O USO DA DENSIFICAÇÃO NA MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DA LIQUEFACÇÃO INDUZIDA POR SISMOS

THE USE OF DENSIFICATION TO MITIGATE THE EFFECTS OF EARTHQUAKE- INDUCED LIQUEFACTION

Reis, Ricardo M. C. G., *DEC- FCTUC, Universidade de Coimbra, Portugal, reiz@netcabo.pt*
Sousa, José A. M., *DEC- FCTUC, Universidade de Coimbra, Portugal, ze_chippo@sapo.pt*
Coelho, Paulo A. L. F., *DEC- FCTUC, Universidade de Coimbra, Portugal, pac@dec.uc.pt*

RESUMO

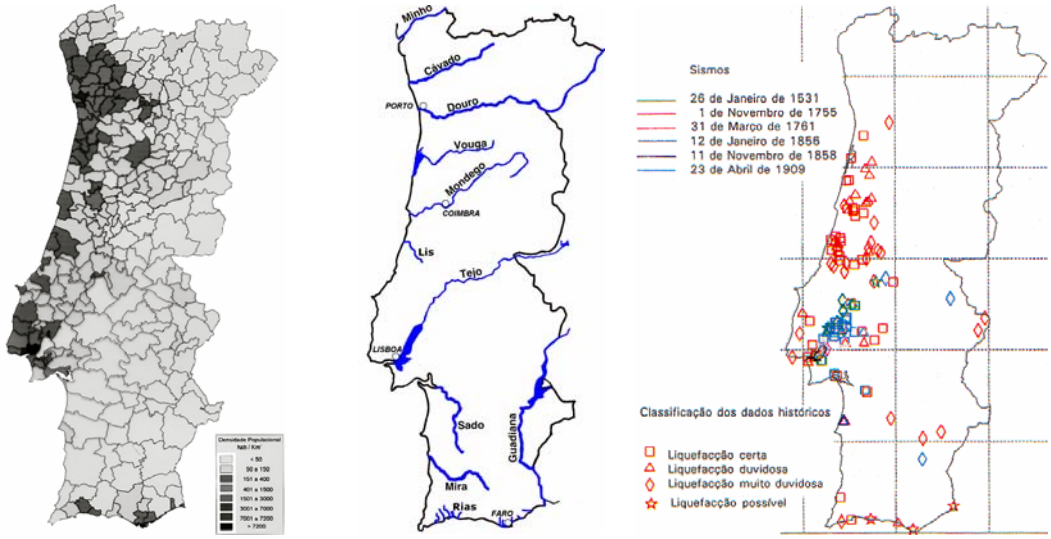
A liquefacção é um problema sério em regiões sismicamente activas para construções assentes em solos incoerentes saturados. Em Portugal, o potencial sísmico de algumas regiões associa-se frequentemente à construção intensiva em zonas costeiras e fluviais sobre solos granulares. Quando os efeitos da liquefacção parecem inaceitáveis, algum tipo de melhoramento e/ou reforço dos solos é requerido. A densificação é uma das técnicas mais usadas na prática, mas o conhecimento sobre os mecanismos que garantem a melhoria da resposta da fundação às acções sísmicas, as características das técnicas de densificação in situ, os efeitos negativos associados ao seu uso e a geometria requerida para o tratamento é limitado. O artigo combina conhecimento empírico com resultados de investigação para discutir estes aspectos, a fim de incentivar um uso mais fundamentado da densificação na mitigação dos efeitos da liquefacção.

ABSTRACT

Liquefaction is a serious problem in seismically active regions for constructions built on saturated granular soils. In Portugal, the seismic potential of some regions frequently combines with an intensive construction in coastal and fluvial areas on top of granular soils. When the effects of liquefaction seem unacceptable, some kind of soil improvement and/or reinforcement is required. Densification is one of the most used techniques in practice, but the understanding on the mechanisms that enhance the foundation response to seismic loading, the characteristics of in-situ densification techniques, the negative effects resulting from its use and the geometry required for the treatment is limited. The paper combines empirical and research knowledge to discuss these issues, in order to support a sounder use of densification in liquefaction mitigation.

1. INTRODUÇÃO

O problema da liquefacção é extremamente sério em regiões sismicamente activas, sobretudo para construções sobre maciços saturados de solos granulares. Os episódios de liquefacção no passado mostram que Portugal não está imune ao fenómeno, pois o potencial sísmico de várias regiões associa-se à distribuição demográfica que privilegia zonas costeiras e fluviais onde abundam materiais incoerentes e níveis freáticos elevados (Figura 1). Quando os efeitos da liquefacção são inaceitáveis, recorre-se a técnicas de melhoramento e/ou reforço de solos que os limitem, sendo a densificação uma das técnicas mais populares. Porém, o conhecimento sobre os mecanismos que garantem um melhor comportamento do solo, as características das técnicas de densificação in situ, a geometria da zona a tratar e as eventuais implicações negativas associadas ao uso desta técnica continua a ser limitado. A fim de melhorar a eficácia da densificação como medida de mitigação dos efeitos da liquefacção induzida por sismos, é fundamental clarificar os aspectos essenciais da sua aplicação e funcionamento.



a) Distribuição Demográfica (INE 1991) b) Rios mais importantes c) Registos históricos de casos de liquefacção (Jorge e Vieira 1997)

Figura 1 – Características demográficas e hidrográficas de Portugal e ocorrências de liquefacção

2. TÉCNICAS DE DENSIFICAÇÃO

Sendo a liquefacção induzida por sismos um fenómeno resultante da geração de excesso de pressão neutra nos solos devido ao corte cíclico, a maioria das medidas de mitigação dos seus efeitos tem por objectivo reduzir essa geração ou facilitar a sua dissipação. A densificação enquadra-se na primeira destas categorias, visando sobretudo aumentar a compacidade do solo e assim melhorar o seu comportamento sob acções dinâmicas e estáticas, o que se traduz num aumento da resistência, nomeadamente à liquefacção, e pela redução da deformabilidade.

A popularidade da densificação advém da percepção física quase intuitiva do melhoramento, da estabilidade dos efeitos do tratamento ao longo do tempo e da relativa facilidade com que o tratamento é realizado in situ. No Japão, um dos países mais fustigados pelos efeitos muitas vezes dramáticos da liquefacção, a densificação é a técnica mitigadora mais utilizada, tanto em termos de número de casos como de volume tratado (Sasaki et al. 2004). Tal tendência tem-se acentuado ao longo dos tempos (Figura 2), o que sugere que se consolidou na comunidade a percepção da sua eficácia na mitigação dos efeitos da liquefacção induzida por sismos.

A densificação dos solos in situ é produzida sobretudo por técnicas de vibração, injecção ou compactação dinâmica. Embora o recurso a explosivos tenha conhecido algumas aplicações, as actuais exigências ambientais e sobretudo de controlo do uso de explosivos limitam o seu uso.

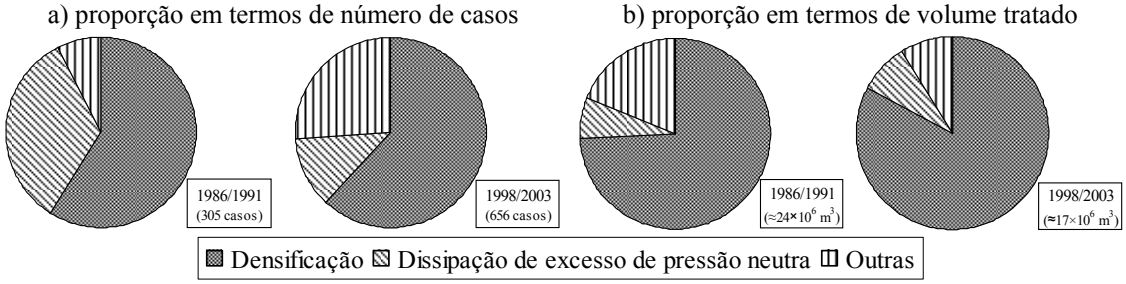


Figura 2 – Tendência da aplicação de medidas de mitigação dos efeitos da liquefacção induzida por sismos no Japão durante as últimas décadas (Sasaki et al. 2004).

A densificação por vibração consiste em introduzir desde a superfície do maciço, eventualmente com o auxílio de jactos de ar e água, um equipamento vibrador capaz de densificar o solo. Consoante o tipo de vibrador utilizado podem-se obter vibrações maioritariamente horizontais ou verticais, que causam uma densificação permanente do solo envolvente. O tratamento é conduzido de baixo para cima e repetido seguindo em geral uma malha rectangular, podendo incluir a instalação de colunas de brita durante a densificação. No caso do tratamento ocorrer em solos saturados, esta técnica causa liquefacção local do maciço. O facto de impor vibrações ao terreno poderá ser prejudicial se for utilizado perto de estruturas existentes.

A densificação por injecção consiste na injecção sob pressão de uma calda de alta viscosidade no solo, formando bolbos dentro do solo que o densificam. Embora possa ser aplicada a solos coesivos, esta técnica mitiga os efeitos da liquefacção quando aplicada em solos incoerentes. Como não gera vibrações no solo e permite o uso de equipamento relativamente leve, a técnica é muito versátil. A sua eficiência tende a ser inversamente proporcional à resistência e rigidez local do maciço, o que tende a produzir uma uniformização das condições mecânicas do maciço, o que é positivo do ponto de vista do comportamento de fundações superficiais.

A densificação ou compactação dinâmica consiste em transmitir ao solo a energia proveniente da queda de uma grande massa de uma altura elevada, causando vibrações no maciço que podem ser muito significativas, e que, para além de aumentarem a tensão efectiva horizontal instalada, induzem a sua densificação. A profundidade do melhoramento tende a crescer com a magnitude da energia gerada no impacto, sendo em geral requeridas técnicas complementares, baseadas por exemplo no uso de cilindros vibradores, para densificar as camadas mais superficiais do maciço a tratar. Em solos saturados, a compactação dinâmica pode gerar excessos de pressão neutra, cuja dissipação pode ser acelerada com drenos verticais.

A escolha da técnica mais indicada para fazer um tratamento por densificação é determinada sobretudo pelas características do maciço e da sua envolvente, pelos requisitos do tratamento (incluindo geometria do tratamento, e nível de densificação requerido) e ainda pelos custos associados. O Quadro 1 resume as características fundamentais das técnicas de densificação, cujo conhecimento permite seleccionar a que melhor serve para tratar um depósito em particular de modo a optimizar o resultado e minimizar os custos e perturbação na envolvente. De realçar que existe uma informação potencialmente relevante que, face às limitações do conhecimento actual, tende a ser ignorada na selecção. De facto, cada técnica pode induzir estruturas variadas no solo densificado, o que pode influenciar de forma significativa o comportamento, sobretudo em termos de resistência à liquefacção (Ishihara 1996). Do ponto de vista ambiental, os impactes produzidos por algumas técnicas durante a construção podem ser inaceitáveis. Em zonas urbanas, por seu lado, sobretudo se densamente povoadas, a escolha da técnica de densificação deve privilegiar os efeitos produzidos sobre as estruturas envolventes. Tal tem impulsionado o uso da densificação por injecção, que é nesses casos a técnica mais adequada.

3. MECANISMOS DE ACTUAÇÃO

O sucesso da densificação na mitigação dos efeitos da liquefacção é frequentemente visto como um resultado óbvio do facto de areias densas apresentarem um comportamento ao corte descrito como dilatante. Tal explicação resulta da observação do comportamento de areias sujeitas ao corte monotónico. De facto, como ilustra a Figura 3 para ensaios monotónicos não drenados, areias soltas têm tendência para gerar pressão neutra positiva enquanto areias densas geram excessos de pressão neutra negativos quase desde o início do corte. Os casos de colapso, como o apresentado na figura, são típicos de areias muito soltas ou sob tensões de consolidação muito elevadas, que são muitíssimo raras na natureza. Em condições mais realistas, até uma areia solta acaba por dilatar, embora o faça para extensões de corte muito superiores às de uma areia densa.

Quadro 1- Características das principais técnicas de densificação utilizadas para melhorar solos (baseado em Green 2001 e Burke e Sehn 2004)

Particularidades da técnica	Técnica utilizada para densificar o solo		
	Vibração	Injecção	Compactação Dinâmica
Características granulométricas do solo a tratar	- solo arenoso c/ <12% finos - depósitos artificiais soltos	- funciona melhor com solos que possuam boa drenagem	- melhor em solos que contêm <50% Silte e <10% de argila - desaconselhado para solos orgânicos
Posição do nível freático no maciço a tratar	- melhor para nível freático elevado mas também aplicável se profundo	- melhor para nível freático profundo mas também é aplicável quando este for elevado	- nível Freático elevado (<1.5 metros) reduz a eficácia
Características de resistência do solo a tratar	- se o estrato superior for muito rígido, pode ser necessário utilizar Pré-perfuração	- estratos superficiais rígidos não são problema (podem até reduzir possíveis levantamentos à superfície)	- estratos superiores muito rígidos reduzem a transmissão da energia - uso desaconselhado em solos moles
Características de plasticidade do solo a tratar	- não aconselhado se >2% de finos de argila	- mais eficaz em solos não plásticos; - mais apropriada para solos pouco sensíveis	- a plasticidade reduz a eficiência da técnica
Profundidade máxima atingível com o tratamento	- eficaz até ± 35 metros de profundidade. Maiores profundidades podem ser atingidas sob condições especiais	- eficaz a profundidades da ordem dos 15-20 metros - necessita de sobrecarga mínima de 50 KPa para ser eficaz	- em geral até 10 metros, contudo, mas já foram atingidas profundidades de 50 metros com equipamento especial
Expectativa de melhoria da compacidade a atingir com o tratamento	- normalmente permite atingir uma densidade relativa de 70 a 85 %;	- normalmente permite atingir uma densidade relativa de 75 a 80%	- normalmente melhora 75% da densidade relativa em solos bons - o levantamento reduz-se com a profundidade do tratamento
Limitações relativas ao melhoramento do maciço	- a densificação produzida não é uniforme, variando conforme distância ao vibrador	- pode causar levantamento da superfície (preferível tratar maciço de cima para baixo)	- a densificação não atinge grande uniformidade em profundidade - exige compactação leve final à superfície
Custos médios de equipamentos (mobilização, preparação do trabalho e desmobilização) e m^3 de tratamento, a preços de 2003 nos USA	- 3500€ a 10000€ como custos de equipamento e preparação do local; - 2€ a 6€ por m^3 de solo tratado acrescido do custo da compensação do assentamento (até 5 a 15% do volume de solo tratado)	- 7000€- custo de equipamento e preparação do local - 25€ a 50€ por metro de furacão; - 45€ a 180€ por m3 de calda viscosa (quantidade variável em função das condições do solo)	- 15000€ a 35000€ para os custos de equipamento e preparação do local de trabalho - 5€ a 15€ por m^2 de tratamento, mais os custos de compensação dos assentamentos
Consequências negativas sobre a envolvente	- assentamentos em redor dos furos de tratamento, o que pode afectar estruturas que estejam quase sobre a zona (pode ser minimizado por introdução de material, de preferência colocado em profundidade no furo)	- pode causar levantamento do maciço à superfície (pressões exageradas), o que pode até ser usado, em condições controladas, para corrigir deformações indesejáveis de estruturas (preferível o método descendente para criar crusta superficial inicial);	- forte poluição ambiental (sonora e do ar); - o nível de vibrações induzido no maciço pode causar danos elevados em infraestruturas e estruturas vizinhas

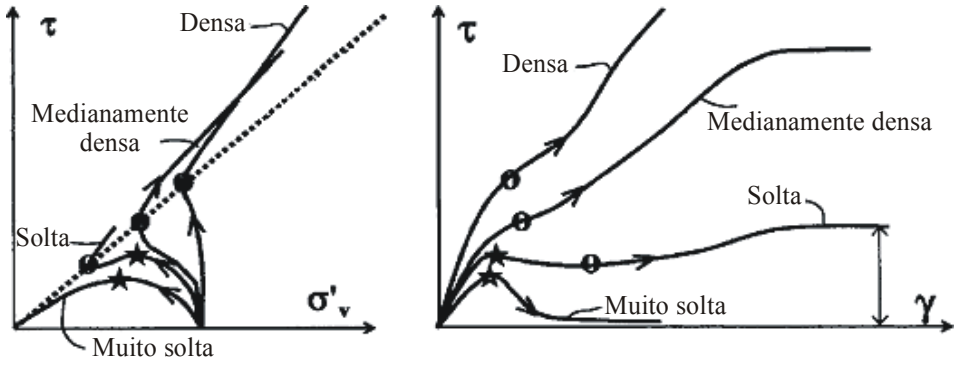


Figura 3- Comportamento de uma areia com diferentes densidades relativas sujeita ao corte monotónico não drenado (Groot et al. 2006)

a) areia com densidade relativa de 47 %

b) areia com densidade relativa de 75 %

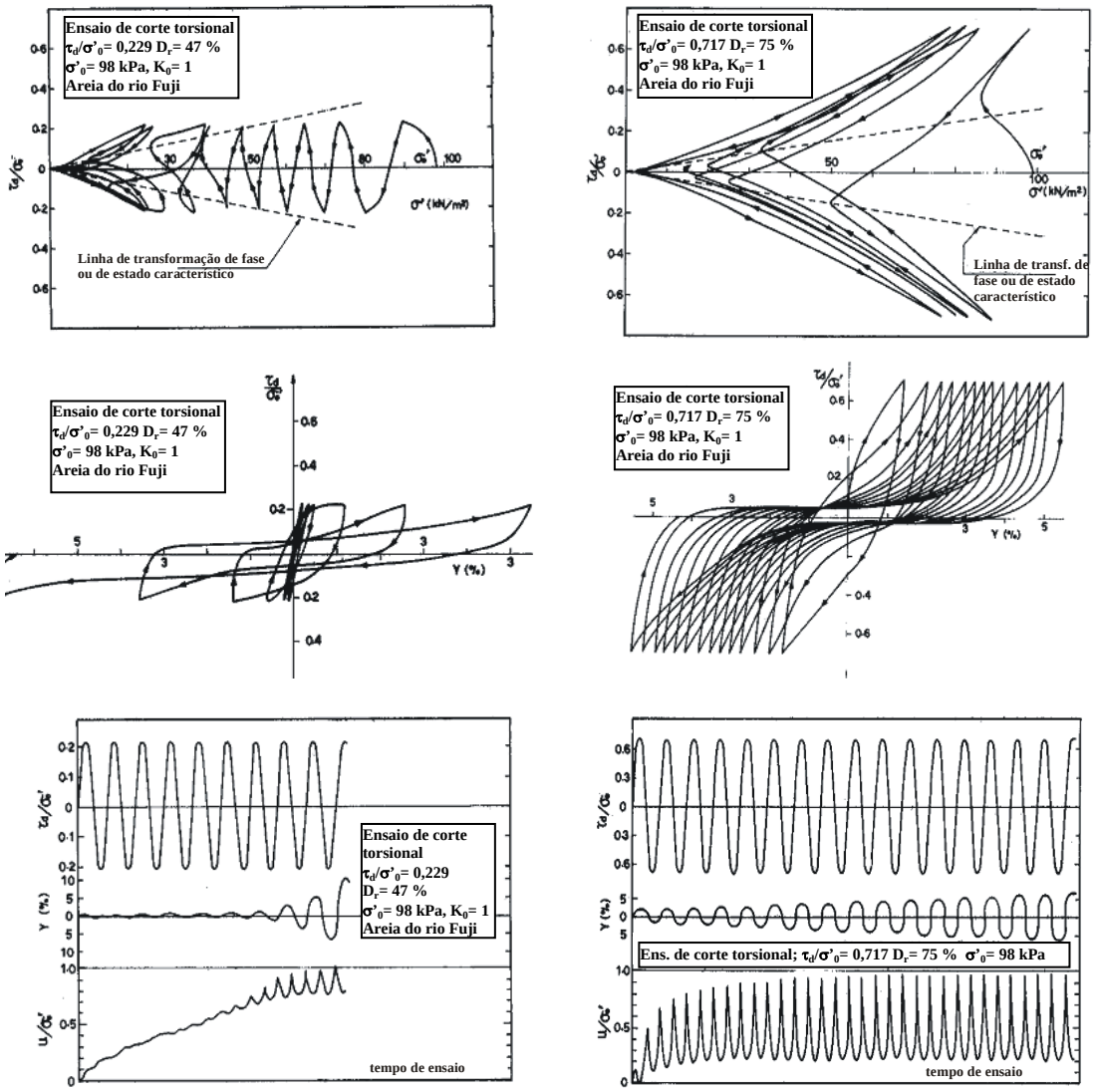


Figura 4- Comportamento de areia de Toyoura com diferentes compacidades em corte cíclico torsional não drenado (Ishihara 1985)

No caso de areias sob acções cíclicas, em condições não drenadas, o comportamento é porém distinto. Neste caso, o conceito de comportamento dilatante descreve apenas fases limitadas em cada ciclo de solicitação, sendo no entanto válido para areias com diferentes compacidades. O comportamento cíclico das areias em condições não drenadas é governado pela existência da linha de transformação de fase ou de estado característico, que define os instantes em que o comportamento da areia passa de contractivo a dilatante e vice-versa, desde que o nível de redução da tensão efectiva ou de solicitação seja elevados. Ao contrário do que acontece no caregamento monotónico, a reversão da carga em cada ciclo acaba por gerar aumentos mais ou menos significativos da pressão neutra qualquer que seja a compacidade da areia, o que leva a uma redução progressiva da tensão efectiva no solo em cada ciclo (Figura 4).

Ainda que o comportamento seja globalmente semelhante, enormes diferenças subsistem entre o comportamento de areias soltas e densas quando sujeitas ao corte (Figura 4). Por um lado, a acumulação de excesso de pressão neutra é muito maior numa areia solta, onde a degradação do comportamento do solo é por isso mais acelerada. Por outro lado, quando o nível de tensão efectiva na amostra atinge valores baixos, uma amostra densa exibe uma resposta muito mais rígida quando solicitada ao corte do que uma areia solta. Tal não poderá ser desligado do facto de, em cada inversão da direcção do carregamento, a elevada capacidade da areia densa para dilatar permitir reduzir significativamente a pressão neutra durante uma fase do ciclo.

Na realidade, durante uma solicitação sísmica no campo, o carregamento do maciço será uma conjugação de um carregamento cíclico com um carregamento dinâmico. Neste caso, a melhoria do comportamento do maciço quando densificado relativamente à liquefacção resulta fundamentalmente de dois factores:

- por um lado, da menor taxa de geração de excesso de pressão neutra que se verifica durante o carregamento cíclico num maciço denso, o que limita a degradação do comportamento;

- por outro lado, da resposta bem mais rígida que um solo denso, mesmo que sob nível de tensão efectiva reduzido, oferece quando solicitado de forma monotónica, como por exemplo por uma fundação construída sobre um maciço sujeito a excessos de pressão neutra gerados por sismos.

4. IMPACTOS NEGATIVOS DA DENSIFICAÇÃO

Dadas as limitações das capacidades de dimensionamento actuais, nomeadamente em termos de interacção solo-estrutura em problemas envolvendo geração de excesso de pressão neutra na fundação, não é comum avaliar os eventuais impactos negativos para as estruturas resultantes do tratamento por densificação da sua fundação, o qual é supostamente realizado com o objectivo de as proteger, nomeadamente dos efeitos da liquefacção. Porém, alguns resultados de investigação têm sugerido que uma estrutura fundada num maciço densificado pode estar sujeita a maior solicitação sísmica do que se estivesse construída num maciço não tratado. Nesse caso, a melhoria do comportamento da fundação poderia não corresponder necessariamente a um aumento da segurança da estrutura, a menos que também esta seja reforçada.

Hausler e Sitar (2001) provaram através de modelos físicos que estruturas construídas sobre maciços densificados sofrem maiores acelerações durante um sismo do que as construídas sobre maciços não tratados. Liu e Dobry (1997) observaram também que o incremento da energia sísmica transmitido a uma estrutura assente num maciço densificado depende da profundidade do tratamento. Coelho et al. (2007) obtiveram conclusões consistentes com estas, provando a dependência da solicitação sísmica de uma ponte em relação à largura da zona densificada. Além disso, verificaram que, devido à interacção solo-estrutura, o assentamento da estrutura durante o sismo cresce com a largura da zona tratada, pelo que o melhor desempenho de zonas densificadas extensas depende de uma redução maior dos assentamentos pós-sismo.

Claro que, sendo o tratamento exigido para mitigar os efeitos da liquefacção, as implicações negativas associadas não deverão impedir o seu uso, embora estas devam ser consideradas pelo projectista estrutural para preservar o nível de segurança do dimensionamento. Em particular, o incremento do valor das acelerações e a alteração da frequência predominante na acção sísmica transmitida à estrutura podem afectar significativamente alguns tipos de estruturas.

5. GEOMETRIA DE DENSIFICAÇÃO

Um dos aspectos mais importantes relativamente ao uso da densificação enquanto medida de mitigação dos efeitos dos sismos é o da geometria do tratamento, o qual deve conjugar um comportamento óptimo em termos de assentamentos e solicitação da estrutura, com custos mínimos. A escolha da geometria ideal é dificultada pelo conhecimento limitado sobre o uso da densificação na mitigação dos efeitos da liquefacção, as incertezas da modelação numérica do problema e as conclusões ambíguas obtidas pela observação de casos reais. De facto, verifica-se que embora o desempenho de estruturas construídas sobre maciços densificados supere em geral o de estruturas vizinhas em que não existe qualquer tratamento, não tem sido possível identificar as razões pelas quais o comportamento pode ser ainda assim insatisfatório (Mitchell et al. 1998). Em termos económicos e de viabilidade de aplicação do tratamento in situ, ainda que a profundidade a densificar seja relevante, a maior preocupação reside na extensão da área a densificar em planta à volta da estrutura. De facto, esta define o número de vezes que é preciso mover o equipamento de densificação e a área envolvente à estrutura que tem de ser ocupada e perturbada, o que levanta problemas de vária ordem, sobretudo em ambientes urbanos.

Tradicionalmente, como relatam Mitchell et al. (1998), tem sido aconselhada a implementação de zonas densificadas sob fundações superficiais com a seguinte geometria (Figura 5):

- levar o tratamento a profundidades tais que cubram toda a espessura (d) de solos susceptíveis de sofrer liquefacção;

- estender a área de tratamento em planta, para além dos limites da fundação, de uma distância igual à profundidade do tratamento.

Tais indicações implicam um volume de solo a densificar, V_{dens}, que pode ser muito significativo, e que é dado, seguindo a nomenclatura da Figura 5, por:

$$V_{dens} = A_{dens.} \times B_{dens.} \times d = (A_{fund.} + 2 \times d) \times (B_{fund.} + 2 \times d) \times d \qquad (1)$$

Face aos custos que tal geometria implica e à dificuldade crescente em atingir tais dimensões em planta, sobretudo em meios urbanos, alguns autores propõem que a extensão do tratamento em planta seja limitada a 0,6×d (Kramer 1996). Coelho et al. (2007) sugerem que tal redução pode ser ainda maior, pelo menos se as condições de realização dos ensaios na centrifugadora, com simetria da solicitação sísmica e horizontalidade do bedrock, reflectirem a situação real.

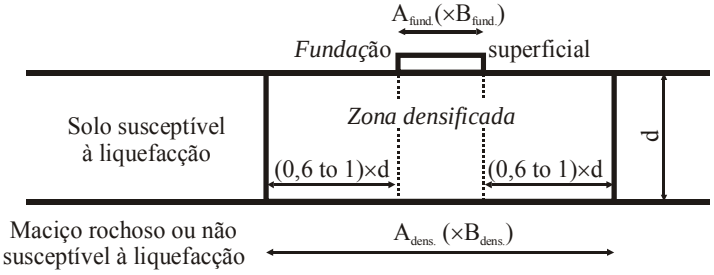


Figura 5- Dimensões do tratamento utilizadas na prática corrente

6. CONCLUSÕES

As características do território Português favorecem a ocorrência de liquefacção em zonas urbanas, o que deve ser considerado no dimensionamento das fundações. Embora a densificação seja cada vez mais utilizada para mitigar os efeitos devastadores da liquefacção, os progressos relativos aos fundamentos científicos da sua aplicação são limitados. A experiência actual sugere que a selecção da técnica de densificação deve basear-se não só nos custos mas mais nas capacidades e limitações de cada técnica, incluindo os impactes ambientais e efeitos sobre a envolvente construída, sobretudo se o tratamento for feito em ambiente urbano. Além disso, o aumento da solicitação dinâmica imposta às estruturas construídas sobre maciços densificados deve ser previsto no dimensionamento, para que o nível de segurança estrutural seja mantido.

A geometria actualmente recomendada na prática corrente impõe grandes volumes a tratar e a ocupação de extensas áreas em redor das estruturas, o que nem sempre é física ou economicamente viável. Porém, a clarificação do funcionamento da densificação como medida de mitigação dos efeitos da liquefacção sugere que é possível vir a utilizar zonas de densificação mais estreitas no futuro. Tal evolução, conjugada com as potencialidades da densificação por injecção, pode fomentar a utilização desta técnica em meios urbanos densamente povoados.

REFERÊNCIAS

Burke, G.K. e Sehn A.L., (2004) "*The Influence of Ground Improvement on Geotechnical Design*". ASCE/ NCDOT Geo^3 T^2 Conference- Geotechnical Agenda, NC, US.

Coelho, P.A.L.F., Haigh, S.K., Madabhushi, S.P.G. & O'Brien, T.S. (2007) "*Post-earthquake behaviour of footings employing densification to mitigate liquefaction*", Journal of Ground Improvement, Thomas Telford, No. 11 (1): 45-53.

Green, R.A. (2001) "*Energy-Based Evaluation and Remediation of Liquefiable Soils*", Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, 397 p.

Groot, M.B.; Bolton, M.D.; Foray, P.; Meijers, P, Palmer, A.C. Sandven, R., Sawicki, A. e Teh, T.C. (2002), "*Physics of Liquefaction Phenomena around Marine Structures*" Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, No.132(4): 227-243.

Hausler, E.A. e Sitar, N. (2001) "*Dynamic Centrifuge Testing of Improved Ground*", Proc. 15th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Recent Developments in Ground Improving, Turkey: 27–31.

INE (1991) "*Censos 91"*, XII Recenseamento Geral da População. INE, Portugal.

Ishihara, K. (1985) "*Stability of Natural Deposits During Earthquakes*", Theme Lecture, Proc. XI Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 1, San Francisco, Balkema, Rotterdam: 321-376.

Ishihara, K. (1996) "*Soil behaviour in Earthquake Geotechnics*", Oxford Engineering Science Series, Clarendon Press, Oxford, UK, 350 p.

Jorge, C. e Vieira, A. (1997) "*Liquefaction potential assessment"*, Seismic behaviour of ground and geotechnical structures, Sêco e Pinto (ed), Balkema: 33-43.

Kramer, S.L. (1996) "*Geotechnical Earthquake Engineering"*, Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.

Liu, L. e Dobry, R. (1997) "*Seismic response of shallow foundations on liquefiable saturated sand*", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng., ASCE, 123(6): 557-567.

Mitchell, J.K., Cooke, H. G. & Schaeffer, J. (1998) "*Design considerations in ground improvement for seismic risk mitigation*", Proc. Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III, Seattle, Wa., ASCE Geotech. Publication No.75, Vol.1: 580-613.

Sasaki, Y., Kano, S. e Matsuo, O. (2004) "*Research and practices on remedial measure for river dikes against liquefaction*", Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, 4(3): 312-335.