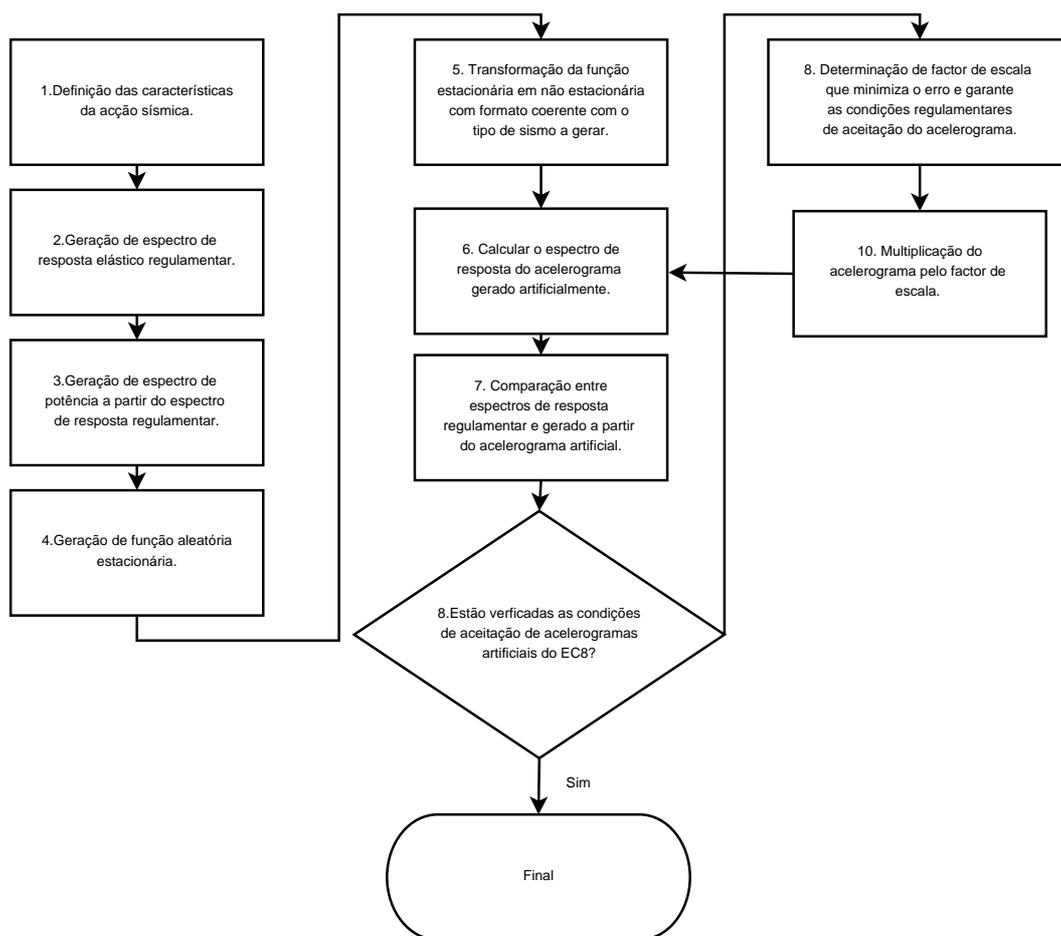


Fig. 1 – Diagrama com a sequência de operações envolvidas na criação de acelerogramas artificiais, incorporadas no programa de cálculo automático **ArtSisGen**.

## 2.1 Definição das características da acção sísmica

Os parâmetros definidores da acção sísmica de referência são baseados nas características e parâmetros apresentados no Eurocódigo 8 e respectivo Anexo Nacional, e os da acção sísmica cujo acelerograma se pretende gerar, nas preferências do utilizador.

No que se refere ao programa de cálculo automático os dados de entrada são introduzidos num ficheiro de *input*, com a designação **INPUT.DAD**. O ficheiro é composto por dois blocos designados por:

- **SISREF** – onde são introduzidos os dados que caracterizam o espectro de resposta de referência (espectro de resposta) de referência.

- **SISUSER** – onde são introduzidos os dados que caracterizam o acelerograma a gerar artificialmente;

A Fig. 2 apresenta a configuração do ficheiro de dados do programa.

<p><b>SISREF</b></p> <p><b>TS</b> – Acção sísmica (tipo 1 ou 2);</p> <p><b>ZS</b> – Zona sísmica (de 1 a 6 se acção sísmica tipo 1 ou 1 a 5 se acção sísmica tipo 2)</p> <p><b>TT</b> – Tipo de terreno (de A a E)</p> <p><b>AMORT</b> – Amortecimento, expressão em percentagem.</p> <p><b>SISUSER</b></p> <p><b>M</b> – magnitude da acção sísmica a gerar;</p> <p><b>DUR</b> – duração da acção sísmica a gerar (s);</p> <p><b>t<sub>1</sub></b> – Intervalo de tempo até ao pico da acção sísmica (s);</p> <p><b>T<sub>1</sub></b> – Período fundamental do elemento a estudar (s).</p>
--

*Fig. 2 – Parâmetros de entrada do programa de cálculo **ArtSisGen**.*

## **2.2 Determinação do espectro de resposta de referência**

É fundamental conhecer o espectro de resposta de referência porque é a partir dele que é feita a análise da qualidade do acelerograma gerado artificialmente. O espectro de resposta de referência é calculado com base nas expressões e parâmetros do Eurocódigo 8, que permitem determinar os espectros de resposta elásticos de acções horizontais, para um coeficiente de amortecimento de 5%.

$$Se_{EC8}(T) = \begin{cases} a_g \cdot S \cdot \left[ 1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1) \right], & 0 \leq T \leq T_B \\ a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5, & T_B \leq T \leq T_C \\ a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left[ \frac{T_C}{T} \right], & T_C \leq T \leq T_D \\ a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left[ \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right], & T_D \leq T \leq 4s \end{cases} \quad Eq. 1$$

Em que:  $Se_{EC8}$ , corresponde ao espectro de resposta elástica,  $a_g$ , ao valor de cálculo da aceleração à superfície para um terreno do tipo A,  $T_B$ , ao limite inferior do período do patamar de aceleração espectral constante,  $T_C$ , ao limite superior do período do patamar de aceleração espectral constante,  $T_D$ , ao valor que define no espectro o início do ramo de deslocamento constante; S, ao coeficiente de solo;  $\eta$ , ao coeficiente de correcção do amortecimento, com valor de referência 1, para amortecimento igual a 5%.

Os parâmetros de definição dos espectros são os definidos no anexo nacional do Eurocódigo 8. A sua introdução não é explícita no programa, pelo que a alteração por parte do regulamento, daqueles parâmetros implicará necessariamente a actualização do programa.

### 2.3 Geração da função densidade espectral de potência a partir do espectro regulamentar

A função densidade espectral de potência pode ser interpretada como uma medida do conteúdo energético por cada gama de frequência,  $w$ , de um sinal expresso no domínio do tempo,  $X(t)$ . O produto  $S_x(w) \cdot \Delta w$  corresponde a uma medida da energia contida numa banda de frequência infinitesimal  $\Delta w$  de um determinado sinal [4]. Para o caso específico, o espectro de potência gerado a partir do espectro de resposta de referência acaba por ter função de filtro que intensifica ou reduz as bandas de frequência do sinal aleatório de ruído branco gerado na etapa seguinte.

A geração do espectro de potência a partir do espectro de resposta regulamentar foi realizada com recurso ao programa de cálculo automático **SPECTRUM\_P**, desenvolvido pelo LREC e apresentado no relatório LREC/DSEMC – Rel. 42/2004 [8]. Uma vez que se trata de um tema já desenvolvido e publicado pelo LREC não se considera necessária a descrição pormenorizada do processo de geração de espectro de potência. O programa de cálculo desenvolvido no âmbito deste documento está perfeitamente integrado com o anterior, não sendo necessário introduzir dados adicionais aos apresentados em 2.1, nem a interrupção do processo de cálculo.

#### **2.4 Geração de sinal aleatório estacionário**

A geração do sinal aleatório estacionário baseou-se no procedimento apresentado por Guerreiro [4], sendo que um sinal estacionário corresponde àquele que não sofre degradação com o tempo.

Apoiando-se nas séries de Fourier e numa demonstração de Solnes, o autor indica ser possível realizar a representação de um acelerograma através da sobreposição de uma série de funções harmónicas e que as amplitudes de cada uma das funções harmónicas estão relacionadas com a energia contida nas bandas de frequência da função densidade espectral de potência. A demonstração é feita pelo autor, mas para efeitos deste documento, considera-se suficiente apresentar a expressão que permite determinar o sinal aleatório estacionário, expresso no tempo, a partir da função densidade espectral de potência Eq. 4.

$$X(t) = \sum_{k=1}^N \sqrt{2 \cdot S_x(\omega_k)} \cdot \cos(\omega_k \cdot t + \phi_k) \quad \text{Eq. 2}$$

Em que:  $X(t)$  corresponde ao sinal expresso no tempo,  $S_k$ , corresponde ao valor do espectro de potência da resposta,  $\omega_k$ , à frequência central da banda de largura  $\Delta\omega$  e é calculada através de  $\omega_k = (k-1/2) \cdot \Delta\omega$  e,  $\phi_k$ , corresponde a um ângulo de

fase gerado aleatoriamente, com base numa função distribuição de probabilidade uniforme, no intervalo  $[0, 2\pi]$ . Um exemplo do sinal gerado corresponde ao representado a preto na Fig. 4.

## 2.5 Transformação do sinal aleatório estacionário em não estacionário, com forma coerente com o tipo de sismo a gerar

Existem algumas propostas de funções de modulação que permitem a transformação da função estacionária gerada no ponto anterior, numa função não estacionária. Clough & Penzien [3] apresentam duas alternativas, sendo que numa delas a forma da função depende da magnitude da acção sísmica que se quer representar. A função de modulação válida para magnitudes entre 4.5 e 7.6 está apresentada nas expressões Eq. 3 e Eq. 4.

$$f(t) = \begin{cases} \left[ \frac{t}{t_1} \right]^2, & t \leq t_1 \\ 1, & t_1 < t \leq t_2 \\ e^{-2(t-t_2)}, & t > t_2 \end{cases} \quad \text{Eq. 3}$$

$$t_2 - t_1 = 10^{(0.43M - 1.83)} \quad \text{Eq. 4}$$

Em que:  $t_1$ , corresponde ao tempo que decorre até ser atingido o pico da acção sísmica,  $t_2$ , ao instante a partir do qual a acção sísmica começa a reduzir a intensidade,  $t_2 - t_1$ , à duração da máxima intensidade da acção sísmica, e,  $M$ , à magnitude da acção sísmica.

Na Fig. 3 apresenta-se a função de modulação do sismo, assumindo um valor de  $t_1$  de 4 s e que a magnitude do sismo é 6.5.

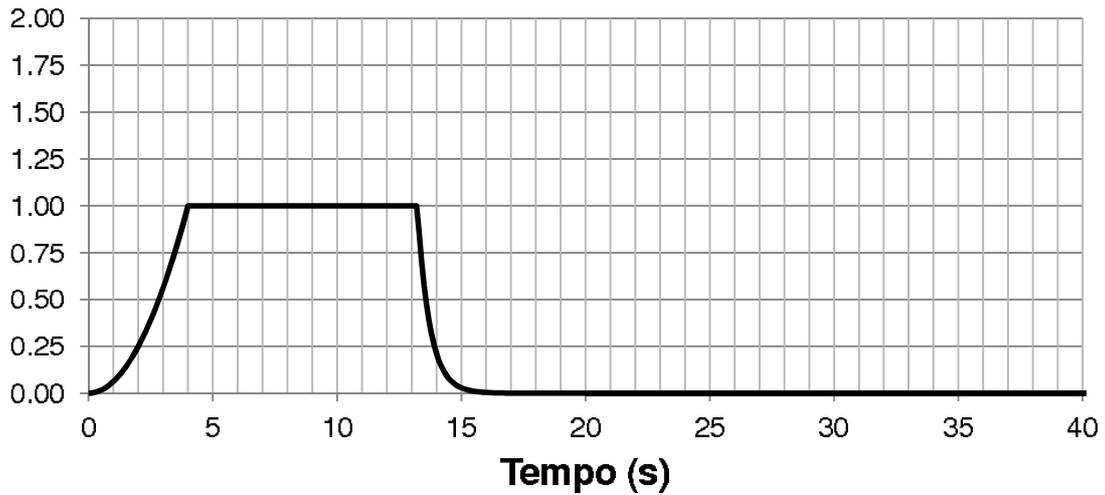


Fig. 3 – Forma da função de modulação, para  $t_1 = 4s$  e magnitude igual a 6.5.

A Fig. 4 apresenta o diagrama de acelerações antes e após a multiplicação pela função de modulação.

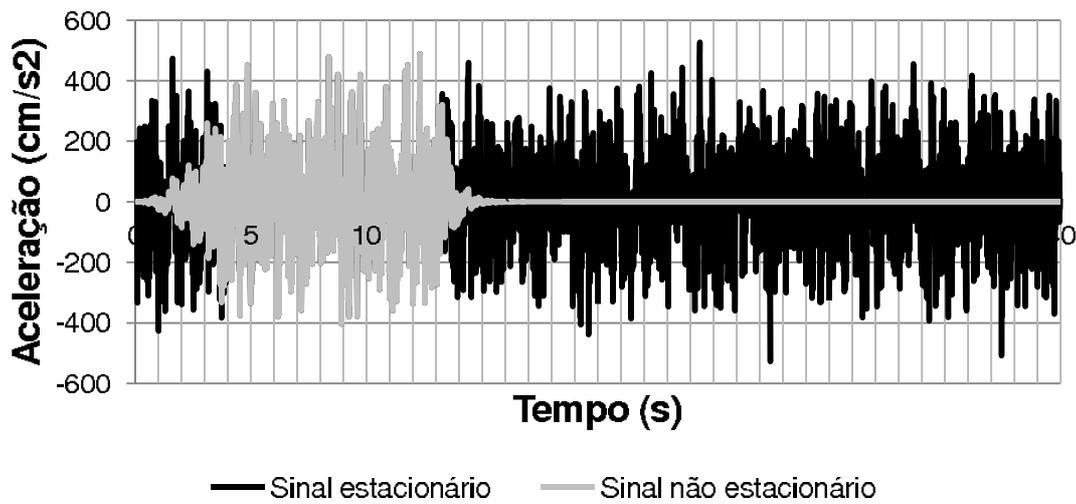


Fig. 4 – Acelerograma antes e após a multiplicação pela função de modulação, para  $t_1 = 4s$  e magnitude igual a 6.5.

## 2.6 Cálculo do espectro de resposta do acelerograma gerado artificialmente

O espectro de resposta de uma série de acelerações corresponde ao valor máximo da resposta, na grandeza que se pretende representar no espectro (aceleração, velocidade, deslocamento), de um conjunto amplo de osciladores de um grau de liberdade com diferentes períodos fundamentais.

A geração do espectro de resposta, a partir do acelerograma artificial,  $a_{artif.}(t)$ , gerado nos passos anteriores, foi realizada com recurso ao programa de cálculo automático **SPECTRUM\_R**, cuja teoria e características do programa de cálculo automático estão apresentados no relatório LREC/DSEMC – Rel. 42/2004 [8]. Uma vez que se trata de um tema já desenvolvido e publicado pelo LREC não se considera necessária a descrição pormenorizada do processo de geração de espectro de resposta.

O programa de cálculo desenvolvido no âmbito deste documento cria, de forma automática, os ficheiros de entrada e lê os ficheiros de saída do programa **SPECTRUM\_R**, sem necessidade de interrupção do processo de cálculo, ou de introdução de variáveis adicionais.

## 2.7 Determinação do factor de escala que minimiza o erro e garante as condições regulamentares de aceitação

A determinação do coeficiente de escala,  $\alpha$ , que minimiza o erro entre o espectros de resposta de referência e o gerado a partir do acelerograma artificial, e que permite cumprir os critérios de aceitação do EC8, corresponde a um problema de optimização com a seguinte forma:

Minimizar:

$$F(\alpha) = \sum_{i=1}^{N_T} \left( Se_{EC8}(T_i) - \alpha \cdot Se_{reg,n}(T_i) \right)^2$$

Sujeita a:

$$\begin{aligned} Se_{EC8}(0) - \alpha_n \cdot Se_{reg,n}(0) &\leq 0 \\ 0.9 \cdot Se_{EC8}(T_i) - \alpha_n \cdot Se_{reg,n}(T_i); T_i &= 0.2 \cdot T_1, \dots, T_1, \dots, 2 \cdot T_1 \\ \alpha &> 0; \end{aligned}$$

Em que  $Se_{EC8}(T_i)$  e  $Se_{reg,n}(T_i)$  correspondem aos valores de aceleração do espectro de resposta de referência e gerado a partir do acelerograma artificial nos períodos  $T_i$ , respectivamente e,  $\alpha$ , ao factor de escala que se pretende determinar.

A resolução do problema de optimização foi incluído no programa de cálculo automático, através da utilização de uma rotina pré-existente de optimização de problemas de minimização de erro com restrições, sendo o factor  $\alpha$  posteriormente utilizado para escalar o acelerograma artificial original.

É o acelerograma escalado que verifica as condições de utilização de acelerogramas artificiais impostas no regulamento.

### 3 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Nesta secção são apresentados e analisados dois acelerogramas artificiais gerados com recurso ao programa **ArtSisGen** apresentados anteriormente. Para abranger um maior número de situações, optou-se por gerar os exemplos 1 e 2 com tipos de acção sísmica, zonas e tipos de terrenos distintos. A magnitude, duração e tempo que decorre até ao pico de aceleração ( $t_1$ ) são iguais nas duas situações.

#### 3.1 Acção sísmica tipo 1, Zona 1, terreno A

As características da acção sísmica do primeiro exemplo incluídas no ficheiro de *input* de dados - **INPUT.DAD** - estão apresentadas na Fig. 5.

<b>SISREF</b>
1
1
A
5
<b>SISUSER</b>
7
40
4
0.5

Fig. 5 – Parâmetros de entrada do programa de cálculo **ArtSisGen**.

O acelerograma artificial que resultou está apresentado na Fig. 6.

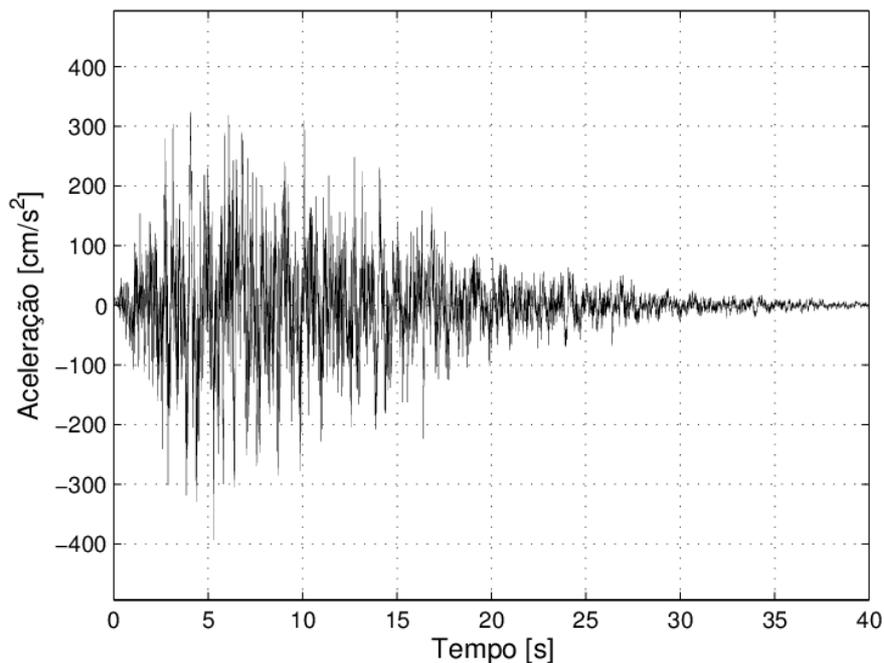


Fig. 6 – Acelerograma artificial, para acção sísmica tipo 1, na Zona 1 e em terreno tipo A.

A Fig. 7 estabelece a comparação entre o espectro de resposta do sismo de referência e o do sismo gerado artificialmente, já escalado.

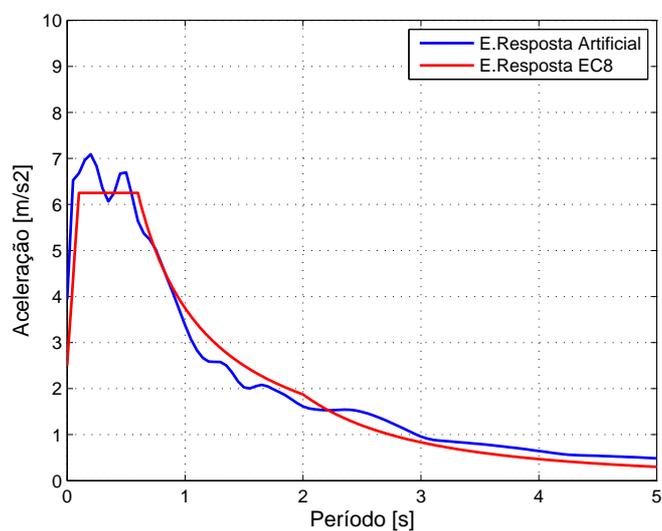
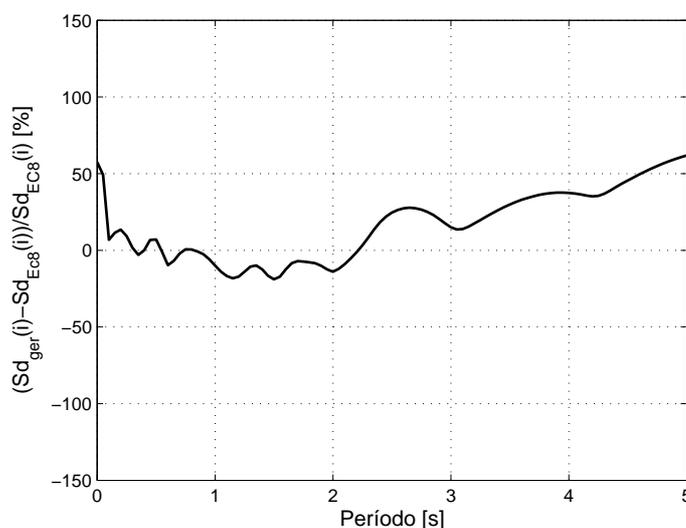


Fig. 7 – Comparação entre espectro de resposta de acelerograma artificial e espectro de referência, para acção sísmica tipo 1, na Zona 1 e em terreno tipo A.

Os pontos seguintes apresentam as características do acelerograma gerado para as condições de aceitação definidas no Eurocódigo 8:

- A duração do sismo foi definida explicitamente em 40 s. O acelerograma tem a duração imposta de 40s, que é superior aos 10s de mínimo imposto regulamentarmente;
- A pseudo-aceleração do espectro de resposta gerado a partir do acelerograma artificial é de  $4 \text{ m/s}^2$  para  $T = 0\text{s}$ . Este valor é superior ao limite  $a_g \cdot S$ , que neste caso assumiria o valor de  $2.5 \text{ m/s}^2$  ( $a_g = 2.5$ ,  $S = 1$ );
- A relação entre o mínimo da pseudo-aceleração espectral do acelerograma gerado artificialmente e a do espectro de resposta de referência no período correspondente é de 9%, no intervalo entre 0.1 e 1s ( $0.2T_1$  até  $2T_1$ ). A Fig. 8 apresenta a relação entre os valores dos dois espectros, para mais fácil identificação. O erro é, no entanto, significativo para períodos fora daquela gama.



*Fig. 8 – Erro entre espectros de resposta de acelerograma artificial e espectro de referência, em relação ao valor do espectro de referência, para acção sísmica tipo 1, na Zona 1 e em terreno tipo A.*

Verifica-se, pelo apresentado anteriormente, que o programa de cálculo automático gera acelerogramas válidos para o exemplo apresentado.

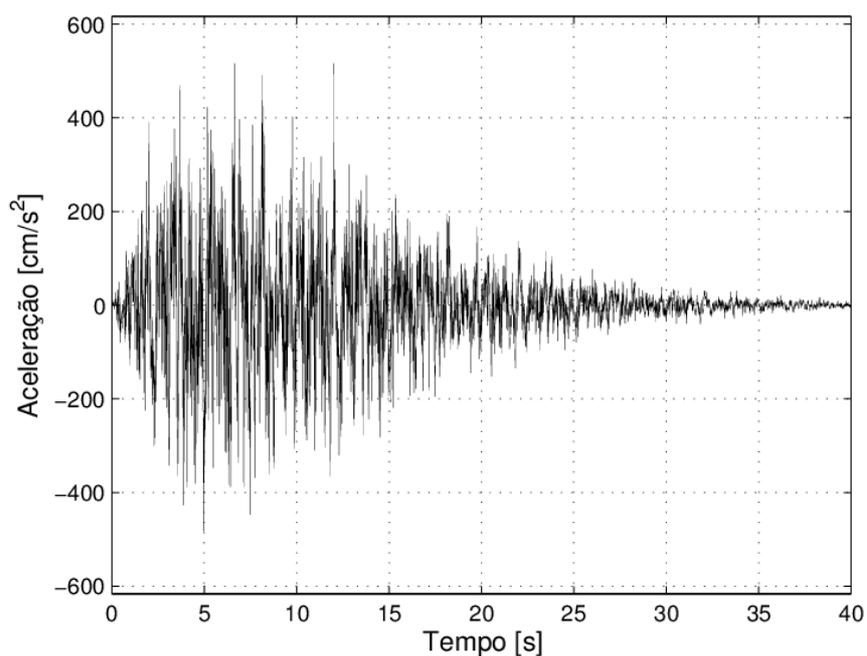
### 3.2 Acção sísmica tipo 2, Zona 2, terreno C

As características da acção sísmica do primeiro exemplo incluídas no ficheiro de input de dados - **INPUT.DAD** - estão apresentadas na Fig. 9.

<b>SISREF</b>
2
2
C
5
<b>SISUSER</b>
<b>7</b>
40
4
<b>0.5</b>

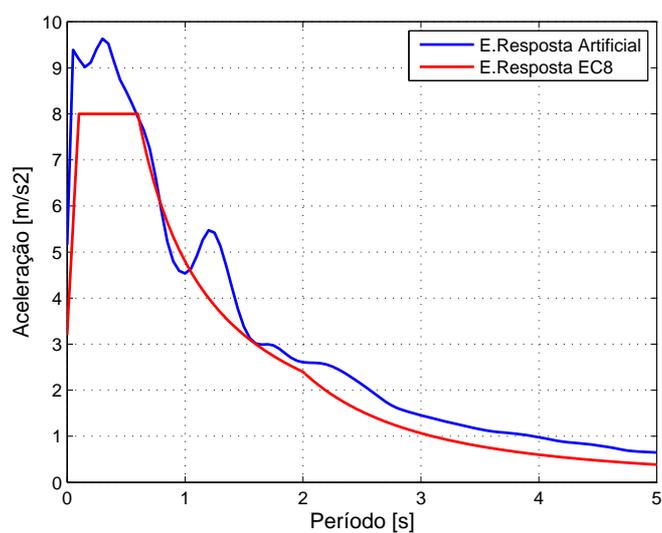
Fig. 9 – Parâmetros de entrada do programa de cálculo **ArtSisGen**.

O acelerograma artificial que resultou está apresentado na Fig. 6.



*Fig. 10 – Acelerograma artificial, para acção sísmica tipo 2, na Zona 2 e em terreno tipo C.*

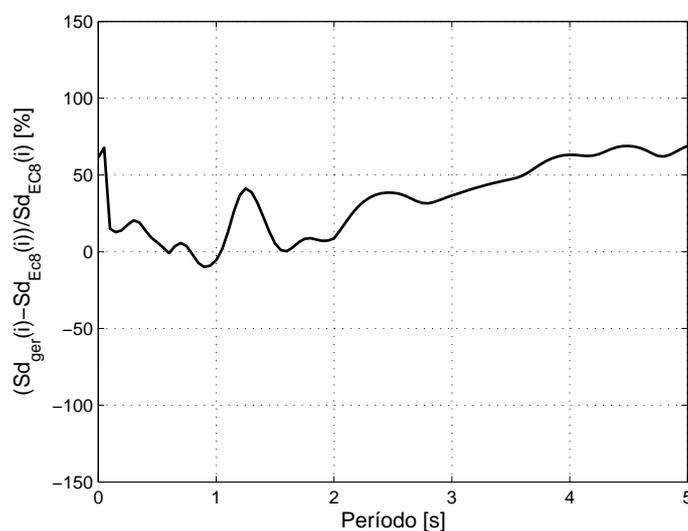
A Fig. 11 estabelece a comparação entre o espectro de resposta do sismo de referência e o do sismo gerado artificialmente, já escalado.



*Fig. 11 – Comparação entre espectro de resposta de acelerograma artificial e espectro de referência, para acção sísmica tipo 2, na Zona 2 e em terreno tipo C.*

Os pontos seguintes apresentam as características do acelerograma gerado para as condições de aceitação definidas no Eurocódigo 8:

- A duração do sismo foi definida explicitamente em 40 s. O acelerograma tem a duração imposta de 40s, que é superior aos 10s impostos regulamentarmente;
- A pseudo-aceleração do espectro de resposta gerado a partir do acelerograma artificial é de  $5.1 \text{ m/s}^2$  para  $T = 0\text{s}$ . Este valor é superior ao limite  $a_g \cdot S$ , que neste caso assumiria o valor de  $3.2 \text{ m/s}^2$  ( $a_g = 2.0$ ,  $S = 1.6$ );
- A relação entre o mínimo da pseudo-aceleração espectral do acelerograma gerado artificialmente e a do espectro de resposta de referência no período correspondente, é de 8%, no intervalo entre 0.1 e 1s ( $0.2T_1$  até  $2T_1$ ). A Fig. 8 apresenta a relação entre os valores dos dois espectros, para mais fácil identificação. O erro é, no entanto, significativo para períodos fora daquela gama.



*Fig. 12 – Erro entre espectros de resposta de acelerograma artificial e espectro de referência, em relação ao valor do espectro de referência, para acção sísmica tipo 2, na Zona 2 e em terreno tipo C.*

Verifica-se, pelo apresentado anteriormente, que o programa de cálculo automático gera acelerogramas válidos para o exemplo apresentado.

## 4 CONCLUSÕES

Apesar de válida e cómoda para a maior parte das aplicações da engenharia civil, a representação da acção sísmica através de espectros de resposta não é válida para todas as situações em que se pretende avaliar o comportamento de estruturas face à acção sísmica.

O Eurocódigo 8 permite o recurso a três métodos distintos de criação de acelerogramas compatíveis com as acções de referência regulamentares. São eles:

- Acelerogramas artificiais;
- Acelerogramas registados;
- Acelerogramas simulados.

Dos três métodos propostos o primeiro corresponde ao de mais simples adaptação.

No presente documento apresentou-se a metodologia com base na qual foi desenvolvido um programa de cálculo automático – **ArtSisGen** – que permite criar acelerogramas artificiais compatíveis com os espectros de resposta regulamentares.

Os exemplos de aplicação realizados, cujos resultados se apresentaram na secção 3 deste documento, demonstram a aplicabilidade do programa de cálculo à geração de acelerogramas compatíveis com os requisitos regulamentares.

## 5 REFERÊNCIAS

- [1] CT115, NP EN 1998-1: Projecto de estruturas para resistência aos sismos Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios, IPQ. (2009) 230.
- [2] J.M.C. Estêvão, C.S. Oliveira, Utilização de acelerogramas simulados na análise sísmica de estruturas, in: Sísmica 2010 - 8º Congresso De Sismologia E Engenharia Sísmica, Aveiro, Portugal, 2010: pp. 1-12.
- [3] R.W. Clough, J. Penzien, Dynamics of structures, 3rd ed., USA, Computers & Structures, 2003.
- [4] L. Guerreiro, Acção sísmica. Engenharia Sísmica de Pontes, Lisboa, 2011.
- [5] J.M.C. Estêvão, M. Jesus, Aplicação de técnicas de optimização na utilização de acelerogramas registados, in: Sísmica 2007 - 7º Congresso De Sismologia E Engenharia Sísmica, 2007: pp. 1-13.
- [6] M.R. Fragoso, Programa de cálculo automático SPECTRUM\_P. Cálculo de espectros de potência compatíveis com espectros de resposta de acções sísmicas. Versao 1.0, (2004) 8.
- [7] M.R. Fragoso, Programa de cálculo automático Spectrum\_R. Cálculo de espectros de resposta de movimentos sísmicos. Versão 1.0. Manual de utilização do programa., Dados. (2004) 1-4.
- [8] M.R. Fragoso, LREC/DSEMC - Rel. 42/2004. Modelação de acções sísmicas por espectros de potência., Ponta Delgada, 2004.

Autoria

Pedro Medeiros

Técnico Superior (Eng. Civil)

Visto

O Director de Serviços

de

Estruturas e Materiais de Construção

José Carlos Oliveira

Visto

O Director do LREC

António Pereira Alves Calado