

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE OPTIMIZAÇÃO NA UTILIZAÇÃO DE ACELEROGRAMAS REGISTADOS

JOÃO M.C. ESTÊVÃO

Professor Adjunto
ADEC-EST-UALG
Faro – Portugal

MÁRIO JESUS

Professor Adjunto
ADEC-EST-UALG
Faro – Portugal

SUMÁRIO

Actualmente, existe uma grande difusão de aparelhos digitais do tipo “strong-motion”, por todo mundo, que permitem registar movimentos sísmicos intensos. Também começa a ser frequente esses registos estarem disponíveis, na Internet, para acesso livre. O Eurocódigo 8 (EN 1998-1:2004) permite a representação da acção sísmica, no domínio do tempo, por intermédio de um número, não inferior a três, de acelerogramas registados. No entanto, a escolha desses acelerogramas, de forma a cumprir as regras impostas pelo EC8, reveste-se de alguma complexidade. Neste trabalho, apresentamos uma metodologia para selecção dos acelerogramas a utilizar nas análises sísmicas de estruturas. O que propomos é a escolha de um conjunto de factores multiplicadores dos acelerogramas, que ajustam os valores dos respectivos espectros de resposta às regras impostas pelo EC8. Recorre-se a técnicas de optimização numérica, por forma a quantificar os valores desses factores. Eles são determinados de modo a minimizarem a soma dos desvios em relação ao espectro de resposta objectivo, para o tipo de terreno em causa. A mesma técnica pode ser utilizada na determinação dos valores de T_B , T_C e T_D dos espectros do EC8, depois de normalizados os espectros de resposta dos acelerogramas registados. São apresentados exemplos de aplicação das metodologias propostas a alguns casos de estudo.

1. MOTIVAÇÃO E ENQUADRAMENTO

As análises dinâmicas não lineares de solos e de estruturas exigem a representação da acção sísmica, no domínio do tempo, na forma de acelerogramas. De acordo com o Eurocódigo 8 [1], os acelerogramas a utilizar poderão ser artificiais, simulados ou registados instrumentalmente, consistentes com as características dos solos do local em estudo.

Os acelerogramas artificiais são funções do tempo ajustadas a um espectro de resposta de acelerações absolutas, não traduzindo o efeito de um evento sísmico, em termos de magnitude, distância ao foco ou duração das vibrações. Já os acelerogramas simulados, são gerados de modo a reproduzirem, de forma aproximada, a influência da magnitude, do mecanismo focal e do caminho de propagação, de modo a se ajustarem às características das fontes sísmogénicas. Existe, no entanto, alguma discussão sobre as vantagens e os inconvenientes das várias abordagens para o problema, tendo em conta os pontos de vista dos sismologistas e dos engenheiros sísmicos de estruturas [2].

Uma das principais vantagens da utilização de acelerogramas registados, em detrimento da utilização de acelerogramas artificiais e simulados, reside na eliminação de um conjunto de características irrealistas, quer no conteúdo espectral, quer no desfazamento das várias harmónicas que constituem um registo sísmico [3,4].

A utilização de acelerogramas registados nas análises sísmicas dinâmicas não lineares, tem vindo a ganhar adeptos entre os engenheiros de estruturas, à medida que as bases de dados (de acesso livre na Internet) de registos “strong motion” têm vindo a aumentar em número e volume de dados. No entanto, a utilização desses registos pode apresentar alguma complexidade na actividade de projecto de um engenheiro civil, atendendo às regras de selecção do Eurocódigo 8 (EC8), que em seguida se enunciam:

- É necessário a utilização de um mínimo de três acelerogramas (sete caso se pretenda utilizar o valor médio dos resultados);

- Os acelerogramas devem ser escalados para o valor de $a_g \cdot S$ do solo em causa;
- O valor médio que se obtém dos espectros de resposta individuais, para o período $T = 0$ segundos, não deve ser inferior a $a_g \cdot S$;
- No intervalo entre $0.2 \cdot T_1$ e $2 \cdot T_1$, sendo T_1 o período fundamental da estrutura, e na direcção em que o acelerograma é aplicado, o valor médio dos espectros de resposta elásticos, calculados para 5 % de coeficiente de amortecimento viscoso, a partir dos acelerogramas, não pode ser inferior a 90 % do correspondente espectro de resposta elástico regulamentar.

Encontrar registos de sismos, sem aplicação de um factor de escala, que se enquadrem nestes critérios de selecção, torna-se uma tarefa difícil, tendo em conta a grande dispersão de valores associados aos acelerogramas registados [4].

A afectação de um factor de escala à amplitude do registo é permitida pelo EC8 e é uma forma de se conseguir o ajuste aos critérios atrás referidos. Existem diversas técnicas para escalar os acelerogramas, umas mais elaboradas do que outras. No entanto, o que se verifica de alguns estudos, é que as metodologias mais complexas não têm como consequência uma melhoria significativa na variabilidade dos resultados [5], existindo mesmo estudos demonstrando que as consequências da aplicação de factores de escala às amplitudes dos registos, nos resultados das análises dinâmicas não lineares de estruturas de edifícios, são negligenciáveis [6].

Por outro lado, os espectros de resposta elásticos regulamentares, têm que se ajustar aos registos de sismos que, com uma determinada probabilidade de excedência, poderão vir a afectar o local em estudo. No EC8 é definida uma função que traduz o espectro de resposta elástico $Se(T)$, para 5 % de coeficiente de amortecimento viscoso, que é expressa na equação (1).

$$Se(T) = \begin{cases} a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot 1.5 \right] & ; 0 \leq T \leq T_B \\ a_g \cdot S \cdot 2.5 & ; T_B \leq T \leq T_C \\ a_g \cdot S \cdot 2.5 \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right] & ; T_C \leq T \leq T_D \\ a_g \cdot S \cdot 2.5 \cdot \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right] & ; T_D \leq T \leq 4 \text{ s} \end{cases} \quad (1)$$

Cada Anexo Nacional ao EC8 deverá apresentar os valores de S , T_B , T_C e T_D que se ajustam às características dos sismos que poderão afectar a zona sísmica em questão e o solo tipo em causa [7].

É neste contexto que surge o presente trabalho, visando o desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo automático que optimize a resolução dos problemas inerentes à selecção e ajuste da amplitude dos acelerogramas, a utilizar nas análises dinâmicas não lineares (“**problema A**”), assim como permita otimizar a calibração dos parâmetros dos espectros de resposta elásticos regulamentares T_B , T_C e T_D (“**problema B**”), tendo em conta os valores verificados em sismos ocorridos a nível mundial.

Após a introdução, é feita uma apresentação dos critérios de selecção de acelerogramas registados instrumentalmente, assim como se apresenta uma metodologia para o cálculo dos respectivos espectros de resposta.

Depois, são propostos diversos problemas de optimização (com funções objectivo não lineares) e é apresentada uma variante ao método Complex para resolução dos referidos problemas de optimização.

Por fim, são apresentados os resultados de alguns exemplos de aplicação da metodologia proposta assim como as conclusões retiradas do trabalho realizado.

2. SELECÇÃO DE ACELEROGRAMAS REGISTRADOS

Foi desenvolvida uma ferramenta de cálculo automático que permite ler, directamente, os ficheiros dos registos existentes nas bases de dados escolhidas, assim como calcular os respectivos espectros de resposta elásticos.

As bases de dados que o programa, actualmente, permite tratar são:

- CISN - Engineering Strong Motion Data Center (<http://www.quake.ca.gov/cisn-edc/>).
- ESD - European Strong Motion Database (<http://www.isesd.cv.ic.ac.uk/>) [8].

Estas bases de dados têm as três componentes do sismo e apresentam uma boa caracterização dos solos onde os registos foram obtidos.

2.1. Critérios de selecção de acelerogramas

A selecção dos acelerogramas pode ser dificultada pela existência de muitas combinações de parâmetros associados aos sismos, tais como a magnitude, o mecanismo de ruptura, a distância ao foco ou à ruptura, assim como as características dos solos, que nem sempre estão bem definidas. A aplicação de um factor de escala aos acelerogramas, de modo a serem ajustados ao espectro de resposta regulamentar, é uma prática aceitável, desde que se seleccione sismos de magnitudes semelhantes, não sendo, nessas condições, tão importante a variabilidade da distância [3].

Quando se pretende o ajuste aos espectros do EC8, alguns autores [4] sugerem que, além das condições impostas pelo EC8 à selecção e ajuste dos acelerogramas registados (por considerarem que também têm influência nos resultados das análises não lineares de estruturas), se tenha ainda em conta os seguintes aspectos:

- Os desvios do espectro médio dos registos, em relação ao espectro regulamentar;
- O máximo desvio de um só espectro em relação ao espectro regulamentar;
- A escolha dos vários acelerogramas incida sobre registos de diversos eventos sísmicos;

Tendo em conta os aspectos referidos anteriormente, em relação ao “problema A” deste trabalho, propomos o seguinte:

- Quantificação dos espectros de resposta elásticos $Se(T)$, para 5 % de coeficiente de amortecimento viscoso, dos acelerogramas dos registos e normalização dos referidos espectros em relação ao valor que se obtém para o período nulo, de acordo com a expressão (2)

$$\bar{Se}(T) = \frac{Se(T)}{Se(0)} \quad (2)$$

- Cálculo do valor do desvio σ (3), em relação ao espectro objectivo normalizado do EC8.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N_f} \sum_{i=1}^{N_f} (\bar{Se}_{EC8}(T_i) - \bar{Se}_{reg}(T_i))^2} \quad (3)$$

A selecção dos acelerogramas deve recair sobre os registos de magnitudes e distâncias ao foco (ou ao epicentro) que se enquadrem na perigosidade sísmica da região onde se localiza a estrutura em estudo, e que apresentem desvios σ tão pequenos quanto o possível, tendo em conta os registos existentes nas bases de dados consultadas.

Também deverá ser dada atenção à duração dos acelerogramas candidatos a serem utilizados no cálculo da resposta sísmica das estruturas de edifícios. As durações dos registos existentes nas bases de dados dependem não só da magnitude, da distância ao foco e da natureza do solo, mas também da sensibilidade dos diversos equipamentos usados no registo de movimentos sísmicos intensos, assim como da sua calibração.

De modo a que os vários acelerogramas sejam comparáveis entre si, e tendo em vista a redução do enorme esforço computacional associado às análises dinâmicas não lineares de edifícios, quando o registo é muito longo,

será necessário estabelecer critérios objectivos para a determinação da duração a considerar. Esta tarefa é dificultada pelo facto de existirem muitos critérios para a definição da duração [9], não existindo um critério objectivo definido no EC8, para além da referência ao valor de 10 segundos a considerar como valor mínimo da parte estacionária dos acelerogramas gerados artificialmente.

Neste trabalho, é proposto que a duração total dos registos (t_f) seja truncada à duração efectiva (τ_{ef}), tal como é definida por Bommer e Martinez-Pereira [9], a partir do gráfico de Husid (Figura 1), sendo

$$\tau_{ef} = t_2 - t_1 \quad (4)$$

em que t_1 e t_2 correspondem aos instantes em que os valores de AI_1 e AI_2 atingem determinada percentagem do valor total do acelerograma (AI_f), sendo $AI_{(t)}$ dada pela seguinte expressão (intensidade de Arias):

$$AI_{(t)} = \frac{\pi}{2g} \int_0^t a_{g(t)}^2 dt \quad (5)$$

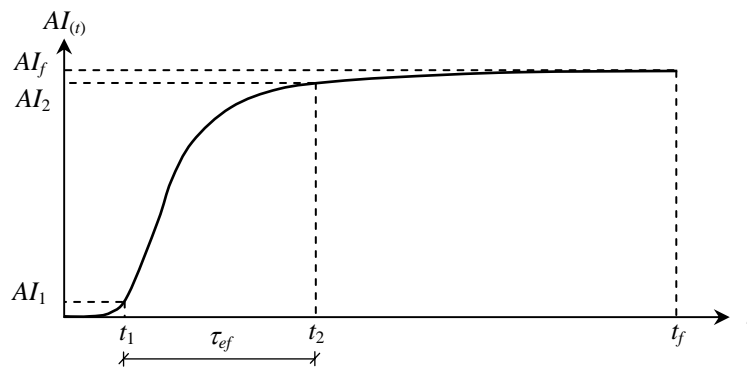


Figura 1: Definição da duração efectiva τ_{ef} do acelerograma.

2.2. Quantificação dos espectros de resposta

Os acelerogramas registados são funções do tempo compostas por segmentos de recta entre cada duas leituras do equipamento de registo, como é exemplificado na Figura 2.

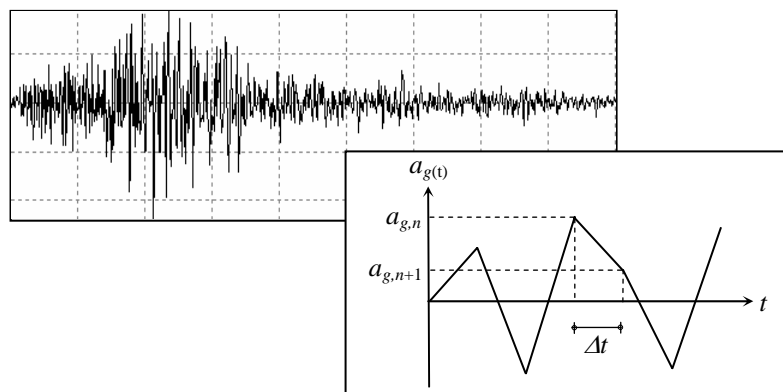


Figura 2: Ilustração de um acelerograma registado.

O espectro de resposta de um acelerograma corresponde ao valor máximo da resposta de um oscilador linear de um grau de liberdade com período T , sujeito a esse acelerograma. Existem diversas metodologias para a

quantificação da resposta de um oscilador linear com 5 % de coeficiente de amortecimento viscoso [10,11,12,13], cuja equação de movimento é

$$\ddot{d}_{(t)} + \frac{0.2\pi}{T} \cdot \dot{d}_{(t)} + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot d_{(t)} = - \left[a_{g,n} + \frac{a_{g,n+1} - a_{g,n}}{\Delta t} \cdot (t - t_n) \right] \quad (6)$$

em que $\ddot{d}_{(t)}$ é a aceleração relativa, $\dot{d}_{(t)}$ é a velocidade relativa e $d_{(t)}$ é o deslocamento relativo do oscilador.

A partir da solução analítica da equação diferencial, no intervalo de tempo Δt , foi desenvolvido um algoritmo computacional (Figura 3) para o cálculo do espectro de resposta de acelerações absolutas.

Como forma de ser assegurado o rigor do algoritmo proposto, foram calculados os espectros de resposta a partir de outros métodos: resolução analítica do Integral de Duhamel e através do Método de Newmark-beta (com aceleração constante). Dos testes realizados, foi verificada bastante maior rapidez de cálculo com o algoritmo desenvolvido, para a mesma precisão de resultados.

O cálculo é realizado para os N pontos do acelerograma e para os N_T pontos do espectro de resposta. Para aumentar o rigor do cálculo, os intervalos de leitura do registo Δt foram subdivididos em 10 intervalos menores.

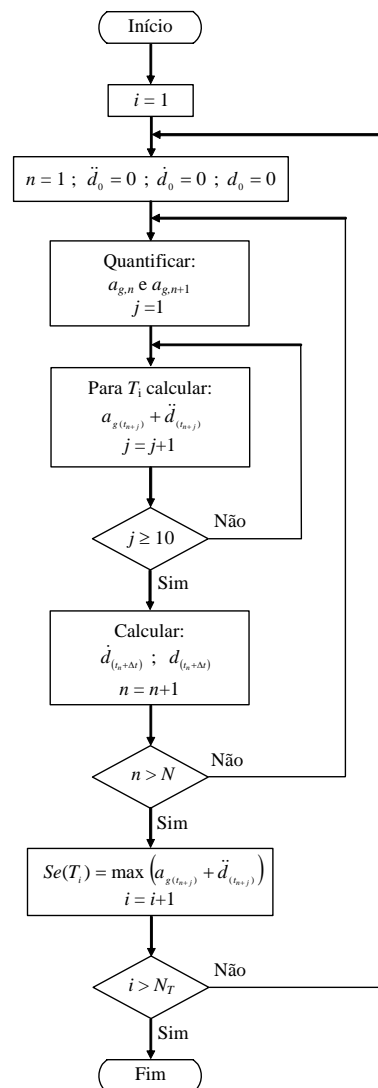


Figura 3: Esquematização do algoritmo desenvolvido para o cálculo do espectro de resposta.

3. METODOLOGIAS PARA APROXIMAÇÃO DE SOLUÇÕES

Já foi sugerido por alguns autores [14] que os N_R acelerogramas registados seleccionados para as análises não lineares sejam escalados em resultado da resolução de um problema de optimização (minimização) não restringido, em que a função objectivo corresponde ao erro entre o espectro de resposta escalado do registo e o espectro de resposta definido no EC8. Neste trabalho, é apresentada uma abordagem mais alargada ao problema, com a inclusão das restrições impostas pelo EC8, visando dois objectivos distintos, aqui designados por “problema A” e “problema B”.

3.1. Ajuste dos acelerogramas ao espectro objectivo (“Problema A”)

Neste problema de optimização, o objectivo é escalar os acelerogramas de modo a minimizar os desvios entre os respectivos espectros de resposta e os do EC8, para o solo em causa, de modo a serem verificadas as restrições às análises não lineares impostas pelo referido EC8, como em seguida se apresenta:

Variáveis: α_i – factor de escala do acelerograma registado i

$$\text{Minimizar } F(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{N_R}) = \sum_{n=1}^{N_R} \sum_{i=1}^{N_T} (Se_{EC8}(T_i) - \alpha_n \cdot Se_{reg.n}(T_i))^2$$

Sujeito a

$$Se_{EC8}(0) - \frac{1}{N_R} \sum_{n=1}^{N_R} \alpha_n \cdot Se_{reg.n}(0) \leq 0 \quad (7)$$

$$0.9 \cdot Se_{EC8}(T_i) - \frac{1}{N_R} \sum_{n=1}^{N_R} \alpha_n \cdot Se_{reg.n}(T_i) \leq 0 ; T_i = 0.2T1, \dots, T1, \dots, 2T1$$

$$\alpha_i > 0 ; i = 1, 2, \dots, N_R$$

em que T_i é o período do ponto i do espectro de resposta e $T1$ é o período fundamental da estrutura a analisar.

3.2. Determinação dos parâmetros de um espectro tipo (“Problema B”)

No segundo problema de optimização, o objectivo é a determinação dos parâmetros que ajustem o espectro tipo normalizado do EC8, definido pela equação (1), à média dos espectros normalizados de um conjunto de sismos registados, ou ao máximo valor destes.

Este problema terá que ser subdividido em dois, um para as componentes horizontais e outro para a componente vertical, tal como se apresenta nos pontos seguintes.

3.2.1. Componentes horizontais

Neste caso, as únicas restrições dizem respeito à relação de grandeza entre os períodos T_B , T_C e T_D , que são as variáveis do problema.

Variáveis: T_B , T_C e T_D

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } F(T_B, T_C, T_D) &= \sum_{i=1}^{N_T} \left(\frac{1}{N_R} \sum_{n=1}^{N_R} \bar{S}e_{reg.n}(T_i) - \bar{S}e_{EC8}(T_i, T_B, T_C, T_D) \right)^2 \\ \text{ou } F(T_B, T_C, T_D) &= \sum_{i=1}^{N_T} \left(\text{máx. } \bar{S}e_{reg.n}(T_i) - \bar{S}e_{EC8}(T_i, T_B, T_C, T_D) \right)^2 \end{aligned} \quad (8)$$

Sujeito a

$$0 \leq T_B \leq T_C \leq T_D \leq 4 \text{ segundos}$$

3.2.2. Componente vertical

O EC8 apresenta uma função para o espectro de resposta tipo (com 5 % de coeficiente de amortecimento viscoso) da componente vertical (9), distinta da função (1), definida para as componentes horizontais.

$$Sve(T) = \begin{cases} a_{vg} \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot 2 \right] & ; 0 \leq T \leq T_B \\ a_{vg} \cdot 3 & ; T_B \leq T \leq T_C \\ a_{vg} \cdot 3 \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right] & ; T_C \leq T \leq T_D \\ a_{vg} \cdot 3 \cdot \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right] & ; T_D \leq T \leq 4 \text{ s} \end{cases} \quad (9)$$

Além disso, também o valor de aceleração de pico de referência (a_{vg}), para esta componente do sismo, é indexado ao valor (a_g) definido para as componentes horizontais, tal como se indica na equação (10).

$$a_{vg} = \alpha_v \cdot a_g \quad (10)$$

O que propomos é a normalização dos espectros de resposta da componente vertical dos registos seleccionados, ao valor da combinação quadrática simples, para período nulo, dos respectivos espectros das componentes horizontais. Em alternativa, será possível a normalização em relação ao máximo valor de aceleração de pico das duas componentes horizontais.

Variáveis: α_v , T_B , T_C e T_D

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } F(\alpha_v, T_B, T_C, T_D) &= \sum_{i=1}^{N_T} \left(\frac{1}{N_R} \sum_{n=1}^{N_R} \bar{S}ve_{reg.n}(T_i) - \bar{S}ve_{EC8}(T_i, \alpha_v, T_B, T_C, T_D) \right)^2 \\ \text{ou } F(\alpha_v, T_B, T_C, T_D) &= \sum_{i=1}^{N_T} \left(\text{máx. } \bar{S}ve_{reg.n}(T_i) - \bar{S}ve_{EC8}(\alpha_v, T_i, T_B, T_C, T_D) \right)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

Sujeito a

$$\alpha_v > 0$$

$$0 \leq T_B \leq T_C \leq T_D \leq 4 \text{ segundos}$$

3.3. Método Complex proposto

Os problemas de optimização descritos nos pontos anteriores, apresentam funções objectivo não lineares. Existem diversos métodos para a resolução deste tipo de problemas [15].

Atendendo às características dos problemas apresentados, foi desenvolvida uma adaptação a diversas variantes do método Complex [15,16,17].

Este método, proposto em 1965 por Box como uma extensão ao método Simplex, apresenta uma grande simplicidade, tendo sido verificada a convergência para os problemas estudados (7,8,11), em todos os testes realizados. Também apresenta a grande vantagem de não necessitar do armazenamento de grandes estruturas de dados, o que, atendendo ao elevado número de restrições do “problema A” (dado que temos um intervalo de números reais entre $0.2T1$ e $2T1$), facilita a gestão computacional do método. Por outro lado, a generalidade dos métodos destinados à resolução de problemas não lineares de optimização com restrições, exige o cálculo das derivadas das funções, o que constitui um difícil obstáculo à implementação dos algoritmos, o que não acontece com o método proposto.

A variante do método Complex desenvolvida está esquematizada na Figura 4.

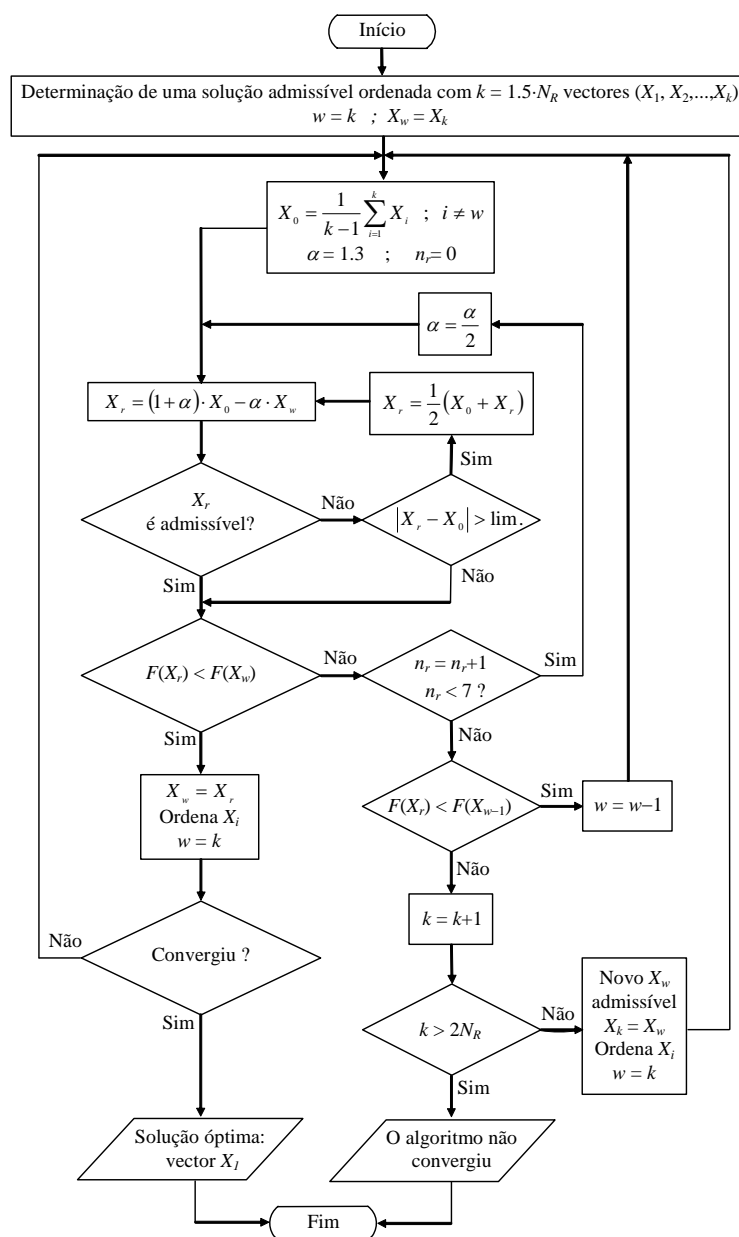


Figura 4: Esquematização do método Complex desenvolvido.

Os vectores são ordenados em ordem decrescente pelo valor da função objectivo de X_1 para X_k .

A convergência é atingida quando os limites à distância entre dois vectores e a amplitude de valores observáveis, são atingidos. A não convergência poderá estar associada à existência de uma função objectivo com fraca variação de amplitude ou à hipótese do vector X_k ficar aprisionado entre óptimos locais, o que nunca aconteceu nos problemas estudados.

4. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Para aplicação da metodologia proposta a alguns exemplos, foi seleccionado um conjunto de oito registos das bases de dados ESD e CISN, obtidos em rocha (de diversos tipos) a uma distância inferior a 40 km, relativa ao epicentro, em resultado da ocorrência de sismos com magnitudes de Richter compreendidas entre 5.7 e 6.5, e estão discriminados na Tabela 1.

A duração efectiva do acelerograma, para cada uma das três componentes do registo do sismo, foi calculada para valores de AI compreendidos entre 2.5 % e 97.5 % do total, tal como é sugerido por alguns autores [18].

Tabela 1 - Descrição dos registos utilizados nos exemplos de aplicação (obtidos em rocha).

Designação do sismo	Local do registo	Magnitude	Distância ao epicentro (km)	Duração efectiva (s)	Base de dados
Umbria Marche 1997	Assisi-Stallone	5.7	24	5.9 a 10.1	ESD
Kozani 1995	Kozani-Prefecture	6.5	17	9.9 a 12.6	ESD
South Iceland 2000	Minni-Nupur	6.5	13	7.3 a 8.3	ESD
Bitola 1994	Florina-Cultural Center	6.1	39	6.0 a 15.0	ESD
Big Bear 1992	Snow Creek	6.4	37	17.4 a 19.5	CISN
Whittier 1987	Mt. Wilson	6.1	19	11.9 a 14.8	CISN
Sierra Madre 1991	Mt. Wilson	5.8	7	4.1 a 5.3	CISN
Petrolia 1991	Cape Mendocino	6.0	13	5.6 a 12.7	CISN

4.1. Exemplo do “problema A”

Caso se pretenda a realização de uma análise não linear de uma estrutura com base em acelerogramas reais, o ajuste dos acelerogramas depende das características dinâmicas da estrutura a analisar. Por esse motivo, neste exemplo, foi assumido $T_1 = 0.5$ s como valor do período fundamental da estrutura a analisar.

Como desconhecemos os valores do Anexo Nacional ao EC8, neste exemplo é apresentado o ajuste dos espectros dos sismos da Tabela 1, ao espectro objectivo de referência do EC8, considerando $a_g = 177$ cm/s², que corresponde à aceleração de pico de cálculo que se obtém dos espectros de potência do sismo tipo I e terreno tipo I do Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes [19].

Na definição do espectro de resposta elástico, foram adoptados os valores de referência sugeridos no EC8 para rocha e sismos com magnitudes superiores a 5.5, como se indicam em seguida:

- Valores adoptados no exemplo (valores de referência para terreno tipo A do EC8):

Componentes horizontais: $S = 1.00$, $T_B = 0.15$, $T_C = 0.40$, $T_D = 2.00$ s.

Componente vertical: $\alpha_v = 0.90$, $T_B = 0.05$, $T_C = 0.15$, $T_D = 1.00$ s.

Os gráficos da esquerda da Figura 5, correspondem aos espectros de resposta dos acelerogramas referentes às componentes horizontais dos sismos da Tabela 1. À direita, são apresentados os espectros dos acelerogramas escalados de modo a serem cumpridas as restrições do EC8.

Das Figuras 5 e 6, é evidente que os espectros de resposta iniciais dos registos não cumpriam as restrições do EC8, designadamente no intervalo entre 0.1 s e 1 s, para as componentes horizontais.

Após a resolução do problema de minimização (7), os acelerogramas das várias componentes foram escalados de modo a que os respectivos espectros de resposta se ajustassem ao espectro objectivo, atendendo às restrições do EC8.

Os resultados estão apresentados nos gráficos seguintes (Figuras 5 e 6), com o período em segundos e a aceleração espectral em cm/s^2 . É de notar que os gráficos não apresentam a mesma escala vertical.

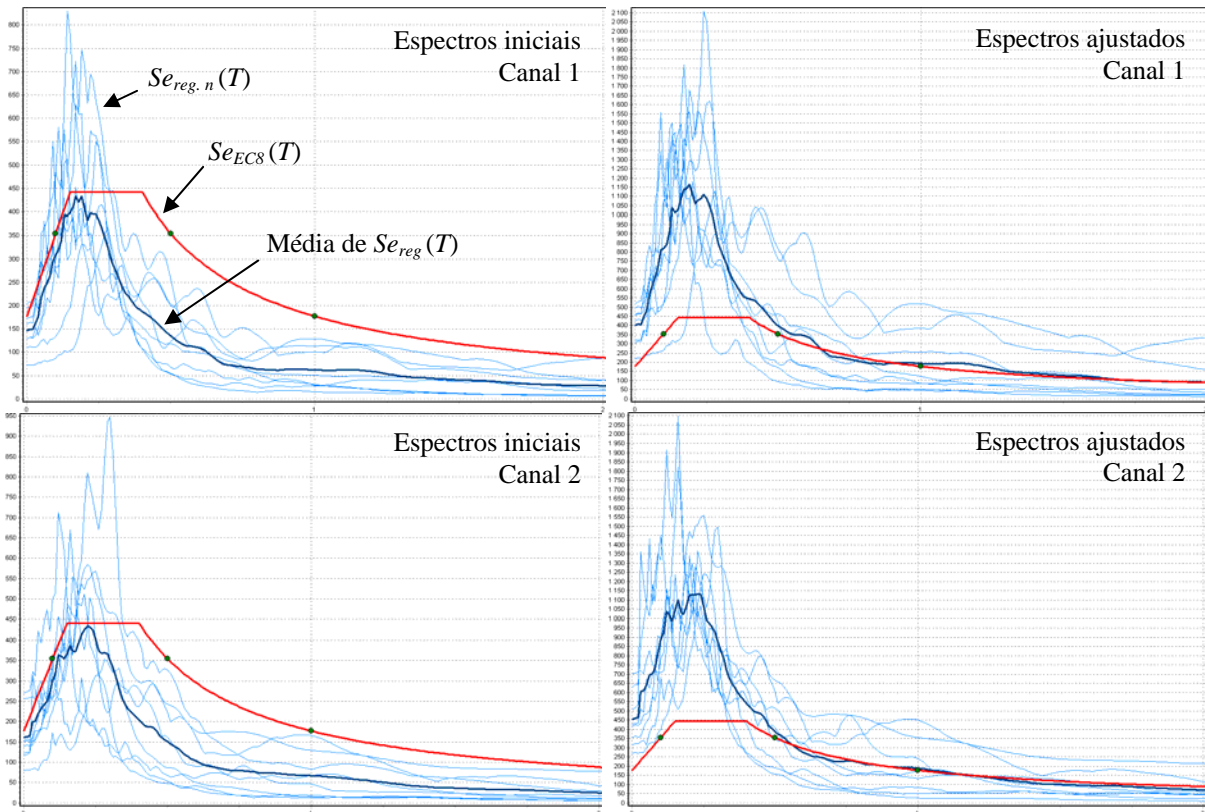


Figura 5: Espectros de resposta $T - Se(T)$ iniciais e ajustados dos sismos da Tabela 1 (componentes horizontais).

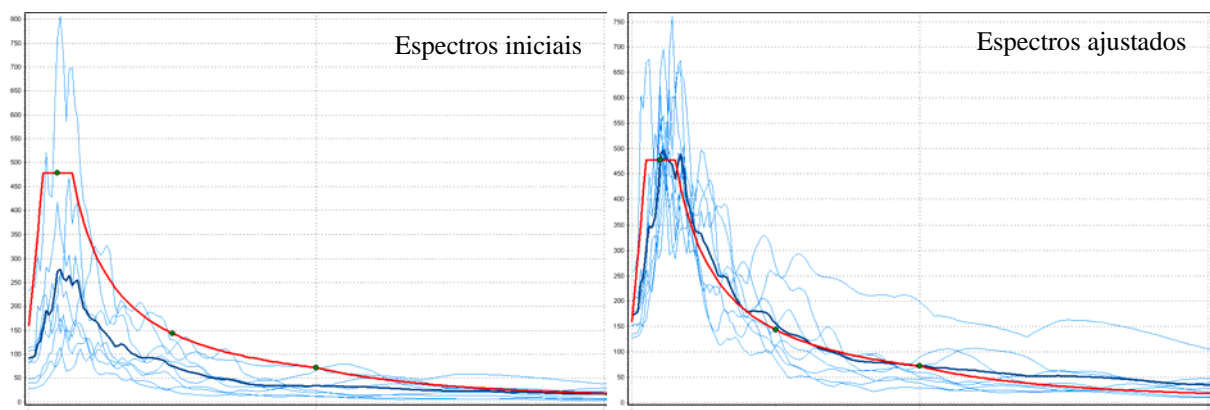


Figura 6: Espectros de resposta $T - S_{ve}(T)$ iniciais e ajustados dos sismos da Tabela 1 (componente vertical).

4.2. Exemplo do “problema B”

Para ilustrar as potencialidades do método na resolução do problema de optimização denominado por “problema B”, foram utilizados os sismos da Tabela 1.

Os parâmetros do espectro das componentes horizontais foram quantificados após a resolução do problema de minimização (8), considerando todos os espectros de resposta das componentes horizontais (16 espectros).

Em relação à componente vertical, os parâmetros foram obtidos após a normalização dos espectros em relação à combinação quadrática simples dos valores de período nulo dos espectros das componentes horizontais.

Todos os cálculos foram realizados com duas funções objectivo: uma com os valores médios dos espectros de resposta dos registos e outra com os valores máximos dos referidos espectros.

Os espectros de resposta normalizados obtidos estão apresentados nas figuras seguintes (período em segundos).

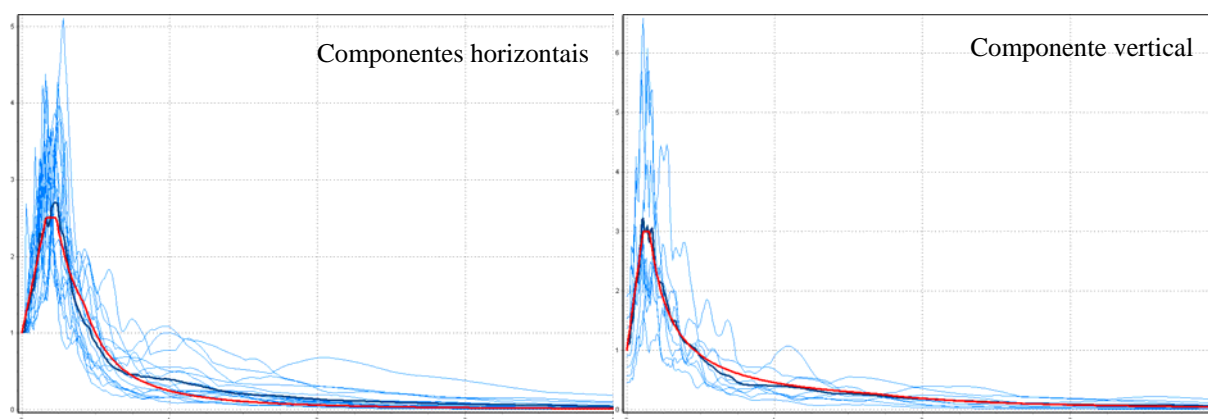


Figura 7: Espectros de resposta $T - \bar{S}_e(T), \bar{S}_{ve}(T)$ do exemplo do “problema B” (valores médios).

Valores médios determinados para rocha:

Componentes horizontais: $S = 1.00, T_B = 0.16, T_C = 0.23, T_D = 0.43$ s

Componente vertical: $\alpha_v = 0.37, T_B = 0.11, T_C = 0.15, T_D = 1.68$ s

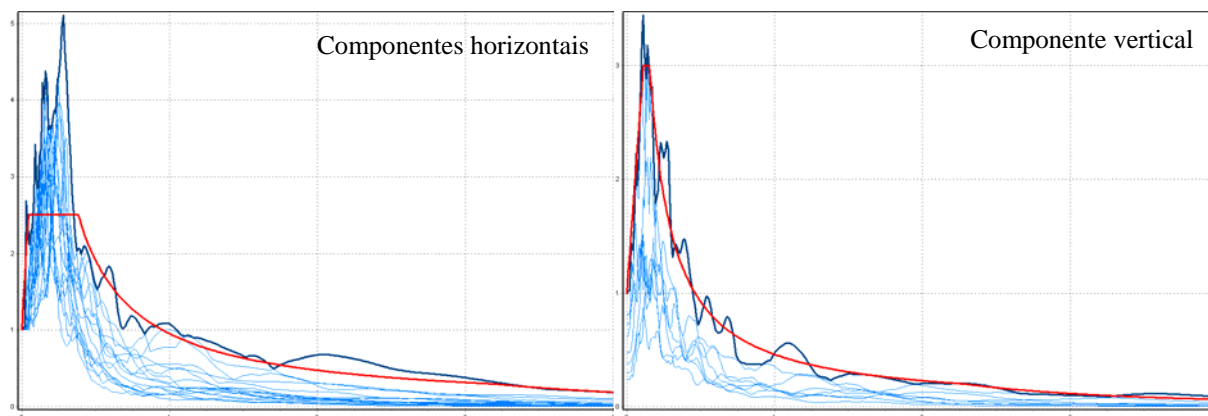


Figura 8: Espectros de resposta $T - \bar{S}_e(T), \bar{S}_{ve}(T)$ do exemplo do “problema B” (valores máximos).

Valores máximos determinados para rocha:

Componentes horizontais: $S = 1.00, T_B = 0.04, T_C = 0.38, T_D = 3.20$ s

Componente vertical: $\alpha_v = 0.70, T_B = 0.11, T_C = 0.15, T_D = 2.29$ s

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Dos muitos testes realizados à fiabilidade do método proposto, podemos concluir que se apresenta como uma boa opção para a resolução de problemas que envolvam a utilização de acelerogramas registados.

O método apresentou um excelente desempenho para qualquer um dos problemas A ou B, quer em tempo quer em sustentabilidade e mesmo em precisão.

Em relação ao “problema B”, o ajuste do valor de T_d , na zona do espectro com menos declive apresenta maior dificuldade computacional. Para permitir a obtenção de resultados mais precisos, o método foi alterado de modo a aumentar o número de pontos a processar nessa zona do espectro. Contudo, e atendendo a que a precisão anteriormente atingida já ser suficiente, optou-se por não propor essa alteração neste artigo.

Os exemplos aqui apresentados, designadamente referentes ao “problema B”, não pretendem ser conclusivos em relação aos valores de referência propostos no Eurocódigo 8 para os espectros de resposta elásticos, mas ilustram as potencialidades da metodologia proposta, e nesse sentido podemos concluir que o método apresentou um notável desempenho.

Em trabalhos futuros, atendendo à performance demonstrada pelo método aqui proposto, pretendemos aplicar a metodologia a todos os sismos das bases de dados já incluídas, assim como considerar outras bases de dados, de modo a, então, aferir os parâmetros dos espectros propostos no EC8, para todos os tipos de solos.

Também pretendemos desenvolver ferramentas de cálculo automático que incluam este método, de modo a possibilitar a análise não linear de solos e de estruturas de edifícios e pontes, com base em acelerogramas reais de sismos, eliminando muitos dos inconvenientes associados à utilização de acelerogramas artificiais ou mesmo em relação à utilização de acelerogramas simulados.

6. REFERÊNCIAS

- [1] CEN (2004) Eurocode 8, Design of Structures for Earthquake Resistance-Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. EN 1998-1: 2004. Comité Européen de Normalisation, Brussels.
- [2] Priestley, N. (2006) Seismological information for displacement-based design – A structural engineer’s wish list. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, ID K1a.
- [3] Bommer, J.J. ; Acevedo, A.B. and Douglas, J. (2003) The selection and scaling of real earthquake accelerograms for use in seismic design and assessment. Proceedings of ACI international conference on seismic bridge design and retrofit. La Jolla, California, American Concrete Institute.
- [4] Iervolino, I; Maddaloni, G. and Cosenza, E. (2006) Eurocode 8: Compliant record sets for seismic analysis of structures. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, ID 113.
- [5] Kappos, A.J. and Kyriakis, P. (2000) A re-evaluation of scaling techniques for natural records. *Soil dynamics and Earthquake Engineering* **20**, 111-123.
- [6] Iervolino, I. and Cornell, C.A. (2004) Sulla Selezione degli Accelerogrammi nella Analisi Non-lineare delle Strutture. XI Congresso Nazionale “L’ingegneria Sismica in Italia”, Genova.
- [7] Sabetta, F. and Bommer, J. (2002) Modification of the spectral shapes and subsoil conditions in Eurocode 8 (Electronic resource), Proceedings of the 12th European conference on earthquake engineering, Paper Reference 518.
- [8] Ambraseys, N.; Smit, P.; Sigbjornsson, R.; Suhadolc, P. and Margaris, B. (2002) Internet-Site for European Strong-Motion Data, European Commission, Research-Directorate General, Environment and Climate Programme.
- [9] Bommer J.J.; Martinez-Pereira, A. (1999) The effective duration of earthquake strong motion. *Journal of Earthquake Engineering* **3** (2), 127–172.
- [10] M.D. Trifunac. (2003) 70-th Anniversary of Biot Spectrum. *Journal of Earthquake Technology*, 23rd ISET Annual Lecture, Paper No. 431, Vol. 40, No. 1, March 2003, 19-50.
- [11] Clough, R.W. ; Penzien, J. (1993) *Dynamics of Structures*. 2ed. McGraw-Hill International Editions, 648 p.
- [12] Hart, G. C. and Wong, K (2000) *Structural Dynamics for Structural Engineers*. J. Wiley & Sons, New York, 608 p.
- [13] Cheng, F.Y. (2001) *Matrix Analysis of Structural Dynamics: Applications and Earthquake Engineering*, Marcel Dekker, New York, 997 p.

-
- [14] Lagarosa, N.D. et al. (2006) Structural optimization: A tool for evaluating seismic design procedures. *Engineering Structures* **28**, 1623–1633.
- [15] Rao, S.S. (1996) *Engineering optimization*. John Wiley & sons, Inc., New York, United States of America.
- [16] Richardson, J.A, and Kuester, J.L. (1971) The complex method for constrained optimization [E4], Algorithm 454, Digital Library from ACM, 487–488.
- [17] Hu, S-Y and Cheng, J-H (2005) Development of the unlocking mechanisms for the complex method. *Computers and Structures* **83**, 1991-2002.
- [18] Reinoso, E and Ordaz, M. (2001) Duration of Strong ground motion during Mexican earthquakes in terms of magnitude, distance to the rupture area and dominant site period. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* **30**, 653-673.
- [19] Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes. Decreto-lei nº235/83, de 31 de Maio. Lisboa: Imprensa Nacional - Casa da Moeda, 1983.