DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/15

Análise do comportamento dinâmico da fundação de torres eólicas *onshore* em solos tropicais

Deivyd Heivyson Diógenes Costa
Mestrando, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, costa.dhd@gmail.com

Juan Felix Rodriguez Rebolledo
Professor Titular, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, jrodriguezr72@unb.br

Manoel Porfirio Cordão Neto
Professor Titular, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, porfirio@unb.br

Márcio Muniz de Farias
Professor Titular, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, muniz@unb.br

RESUMO: Fundações de torres eólicas estão submetidas a carregamentos cíclicos que mobilizam pequenas deformações no solo, regime no qual a rigidez inicial exerce papel relevante na resposta dinâmica do sistema. Este trabalho apresenta uma análise paramétrica tridimensional, via Método dos Elementos Finitos, da influência dos parâmetros de pequenas deformações do modelo HSsmall no comportamento dinâmico de uma torre eólica *onshore* apoiada em uma fundação tipo monoestáca em solo laterítico do Distrito Federal. Variaram-se o módulo de cisalhamento inicial G_0^{ref}, e o parâmetro de degradação $\gamma_{0,7}$. A resposta foi avaliada por meio da frequência natural e dos deslocamentos horizontais no topo da torre em vibração livre. Observou-se variação inferior a 3% na frequência fundamental entre cenários extremos, porém diferenças de até 18% nas amplitudes de vibração. Conclui-se que a consideração da rigidez em pequenas deformações é determinante para estimativas realistas de deslocamentos em regime de serviço, embora apresente influência limitada na frequência natural.

PALAVRAS-CHAVE: Interação solo–estrutura, fundações de torres eólicas, rigidez a pequenas deformações, modelo HSsmall, análise dinâmica.

ABSTRACT: Wind turbine foundations are subjected to cyclic loads that induce small strains in the soil. In this regime, initial stiffness plays a significant role in the system's dynamic response. This study presents a three-dimensional parametric analysis, using the Finite Element Method, to investigate the influence of small-strain parameters from the HSsmall model on the dynamic behavior of an onshore wind turbine founded on a monopile type foundation on lateritic soil in the Federal District. The initial shear modulus, G_0^{ref}, and the degradation parameter, $\gamma_{0,7}$, were varied. The response was evaluated through natural frequency and top horizontal displacements during free vibration. Variations of less than 3% in the fundamental frequency were observed between extreme scenarios, while differences of up to 18% were found in vibration amplitudes. It is concluded that considering small-strain stiffness is crucial for realistic serviceability displacement estimates, although its influence on natural frequency is limited.

KEYWORDS: Soil–structure interaction, wind turbine foundations, small-strain stiffness, HSsmall model, dynamic analysis.

1 INTRODUÇÃO

O avanço da geração de energia eólica no Brasil tem intensificado a necessidade de análises mais refinadas do comportamento dinâmico de fundações de aerogeradores, especialmente em solos tropicais. Diferentemente de estruturas convencionais, torres eólicas estão submetidas a carregamentos predominantemente horizontais e cíclicos, cujas frequências podem se aproximar das frequências naturais do

sistema torre–fundação–solo, elevando o risco de amplificação dinâmica e fadiga estrutural (DNV, 2016; Bhattacharya *et al*., 2017; Arany *et al*., 2017).

A resposta dinâmica dessas estruturas depende fortemente da interação solo–estrutura (ISE), particularmente da rigidez lateral e do amortecimento mobilizados no maciço de solo. Em análises numéricas usuais, entretanto, a rigidez do solo é frequentemente representada por modelos constitutivos que não capturam adequadamente o comportamento em pequenas deformações, regime no qual tipicamente se desenvolvem as solicitações de serviço em fundações eólicas.

O modelo Hardening Soil com rigidez a pequenas deformações (HSsmall) permite representar explicitamente a degradação não linear do módulo de cisalhamento desde níveis muito baixos de deformação, o que pode alterar tanto a frequência natural quanto às amplitudes de vibração do sistema. Apesar dessa potencial influência, ainda não está suficientemente estabelecido em que medida os parâmetros específicos de pequenas deformações impactam efetivamente as propriedades dinâmicas globais do conjunto torre–fundação–solo, particularmente em solos lateríticos brasileiros.

Neste contexto, o presente trabalho desenvolve uma análise paramétrica tridimensional, via Método dos Elementos Finitos, para investigar a influência dos parâmetros de pequenas deformações do modelo HSsmall na resposta dinâmica de uma torre eólica *onshore* experimental (instrumentada) apoiada em uma fundação tipo monoestáca (moldada in loco, de 14 m de profundidade e 0,5 m de diâmetro) em solo tropical do Distrito Federal (Campo Experimental do Laboratório de Infraestrutura da Universidade de Brasília, Infralab/UnB). A investigação concentra-se na frequência natural e na evolução temporal dos deslocamentos no topo da torre, buscando quantificar a relevância prática da rigidez em pequenas deformações para análises dinâmicas de fundações eólicas.

2 CARREGAMENTOS E INTERAÇÃO SOLO–ESTRUTURA

A fundação constitui o elemento responsável por transferir ao maciço de solo as ações provenientes da superestrutura, desempenhando papel decisivo no comportamento estrutural e no desempenho global de torres de turbinas eólicas. Em virtude das elevadas cargas aplicadas e da natureza predominantemente dinâmica dessas solicitações, o projeto de fundações para aerogeradores demanda uma análise criteriosa dos carregamentos atuantes e de sua interação com o solo de suporte.

No dimensionamento geotécnico das fundações de torres eólicas, devem ser consideradas ações de diferentes naturezas: permanentes (peso próprio da superestrutura, torre e fundação), variáveis (esforços induzidos pelo vento, de natureza cíclica) e excepcionais. As ações variáveis atuam principalmente na forma de forças horizontais e momentos fletores na base da torre, associadas tanto às condições operacionais normais quanto a rajadas e eventos extremos (García *et al*., 2019). A combinação dessas ações resulta em um sistema complexo de esforços caracterizado por forças verticais de compressão, esforços cortantes horizontais e momentos fletores elevados, que induzem deslocamentos transversais e rotações na base da torre.

A interação solo–estrutura (ISE) exerce papel fundamental no comportamento estrutural de torres eólicas. Diferentemente de edificações convencionais, essas estruturas esbeltas são submetidas a carregamentos predominantemente horizontais e cíclicos, tornando a resposta do sistema fortemente dependente das propriedades mecânicas do solo (Bhattacharya *et al*., 2017). A idealização da base como engaste perfeito conduz a uma superestimação da rigidez global, negligenciando a deformabilidade do solo (Adhikari e Bhattacharya, 2009). A ISE introduz graus adicionais de flexibilidade, manifestados por deslocamentos horizontais e rotações na base da torre, alterando significativamente a resposta estática e dinâmica do conjunto.

Não menos importante, o fenômeno de ressonância constitui uma das principais preocupações no projeto estrutural de turbinas eólicas modernas, ocorrendo quando uma força externa incide sobre a estrutura com frequência equivalente a uma de suas frequências naturais (Petrobras, 2011). Aerogeradores estão suscetíveis a cargas periódicas que podem induzir tensões de fadiga, amplificadas em condições de ressonância (Harger *et al*., 2023). A frequência natural do sistema torre-fundação-solo ($f_{0,1}$) deve ser cuidadosamente posicionada para evitar coincidência com as frequências características de excitação: a frequência de rotação do rotor (f_{1P}) e a frequência de passagem das pás (f_{3P}) (Arany *et al*., 2017). O DNV (2002) estabelece que as análises modais devem considerar explicitamente a influência do maciço de solo para adequada avaliação do risco de ressonância e dos efeitos de fadiga.

3 MODELO CONSTITUTIVO HSsmall

A correta representação do comportamento mecânico dos solos por meio de modelos constitutivos é fundamental para a análise e o projeto de obras geotécnicas. No contexto de fundações de torres eólicas, a escolha adequada do modelo constitutivo torna-se crítica devido às particularidades de carregamento dessas estruturas: carregamentos cíclicos transientes, esbeltez da estrutura, altura da torre e magnitudes elevadas de momentos fletores (Matos, 2024).

O modelo Hardening Soil (HS), desenvolvido por Schanz *et al.* (1999), é um modelo constitutivo elastoplástico avançado fundamentado na teoria da plasticidade com endurecimento isotrópico. Diferentemente do modelo de Mohr-Coulomb, no qual a superfície de escoamento permanece fixa no espaço de tensões, o modelo HS admite a expansão progressiva dessa superfície em função da deformação plástica acumulada. O modelo incorpora dois mecanismos distintos de endurecimento: (i) endurecimento por cisalhamento, associado às deformações plásticas decorrentes do carregamento desviador primário; e (ii) endurecimento por compressão, relacionado às deformações plásticas volumétricas em ensaios edométricos.

Embora o modelo HS represente satisfatoriamente o comportamento do solo em níveis moderados e elevados de deformação, ele não reproduz adequadamente a elevada rigidez observada experimentalmente em regimes de pequenas deformações. Segundo Benz (2007), a rigidez elástica é geralmente adotada como a rigidez secante correspondente a ciclos de descarregamento-recarregamento em níveis de deformação mais elevados, de modo que a rigidez em pequenas deformações é desconsiderada. Para suprir essa limitação, foi desenvolvido o modelo Hardening Soil com rigidez a pequenas deformações (HSsmall), que consiste em uma extensão do HS, incorporando explicitamente a degradação não linear da rigidez cisalhante com o aumento da deformação. O HSsmall é capaz de representar adequadamente o comportamento do solo em níveis de pequenas deformações (Benz, 2007), típicos do domínio de deformações do solo de fundação de aerogeradores, que pode variar de 10^{-5} a 10^{-3} (CFMS, 2011; Matos, 2024).

3.1 Degradação da rigidez do solo em pequenas deformações

Ensaios laboratoriais e investigações geofísicas demonstram que a rigidez do solo não é constante, mas varia significativamente com o nível de deformação. Em deformações muito pequenas, os solos apresentam sua rigidez máxima recuperável. À medida que a amplitude de deformação aumenta, a rigidez do solo decresce de forma não linear, seguindo uma curva característica em forma de S quando plotada em escala logarítmica (Atkinson & Sallfors, 1991; Benz, 2007; Hardin & Drnevich, 1972). A Figura 1 ilustra o comportamento dessa rigidez para diferentes níveis de deformações.

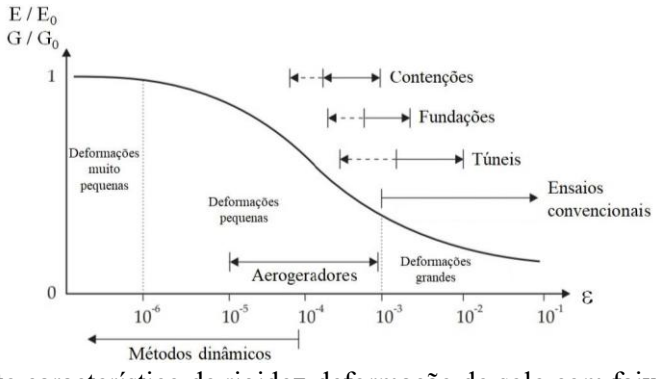


Figura 1. Comportamento característico de rigidez-deformação do solo com faixas de deformação típicas (Adaptado de Benz, 2007)

No software Plaxis, o modelo HSsmall utiliza essencialmente os mesmos parâmetros do modelo HS, diferenciando-se pela introdução de dois parâmetros adicionais responsáveis por descrever a variação da rigidez em pequenas deformações: G_0, que representa o módulo de cisalhamento inicial, correspondente a deformações muito pequenas ($\varepsilon < 10^{-6}$); e $\gamma_{0,7}$, que define o nível de deformação cisalhante no qual o módulo de cisalhamento secante (G_s) é reduzido para aproximadamente 70% de G_0.

3.2 Limite inferior de rigidez

No modelo HSsmall, a curva de redução de rigidez a pequenas deformações é limitada inferiormente pelo módulo de descarregamento/recarregamento (G_{ur}). Esse limite deve ser ativado em combinação com formulações de plasticidade com endurecimento para evitar que a rigidez do material se torne excessivamente reduzida em grandes deformações (Benz, 2007). Sendo assim, é introduzido um *cut-off* na curva hiperbólica de degradação da rigidez na deformação de cisalhamento γ_c, ponto em que a rigidez tangente se reduz à rigidez G_{ur} em ciclos de maior deformação, conforme ilustra a Figura 2.

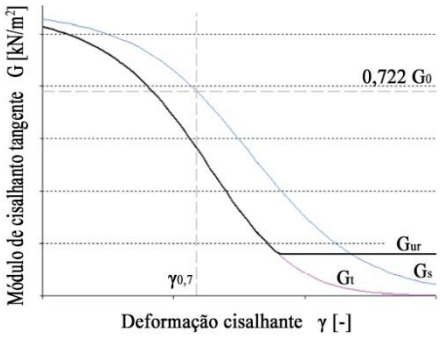


Figura 2. Curva de redução do módulo tangente e secante (Adaptado de Obrzud & Truty, 2014)

4 MODELAGEM NUMÉRICA VIA MEF

Com o objetivo de representar de forma mais realista o comportamento dinâmico da torre, foi desenvolvida uma modelagem tridimensional por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizando o software Plaxis 3D. A malha numérica do modelo é composta por 23.632 elementos tetraédricos de 10 nós, totalizando um total de 48.892 nós, garantindo a discretização espacial adequada para a análise da propagação de tensões e deformações no maciço de solo.

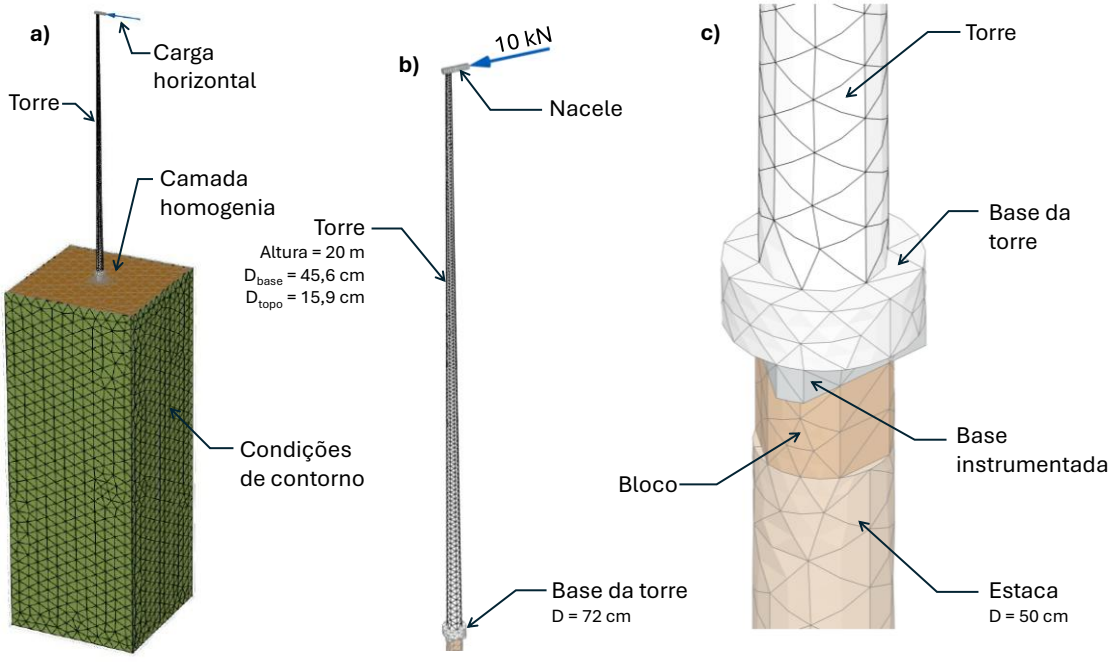


Figura 3. Modelo numérico via MEF: a) visão geral, b) detalhe da torre e do carregamento, e c) detalhe da conexão da base da torre com a estaca

A fim de minimizar a influência das condições de contorno na resposta dinâmica do sistema, o maciço de solo foi representado por um domínio com dimensões de 10 m x 10 m nas direções horizontais (x e y),

correspondendo a aproximadamente 20 vezes o diâmetro da base da torre. Na direção vertical (z), foi adotada profundidade de 30 m. Essas dimensões visam reduzir efeitos artificiais de restrição de deslocamentos e reflexão de ondas nas fronteiras do modelo.

A torre foi idealizada com geometria troncônica, apresentando 20 m de altura, 0,46 m de diâmetro na base e 0,16 m no topo. Para a fundação, foi considerada uma estaca de concreto com 14 m de comprimento e 0,5 m de diâmetro, monolítica com o fuste da torre, assegurando compatibilidade de deslocamentos na interface solo–estrutura. A Figura 3 apresenta a configuração geral da modelagem numérica adotada.

A análise foi conduzida em três etapas sequenciais de cálculo. Na primeira etapa, procedeu-se à ativação estrutural e à aplicação dos carregamentos verticais permanentes, correspondentes ao peso próprio da estrutura. Na segunda etapa, foi aplicada uma carga horizontal concentrada na posição do rotor do aerogerador, representando a ação do vento. Na terceira etapa, essa carga horizontal foi removida, permitindo que a estrutura vibrasse livremente por um intervalo de 10 s. Essa fase teve como finalidade induzir deformações cíclicas no solo, decorrentes da vibração da fundação do aerogerador, e possibilitar a avaliação da resposta dinâmica do sistema solo–fundação–estrutura. O intervalo de 10 s foi adotado por ser suficiente para capturar múltiplos ciclos completos de vibração e permitir identificação precisa da frequência fundamental via Transformada Rápida de Fourier (TRF).

4.1 Parâmetros do solo

Os parâmetros básicos do modelo HS foram definidos com base no trabalho de Rebolledo *et al*. (2019), que apresenta a caracterização de solos típicos da região de Brasília–DF. Os valores adotados encontram-se sintetizados na Tabela 1, que reúne os parâmetros de resistência, rigidez e estado inicial de tensões utilizados na modelagem.

Tabela 1. Parâmetros do solo para o modelo HS

Parâmetro	Valor	Unidade
γ	14,3	kN/m^3
c'	20,0	kPa
φ'	32,0	°
ψ	0,0	°
E_{50}^{ref}	12,0	MPa
E_{50}^{oed}	6,9	MPa
E_{ur}^{ref}	37,5	MPa
m	0,5	[-]
ν_{ur}	0,2	[-]
p^{ref}	100	kPa
R_f	0,9	[-]
POP	31,4	kPa
K_0^{nc}	0,47	[-]
K_0	0,56	[-]

Com o objetivo facilitar o entendimento da influência dos parâmetros responsáveis pela representação do comportamento do solo em pequenas deformações, G_0^{ref} e $\gamma_{0,7}$, o perfil geotécnico foi idealizado como uma única camada homogênea. Essa idealização, além de simplificar a análise paramétrica, reflete a porção do solo mais relevante para a resistência lateral mobilizada pela monoestaca. O parâmetros G_0^{ref} e $\gamma_{0,7}$ foram tratados como variáveis em uma análise paramétrica considerando dois cenários diferentes onde em cada cenário, um desses parâmetros foi tratado como constante, e o outro variou em um intervalo escolhido.

O intervalo de variação de G_0^{ref} foi definido com base nos valores mínimo e máximo permitidos pelo software para um solo com as propriedades apresentadas na Tabela 1. Por sua vez, os valores adotados para $\gamma_{0,7}$ foram estabelecidos a partir de intervalos coerentes propostos por Correia (2001) para solos lateríticos e

saprolíticos, típicos do Distrito Federal. A Tabela 2 apresenta os limites inferior, intermediário e superior considerados para esses parâmetros.

O amortecimento considerado corresponde exclusivamente ao amortecimento material implícito no modelo constitutivo, não tendo sido adotado amortecimento viscoso adicional do tipo Rayleigh.

Tabela 2. Intervalos de valores estudados dos parâmetros G_0^{ref} e $\gamma_{0,7}$

Parâmetro	Valor mínimo	Valor intermediário	Valor máximo	Unidade
G_0^{ref}	15,7	164	312,4	MPa
$\gamma_{0,7}$	$3x10^{-5}$	$1,2x10^{-4}$	$3x10^{-4}$	[-]

4.2 Cenários analisados e variáveis de resposta

A análise paramétrica foi estruturada para avaliar a influência isolada e combinada de G_0^{ref} e $\gamma_{0,7}$ na resposta dinâmica do sistema. De forma resumida, os cenários contemplam: (i) variação de G_0^{ref} entre valores mínimo, intermediário e máximo, mantendo $\gamma_{0,7}$ constante no valor intermediário; e (ii) variação de $\gamma_{0,7}$ entre valores mínimo, intermediário e máximo, mantendo G_0^{ref} fixo no valor intermediário.

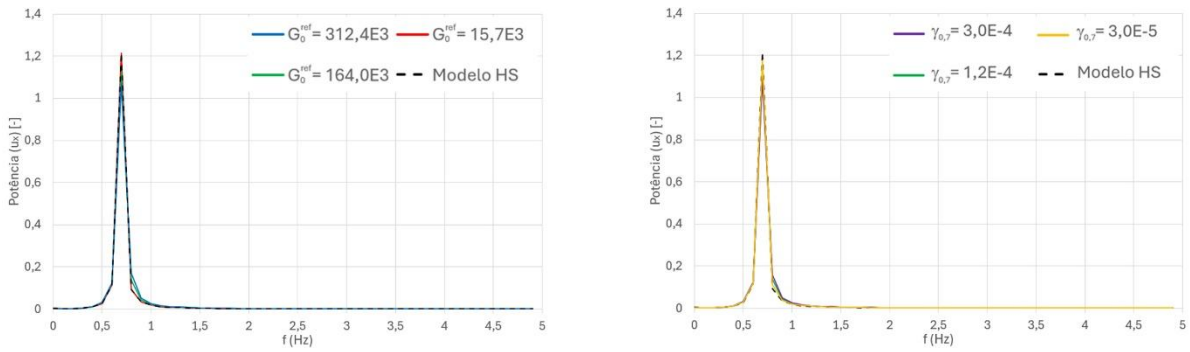
Além dos casos com o modelo HSsmall, foi incluído um solo de referência utilizando o modelo HS, no qual a rigidez a pequenas deformações não é explicitamente considerada. Essa abordagem permite distinguir a influência da rigidez inicial do solo daquela associada à taxa de degradação de rigidez com o aumento das deformações cíclicas, aspectos fundamentais em análises de vibração de fundações.

Por fim, para cada cenário foram analisados os deslocamentos horizontais no topo da torre (rotor), bem como a frequência natural associada ao primeiro modo de vibração da torre. Esses indicadores permitem avaliar simultaneamente o comportamento dinâmico global da estrutura, fornecendo base consistente para a interpretação dos efeitos da rigidez a pequenas deformações na interação solo–estrutura.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Frequência natural

A análise espectral por Transformada Rápida de Fourier (TRF), apresentada na Figura 4, revelou que durante os 10 segundos de vibração livre analisados, a torre realizou aproximadamente 7 oscilações completas em todos os casos estudados, resultando em uma frequência fundamental de 0,70 Hz. A análise comparativa entre os diferentes cenários revelou variação máxima de aproximadamente 0,02 Hz entre os casos extremos, representando uma variação menor que 3% em relação ao valor médio.



(a) (b)

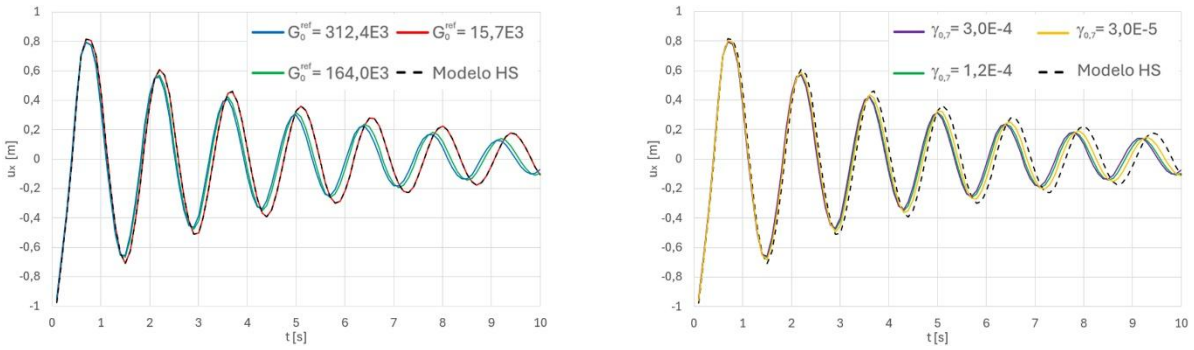
Figura 4. Espectros de potência dos deslocamentos horizontais no rotor. (a) Cenário com G_0^{ref} variável. (b) Cenário com $\gamma_{0,7}$ variável

Esse comportamento decorre do fato de que, no modelo HSsmall, a rigidez mobilizada em ciclos de carregamento-descarregamento em níveis moderados de deformação é predominantemente controlada por

E_{ur}^{ref}, mantido constante nas análises (37,5 MPa). Assim, a consideração da rigidez em pequenas deformações mostrou impacto limitado na estimativa da frequência fundamental sob vibração livre.

5.2 Evolução temporal dos deslocamentos horizontais

Em contraste com a frequência natural, a resposta em deslocamentos apresentou sensibilidade significativa aos parâmetros analisados. A variação de G_0^{ref} influenciou diretamente a amplitude máxima de vibração, com diferenças de até 18% entre os cenários extremos ao final do quinto ciclo. Solos com menor G_0^{ref} mobilizaram menor rigidez inicial, resultando em maiores deslocamentos e amplificação progressiva ao longo dos ciclos, como pode ser observado na Figura 5(a).



(a) (b)

Figura 5. Deslocamentos horizontais no rotor ao longo da vibração. (a) Cenário com G_0^{ref} variável. (b) Cenário com $\gamma_{0,7}$ variável

O parâmetro $\gamma_{0,7}$, por sua vez, controlou a taxa de degradação da rigidez com o aumento das deformações cisalhantes. Cenários com menores valores de $\gamma_{0,7}$ apresentaram redução mais rápida do módulo de cisalhamento e amplitudes até 8% superiores ao final do período analisado, como ilustrado na Figura 5(b).

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou, por meio de análise paramétrica em MEF, a influência dos parâmetros de rigidez em pequenas deformações (G_0^{ref} e $\gamma_{0,7}$) na resposta dinâmica de fundações monoestaca para torres eólicas *onshore*, considerando propriedades representativas de solos lateríticos do Distrito Federal. A investigação permitiu examinar a sensibilidade das principais variáveis dinâmicas do sistema solo–fundação–estrutura às variações desses parâmetros constitutivos.

A baixa sensibilidade da frequência natural às variações de G_0^{ref} e $\gamma_{0,7}$ indica que, para os níveis de deformação mobilizados na vibração livre analisada, o sistema permaneceu predominantemente em regime de deformações moderadas, no qual a rigidez equivalente é governada principalmente pelo módulo de descarregamento–recarregamento E_{ur}^{ref}, mantido constante. Isso sugere que, sob excitações de pequena amplitude, a influência da rigidez inicial máxima do solo tende a ser amortecida pela resposta global da estrutura, dominada pela flexibilidade do fuste e da fundação.

Diferentemente da frequência natural, as amplitudes de deslocamento mostraram-se sensíveis à variação dos parâmetros de pequenas deformações, evidenciando que, embora a rigidez global modal não seja substancialmente alterada, a resposta transitória do sistema é influenciada pelo nível de rigidez mobilizado nos primeiros ciclos. Valores menores de G_0^{ref} resultaram em menor rigidez inicial e maior mobilização de deformações cisalhantes no solo, ampliando progressivamente a resposta vibratória.

Observa-se que o parâmetro $\gamma_{0,7}$ atuou como controlador da transição para o regime não linear, influenciando a taxa de degradação da rigidez ao longo dos ciclos. Essa diferença torna-se particularmente relevante em verificações de estado limite de serviço, nas quais amplitudes de vibração e deslocamentos acumulados são determinantes para desempenho estrutural e conforto operacional. O emprego de modelos

constitutivos avançados, como o HSsmall, mostra-se particularmente relevante em análises dinâmicas de fundações eólicas em solos tropicais.

Por fim, reconhece-se que simplificações adotadas — como a representação da excitação por vibração livre, a idealização de perfil homogêneo e a consideração exclusiva do amortecimento material — limitam a generalização dos resultados. Investigações futuras que incorporem excitações harmônicas representativas, estratificação do subsolo e calibração mais abrangente de mecanismos de amortecimento poderão ampliar a robustez das conclusões apresentadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Eletrobras FURNAS à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Laboratório de Infraestrutura Rodoviária (InfraLab) da Universidade de Brasília, pelo auxílio financeiro e de infraestrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adhikari, S., Bhattacharya, S. (2009). Dynamic Analysis of Wind Turbine Towers on Flexible Foundations. *Shock and Vibration*. p. 19. 37-56.

Arany, L., Bhattacharya, S., Macdonald, J., Hogan, S.J. (2017) Design of monopiles for offshore wind turbines in 10 steps. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v. 92, p. 126–152.

Atkinson, J.H., Sallfors, G. (1991) Experimental determination of soil properties. Proc. 10th ECSMFE, volume 3, pages 915–956, Florence.

Benz, T. (2007) *Small-Strain Stiffness of Soils and its Numerical Consequences*. Dr.-Ing., Universität Stuttgart, 191 p.

Bhattacharya, S., Nikitas, G., Arany, L., Nikitas, N. (2017) *Soil-Structure Interactions (SSI) for Offshore Wind Turbines*. IET Reference.

CFMS – COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE. (2011) *Recommandations sur la conception…* Paris, France.

Correia, A.G., Barros, J.M.C., Santos, J.A., Niyama, S. (2001) An Approach to Predict Shear Modulus of Soils… San Diego, California.

DNV – DET NORSKE VERITAS. (2002) *Guidelines for design of wind turbines*. Høvik, Norway.

DNV – DET NORSKE VERITAS. (2016) *DNVGL-ST-0437: Loads and site conditions for wind turbines*.

García, F.J.A, Matos, Y.M.P., Farias, M.M., Cunha, R.P., Guimarães M.J.R. (2019) Análise Dinâmica de um Gerador Eólico em Solo Tropical. Geocentro, Brasília.

Hardin, B.O., Drnevich, V.P. (1972) Shear modulus and damping in soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 98(SM7): 667–692.

Harger, A., Carmo, L.H.S., Gay Neto, A., Simos, A.N., Franzini, G.R., Vieira, G.H.R. (2023) Modal analysis of 15 MW semi-submersible floating wind turbine. *Wind*, 3(4): 548-566.

Matos, Y.M.P. (2024) *Avaliação experimental e numérica do comportamento mecânico de fundações…* Universidade de Brasília.

Obrzud, R., Truty, A. (2014) *The Hardening Soil Model – A Practical Guidebook*. Zsoil.

Petrobras (2011) N-1848 – Projeto de fundações de máquinas. Rio de Janeiro.

Rebolledo, J.F.R., León, R.F.P., Camapum de Carvalho, J. (2019) Obtaining the Mechanical Parameters… *Soils and Rocks*, 42(1): 61-74.

Schanz, T., Vermeer, P.A., Bonnier, P.G. (1999) The hardening soil model: Formulation and verification. *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*.