

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE CORTINAS ANCORADAS SUJEITAS A ACÇÕES SÍSMICAS. COMPILAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

STUDY OF THE ANCHORED RETAINING WALLS BEHAVIOUR WHEN SUBMITTED TO SEISMIC LOADS. BIBLIOGRAPHIC COLLECT

Carvalho, Ana Teresa, *Geotest,Lda/FCTUNL, Portugal, a.carvalho@geotest.pt*
Santos Pereira, Carlos, *IST, Portugal, csp@civil.ist.utl.pt*
Bilé Serra, João, *LNEC, Portugal, biles@lnec.pt*

RESUMO

Cada vez mais é comum a utilização de estruturas de contenção ancoradas com carácter definitivo. O estudo do comportamento de estruturas ancoradas face a acções dinâmicas não está tão desenvolvido como a modelação das mesmas sob acções estáticas, pelo que usualmente este tipo de estruturas é dimensionado sem que a acção sísmica seja devidamente considerada. No entanto, existem publicados na bibliografia da especialidade alguns estudos efectuados nesta área. Apresenta-se neste artigo uma compilação da informação recolhida acerca dos estudos efectuados, nomeadamente com recurso a métodos numéricos e a ensaios em modelo reduzido, sintetizando-se e enquadrando-se os resultados obtidos.

ABSTRACT

The use of anchored retaining walls as permanent structures is increasing. The study of the behaviour of anchored retaining walls submitted to seismic actions is not so well developed as the static case, and then normally this structures design is made without the adequate consideration of the seismic action. However there are published some studies made in this area. This paper presents a bibliographic collect about those studies, especially when have recourse to numerical methods and small model tests, and the results obtained are presented.

1. INTRODUÇÃO

As estruturas de contenção ancoradas, que começaram por ser utilizadas em obras provisórias, são usadas actualmente como elementos definitivos. Como tal, algumas preocupações adicionais devem ser tidas em atenção, nomeadamente a protecção dos elementos estruturais e as acções com probabilidade de ocorrência num período de tempo mais dilatado do que o considerado para as estruturas provisórias. Uma dessas acções a considerar no dimensionamento deste tipo de estruturas, no caso do território português, é a acção sísmica.

As cortinas ancoradas são normalmente estruturas de contenção flexíveis e esta designação advém da sua capacidade de deformação, com a conseqüente redistribuição das pressões das terras ao longo da parede. A grandeza e a distribuição da pressão das terras depende das propriedades do terreno, da rigidez relativa solo/estrutura e das características da interface. Embora venham a ser realizados, desde há décadas, estudos tendo em vista a caracterização deste problema, mesmo em condições estáticas a questão da interacção solo/estrutura é complexa e normalmente são feitas simplificações de modo a possibilitar a sua análise.

Sob acções dinâmicas, o problema é ainda mais complexo e o comportamento das estruturas flexíveis ancoradas ainda está longe de estar completamente estudado. A vibração causada por

um sismo é um evento de duração limitada, que causa oscilação da pressão das terras sobre a estrutura de suporte e que pode resultar, segundo diversos autores, em acréscimos permanentes de pressão e de deslocamento. A questão da funcionalidade causada pelo movimento da parede pode ser importante [1], já que os deslocamentos permanentes induzidos podem não ser compatíveis com as condições de serviço pretendidas para a estrutura.

Nesta comunicação dá-se conta dos trabalhos mais significativos acerca da análise sísmica de estruturas de contenção flexíveis mono e multi-ancoradas. Optou-se ainda por incluir nesta análise as estruturas escoradas, face às semelhanças de comportamento da cortina e dado que estas são muitas vezes utilizadas para modelação das estruturas ancoradas, especialmente no que diz respeito a modelos físicos. Refere-se que o estudo se restringe a cortinas instaladas em terrenos sem influência de nível freático, já que em caso contrário haveria ainda que ter em atenção os efeitos hidrodinâmicos, o desenvolvimento de pressões intersticiais e, no caso de solos arenosos, os fenómenos de liquefacção.

O estudo que agora se apresenta faz parte do trabalho de doutoramento que a autora se encontra actualmente a desenvolver e que versa a análise sísmica de estruturas de contenção ancoradas.

2. VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA/DIMENSIONAMENTO – ANÁLISE ESTÁTICA

Segundo o EC7 [2] as estruturas de contenção flexíveis (“embedded walls”) são muros ou paredes de espessura relativamente reduzida em aço, betão armado, ou madeira, suportados por ancoragens, escoras e/ou por pressões de terras de tipo passivo. A resistência à flexão destas estruturas desempenha uma função significativa na contenção, enquanto a contribuição do seu peso é desprezável. Exemplos destas estruturas incluem as cortinas de estacas pranchas autoportantes, as cortinas ancoradas ou escoradas de aço ou betão, as paredes moldadas, etc.

Enquanto que nas estruturas de suporte rígidas a garantia de segurança se resume à verificação ao deslizamento, ao derrubamento e à rotura de fundação, no caso das cortinas flexíveis o mecanismo de rotura pode envolver um ou mais elementos estruturais, encontrando-se referidos no EC7 [2] exemplos dos vários cenários de rotura a considerar no dimensionamento de estruturas ancoradas/escoradas e que esquematicamente se ilustram na Figura 1.

As estruturas podem ser mono ou multi-apoiadas, sendo a metodologia de dimensionamento diferente consoante se trate de um ou de outro caso. A designação estruturas mono-apoiadas significa que a parte inferior da cortina se encontra enterrada no solo e a sua zona superior está ancorada ou escorada em apenas um nível. Nesta estrutura, tira-se partido do impulso passivo na zona enterrada da cortina e o dimensionamento baseia-se usualmente nos designados “métodos clássicos”, ou seja no método do apoio fixo ou do apoio móvel. Nas estruturas multi-apoiadas, por seu lado, existem diversos níveis de escoras ou de ancoragens e a profundidade enterrada é reduzida, pelo que não se tem em conta o impulso passivo e o seu dimensionamento é normalmente realizado com base em diagramas aparentes, determinados a partir da observação deste tipo de obras [3].

3. ANÁLISE SÍSMICA DE ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO FLEXÍVEIS

3.1 Análise através de Modelos Numéricos

Actualmente os métodos de análise dinâmica de estruturas de contenção flexíveis incluem, segundo Degrande *et al.* [4]: a) análises pseudo-estáticas, b) modelos elásticos e lineares e c) formulações baseadas em modelos elastoplásticos.

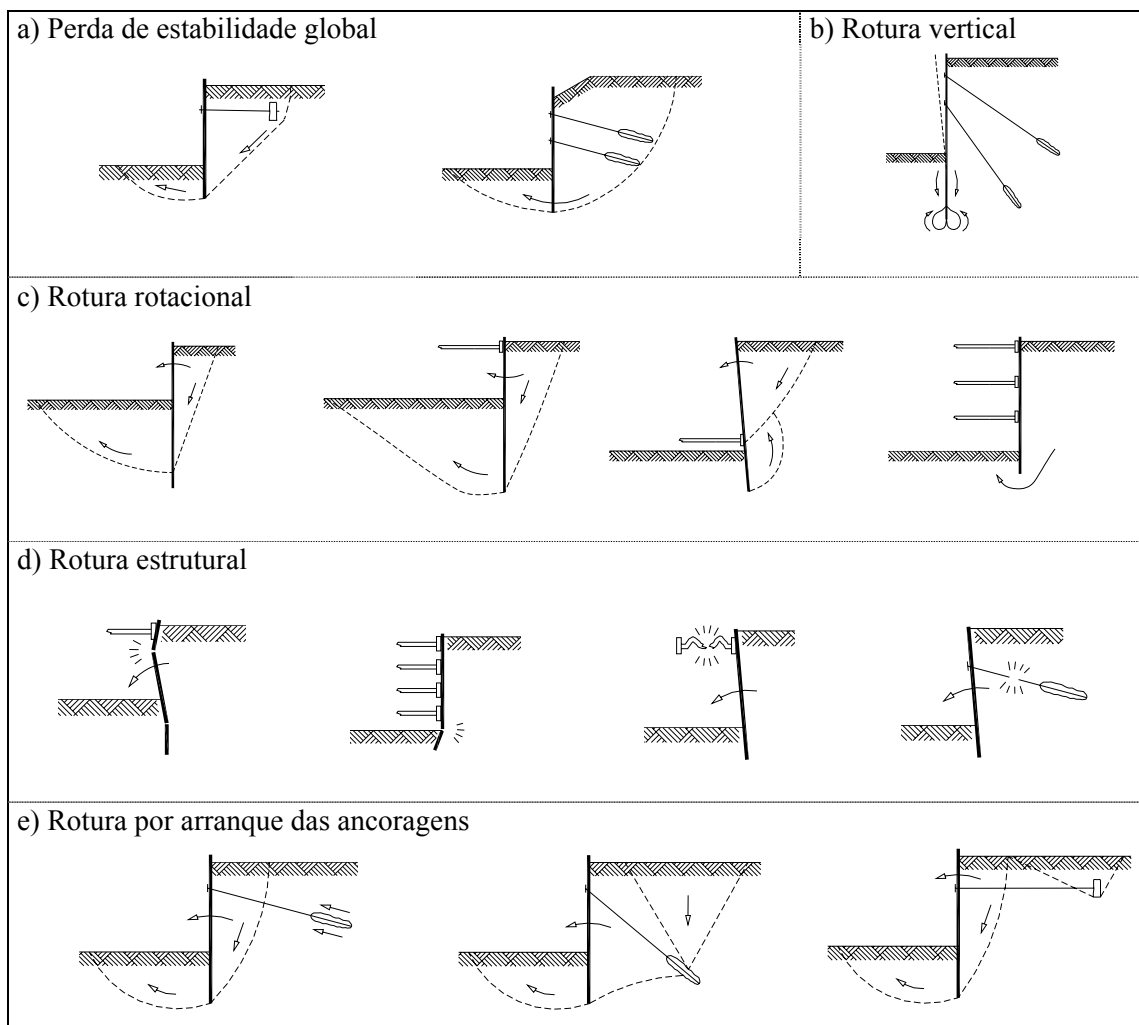


Figura 1 – Exemplos de modos limites de ruptura de cortinas flexíveis

No que diz respeito ao primeiro caso, que é aplicado na maior parte das situações, o dimensionamento das cortinas é realizado através de métodos desenvolvidos para estruturas de suporte rígidas, embora o seu comportamento seja distinto das flexíveis, e o método normalmente utilizado é o de Mononobe-Okabe. Trata-se do método mais antigo para determinação da pressão horizontal dinâmica, sobre estruturas de suporte, e que foi desenvolvido por Mononobe [5] e Okabe [6]. Este método tem como base a teoria das cunhas de Coulomb, é um método analítico de cálculo dos impulsos sísmicos activo e passivo e aplica-se a solos incoerentes secos ou a solos incoerentes saturados ou submersos, desde que com elevada permeabilidade ($k > 10^{-3}$ cm/s). Refere-se, porém, que tal como o método de Coulomb, a formulação de Mononobe-Okabe permite avaliar a força total aplicada no muro e não a distribuição da pressão horizontal em profundidade. Por outro lado, este método não permite determinar os deslocamentos expectáveis na estrutura de contenção.

O caso da análise elástica e linear tira partido da validade do princípio da sobreposição, pelo que é adequado para estudar o efeito da interacção solo-estrutura e para ilustrar o modo de propagação das ondas. Embora este método não permita modelar o comportamento cíclico elastoplástico dos solos sob acção sísmica, nem possibilite a determinação de deslocamentos permanentes, é uma ferramenta útil para estudar o comportamento com reduzidas deformações, o qual precede a fase de plastificação intensa, com um modelo que não exige esforço significativo do ponto de vista computacional.

Por último, o caso c) é a solução mais aproximada à realidade, dado que o estado de tensão inicial pode ser tido em conta e para sismos de elevada intensidade, onde prevalecem as grandes deformações, o comportamento cíclico elastoplástico do solo é adequadamente tido em consideração e os deslocamentos permanentes podem ser estimados. No entanto, este método é mais exigente do ponto de vista computacional e no que se refere à informação geotécnica de base, pelo que a sua aplicação normalmente se restringe a casos simples.

Segundo o EC8 [7] a verificação da segurança de estruturas de contenção flexíveis ancoradas pode ser realizada com base em métodos pseudo-estáticos, com o coeficiente sísmico horizontal a considerar nos cálculos ser 1.5 a 2 vezes o coeficiente aconselhado para estruturas de suporte de gravidade. No caso das ancoragens é apresentada uma expressão para o cálculo do seu comprimento, com base no valor determinado numa análise estática e tendo em atenção a aceleração expectável.

Na consulta bibliográfica realizada foram encontrados diversos estudos que, recorrendo a modelos numéricos, procuram determinar as acções dinâmicas sobre estruturas de contenção flexíveis mono-apoiadas e multi-apoiadas. Todos os casos encontrados na bibliografia se referem a solos incoerentes.

Resumem-se, de seguida, as principais conclusões retiradas da informação recolhida, a qual se apresenta sintetizada separadamente consoante o tipo de estrutura de contenção. No Quadro 1 constam as situações referentes às estruturas mono-apoiadas.

Quadro 1 – Estruturas flexíveis mono-apoiadas

Autores	Estrutura	Cálculo	Acção Sísmica
Siller e Dolly (1992) [8]	Com 1 e 2 níveis de ancoragens	MEF/Elastoplástico não linear e Mononobe-Okabe	Sinusoidal com aceleração de pico de 0.2, 0.4 e 0.6g
Richards Jr. e Elms (1992) [9]	Com ancoragem horizontal, de placa	Mononobe-Okabe	Aceleração de 0.4 a 0.6g
Younan e Veletsos (2000)[10]	Em consola e apoiada no topo	Viscoelástico	Harmónica e registo real de um sismo (aceleração de pico de 0.312g)
Degrande <i>et al.</i> (2002) [4]	Cortina de estacas-prancha, em consola e com um nível de ancoragens inclinado	MEF/Elástico e linear, com amortecimento hysterético	Onda plana vertical harmónica SV
Anastasopoulos <i>et al.</i> (2004) [11] e Gazetas <i>et al.</i> (2004) [12]	Muros de b.a. em L; cortinas de estacas ancoradas; muros de solo reforçado com malha metálica	MEF/Elástico e elastoplástico e Mononobe-Okabe	Acelerograma determinado a partir do sismo real (Atenas 1999; Ms 5.9; PGA=0.5g)

Verifica-se que na análise de cortinas mono-apoiadas se recorre muitas vezes ao método de Mononobe-Okabe, mesmo quando também se realizam análises pelo MEF, servindo para comparação de resultados.

Siller e Dolly [8] recorrem ao MEF e, utilizando um modelo elastoplástico, não linear, estudam o comportamento de estruturas de contenção flexíveis com um e dois níveis de ancoragens, em que fazem variar a profundidade de encastramento. Analisam várias estruturas, dimensionadas a partir da adopção de diagramas de impulso triangulares e diagramas rectangulares aparentes, ambos combinados com a aplicação do Mononobe-Okabe. Como conclusão, referem o

benefício de utilização de níveis de ancoragens adicionais para reduzir os deslocamentos sísmicos. Verificam que não há vantagem em aumentar o comprimento de encastramento para além do valor resultante da aplicação de Mononobe-Okabe, se o objectivo for a diminuição de deslocamento acima da base da escavação. Verificam, ainda, que há um acréscimo da carga nas ancoragens, face à acção sísmica, e que após essa acção cessar o valor da carga diminui. Contudo há uma parcela daquele acréscimo que se mantém. Recomendam ainda que no dimensionamento sísmico se considere a utilização de pré-esforço das ancoragens com valor equivalente ao total da força estimada através do método de Mononobe-Okabe.

Richards Jr. e Elms [9] fazem uma revisão de anteriores trabalhos acerca do comportamento dinâmico de estruturas de suporte, em particular com a aplicação do método de Mononobe-Okabe para o estado limite passivo. Estudam o comportamento de uma estrutura auto-portante, com uma ancoragem horizontal, de placa, no topo. Concluem que os comprimentos das ancoragens devem ser aumentados no caso de estruturas de contenção dimensionadas para fazer face a acções sísmicas.

Younan e Veletsos [10], no seguimento de trabalhos anteriores [13], fazem uma avaliação crítica acerca da resposta de uma cortina flexível em consola e de uma outra apoiada no topo, ambas encastradas na base. Em resultado dos estudos realizados, os autores verificam que a intensidade e a distribuição dos deslocamentos na parede, as pressões exercidas sobre a mesma e as forças induzidas pela excitação horizontal do terreno, são muito sensíveis à flexibilidade da cortina. Há uma redução muito significativa dos esforços sobre a cortina no caso de uma estrutura flexível, comparativamente com uma outra rígida. No entanto, verificam que esta redução é inferior no caso de uma cortina apoiada no topo comparativamente com uma cortina em consola. Concluem ainda, para a estrutura em consola, que quando o efeito da amplificação dinâmica não é tido em conta, a magnitude da força obtida através do método por eles desenvolvido é próxima da obtida pelo método de Mononobe-Okabe. Mais ainda, o braço da força para cálculo do momento flector na base é menor ou igual a 40% da altura da parede, o que está próximo do 1/3 especificado na versão original do método, mas inferior aos 50 a 60% referidos em Seed e Whitman [14]. A este propósito refere-se que o EC8 [7] aconselha que se tome, na ausência de estudos mais detalhados, o ponto de aplicação da pressão dinâmica das terras a meia altura da estrutura. Neste último recomenda-se ainda que se tome o mesmo ponto de aplicação da resultante da pressão estática, para paredes com livre rotação na sua base.

O trabalho desenvolvido por Degrande *et al.* [4] versa a implementação de um modelo de cálculo, tendo sido estudadas estruturas flexíveis em consola e com um nível de ancoragem, suportando uma camada de solo horizontal existente sobre um estrato rígido. No primeiro caso utilizam os resultados obtidos por Veletsos e Younan [13] para validar o modelo. Neste estudo, e para os casos particulares analisados, os autores concluem quanto à baixa influência da ancoragem na redução dos deslocamentos e das forças dinâmicas sobre a cortina. Referem a necessidade de realização de uma análise paramétrica mais aprofundada para estudar a influência da profundidade e rigidez da cortina, do comprimento e rigidez da ancoragem e da espessura e características dinâmicas do solo.

Nos trabalhos apresentados por Anastasopoulos *et al.* [11] e Gazetas *et al.* [12], utilizando o MEF avaliam a magnitude e a distribuição da pressão dinâmica do terreno, em diversos tipos de estruturas de contenção flexíveis, procurando descobrir algumas das mais importantes causas do seu bom comportamento face a acção sísmica, tendo como referência os resultados de observação de algumas estruturas sujeitas a sismos. É estudado o comportamento de muros de betão armado com secção em L, cortinas de estacas com um nível de ancoragens, horizontais e inclinadas, e muros de solo reforçado com malha metálica. Concluem que os tipos de estruturas estudadas possuem suficiente flexibilidade para fazer face a pressões dos terrenos, que na maior parte dos casos são inferiores às calculadas com o Mononobe-Okabe, especialmente na metade

superior da parede. O valor máximo (e residual) da carga nas ancoragens é baixo nos casos analisados. Referem que uma possível exceção a esta última conclusão é o caso de ancoragens muito inclinadas e rígidas, as quais são responsáveis por pressões mais elevadas na cortina, superiores às obtidas pelo método de Mononobe-Okabe. Referem ainda que uma aceleração vertical, mesmo muito forte, não parece ter efeito mensurável na pressão dinâmica das terras, pelo que pode ser ignorada no dimensionamento, o que está de acordo com o referido no EC8 [7] para estruturas que não sejam de gravidade.

No Quadro 2 apresenta-se o resumo dos casos das cortinas multi-apoiadas. Verifica-se que para a análise deste tipo de estruturas se recorre sempre ao MEF.

Quadro 2 – Estruturas flexíveis multi-apoiadas

Autores	Estrutura	Cálculo	Ação Sísmica
Siller (1988) [15]; Siller <i>et al.</i> (1991) [16]; Siller e Frawley (1992) [17]	Com 2 e 4 níveis de ancoragens	MEF/Elástico linear e Elastoplástico não linear	Sinusoidal, com acelerações de pico de 0.2, 0.4 e 0.6g
Bangash <i>et al.</i> (1993) [18]	Com 4 níveis de ancoragens	Flex/Não linear	Sinusoidal (4 ciclos completos) e aceleração de pico de 0.15g
Gazetas <i>et al.</i> (2005) [19]	Cortina de estacas com 5 e 7 níveis de ancoragens	MEF/Método Linear Equivalente	Acelerograma a partir de sismo real (Atenas 1999; Ms 5.9; PGA 0.5g)
Ambrósio <i>et al.</i> (2005) [20]	Cortina de betão armado com 2 níveis de escoras	Flush/Viscoelástico linear com amortecimento hysterético	Acelerograma gerado artificialmente (RSA; ação tipo I, Zona A). Aceleração máxima 0.185g

Nos estudos conduzidos por Siller *et al.* [15][16][17] é analisada a influência de determinados factores, nomeadamente da rigidez da ancoragem, da sua inclinação e do seu espaçamento na vertical, na resposta dinâmica da estrutura, e são feitas comparações entre resultados de análises elásticas lineares e elastoplásticas não lineares. Verificam que um aumento da rigidez da ancoragem se traduz numa maior capacidade para suportar a carga e resulta numa diminuição do deslocamento máximo e permanente ao longo da parede, mas que esta capacidade de redução da deformação se restringe à área em redor da cabeça da ancoragem. Da análise elastoplástica não linear concluem, entre outros aspectos, que os deslocamentos e as tensões na cortina resultantes da construção da contenção são importantes para a resposta dinâmica. Verificam que a rigidez da ancoragem é mais importante na determinação do deslocamento máximo dinâmico, do que o valor de pré-esforço. O nível de excitação mostrou ser um factor importante na determinação da deformação, pois quanto maior este valor, maior a amplificação do movimento sísmico e dos deslocamentos permanentes.

Bangash *et al.* [18], utilizando o programa Flex e fazendo uma análise não linear, estudam a resposta sísmica de uma estrutura ancorada com 4 níveis de ancoragens. Concluem que uma contenção com as características da estudada tem uma resistência considerável ao sismo e que a sua flexibilidade, a sua baixa massa e a ancoragem ao solo, permitem que a estrutura se mova com o terreno envolvente. Este movimento conjunto resulta em variações mínimas da carga nas ancoragens e da pressão dinâmica dos terrenos. A única zona onde este movimento está impedido é na que corresponde ao comprimento de encastramento, ou seja à parte enterrada da cortina. O resultado deste estudo mostra que o método de Mononobe-Okabe pode ser muito conservativo quando o solo suportado possui um ângulo de atrito superior a 30° e a superfície do terreno é horizontal. Mostra ainda que a envolvente da pressão dinâmica das terras é

rectangular, para a superfície do terreno horizontal. No entanto, estes investigadores recomendam que a estrutura de contenção deve ser dimensionada para momentos flectores dinâmicos adicionais, introduzidos na zona da cortina próxima da base da escavação.

Dentro da mesma linha de investigação de Anastasopoulos *et al.* [11] e Gazetas *et al.* [12], Gazetas *et al.* [19] resumem os resultados da análise numérica do comportamento sísmico de três estruturas enterradas (duas delas constituídas por cortinas multi-escoradas/ancoradas provisórias) que foram sujeitas a um sismo. Concluem que a flexibilidade própria das estruturas fizeram com que a pressão dinâmica das terras fosse mínima, dado que suportavam solos rijos na maior parte da profundidade, e verificam que a carga dinâmica nas ancoragens é também de pequeno valor. Assim, atribuem o bom comportamento destas estruturas de contenção, em parte, à substancial rigidez e resistência do terreno e também à predominância de altas frequências do registo do sismo. Não excluem a possibilidade de no caso do solo ser menos resistente e a excitação ser mais elevada e rica em longos períodos, a estrutura poder sofrer danos significativos.

Ambrósio *et al.* [20] analisam o comportamento sísmico de uma estrutura flexível, com dois níveis de escoramento e variando a rigidez do terreno. Utilizam o programa Flush e recorrem a um modelo viscoelástico. Constatam que em todos os casos analisados há amplificação da acção sísmica ao longo da altura da camada deformável, sendo aquela tanto maior quanto mais rígido for o terreno. Consequentemente, e ao contrário do que sucede em termos estáticos, os esforços dinâmicos na parede e nas escoras aumentam em proporcionalidade directa com o aumento da rigidez do terreno. Verificam que os esforços dinâmicos são muito significativos quando comparados com os estáticos, em determinadas secções da parede, especialmente ao nível da base da escavação. Obtiveram momentos flectores e esforços transversos dinâmicos que chegam a ser 2.5 vezes superiores aos estáticos.

3.2 Análise através de Ensaios em Modelo Reduzido

As teorias utilizadas na análise dinâmica têm sido validadas com base nos resultados obtidos em ensaios realizados em modelos físicos, recorrendo a mesa vibratória ou a centrífugadora.

Os ensaios em mesa vibratória não representam o efeito real da tensão de confinamento a que o solo está sujeito na natureza, aspecto que é particularmente importante para o estudo do seu comportamento, uma vez que os solos exibem dependência entre a tensão e a deformação. Como tal, a previsão do comportamento das estruturas de contenção *in situ*, com base nos resultados obtidos em mesa vibratória devem ser utilizados com alguma cautela, embora possam servir para facilitar a compreensão dos fenómenos a que este tipo de estruturas de suporte são sujeitas em consequência da acção sísmica.

Ultimamente, os ensaios em centrífugadora têm sido uma ferramenta útil no estudo do comportamento das estruturas geotécnicas. Nos ensaios em centrífugadora devem-se respeitar algumas condições de semelhança entre o modelo e o protótipo e recorrer a uma aceleração adequada. As leis de semelhança são utilizadas para obter a resposta do protótipo em função dos resultados no modelo.

No caso de análises de comportamento de estruturas de contenção flexíveis resumem-se no Quadro 3 alguns estudos mais representativos que dizem respeito a ensaios em mesa vibratória. No caso de ensaios em centrífugadora, somente foram encontrados modelos de cortinas em consola, pelo que não se incluem na presente comunicação.

Todos os ensaios em mesa vibratória correspondem a cortinas mono-apoiadas. Em todos os casos se conclui que o método de Monobe-Okabe conduz a resultados próximos dos que se

obtêm através dos ensaios em modelo. No caso de Kurata *et al.* (1965), citado em Seed e Whitman [14], é referido ainda que após a estrutura ter sido sujeita à acção sísmica fica instalada uma pressão permanente que é substancialmente superior à pressão estática, anterior à excitação, e que é uma parte considerável do valor máximo desenvolvido durante o sismo.

Quadro 3 – Ensaio de estruturas flexíveis em mesa vibratória

Autores	Estrutura	Modelo	Solo	Acção Sísmica
Kurata <i>et al.</i> (1965), citado em Seed e Whitman (1970) [14]	Cortina de estacas-prancha, com um nível de ancoragens horizontal	Cortina: altura 914 mm	Areia	---
Neelakantan <i>et al.</i> (1990) [21] e Neelakantan <i>et al.</i> (1992) [22]	Apoiada no topo e encastrada em solo na base	Cortina de alumínio: altura 629 mm; largura 882 mm; esp. 6.4 mm	Areia (Ottawa C-109) $e=0.55$; $\phi'=30^\circ$	Aceleração horizontal, sinusoidal, com frequência de 3 Hz. Valor da aceleração de pico nos ensaios de 0.4 a 0.7g.
Budhu <i>et al.</i> (1993) [23]	Com um nível de ancoragem horizontal	Cortina de alumínio: largura 882 mm; esp. 6.35 mm	Areia	Aceleração máxima de 0.4 e 0.6 g; frequência 3Hz

Budhu *et al.* [23] conclui que as estruturas de contenção flexíveis dimensionadas através dos métodos estáticos convencionais podem suportar um nível moderado de aceleração sísmica (até cerca de 0.2g), sem que ocorra a rotura. Nos casos estudados, concluíram que o nível de aceleração necessária para levar à rotura da ancoragem é inferior ao requerido para provocar a instabilidade da cortina, devido a rotação em torno do ponto de aplicação da mesma, pelo que concluem que a ancoragem será a primeira a ceder.

4. CONCLUSÕES

Verifica-se que a maior parte dos estudos publicados na bibliografia da especialidade, que abordam a acção sísmica sobre estruturas de contenção ancoradas, dizem respeito principalmente a análises numéricas, sendo que os que recorrem a modelos físicos são escassos para estruturas mono-apoiadas e inexistentes no caso de estruturas multi-apoiadas. Verifica-se, assim, que no caso das cortinas multi-apoiadas, à excepção dos estudos que têm como base os resultados obtidos da observação das estruturas sujeitas a uma acção sísmica [11] [12] [19], os restantes apoiam-se exclusivamente nas análises numéricas, sem confrontação com ensaios ou resultados de instrumentação para validação dos modelos utilizados.

Todos os casos estudados dizem respeito a solos incoerentes, pelo que a sua representatividade é questionável já que na realidade grande parte dos maciços suportados pelo tipo de estruturas em análise apresentam componente coesiva na sua constituição.

Tendo em atenção estes factos e embora os casos analisados se refiram a situações particulares, o que faz com que os resultados obtidos em cada um deva ser alvo de uma análise tendo em atenção as suas condições específicas, é possível retirar algumas conclusões gerais.

Verifica-se que há uma convergência no sentido da clara influência da flexibilidade da cortina na magnitude e na distribuição das pressões sobre a estrutura, bem como nos respectivos deslocamentos, o que já era expectável. Ressalta o facto de, em geral, a aplicação do método de

Mononobe-Okabe, que serve na maior parte dos casos como referência, conduzir a valores da ordem de grandeza dos obtidos através de análises efectuadas através de outros métodos mais recentes, tal como o MEF, talvez com excepção dos casos das estruturas multi-apoiadas, onde aquele parece conduzir a resultados mais conservativos. Acerca do ponto de apoio da resultante da pressão dinâmica das terras já o consenso não parece ser tão evidente. Os resultados obtidos em alguns estudos acerca do aumento dos comprimentos das ancoragens, para fazer face a fenómenos sísmicos, vai de encontro ao especificado no EC8 [7].

Conclui-se que as características das ancoragens, tal como a sua rigidez, comprimento, inclinação e localização, são aspectos essenciais no comportamento deste tipo de estruturas. As características do terreno e o nível de excitação sísmica são igualmente dois aspectos importantes a ter em atenção. Por outro lado, as análises realizadas recorrendo a modelos elastoplásticos não lineares permitem concluir da importância, para a análise sísmica, do estado de tensão/deformação resultantes da construção da estrutura de contenção. Este aspecto, aliado à utilidade da estimativa do deslocamento e dos esforços permanentes da cortina, leva a que se deva apostar na utilização de modelos de cálculo mais desenvolvidos, sem nunca esquecer o seu apoio em resultados de trabalhos de prospecção adequados.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Steedman, R.S. (1999) Seismic soil-structure interaction of rigid and flexible retaining walls. Actas 2º International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Sêco e Pinto (ed.), Lisboa, pp. 949-956.
- [2] EC7 (2003) Geotechnical design. Part 1: General Rules, EN 1997-1, CEN.
- [3] Terzaghi, K.; Peck, R.B. (1967) Soil mechanics in engineering practice. 2ª edição, John Wiley and Sons, Nova Iorque.
- [4] Degrande, G.; Praet, E.; Van Zegbroeck, B.; Van Marcke, P. (2002) Dynamic interaction between the soil and an anchored sheet pile during seismic excitation. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol. 26, pp. 605-631.
- [5] Mononobe, N.; Matsuo, H. (1929) On the determination of earth pressures during earthquakes. Actas World Engineering Congress, pp. 177-185.
- [6] Okabe, S. (1926) General theory of earth pressures. Journal of the Japan Society of Civil Engineering, vol. 12, nº1.
- [7] EC8 (2002) Design of structures for earthquake resistance. Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects, EN 1998, CEN.
- [8] Siller, T.J.; Dolly, M.O. (1992) Design of tiedback walls for seismic loading. Journal of Geotechnical Engineering, vol.118, nº11, pp. 1804-1821.
- [9] Richards, Jr, R.R.; Elms, D.G. (1992) Seismic passive resistance of tiedback walls. Journal of Geotechnical Engineering, vol.118, nº7, pp. 996-1010.
- [10] Younan, A. H.; Veletsos, A. S. (2000) Dynamic response of flexible retaining walls. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 29, pp. 1815-1844.
- [11] Anastasopoulos, I.; Gazetas, G.; Psarropoulos, P.N. (2004) On the seismic response of flexible retaining structures. Actas 3º International Conference On Earthquake Geotechnical Engineering, Berkeley, Editors Doolin, vol. I, pp. 96-103.
- [12] Gazetas, G.; Psarropoulos, P.N.; Anastasopoulos, I.; Gerolymos, N. (2004) Seismic behaviour of flexible retaining systems subjected to short duration moderately strong excitation, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24, pp. 537-550.
- [13] Veletsos, A.S.; Younan, A.H. (1997) Dynamic response of cantilever retaining walls. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 123, nº 2, pp. 161-172.

- [14] Seed, H.B.; Whitman, R.V. (1970) Design of earth retaining structures for dynamic loads. ASCE – Special Conference – Lateral stresses in the ground and design of earth retaining structures, Cornell University, pp. 103-147.
- [15] Siller, T.J. (1988) Seismic response of tiedback retaining walls. Tese de Doutorado. Universidade de Carnegie-Mellon.
- [16] Siller, T.J.; Christiano, P.P; Bielak, J. (1991) Seismic response of tiedback retaining walls. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 20, pp. 605-620.
- [17] Siller, T.J.; Frawley, D.D. (1992) Seismic response of multianchored retaining walls. Journal of Geotechnical Engineering, vol. 118, nº11, pp. 1787-1803.
- [18] Bangash, A.A.; Denby, G.M.; Fragaszy, R.J. (1992) Non-linear dynamic response of tiedback walls. Actas Conferência Retaining Structures. Institution of Civil Engineers, Robinson College, Cambridge, Thomas Telford, Londres, pp.768-779.
- [19] Gazetas, G.; Gerolymos, N.; Anastasopoulos, I. (2005) Response of three Athens metro underground structures in the 1999 Parnitha earthquake. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol.25, pp. 617-633.
- [20] Ambrósio, A.C.; Santos, J.A.; Brito, J.M. (2005) Análise do comportamento sísmico de estruturas flexíveis multi-apoiadas utilizando modelos viscoelásticos. 3^{as} Jornadas Luso-Espanholas, LNEC, Portugal.
- [21] Neelakantan, G.; Budhu, M.; Richards Jr., R. (1990) Mechanics and performance of a tiedback wall under seismic loads. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 19, pág. 315-331.
- [22] Neelakantan, G.; Budhu, M.; Richards Jr., R. (1992) Balanced seismic design of anchored retaining walls. Journal of Geotechnical Engineering, vol. 118, nº6, pp. 873-888.
- [23] Budhu, M.; Neelakantan, G.; Richard, R. (1993) Balanced seismic design – improving the seismic efficiency of anchored retaining walls. Actas Conferência Retaining Structures, Thomas Telford, Londres, pp. 140-147.