

## ESTUDO COMPARATIVO DE DIFERENTES MÉTODOS DE ANÁLISE SÍSMICA DE BARRAGENS GRAVIDADE



Eduardo M. Bretas\*

Bolseiro  
LNEC  
Lisboa  
ebretas@lnec.pt



António Lopes Batista

Investigador  
LNEC  
Lisboa  
a.l.batista@lnec.pt



José Vieira de Lemos

Investigador  
LNEC  
Lisboa  
vlemos@lnec.pt



Pierre Léger

Professor  
École Polytechnique de  
Montréal  
pierre.leger@polymtl.ca

### SUMÁRIO

A análise sísmica de barragens inicia-se, em regra, por meio de métodos simplificados, prosseguindo, caso necessário, através de métodos mais sofisticados. Para barragens gravidade, esta análise progressiva envolve geralmente (i) o método pseudo-estático, (ii) o método pseudo-dinâmico, (iii) a análise dinâmica linear no tempo e (iv) a análise dinâmica não linear no tempo. Neste trabalho é apresentado o estudo de 52 modelos, representando barragens gravidade com diferentes características, utilizando os quatro métodos de análise (i-iv), tendo em conta dois sismos de diferentes intensidades, como forma de analisar a resposta elástica e a resposta não-linear dos modelos. O objetivo principal é verificar o interesse da utilização desta metodologia progressiva de análise e o seu âmbito de aplicação.

**Palavras-chave:** Barragens gravidade; análise sísmica; metodologia progressiva.

### 1. INTRODUÇÃO

Inúmeros aspetos influenciam a seleção e a aplicação do método de análise para o estudo sísmico de barragens. Muitos destes aspetos dependem do nível de interação barragem-reservatório-sedimentos-fundação que deve ser considerado em cada caso. A

representação do efeito hidrodinâmico do reservatório, bem como das pressões internas de subpressão, são exemplos da interação de diferentes fenómenos que interessa ter conta. Muitos regulamentos sugerem a avaliação das respostas da estrutura para um sismo com intensidade moderada, para a qual a barragem deve apresentar um comportamento linear e elástico, e para um sismo com intensidade elevada, para o qual se pode admitir que a barragem possa sofrer alguns danos, mantendo porém a capacidade de reter a água do reservatório. Os critérios de avaliação do comportamento sísmico de barragens devem avaliar mecanismos de rotura locais, como o esmagamento e a fendilhação do material com base na análise de tensões na estrutura, mas também mecanismos de rotura globais, tais como a possibilidade de deslizamento permanente da barragem pelo plano de fundação ou através de qualquer secção da barragem.

Muitas vezes a análise sísmica de barragens inicia-se através de métodos simplificados e prossegue, caso necessário, através de métodos mais sofisticados. Admite-se que os métodos simplificados, que exigem menos recursos, produzem resultados mais conservadores, enquanto métodos mais sofisticados, que exigem mais recursos, permitem a obtenção de resultados mais realistas. O objetivo deste trabalho é investigar a eficácia de uma metodologia de análise progressiva, que inclua métodos simplificados e sofisticados, e avaliar o seu âmbito de aplicação. Foi realizado o estudo de 52 modelos de barragens gravidade, representando barragens com diferentes alturas e propriedades, através de quatro métodos de análise sísmica, nomeadamente (i) o método pseudo-estático, (ii) o método pseudo-dinâmico, (iii) a análise dinâmica linear no tempo e (iv) a análise dinâmica não linear no tempo. Para cada modelo foram ainda considerados dois sismos com diferentes intensidades, moderada e elevada, como forma de obter a resposta elástica e a resposta não-linear dos modelos. Os resultados relativos ao sismo com intensidade moderada foram já apresentados e discutidos num trabalho anterior [1], porém são incluídos novamente neste trabalho, em conjunto com os resultados obtidos com o sismo de intensidade elevada. Os principais resultados apresentados incluem a distribuição de tensões ao longo da base da barragem, o fator de segurança ao deslizamento e o deslizamento permanente da barragem ao longo do plano de fundação.

## **2. DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE ANÁLISE UTILIZADOS**

Como mencionado anteriormente, as análises foram realizadas através de quatro métodos distintos: método pseudo-estático (PE), método pseudo-dinâmico (PD), análise dinâmica linear no tempo (L) e análise dinâmica não-linear no tempo (NL). Os dois primeiros métodos, pseudo-estático e pseudo-dinâmico, foram resolvidos com recurso à ferramenta numérica CADAM [2]. Neste código computacional o cálculo de estabilidade é realizado considerando o equilíbrio do corpo rígido, sendo as tensões determinadas através da teoria das peças lineares. Os últimos dois métodos, que consideram análises dinâmicas linear e não-linear no tempo, foram resolvidos através de uma ferramenta numérica desenvolvida com base no

método dos elementos discretos, elaborada especificamente para a análise estrutural de barragens gravidade [3].

No método pseudo-estático, as forças de inércia são o produto da massa, incluindo as massas associadas, pela aceleração. Não é considerada a amplificação dinâmica das forças de inércia ao longo da altura da barragem, bem como é desprezada a natureza oscilatória da ação dinâmica. As tensões são determinadas a partir da aceleração máxima de referência, enquanto o fator de segurança ao deslizamento é calculado com base na aceleração permanente, que corresponde a 2/3 do valor da aceleração máxima de referência. O método pseudo-dinâmico é semelhante ao método pseudo-estático, exceto no facto de considerar a amplificação dinâmica das forças de inércia na direção horizontal, ao longo da altura da barragem, através do espectro de resposta, conforme descrito por Chopra [4].

A análise dinâmica linear no tempo é realizada com um modelo de elementos discretos composto por duas malhas contínuas que representam a barragem e a fundação. Nesta análise a interface entre a barragem e a fundação foi considerada com propriedades elásticas, caracterizadas por valores de rigidez normal de 20 GPa/m e de rigidez de corte de 7 GPa/m. A análise dinâmica não linear no tempo é semelhante à análise linear, com exceção do modelo constitutivo da junta entre a barragem e o plano de fundação, que assume um comportamento não-linear representado pelos critérios Rankine, à tração, e de Mohr-Coulomb, ao corte, caracterizados por um ângulo de atrito de 45° e coesão e resistência à tração nulas.

### **3. DESCRIÇÃO DOS MODELOS**

#### **3.1 Geometria das barragens e propriedades dos materiais**

Foram consideradas barragens com quatro alturas muito distintas (Figura 1), que pretendem representar obras de diferentes dimensões. Assim, escolheram-se uma barragem pequena com 15 m de altura, uma barragem média com 30 m de altura, uma barragem grande com 50 m de altura e uma barragem muito grande com 100 m de altura. A base das barragens foi definida a partir da inclinação do paramento de jusante correspondente à razão 0,8:1 (H:V). Para todos os casos foi considerado um paramento de montante vertical. A largura do coroamento foi ajustada de acordo com a altura da barragem. As principais dimensões dos modelos são apresentadas no Quadro 1.

As propriedades do betão, material que constitui o corpo das barragens, foram seleccionadas para representar dois cenários. O primeiro cenário representa o caso de uma barragem em bom estado, caracterizado por um módulo de elasticidade de 30 GPa. O segundo caso destina-se a representar uma barragem com elevado grau de deterioração, caracterizado por um módulo de elasticidade de 15 GPa. Para as propriedades do material do maciço rochoso de fundação foi adotada uma abordagem semelhante, considerando dois cenários

distintos. O primeiro caso representa um maciço rochoso de boa qualidade, moderadamente fraturado, caracterizado por um módulo de elasticidade de 20 GPa. O segundo caso representa um maciço rochoso muito fraturado, caracterizado por um módulo de elasticidade de 10 GPa. Em todos os cenários consideraram-se densidades de 2400 kg/m<sup>3</sup> e 2500 kg/m<sup>3</sup> para o betão e para o maciço rochoso de fundação, respetivamente. As propriedades consideradas são resumidas no Quadro 2.

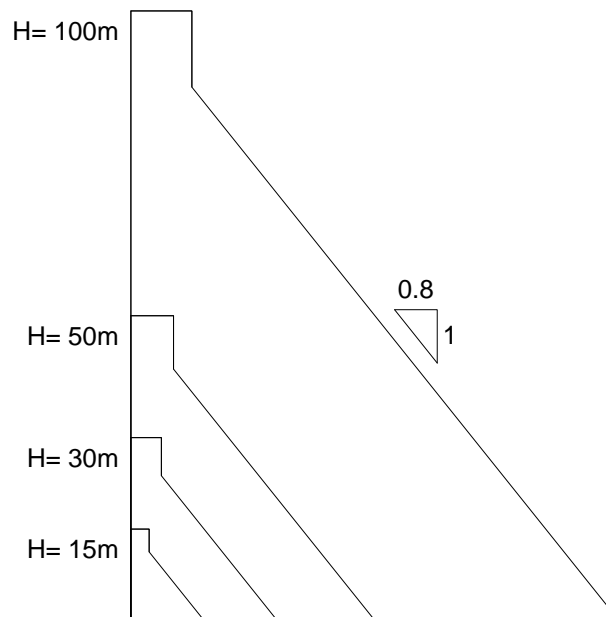


Figura 1. Geometria dos modelos das barragens.

Quadro 1. Principais dimensões dos modelos.

Descrição	Altura	Largura da base	Largura do coroamento
Barragem pequena	15 m	12 m	3 m
Barragem média	30 m	24 m	5 m
Barragem grande	50 m	40 m	7 m
Barragem muito grande	100 m	80 m	10 m

Quadro 2. Propriedades dos materiais dos modelos.

Descrição	Módulo de elasticidade	Densidade	Coefficiente de Poisson
Barragem em bom estado	30 GPa	2400 kg/m <sup>3</sup>	0,2
Barragem deteriorada	15 GPa	2400 kg/m <sup>3</sup>	0,2
Maciço rochoso de boa qualidade	20 GPa	2500 kg/m <sup>3</sup>	0,2
Maciço rochoso muito fraturado	10 GPa	2500 kg/m <sup>3</sup>	0,2

### 3.2 Ações estáticas e dinâmicas

As ações estáticas a considerar são o peso próprio do betão, a pressão hidrostática e a subpressão (Figura 2). A pressão hidrostática foi calculada admitindo que o nível da albufeira coincide com o coroamento. Foi adotado um diagrama de pressões triangular para representar a subpressão, com uma pressão equivalente a 30% da pressão hidrostática no pé de montante e pressão nula no pé de jusante (Figura 2). Esta redução de 70% pretende ter em consideração os efeitos da cortina de impermeabilização e do sistema de drenagem, no sentido de reduzir a percolação e as pressões no maciço de fundação. Admite-se que a subpressão se mantém inalterada durante o sismo. O Quadro 3 apresenta os valores das resultantes da pressão hidrostática, subpressão e peso próprio da barragem, bem como a relação entre a subpressão e o peso próprio. A resultante da subpressão total é, em todos os casos, de cerca de 12,5% da resultante do peso próprio.

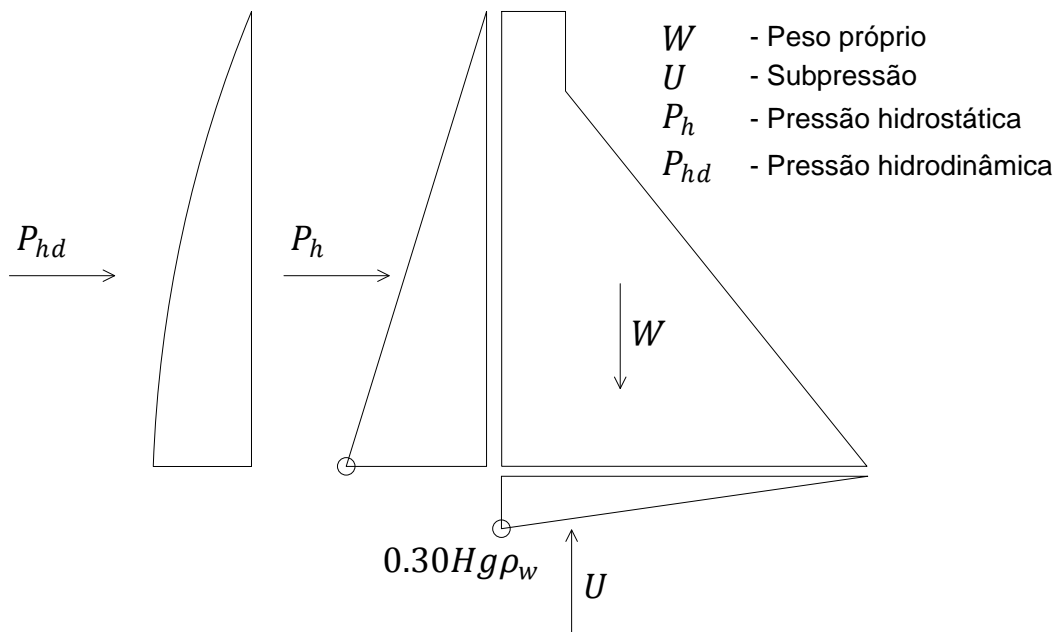


Figura 2. Ações estáticas e dinâmicas.

Quadro 3. Pressão hidrostática, subpressão, peso próprio e relação entre subpressão e peso próprio.

Altura da barragem	Pressão hidrostática	Subpressão (U)	Peso próprio (W)	U/W
15 m	1125 kN	270 kN	2160 kN	0,125
30 m	4500 kN	1080 kN	8640 kN	0,125
50 m	12500 kN	3000 kN	24000 kN	0,125
100 m	50000 kN	12000 kN	96000 kN	0,125

O efeito hidrodinâmico do reservatório (Figura 2) foi determinado através da solução de Westergaard,

$$m_{a,i} = \frac{7}{8} \rho_w \sqrt{Hy_i} A_i \quad (1)$$

onde  $m_{a,i}$  é a massa associada na direcção horizontal para o grau de liberdade  $i$ ;  $\rho_w$  é a densidade da água;  $H$  é a cota do reservatório;  $y_i$  é a distância vertical desde do fundo do reservatório ao grau de liberdade  $i$ ; e  $A_i$  é a área de influência do grau de liberdade  $i$ .

A massa da barragem e a massa associada total são apresentados no Quadro 4, onde também é referida a relação entre a massa associada e a massa da barragem. Para todos os casos, tendo em conta a formulação adotada, a massa associada total representa aproximadamente cerca 61% da massa da barragem.

Quadro 4. Massa da barragem, massa associada e relação entre massa associada e a massa da barragem.

Altura da barragem	Massa ( $m_d$ )	Massa associada ( $m_a$ )	$m_a/m_d$
15 m	216 x10 <sup>3</sup> kg	132 x10 <sup>3</sup> kg	0,61
30 m	864 x10 <sup>3</sup> kg	562 x10 <sup>3</sup> kg	0,61
50 m	2400 x10 <sup>3</sup> kg	1462 x10 <sup>3</sup> kg	0,61
100 m	9600 x10 <sup>3</sup> kg	5848 x10 <sup>3</sup> kg	0,61

A partir da geometria do modelo, das propriedades dos materiais e da massa associada total, foi determinado o período fundamental de vibração para cada modelo. Os resultados encontram-se condensados no Quadro 5, tendo em conta as quatro combinações de propriedades para cada geometria de barragem: (i) modelo 15/10,  $E_b=15$  GPa e  $E_r=10$  GPa, modelo 15/20,  $E_b=15$  GPa e  $E_r=20$  GPa, modelo 30/10,  $E_b=30$  GPa e  $E_r=10$  GPa, e modelo 30/20,  $E_b=30$  GPa e  $E_r=20$  GPa, onde  $E_b$  é o módulo de elasticidade do betão (barragem) e  $E_r$  é o módulo de elasticidade do maciço rochoso. A Figura 3 representa o modo fundamental de vibração para o modelo da barragem de 100 m de altura.

Quadro 5. Período fundamental de vibração.

Altura da barragem	Período fundamental de vibração			
	15/10	15/20	30/10	30/20
15 m	0,075 s	0,068 s	0,064 s	0,056 s
30 m	0,150 s	0,136 s	0,129 s	0,112 s
50 m	0,410 s	0,227 s	0,214 s	0,186 s
100 m	0,500 s	0,454 s	0,429 s	0,372 s

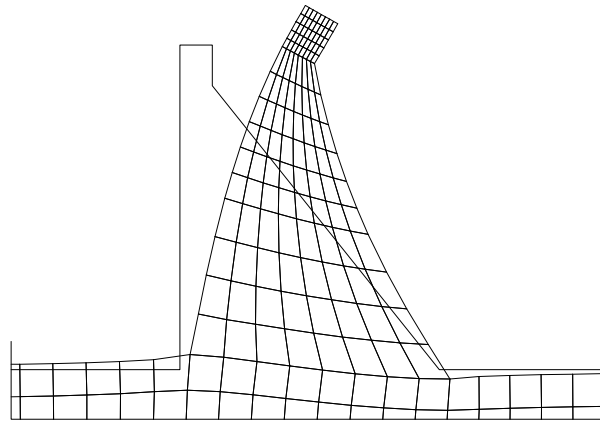


Figura 3. Modo fundamental de vibração para o modelo da barragem de 100 m de altura.

A ação sísmica foi definida tendo por base a hipótese da barragem se localizar na região de Évora e, naturalmente, estar implantada em rocha. Para o cenário de um sismo distante e para um período de retorno de 1000 anos, o Anexo Nacional do Eurocódigo 8 (EC8) [5] permite estimar para aceleração máxima de referência o valor de  $1,6 \text{ m/s}^2$ , que foi adotada neste estudo para o cenário de ocorrência de um sismo de intensidade moderada. As acelerações verticais foram determinadas a partir das acelerações horizontais, minoradas em  $2/3$ . Para todos os modelos foi adotado um coeficiente de amortecimento viscoso de 5%, proporcional à massa e centrada na frequência fundamental de vibração. Foram gerados dois acelerogramas artificiais (Figura 4), com 42 segundos de duração, de forma a coincidir com o espectro de resposta elástica proposto pelo EC8 (Figura 5). Para o cenário do sismo com intensidade elevada foram adotados os acelerogramas originais majorados por um fator de 2. Para as análises (L) e (NL), o acelerograma N.º 1 foi aplicado na direção horizontal, enquanto o acelerograma N.º 2 foi aplicado na direção vertical, com uma redução de  $2/3$ , ambos na forma de uma história de tensões, respetivamente, normal e de corte.

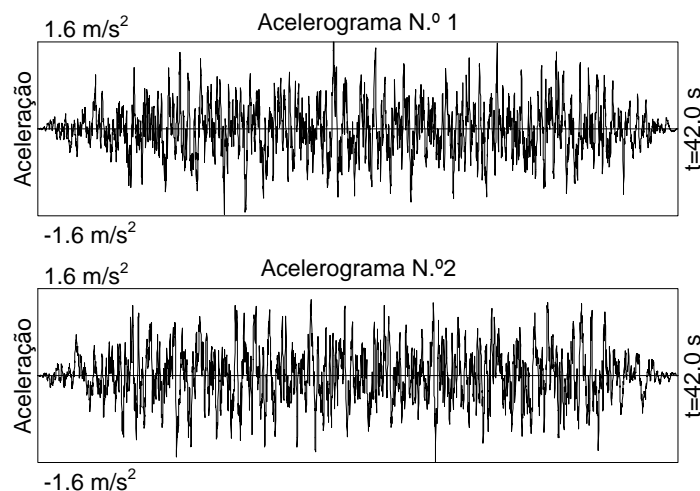


Figura 4. Acelerogramas com aceleração máxima de referência de  $1,6 \text{ m/s}^2$ .

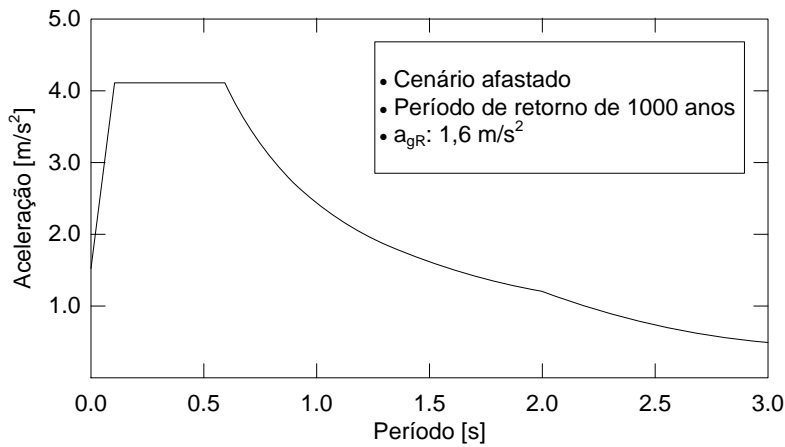


Figura 5. Espectro de resposta elástica obtido a partir do EC8.

#### 4. RESULTADOS DAS ANÁLISES EFETUADAS

##### 4.1 Resultados da análise estática

Numa primeira fase apenas as ações estáticas foram consideradas, nomeadamente o peso próprio, a pressão hidrostática e a subpressão. Os fatores de segurança ao deslizamento variam muito pouco com a altura da barragem, sendo de 1,80 para a barragem com 15 m de altura, 1,76 para a barragem com 30 m de altura, 1,74 para a barragem com 50 m de altura e 1,71 para a barragem com 100 m de altura. As tensões verticais no plano de fundação estão representadas graficamente na Figura 6 e constam do Quadro 6 para a barragem com 15 m de altura, no Quadro 7 para a barragem com 30 m de altura, no Quadro 8 para a barragem com 50 m de altura e no Quadro 9 para a barragem com 100 m de altura.

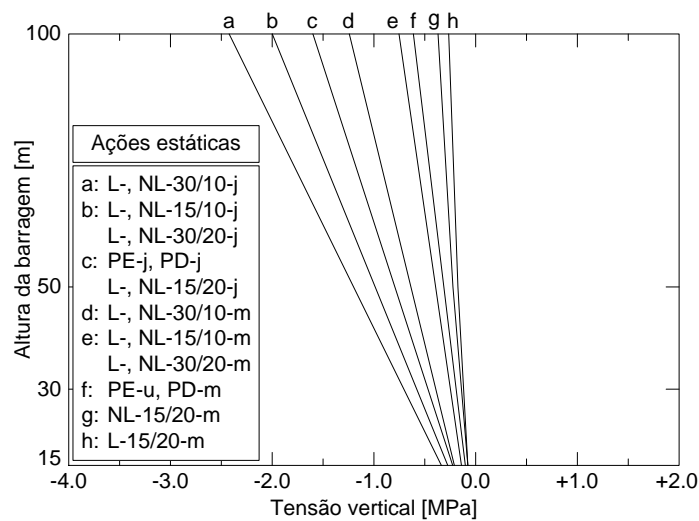


Figura 6. Tensões verticais no plano de fundação para as ações estáticas (m – montante; j – jusante).



Quadro 6. Tensões verticais a montante ( $\sigma_m$ ) e jusante ( $\sigma_j$ ), fator de segurança ao deslizamento (FSD) e deslizamento permanente ( $u$ ) para o modelo da barragem com 15 m de altura sujeito às ações estáticas.

Modelo	$\sigma_m$ [MPa]	$\sigma_j$ [MPa]	FSD	$u$ [mm]
PE	-0,11	-0,22	1,80	-
PD				
L-15/10	-0,15	-0,28	1,80	-
L-15/20	-0,08	-0,23	1,80	-
L-30/10	-0,21	-0,34	1,80	-
L-30/20	-0,14	-0,27	1,80	-
NL-15/10	-0,15	-0,28	1,80	-
NL-15/20	-0,09	-0,23	1,80	-
NL-30/10	-0,21	-0,34	1,80	-
NL-30/20	-0,14	-0,27	1,80	-

Quadro 7. Tensões verticais a montante ( $\sigma_m$ ) e jusante ( $\sigma_j$ ), fator de segurança ao deslizamento (FSD) e deslizamento permanente ( $u$ ) para o modelo da barragem com 30 m de altura sujeito às ações estáticas.

Modelo	$\sigma_m$ [MPa]	$\sigma_j$ [MPa]	FSD	$u$ [mm]
PE	-0,21	-0,45	1,76	-
PD				
L-15/10	-0,27	-0,58	1,76	-
L-15/20	-0,13	-0,47	1,76	-
L-30/10	-0,41	-0,70	1,76	-
L-30/20	-0,26	-0,57	1,76	-
NL-15/10	-0,27	-0,58	1,76	-
NL-15/20	-0,15	-0,47	1,76	-
NL-30/10	-0,41	-0,70	1,76	-
NL-30/20	-0,26	-0,57	1,76	-

Quadro 8. Tensões verticais a montante ( $\sigma_m$ ) e jusante ( $\sigma_j$ ), fator de segurança ao deslizamento (FSD) e deslizamento permanente ( $u$ ) para o modelo da barragem com 50 m de altura sujeito às ações estáticas.

Modelo	$\sigma_m$ [MPa]	$\sigma_j$ [MPa]	FSD	$u$ [mm]
PE	-0,33	-0,76	1,74	-
PD				
L-15/10	-0,42	-0,99	1,74	-
L-15/20	-0,18	-0,79	1,74	-
L-30/10	-0,66	-1,19	1,74	-
L-30/20	-0,41	-0,97	1,74	-
NL-15/10	-0,42	-0,99	1,74	-
NL-15/20	-0,22	-0,79	1,74	-
NL-30/10	-0,66	-1,19	1,74	-
NL-30/20	-0,41	-0,97	1,74	-

Quadro 9. Tensões verticais a montante ( $\sigma_m$ ) e jusante ( $\sigma_j$ ), fator de segurança ao deslizamento (FSD) e deslizamento permanente ( $u$ ) para o modelo da barragem com 100 m de altura sujeito às ações estáticas.

Modelo	$\sigma_m$ [MPa]	$\sigma_j$ [MPa]	FSD	$u$ [mm]
PE	-0,60	-1,57	1,71	-
PD				
L-15/10	-0,74	-2,00	1,71	-
L-15/20	-0,27	-1,59	1,75	-
L-30/10	-1,24	-2,42	1,71	-
L-30/20	-0,74	-1,99	1,75	-
NL-15/10	-0,76	-2,01	1,71	-
NL-15/20	-0,38	-1,61	1,71	-
NL-30/10	-1,24	-2,42	1,71	-
NL-30/20	-0,76	-1,99	1,71	-

## 4.2 Resultados da análise sísmica

Tal como no caso da análise estática, são apresentados os fatores de segurança ao deslizamento, as tensões verticais no plano de fundação e o deslizamento permanente da barragem ao longo do plano de fundação. Para os modelos L e NL, as tensões e o fator de segurança ao deslizamento são calculados como histórias ao longo do tempo. Por esta razão, as tensões são caracterizadas pelos valores mínimo e máximo calculados durante o sismo e o fator de segurança ao deslizamento apenas pelo valor mínimo, pois é o mais relevante para avaliar a estabilidade da barragem. Para os modelos L, ao longo da análise, nos instantes em que o fator de segurança é inferior a 1, o deslizamento permanente pode ser estimado através da integração da equação de movimento, tendo por base as forças não equilibradas. Os resultados são apresentados no Quadro 10 para a barragem com 15 m de altura, no Quadro 11 para a barragem com 30 m de altura, no Quadro 12 para a barragem com 50 m de altura e no Quadro 13 para a barragem com 100 m de altura.

Quadro 10. Tensões verticais a montante ( $\sigma_m$ ) e jusante ( $\sigma_j$ ), fator de segurança ao deslizamento (FSD) e deslizamento permanente ( $u$ ) para o modelo da barragem com 15 m de altura sujeito às ações estáticas e sísmicas.

Modelo	Sismo de intensidade moderada						Sismo de intensidade elevada					
	$\sigma_m$ [MPa]		$\sigma_j$ [MPa]		FSD	$u$ [mm]	$\sigma_m$ [MPa]		$\sigma_j$ [MPa]		FSD	$u$ [mm]
	Min.	Max.	Min.	Max.			Min.	Max.	Min.	Max.		
PE	0,10		-0,39		1,19	-	0,32		-0,55		< 1	-
PD-15/10	0,11		-0,44		1,25	-	0,34		-0,64		< 1	-
PD -15/20	0,10		-0,42		1,26	-	0,32		-0,62		< 1	-
PD -30/10	0,09		-0,41		1,28	-	0,29		-0,59		< 1	-
PD -30/20	0,08		-0,40		1,29	-	0,27		-0,57		< 1	-
L-15/10	0,20	-0,49	-0,11	-0,47	1,07	0	0,55	-0,82	0,06	-0,66	< 1	< 1
L-15/20	0,31	-0,44	-0,04	-0,48	1,04	0	0,66	-0,79	0,08	-0,57	< 1	< 1
L-30/10	0,14	-0,57	-0,12	-0,57	1,05	0	0,49	-0,93	0,09	-0,80	< 1	< 1
L-30/20	0,29	-0,55	-0,04	-0,59	1,06	0	0,69	-0,99	0,16	-0,71	< 1	< 1
NL-15/10	0	-0,55	-0,16	-0,53	1,08	0	0	-0,89	0	-2,09	< 1	< 10
NL-15/20	0	-0,52	-0,08	-0,50	1,11	0	0	-0,89	0	-0,69	< 1	< 10
NL-30/10	0	-0,59	-0,15	-0,63	1,05	0	0	-3,05	0	-2,60	< 1	< 10
NL-30/20	0	-0,59	-0,05	-0,59	1,06	0	0	-1,35	0	-2,85	< 1	< 10

Quadro 11. Tensões verticais a montante ( $\sigma_m$ ) e jusante ( $\sigma_j$ ), fator de segurança ao deslizamento (FSD) e deslizamento permanente ( $u$ ) para o modelo da barragem com 30 m de altura sujeito às ações estáticas e sísmicas.

Modelo	Sismo de intensidade moderada					Sismo de intensidade elevada						
	$\sigma_m$ [MPa]		$\sigma_j$ [MPa]		FSD	$u$ [mm]	$\sigma_m$ [MPa]		$\sigma_j$ [MPa]		FSD	$u$ [mm]
	Min.	Max.	Min.	Max.			Min.	Max.	Min.	Max.		
PE	0,22		-0,78		1,17	-	0,65		-1,10		< 1	-
PD-15/10	0,32		-0,94		1,17	-	0,85		-1,44		< 1	-
PD -15/20	0,32		-0,94		1,17	-	0,85		-1,44		< 1	-
PD -30/10	0,30		-0,93		1,18	-	0,82		-1,40		< 1	-
PD -30/20	0,30		-0,93		1,18	-	0,82		-1,40		< 1	-
L-15/10	0,39	-0,99	-0,26	-0,90	1,12	0	1,05	-1,70	0,07	-1,22	< 1	< 1
L-15/20	0,44	-0,79	-0,20	-0,82	1,23	0	1,05	-1,53	0,11	-0,95	< 1	< 1
L-30/10	0,15	-1,04	-0,33	-1,02	1,17	0	0,70	-1,68	0,04	-1,35	< 1	< 1
L-30/20	0,32	-0,91	-0,22	-0,96	1,19	0	0,91	-1,61	0,11	-1,20	< 1	< 1
NL-15/10	0	-1,08	-0,30	-0,98	1,13	0	0	-1,89	0	-1,46	< 1	< 10
NL-15/20	0	-0,94	-0,26	-0,90	1,23	0	0	-1,74	0	-1,34	< 1	< 10
NL-30/10	0	-1,08	-0,37	-1,07	1,17	0	0	-1,76	0	-1,46	< 1	< 10
NL-30/20	0	-1,00	-0,30	-0,99	1,19	0	0	-1,70	0	-1,22	< 1	< 10

Quadro 12. Tensões verticais a montante ( $\sigma_m$ ) e jusante ( $\sigma_j$ ), fator de segurança ao deslizamento (FSD) e deslizamento permanente ( $u$ ) para o modelo da barragem com 50 m de altura sujeito às ações estáticas e sísmicas.

Modelo	Sismo de intensidade moderada					Sismo de intensidade elevada						
	$\sigma_m$ [MPa]		$\sigma_j$ [MPa]		FSD	$u$ [mm]	$\sigma_m$ [MPa]		$\sigma_j$ [MPa]		FSD	$u$ [mm]
	Min.	Max.	Min.	Max.			Min.	Max.	Min.	Max.		
PE	0,38		-1,29		1,15	-	1,08		-1,82		< 1	-
PD-15/10	0,57		-1,60		1,14	-	1,47		-2,43		< 1	-
PD -15/20	0,57		-1,60		1,14	-	1,47		-2,43		< 1	-
PD -30/10	0,54		-1,57		1,15	-	1,42		-2,38		< 1	-
PD -30/20	0,54		-1,57		1,15	-	1,42		-2,38		< 1	-
L-15/10	0,80	-1,46	-0,50	-1,58	1,11	0	2,01	-2,51	-0,02	-2,17	< 1	< 1
L-15/20	0,88	-1,23	-0,35	-1,25	1,12	0	2,47	-2,52	0,09	-1,85	< 1	< 1
L-30/10	0,42	-1,75	-0,62	-1,81	1,12	0	1,49	-2,85	-0,05	-2,42	< 1	< 1
L-30/20	0,52	-1,45	-0,46	-1,60	1,16	0	1,89	-2,86	0,15	-2,08	< 1	< 1
NL-15/10	0	-1,73	-0,64	-1,72	1,16	0	0	-3,30	0	-2,52	< 1	< 10
NL-15/20	0	-1,53	-0,52	-1,44	1,12	0	0	-3,32	0	-2,46	< 1	< 10
NL-30/10	0	-1,82	-0,69	-1,91	1,11	0	0	-3,38	0	-2,56	< 1	< 10
NL-30/20	0	-1,62	-0,56	-1,66	1,17	0	0	-3,21	0	-2,38	< 1	< 10

Quadro 13. Tensões verticais a montante ( $\sigma_m$ ) e jusante ( $\sigma_j$ ), fator de segurança ao deslizamento (FSD) e deslizamento permanente ( $u$ ) para o modelo da barragem com 100 m de altura sujeito às ações estáticas e sísmicas.

Modelo	Sismo de intensidade moderada					Sismo de intensidade elevada						
	$\sigma_m$ [MPa]		$\sigma_j$ [MPa]		FSD	$u$ [mm]	$\sigma_m$ [MPa]		$\sigma_j$ [MPa]		FSD	$u$ [mm]
	Min.	Max.	Min.	Max.			Min.	Max.	Min.	Max.		
PE	0,78		-2,58		1,13	-	2,17		-3,63		< 1	-
PD-15/10	1,27		-3,28		1,11	-	3,14		-5,03		< 1	-
PD -15/20	1,27		-3,28		1,11	-	3,14		-5,03		< 1	-
PD -30/10	1,22		-3,23		1,12	-	3,04		-4,93		< 1	-
PD -30/20	1,22		-3,23		1,12	-	3,04		-4,93		< 1	-
L-15/10	1,56	-2,99	-0,95	-2,95	1,15	0	3,85	-5,24	0,09	-3,90	< 1	< 1
L-15/20	1,46	-2,41	-0,91	-2,34	1,20	0	4,20	-5,11	0,15	-3,23	< 1	< 1
L-30/10	0,74	-3,52	-1,20	-3,40	1,16	0	2,72	-5,81	0,02	-4,37	< 1	< 1
L-30/20	0,88	-2,63	-1,22	-2,87	1,22	0	3,49	-5,10	-0,04	-3,82	< 1	< 1
NL-15/10	0	-3,87	-1,13	-3,23	1,10	0	0	-7,78	0	-5,20	< 1	< 10
NL-15/20	0	-3,26	-1,11	-2,58	1,22	0	0	-7,88	0	-4,82	< 1	< 10
NL-30/10	0	-3,70	-1,33	-3,56	1,16	0	0	-7,36	0	-5,27	< 1	< 10
NL-30/20	0	-2,95	-1,35	-2,97	1,24	0	0	-7,27	0	-4,62	< 1	< 10

## 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Tendo em conta apenas as ações estáticas, com os modelos PE e PD obtêm-se os mesmos resultados pois o conjunto de ações e o método de resolução do programa CADAM são exatamente os mesmos em ambos os casos. Os resultados dos modelos L e NL, para cada conjunto de propriedades, são equivalentes pois o modelo é o mesmo, exceto para as propriedades da junta barragem-fundação que, para as ações em causa, apresenta comportamento elástico para todas as combinações de ações. O comportamento da barragem perante as ações estáticas é importante pois corresponde às condições iniciais da estrutura que antecede a ocorrência do sismo. Neste caso, para todos os modelos analisados, o fator de segurança ao deslizamento é superior à unidade, pelo que não ocorrem deslizamentos permanentes para as ações estáticas. Para além disto, não se verificam tensões de tração na junta barragem-fundação, que apresenta compressões, tanto a montante como jusante, em todos os casos. Quanto aos resultados para o sismo de intensidade moderada, quando comparados aos resultados obtidos através da análise estática, para todos os modelos e análises, verificou-se uma redução do FSD e a ocorrência, tanto a montante como a jusante, de tensões mínimas, de compressão, superiores às existentes inicialmente. Verificou-se também que, junto ao pé de montante, as tensões máximas são de tração. Por exemplo, para o modelo da barragem gravidade com 100 m de altura, verificou-se uma redução de 35% no FSD, e um aumento de cerca de 50% no valor das tensões mínimas de compressão junto ao pé de jusante. Quanto aos resultados para o

sismo de intensidade elevada, as conclusões são semelhantes. Para os modelos L e NL as tensões máximas, tanto a montante como jusante, são de tracção. Verifica-se que, em média, as tensões mínimas de compressão junto ao pé de jusante são majoradas em cerca de 120% em relação às existentes inicialmente. O FSD é, em todos os casos, inferior à unidade, havendo então lugar ao deslizamento da barragem pelo plano de fundação, porém os valores obtidos são bastante reduzidos, sem significado para os problemas em análise.

## 6. CONCLUSÕES

Foi realizada a análise de 52 modelos de barragens gravidade, representando barragens com diferentes alturas e propriedades, através de quatro métodos de análise sísmica, nomeadamente (i) o método pseudo-estático, (ii) o método pseudo-dinâmico, (iii) a análise dinâmica linear no tempo e (iv) a análise dinâmica não linear no tempo. Para cada modelo foram considerados dois sismos com diferentes intensidades, moderada e elevada. Verificou-se que com o método pseudo-estático é possível obter uma estimativa razoável do fator de segurança ao deslizamento, porém as tensões são inferiores às obtidas com os restantes métodos. A análise linear no tempo parece não possibilitar a obtenção de informação adicional relevante quando comparada com o método pseudo-dinâmico. A análise não linear no tempo permite avaliar a redistribuição de tensões na base da barragem e com isso melhorar a estimativa das tensões sísmicas máximas. Face aos resultados obtidos nos modelos analisados através dos quatro métodos referidos, afigura-se que a metodologia de estudo sísmico de barragens gravidade deverá passar pela realização de uma primeira análise com o método pseudo-dinâmico, que poderá ser complementada, caso necessário, com uma análise dinâmica não linear no tempo.

## REFERÊNCIAS

- [1] Bretas, E.M.; Batista, A.; Lemos, J.V.; Léger, P. – *Seismic analysis of gravity dams: a comparative study using a progressive methodology*, Eurodyn, Porto, 2014.
- [2] Leclerc, M.; Leger, P.; Tinawi, R. – “Computer Aided Stability Analysis of Gravity Dams (CADAM)”, *Advances in Engineering Software*, 34(7): 403-420, 2003.
- [3] Bretas, E.M. – *Desenvolvimento de um modelo de elementos discretos para o estudo de barragens gravidade em alvenaria*, Tese de Doutoramento, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2012.
- [4] Chopra, A.K. – “Earthquake response analysis of concrete dams”, *Advanced Dam Engineering for Design, Construction, and Rehabilitation*, R.B. Jansen, Van Nostrand Reinhold, pp.416-465, 1988.
- [5] Anexo Nacional do Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos (NP EN 1998-1), 2009.