

Modelagem em Centrífuga de Ancoragem Helicoidal de Uma Hélice Submetida a Carregamentos Cíclicos de Tração

José Antonio Schiavon

Departamento de Geotecnia, EESC, USP, São Carlos, Brasil, jaschiav@sc.usp.br

Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha

Departamento de Geotecnia, EESC, USP, São Carlos, Brasil, chctsuha@sc.usp.br

Alain Neel

Laboratoire Géomatériaux et Modèles Géotechniques, IFSTTAR, Bouguenais, França, alain.neel@ifsttar.fr

Luc Thorel

Laboratoire Géomatériaux et Modèles Géotechniques, IFSTTAR, Bouguenais, França, luc.thorel@ifsttar.fr

RESUMO: As ancoragens helicoidais têm sido amplamente empregadas no Brasil para ancorar os estais de torres de linhas de transmissão de energia. Nesta aplicação, as ancoragens estão sujeitas a carregamentos cíclicos originados principalmente pela ação do vento sobre a superestrutura, contudo existem poucos estudos que abordam este problema com ancoragens helicoidais. Este artigo apresenta os resultados preliminares de um estudo do comportamento de ancoragens helicoidais com uma hélice submetidas a carregamento cíclico. Ensaios de carregamento monotônico e cíclico de tração foram realizados na centrífuga do IFSTTAR com um modelo de ancoragem helicoidal de uma hélice instalada em areia muito compacta. Os experimentos compreenderam diferentes amplitudes de carregamento que atingiram até 64% da capacidade de carga à tração da ancoragem, com até 2000 ciclos de carregamento. Os resultados contribuem para o entendimento da influência do número e da amplitude dos ciclos sobre o desempenho da ancoragem.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem em Centrífuga, Ancoragens Helicoidais, Carregamento Cíclico.

1 INTRODUÇÃO

As ancoragens helicoidais são frequentemente usadas no Brasil como ancoragens de estais de torres de linhas de transmissão de energia. Nesse caso, as ancoragens estão sujeitas a carregamentos cíclicos provenientes, principalmente, da ação do vento sobre a torre, sendo indispensável ao projeto considerar-se a influência desse carregamento cíclico sobre o comportamento do sistema ancoragem-solo.

O desempenho da ancoragem sob carregamento cíclico de tração é dependente da

amplitude cíclica ($Q_{cíclica}$), da carga média ($Q_{méd}$), do período de um ciclo (T) ou da frequência (f) e do número de ciclos (N). Os parâmetros de um carregamento cíclico são descritos na Figura 1.

Dois fenômenos relacionados ao carregamento cíclico axial podem influenciar o comportamento das ancoragens helicoidais: a) a degradação cíclica da resistência por atrito lateral e da capacidade de carga da hélice; b) a acumulação de deslocamentos permanentes com o aumento do número de ciclos. Estudos anteriores têm relatado que o carregamento

cíclico induz a uma degradação do desempenho da ancoragem tanto em solos granulares grossos como em solos finos. Entretanto, Clemence e Smithling (1984) relatam que carregamentos repetidos de baixa a média amplitude podem provocar aumento de rigidez do sistema ancoragem-solo. Esse aumento de rigidez pode ser atribuído à ação do carregamento cíclico sobre o solo da região acima da placa, que foi previamente perturbado pela instalação da ancoragem (Victor e Cerato, 2008).

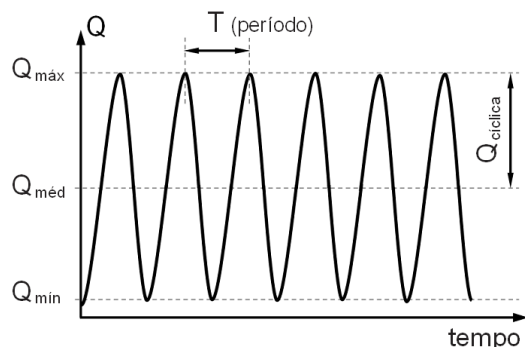


Figura 1. Parâmetros de um carregamento cíclico (Schiavon *et al.*, 2016).

Poulos (1988) propôs um diagrama de estabilidade para avaliar a resposta de estacas convencionais (sem hélice) submetidas a carregamento cíclico. Nos eixos do diagrama são plotados $Q_{cíclica}/Q_T$ e $Q_{méd}/Q_T$, onde Q_T é a capacidade de carga à tração. Nesse diagrama, o comportamento da fundação sob diferentes condições de carregamento cíclico é classificado em três zonas: estável, instável e metaestável. Então, é necessário realizar ensaios com diversas combinações de carga cíclica e carga média para que seja possível construir o diagrama, específico para o tipo de estaca estudado que está instalada num perfil geotécnico particular. Para satisfazer a necessidade de vários ensaios, a modelagem física em centrífuga pode ser uma ferramenta valiosa.

Com modelos reduzidos em centrífuga, é possível investigar o comportamento de fundações sob carregamentos cíclicos, uma vez que é possível realizar uma quantidade satisfatória de experimentos a um custo relativamente baixo em comparação às provas de carga em real grandeza. Assim, este artigo

apresenta as observações de um estudo preliminar sobre o comportamento de ancoragens helicoidais instaladas em areia e submetidas a carregamentos cíclicos de tração. Três ensaios cíclicos em centrífuga foram realizados com valores semelhantes de pré-carga de tração ($Q_{mín} = Q_{pré}$) e diferentes amplitudes de carregamento cíclico ($Q_{cíclica}$) para simular a carga de vento nos estais de uma torre.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho descrito neste artigo foi realizado na centrífuga geotécnica do IFSTTAR, em Nantes, França (Figura 2). Tanto a instalação da ancoragem helicoidal quanto os ensaios de carregamento foram realizados sob uma aceleração centrífuga igual a 10 vezes a aceleração da gravidade terrestre ($10 \times g$). Os experimentos com modelos reduzidos em centrífuga permitem reproduzir, a partir do mesmo material que o protótipo, o mesmo campo de forças de massa que ocorreria em uma obra em grandeza real (Garnier, 2001). Na modelagem física em centrífuga, a intensidade do campo gravitacional gerado pela aceleração centrífuga deve ser inversamente proporcional à escala de redução do modelo (Corté, 1989).



Figura 2. Centrífuga do IFSTTAR.

2.1 Modelo da ancoragem

Sabendo-se que a capacidade de carga de uma ancoragem com uma hélice é composta por

resistência de atrito lateral e pela capacidade de carga da hélice, é necessário utilizar um modelo com uma escala apropriada para se evitar que os resultados sejam influenciados pelo tamanho da partícula de areia em relação ao tamanho do modelo. Contudo, não há propostas na literatura de relações de escala para modelagem de ancoragens helicoidais. Nesse caso, adota-se as recomendações propostas por estudos anteriores sobre efeito escala em modelos de ancoragem em placa e em modelos de estacas comuns (Tsuha, 2007).

O comportamento do modelo de ancoragem deve ser reproduzido com a obediência de um valor mínimo para duas relações: entre o diâmetro da haste e o diâmetro médio das partículas do solo (d/d_{50}), entre o diâmetro da hélice e o diâmetro médio das partículas do solo (D/d_{50}). Neste trabalho, as recomendações reportadas por Garnier *et al.* (2007) foram seguidas na escolha das dimensões adequadas da haste e da hélice do modelo de ancoragem helicoidal.

A ancoragem de uma hélice usada nesta investigação foi feita em aço, com uma hélice de 33 mm de diâmetro (D) e 2,5 mm de passo, soldada a uma haste com diâmetro de seção transversal (d) igual a 10 mm (Figura 3).

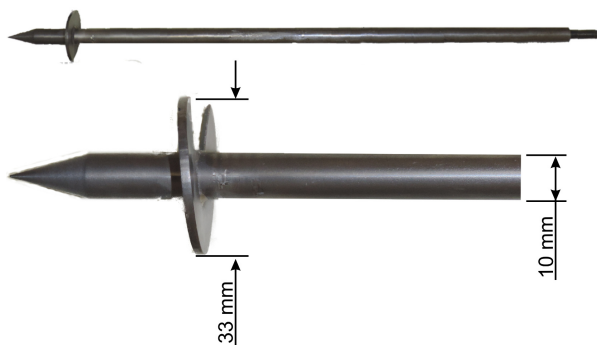


Figura 3. Modelo da ancoragem helicoidal.

As ancoragens helicoidais são instaladas no terreno por meio de rotação que normalmente varia de 5 a 20 RPM, para proporcionar um avanço contínuo e suave, minimizando a perturbação do solo (Chance, 2012). Para a instalação da ancoragem modelo deste estudo, uma taxa de rotação igual a 5,3 RPM foi aplicada no topo da ancoragem, simultaneamente ao avanço vertical de um

passo de hélice para cada revolução.

A profundidade de embutimento da hélice da ancoragem modelo foi de 7,4 vezes o diâmetro da própria hélice (D), que corresponde ao limite do sistema de teste.

2.2 Maciço de areia

O material utilizado para constituir o maciço de solo seco foi a areia de Hostun HN38, com massa específica seca mínima igual a 1,185 g/cm³ e massa específica seca máxima igual a 1,554 g/cm³. O tamanho médio das partículas (d_{50}) é 0,12 mm e o coeficiente de uniformidade é 1,97.

Por meio da técnica de chuva de areia, a areia foi depositada em um container retangular com 120 cm de comprimento, 80 cm de largura e 36 cm de profundidade. A massa específica do maciço no container é definida em função da altura de queda das partículas, da quantidade de areia que flui do reservatório de areia, e da velocidade horizontal do deslocamento desse reservatório sobre o container. Neste estudo, os parâmetros citados foram ajustados para proporcionar uma compacidade relativa (CR) igual a 99%. Para verificar a massa específica obtida, três recipientes calibrados foram colocados no fundo do container. Após os ensaios em centrífuga, o container foi esgotado e os recipientes recuperados para pesagem.

2.3 Procedimento experimental

A instalação da ancoragem modelo foi realizada em voo ($10\times g$). Foi feita uma instalação para cada ensaio de carregamento cíclico. Após a instalação, foi realizado um ensaio de carregamento cíclico com amplitude pré-definida. Os parâmetros necessários para descrever o carregamento cíclico de cada ensaio de tração são: (a) carga média, Q_{med} ; (b) carga cíclica (ou metade da amplitude de carregamento), $Q_{cíclica}$; (c) frequência de carregamento, f ; (d) número de ciclos, N . Os ciclos de carregamento cíclico foram conduzidos segundo uma função senoidal com $f = 1$ Hz (ou período $T = 1$ s), em escala do modelo. A instalação e os ensaios de carregamento foram feitos com o uso de um

sistema servo-controlado que permite realizar os experimentos com controle de deslocamento ou de força (Figura 4).

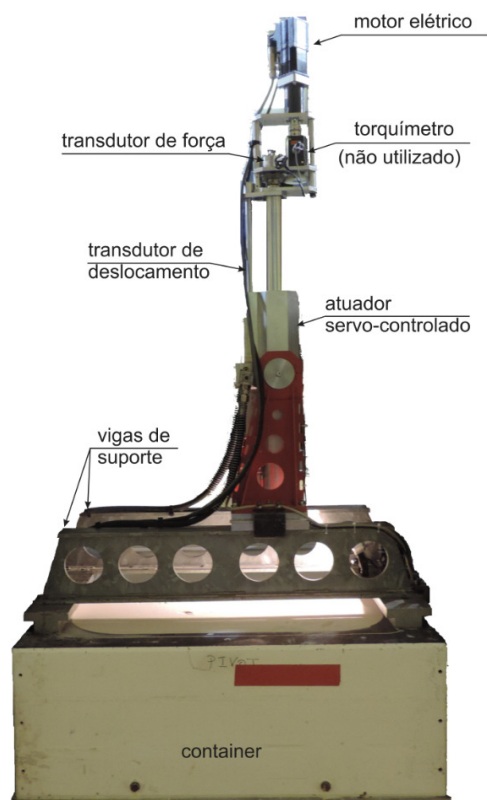


Figura 4. Container e sistema servo-controlado (Schiavon *et al.*, 2016).

A pré-carga ($Q_{pré}$) corresponde à carga mínima a que a ancoragem modelo foi submetida durante o carregamento cíclico, definida como a diferença entre $Q_{méd}$ e $Q_{cíclica}$. Neste estudo, os três ensaios de carregamento cíclico foram conduzidos para simular a condição de serviço de uma ancoragem para estais de torres de linhas de transmissão, com valores de pré-carga entre 18 e 26% da capacidade de carga à tração. A Tabela 1 apresenta os parâmetros usados nos três ensaios cíclicos.

Tabela 1. Parâmetros dos carregamentos cíclicos.

Ensaio	$Q_{pré}$	$Q_{méd}$	$Q_{cíclica}$	Número de ciclos (N)
1	$0.22Q_T$	$0.36Q_T$	$0.15Q_T$	2000
2	$0.26Q_T$	$0.45Q_T$	$0.19Q_T$	2000
3	$0.18Q_T$	$0.40Q_T$	$0.23Q_T$	2000

Três ciclos consecutivos de estabilização do maciço de areia foram realizados (três minutos

cada ciclo). Após, procedeu-se a instalação e o ensaio de carregamento cíclico da ancoragem modelo, em voo ($10\times g$).

3 RESULTADOS

A amplitude do carregamento cíclico foi definida como uma parcela da capacidade de carga da ancoragem. Por isso, foi necessário conduzir previamente um ensaio de carregamento monotônico de tração na ancoragem modelo. Também, sobre o mesmo modelo, foi realizado um segundo carregamento, com o objetivo de comparar a resposta carga-deslocamento de ambos os ensaios monotônicos.

3.1 Ensaios de carregamento monotônico

A curva força-deslocamento do primeiro carregamento monotônico de tração é mostrada na Figura 5. Duas tendências diferentes podem ser observadas no trecho da curva que precede o ponto da carga de pico: um trecho linear entre deslocamento zero e aquele correspondente a cerca de $0,03D$, seguido por um comportamento não-linear até um deslocamento vertical correspondente a $0,2D$. A carga última $Q_T = 93$ kN (de pico), em escala do protótipo, foi alcançada após 54,6 mm ($0,16D$) de deslocamento vertical do topo da haste, em escala do protótipo. Para um deslocamento vertical correspondente a $0,1D$, a carga de tração no topo da haste (Q) foi de 89 kN em escala do protótipo, uma diferença de 4 kN em comparação com o valor da carga de pico.

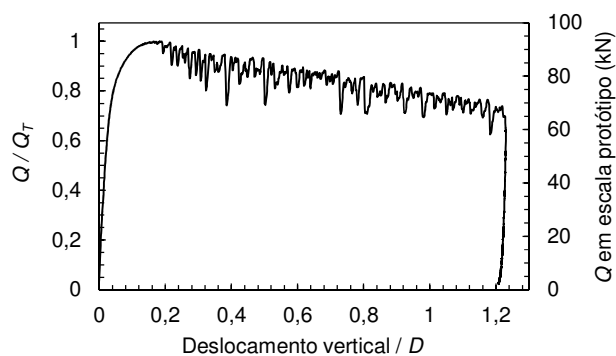


Figura 5. Curva carga-deslocamento do primeiro carregamento (Schiavon *et al.*, 2016).

Após 400 mm de deslocamento vertical do topo da haste (em escala do protótipo), a ancoragem modelo foi descarregada e exibiu 6,7 mm de deslocamento recuperável. Então, um segundo carregamento monotônico de tração foi aplicado para investigar a resposta carga-deslocamento após grandes deslocamentos. A Figura 6 mostra as curvas carga-deslocamento dos dois ensaios de tração. A porção inicial de ambas as curvas é análoga até um valor de carregamento em torno de 50% da capacidade de carga (Q_T), que equivale à carga admissível para um fator de segurança igual a 2. Entretanto, o trecho seguinte da curva do primeiro carregamento, que é não linear e precede o pico de carga, não foi observado no segundo carregamento.

O efeito de um carregamento prévio de tração, com grande deslocamento, reduziu a resistência ao arrancamento da ancoragem em 65%. Nesse segundo carregamento, a carga de pico, caracterizando ruptura, ocorreu para um deslocamento vertical não acumulado de 0,04D (deslocamento medido a partir do início do segundo carregamento).

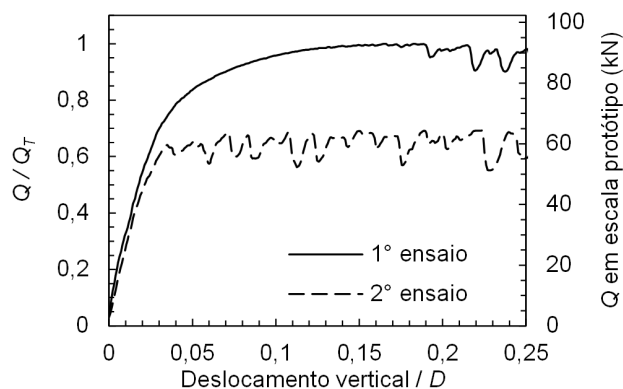


Figura 6. Resposta carga-deslocamento para os ensaios consecutivos de tração (Schiavon *et al.*, 2016).

3.2 Carregamento cíclico

Os deslocamentos verticais foram monitorados desde o fim de cada processo de instalação da ancoragem modelo até o início do carregamento cíclico. Para atingir o valor necessário de pré-carga, o deslocamento vertical no topo da haste, em escala do protótipo, foi de 5,4 mm no ensaio 1, 5,0 mm no ensaio 2 e 4,9 mm no ensaio 3.

O carregamento cíclico de cada ensaio foi realizado logo após a instalação da ancoragem modelo. Nenhum carregamento precedente foi aplicado à ancoragem antes do carregamento cíclico. Três diferentes amplitudes de carregamento cíclico foram testadas, com pré-cargas cíclicas entre 18 e 26% de Q_T .

Devido a um problema na programação do sistema servo-controlado, o carregamento cíclico iniciou antecipadamente, resultando em uma variação linearmente crescente da carga aplicada nos primeiros 4, 9 e 25 ciclos dos ensaios 1, 2 e 3, respectivamente.

A Figura 7 apresenta as três curvas carga-deslocamento da ancoragem modelo sob carregamento cíclico. O deslocamento observado no primeiro ciclo dos três ensaios foi maior e difere significativamente dos ciclos seguintes. Isso ocorre porque o primeiro ciclo corresponde ao primeiro carregamento experimentado pela areia perturbada acima da hélice. Este resultado indica que há uma redução da rigidez inicial da ancoragem, efeito da perturbação da areia na região acima da hélice, causada pela instalação da ancoragem.

O deslocamento vertical acumulado após 1000 ciclos foi de 14,7 mm (0,04D) no ensaio 1, 20,7 mm (0,06D) no ensaio 2, e 28,7 mm (0,09D) no ensaio 3. O carregamento cíclico foi conduzido até 2000 ciclos e o deslocamento vertical acumulado no final dos ciclos foi de 17,4 mm, 24,4 mm e 35,5 mm em escala do protótipo, respectivamente para os ensaios 1, 2 e 3.

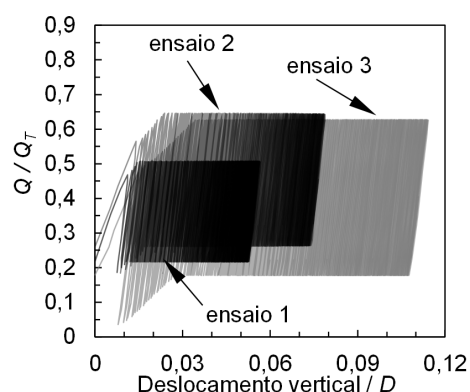


Figura 7. Curvas carga-deslocamento dos ensaios cíclicos.

A Figura 8a apresenta os deslocamentos

verticais medidos no topo da estaca ao longo do carregamento cíclico. Para os ensaios 1 e 2, nota-se uma tendência de estabilização dos deslocamentos. No caso do ensaio 3, a quantidade de ciclos não foi suficiente para identificar uma tendência de estabilização.

Quando o número de ciclos é plotado em escala logarítmica, (Figura 8b), distingue-se duas respostas diferentes na acumulação dos deslocamentos são identificadas. Os três ensaios exibem uma relação bilinear do deslocamento vertical com o logaritmo do número de ciclos (N). Entretanto, o ponto de interseção das duas tendências lineares não ocorre sempre no mesmo ponto para os três ensaios. Figura 8, observa-se que a mudança no comportamento da curva acontece para números de ciclos cada vez menores quando se aumenta a amplitude do carregamento. No ensaio 1, por exemplo, a tendência de acumulação de deslocamentos modifica-se após 60 ciclos aproximadamente. Esta transição é observada por volta de 20 ciclos no ensaio 2 e em aproximadamente 10 ciclos do ensaio 3.

Para as análises deste trabalho, o comportamento cíclico instável quando atinge um deslocamento acumulado igual ou maior que $0,1D$ com menos de 100 ciclos realizados. Portanto, nenhum dos três ensaios exibiu comportamento cíclico instável.

Segundo Tsuha *et al.* (2012), o comportamento cíclico estável é identificado quando os deslocamentos no topo da haste se acumulam lentamente e não atingem um valor correspondente a $0,1D$ após 1000 ciclos de carregamento. Os três ensaios exibiram comportamento estável. Apenas o ensaio 3 apresentou ruptura, mas apenas ocorrendo após 1250 ciclos (deslocamento $\geq 0,1D$). Assim, carregamentos cíclicos com $Q_{m\acute{a}x} = 0,5Q_T$ ou menos não levaram a ancoragem modelo à ruptura (deslocamento $\geq 0,1D$). Caso algum ensaio provocasse deslocamento vertical da ancoragem maior que $0,1D$ entre 100 e 1000 ciclos, o comportamento cíclico da ancoragem seria meta-estável.

Para os três ensaios realizados, a taxa de acumulação dos deslocamentos foi mais significativa nos 100 primeiros ciclos. Uma possível explicação está relacionada à

compactação do cilindro de solo perturbado pela instalação acima da hélice e no entorno da haste, cuja rigidez vai aumentando conforme o carregamento cíclico se processa. O aumento de rigidez contribui com o ganho de estabilidade cíclica da ancoragem e afasta a ancoragem da ruptura.

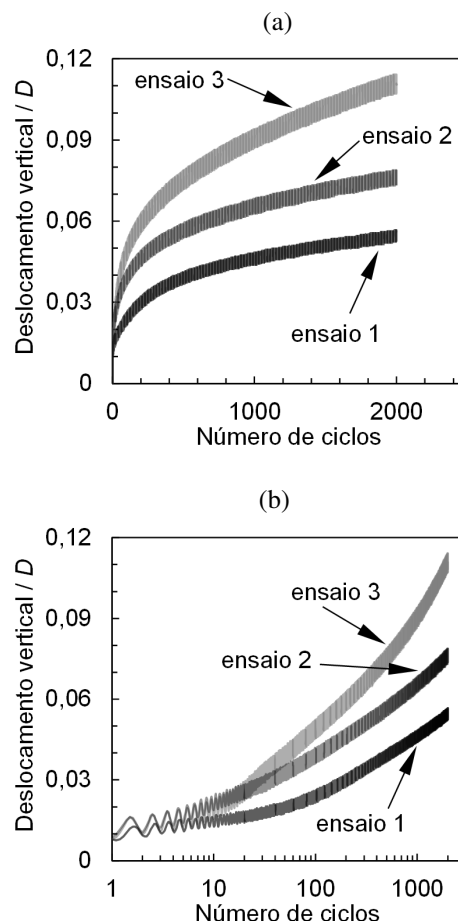


Figura 8. Deslocamento vertical vs número de ciclos: (a) número de ciclos em escala linear; (b) número de ciclos em escala logarítmica.

4 CONCLUSÃO

Três carregamentos cíclicos de diferentes amplitudes foram realizados em um modelo de ancoragem helicoidal com uma hélice em centrífuga. Os resultados desta investigação indicaram um comportamento bilinear na relação entre os deslocamentos da ancoragem e o logaritmo do número de ciclos. O modelo de ancoragem de uma hélice apresentou resposta cíclica estável para amplitudes cíclicas ($2Q_{c\acute{i}clica}$) de até 40% da capacidade de carga à

tração da ancoragem (Q_T), com uma pré-carga entre 18 e 26% de Q_T .

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao programa USP-COFECUB (projeto nº UsMa 132/12), à CAPES (Brasil) pelo apoio financeiro concedido por meio de bolsa de doutorado sanduíche, e ao IFSTTAR (França) pelo apoio concedido por meio de equipamentos e pessoal. Também gostaríamos de agradecer ao auxílio prestado durante os experimentos por P. Gaudicheau, P. Audrain, S. Lerat, D. Macé and C. Favraud.

REFERÊNCIAS

- Chance Civil Construction. 2012. *Guide to model specification: helical piles for structural support. Bulletin 01-0303, Centralia.*
- Corté, J.F. (1989). L'essor de la modélisation en centrifugeuse en géotechnique. *Revue Française de Géotechnique*, Vol. 48, No. 7, p. 7-13.
- Clemence, S.P. e Smithling, A.P. (1984). Dynamic uplift capacity of helical anchors in sand. *4th Australia-New Zealand Conference on Geomechanics.*
- Garnier, J. (2001). Physical models in geotechnics: state of the art and recent advances. *Caquot Conférence*, Paris, França, Vol.1, p.1-59.
- Garnier, J. *et al.* (2007). Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modelling. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, Vol. 7, No. 3, p. 1-23.
- Poulos, H.G. (1988). Cyclic stability diagram for axially loaded piles. *Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 114, No. 8, p. 877-895.
- Schiavon, J.A. *et al.* (2016). Physical modelling of the cyclic loading on a single-helix anchor in sand. *Eurofuge 2016*, Nantes, França.
- Tsuha, C.H.C. (2007). *Modelo teórico para controle da capacidade de carga à tração de estacas metálicas helicoidais em solo arenoso*, Tese de Doutorado, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 250 p.
- Tsuha, C.H.C. *et al.* (2012). Behaviour of displacement piles in sand under cyclic axial loading. *Soils and foundations*, Vol. 52, No. 3, p. 393-410.
- Victor, R.T. e Cerato, A.B. (2008). Helical anchors as wind tower guyed cable foundations. *2nd BGA International Conference on Foundations (ICOF2008), Dundee, 2008.*