DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.1/1

Análise Comparativa dos Efeitos de Amplificação do Sinal Sísmico em Modelagens Dinâmicas Utilizando os Modelos Constitutivos HS Small e UBC3D

Renan Campos
Engenheiro Civil, M.Sc., Tetra Tech South America, Belo Horizonte, Brasil, renan.campos@tetratech.com

Jonathas Balbino
Engenheiro Geotécnico, M.Sc., Tetra Tech South America, Viçosa, Brasil, jonathas.balbino@tetratech.com

Bernardo Silva
Engenheiro Geotécnico, Tetra Tech South America, Belo Horizonte, Brasil, bernardo.silva@tetratech.com

Pablo Gonçalves
Engenheiro Civil, M.Sc., Tetra Tech South America, Belo Horizonte, Brasil, pablo.goncalves@tetratech.com

Hernán Carvajal
Engenheiro Geólogo, D.Sc., Tetra Tech South America, Brasília, Brasil, hernan.carvajal@tetratech.com

RESUMO: Uma avaliação rigorosa da suscetibilidade à liquefação em barragens de rejeito exige considerar carregamentos sísmicos reais e evitar as simplificações pseudo-estáticas, de forma que a modelagem dinâmica numérica se destaca como ferramenta avançada na gestão de risco geotécnico. Nas modelagens dinâmicas convencionais o movimento é imposto na base do modelo e o sinal se altera ao atravessar camadas de solo de rigidez decrescente, resultando em amplificações dependentes do comportamento constitutivo do material, em particular das curvas de degradação do módulo de cisalhamento e de amortecimento. Dois modelos constitutivos de uso corrente são aqui discutidos: o *Hardening Soil Model for Small Strains* (HS Small), amplamente empregado para caracterizar curva tensão-deformação hiperbólica e calibrar degradação e amortecimento; e o UBC3D, mais específico para liquefação, que incorpora regras cinemáticas de plastificação primária e secundária facilitando a transição ao estado liquefeito. Em razão das diferenças de formulação e parâmetros, HS Small e UBC3D podem produzir distintas amplificações do sinal sísmico da base à superfície. Para quantificar esse efeito e avaliar a aplicabilidade em barragens de rejeito propõe-se uma comparação por modelos unidimensionais hipotéticos: aplicam-se acelerogramas na base e, ao processar as saídas superficiais por resposta espectral, isola-se o impacto do modelo constitutivo na modelagem dinâmica e na previsão de suscetibilidade à liquefação.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem, sismologia, dinâmica, barragens, liquefação.

ABSTRACT: A rigorous assessment of liquefaction susceptibility in tailings dams must account for seismic loading rather than rely on pseudo-static simplifications, and dynamic numerical modeling therefore emerges as a leading tool for geotechnical risk management. In conventional dynamic simulations, seismic motion is applied at the model base, and the signal is modified and often amplified as it travels through progressively softer soil layers; this amplification is strongly governed by the chosen constitutive model through its shear-modulus degradation and damping curves. Two contrasting constitutive frameworks are considered: the Hardening Soil Model for Small Strains (HS Small), widely used to define a hyperbolic stress-strain response and to calibrate degradation and damping behavior; and the UBC3D model, more specialized for liquefaction, which embeds simplified kinematic rules for primary and secondary plasticity that ease particle transition to a liquefied state. Because of differing formulations and input requirements, HS Small and UBC3D produce distinct base-to-surface amplification patterns. To quantify these differences and evaluate each model's suitability for tailings dams, a comparative study using hypothetical one-dimensional columns is proposed: accelerograms are imposed at the base, each layer is characterized according to the respective constitutive formulation, and the amplified surface signals are analyzed via spectral response to isolate and interpret the constitutive model's influence on dynamic amplification and liquefaction prediction.

KEYWORDS: Modelling, seismology, dynamics, dams, liquefaction.

1 INTRODUÇÃO

Uma avaliação rigorosa da suscetibilidade à liquefação em estruturas geotécnicas requer a consideração de carregamentos sísmicos, não devendo se limitar às simplificações inerentes às metodologias pseudoestáticas. Nesse contexto, a modelagem numérica dinâmica destaca-se como uma das ferramentas mais avançadas para a gestão do risco geotécnico associado a esse tipo de estrutura.

Em modelagens dinâmicas tradicionais, o carregamento sísmico é aplicado na base do modelo, e o sinal proveniente dessa fonte é amplificado ao atravessar camadas de solo menos rígidas até atingir a superfície. Essa amplificação está fortemente relacionada ao modelo constitutivo adotado para a caracterização do material, pois o comportamento do solo é governado pelas curvas de amortecimento e degradação do módulo de cisalhamento. Dessa forma, a escolha do modelo constitutivo influencia diretamente os resultados das simulações.

O modelo de endurecimento para pequenas deformações, conhecido como Hardening Soil Model for Small Strains (HS Small), é amplamente utilizado para a caracterização de camadas de solo em estudos dinâmicos, permitindo a definição de uma curva tensão-deformação hiperbólica, bem como a calibração das curvas de amortecimento e degradação. Por outro lado, o modelo constitutivo UBC3D, embora menos difundido e predominantemente empregado no software Plaxis, é especializado na simulação do fenômeno de liquefação, incorporando regras cinemáticas simplificadas de plastificação primária e secundária, o que facilita a transição das partículas para o estado liquefeito. Essa característica torna o UBC3D particularmente recomendado para a modelagem de estruturas suscetíveis à liquefação.

Devido às diferenças nas formulações e nos dados de entrada, os modelos HS Small e UBC3D produzem respostas distintas quanto à amplificação do sinal sísmico da base à superfície do modelo. Com o objetivo de quantificar esse impacto e compreender a aplicabilidade de cada modelo no contexto de barragens de rejeito, propõe-se uma análise comparativa por meio de modelos unidimensionais hipotéticos. Acelerogramas são aplicados na base desses modelos, com respostas espectrais correspondentes em topo rochoso, e o processamento permite a amplificação do sinal ao atravessar camadas caracterizadas separadamente por cada formulação. Ao avaliar o sinal amplificado na superfície, por meio da resposta espectral, é possível isolar e compreender o impacto do modelo constitutivo na modelagem dinâmica.

2 MODELOS CONSTITUTIVOS

Para a modelagem dinâmica de solos é fundamental escolher um modelo constitutivo que represente de forma consistente os mecanismos de rigidez, amortecimento, plastificação e geração de poropressão. Este capítulo apresenta e discute os princípios, formulações e parâmetros de dois modelos amplamente utilizados em análises dinâmicas: o modelo de Hardening Soil para pequenas deformações (HS Small) e o UBC3D-PLM, enfatizando suas diferenças conceituais, capacidades de calibração e limitações práticas. Serão resumidos os parâmetros de entrada relevantes para cada modelo, as rotinas de calibração adotadas com base em ensaios triaxiais e de cisalhamento cíclico disponíveis na literatura, bem como critérios de ajuste das curvas de degradação de módulo e das leis de amortecimento histerético.

2.1 HS SMALL

O modelo constitutivo *HS Small* (*Hardening Soil Small Strain Model*) é uma versão avançada do modelo constitutivo *Hardening Soil* (HS), desenvolvida para representar com maior precisão o comportamento não linear dos solos sob pequenas deformações. Enquanto o modelo HS convencional considera rigidez constante até o início da plastificação, o HS Small reconhece que os solos apresentam módulos de cisalhamento iniciais elevados (G_0) quando submetidos a pequenas deformações, com redução gradual da rigidez à medida que o nível de deformação aumenta (Hardin e Drnevich, 1972).

Essa formulação permite representar adequadamente os efeitos sísmicos, uma vez que incorpora as curvas de degradação de rigidez e as características de amortecimento histerético observadas em ensaios de laboratório e campo. Dessa forma, o modelo reproduz com maior realismo a resposta inicial do solo, captando o comportamento elástico não linear típico de carregamentos cíclicos ou variações de tensão de pequena

amplitude, como as geradas por solicitações sísmicas. A Figura 1 apresenta o comparativo das curvas de rigidez entre Mohr-Coulomb (MC), *Hardening Soil* (HS) e HS Small.

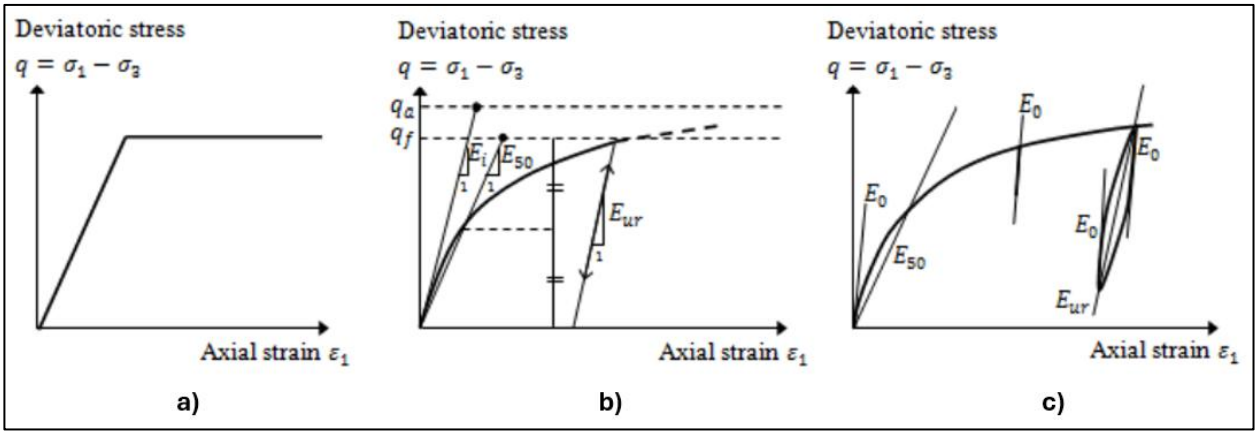


Figura 1. Parâmetros de rigidez para (a) MC, (b) HS e (c) HS Small (Petalas & Galavi, 2012)

No modelo *Hardening Soil* os seguintes parâmetros representam propriedades físicas e constitutivas: ρ (kg/m³) é a densidade do solo (massa por volume); φ' (º) e c' (Pa) são o ângulo de atrito efetivo e a coesão efetiva que controlam a resistência ao cisalhamento; ν é o coeficiente de Poisson que regula a resposta elástica lateral/axial; m é o expoente que descreve a dependência não linear da rigidez com a pressão efetiva; e E_{50ref} (kPa), E_{oedref} (kPa) e E_{urref} (kPa) são os módulos de referência para carregamento triaxial (E_{50}), para compressão edométrica (E_{oed}) e para resposta elástica carga/descarga (E_{ur}). Em relação ao modelo HS tradicional, o HS Small requer parâmetros adicionais, destacando-se o módulo de cisalhamento máximo (G_0) e o parâmetro $\gamma_{0.7}$, que controla a degradação da rigidez com a deformação.

2.2 UBC3D-PLM

O modelo UBC3D-PLM foi selecionado por sua reconhecida capacidade de simular o comportamento de areias e siltes sob carregamentos sísmicos, reproduzindo com realismo os processos de geração de poropressão e degradação de rigidez (Tsegaye, 2010; Petalas & Galavi, 2012). Trata-se de uma solução proposta originalmente na Universidade de British Columbia, em 1997 a partir de expansão à teoria de enrijecimento hiperbólico de Duncan-Chang, que posteriormente foi extrapolada pelo PLAXIS para uma envoltória tridimensional. Atualmente, é o modelo recomendado pelo programa no caso de análises de liquefação dinâmica.

Os principais parâmetros de entrada necessários para a utilização do modelo são o fator de módulo elástico volumétrico (k_B^e), o fator de módulo elástico de cisalhamento (k_G^e), o fator de módulo plástico de cisalhamento (k_G^p), e as razões de dependência associadas a cada um dos módulos (m_e, n_e e n_p). O ajuste da envoltória, que é baseada em Mohr-Coulomb, utiliza o ângulo de atrito para volumes constantes (φ'_{cv}) e o ângulo de atrito no pico (φ'_{pi}).

Na Figura 2a são apresentados os resultados da modelagem numérica de um ensaio de compressão triaxial, utilizada por Petalas e Galavi (2012) para validar o modelo constitutivo. Observa-se que o comportamento do solo reproduzido pelo UBC3D-PLM é de alta acurácia e concorda estreitamente tanto com os dados experimentais quanto com os resultados do modelo UBCSAND, a partir do qual ele se baseia. O modelo mostra um comportamento de endurecimento drenado mais rígido em pequenos deslocamentos.

A Figura 2b apresenta a validação dinâmica do modelo constitutivo, demonstrando a evolução dos excessos de poropressão. O modelo mostra boa concordância com os resultados experimentais. Observa-se que, durante o ensaio experimental, o solo liquefaz após os primeiros 2 ciclos e as condições de carregamento são idênticas às do carregamento primário; já no cálculo numérico (UBC3D-PLM) é ativada a densificação, o que torna a curva mais suave.

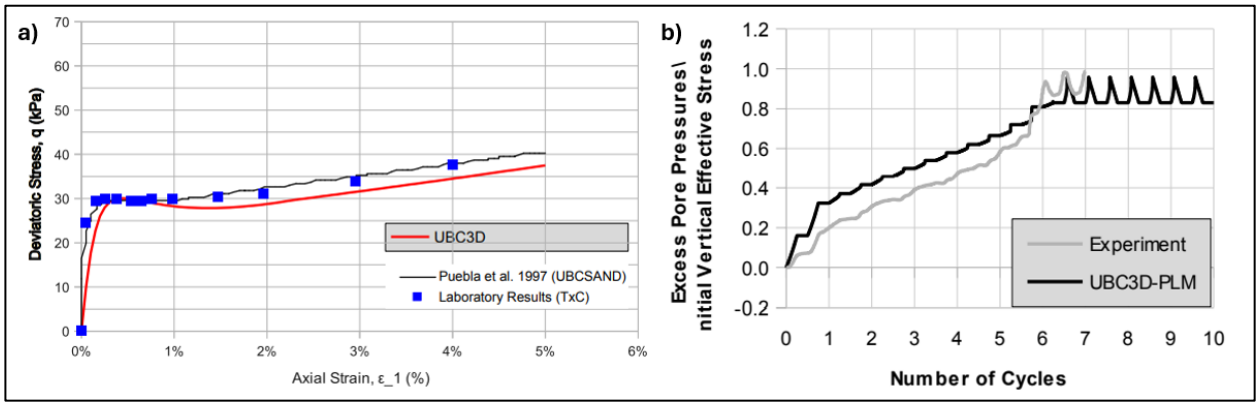


Figura 2. Validação do UBC3D com carregamento monotônico (a) e cíclico (b). (Petalas & Galavi, 2012)

3 MODELOS UNIDIMENSIONAIS

Para desenvolvimento das análises de sensibilidade relacionadas aos modelos constitutivos, foi utilizado o *software* Plaxis para a elaboração de um modelo unidimensional a ser analisado pelo método de elementos finitos. Fisicamente, o modelo consistiu em uma camada denominada Fundação A com espessura de 85,0 m, sotoposta a uma camada de Fundação B com espessura de 50,0 m. Em superfície, é definido um depósito natural arenoso, suscetível a liquefação, com uma espessura equivalente a 50,0 m. A geometria resultante, bem como a malha de elementos finitos considerada, é apresentada na Figura 3.

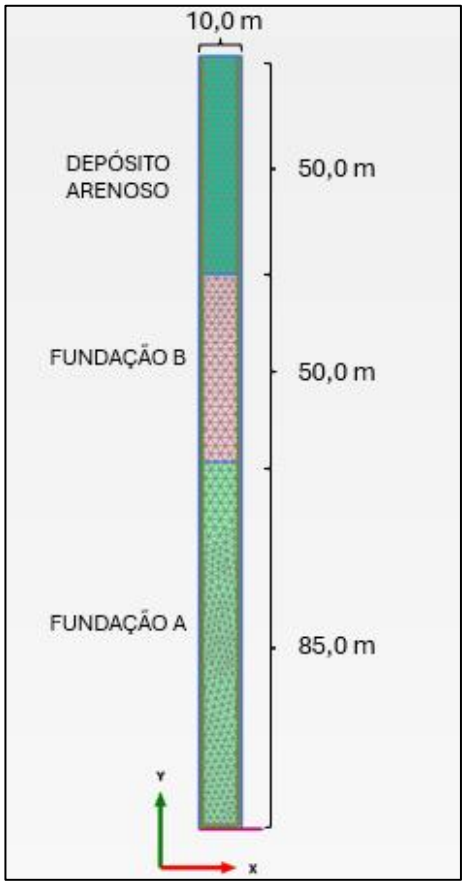


Figura 3. Modelo físico unidimensional e malha de elementos finitos adotada.

Para as camadas de fundação, não suscetíveis a liquefação, foram adotados parâmetros típicos para o modelo constitutivo HS Small. No depósito arenoso, selecionou-se o estudo desenvolvido por Barrueto et al.

(2017), que utilizou ensaios de campo e laboratório para calibrar parâmetros tanto do modelo HS Small quanto UBC3D para um depósito arenoso da área portuária de Lo Rojas, no sul do Chile. A Tabela 1 e a Tabela 2 compilam os parâmetros utilizados.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos adotados – Modelo HS SMall

Parâmetro	**Fundação A**	**Fundação B**	**Depósito Arenoso (HS Small)**
Peso específico seco (kN/m^3)	19,0	20,0	15,6
Peso específico saturado (kN/m^3)	20,0	21,0	19,9
E_{50} (kN/m^2)	10.000	10.000	32.000
E_{oed} (kN/m^2)	10.000	10.000	32.000
E_{ur} (kN/m^2)	30.000	30.000	78.000
m	0,6	0,6	0,5
φ' (°)	33,0	32,0	32,0
C' (kPa)	0	51,0	0
$\gamma_{0.7}$	0,032	0,032	0,0014
G_0 (kN/m^2)	61.000	61.000	32.880

Tabela 2. Parâmetros geotécnicos adotados – Modelo UBC3D

Parâmetro	**Depósito Arenoso (UBC3D)**
Peso específico seco (kN/m^3)	15,6
Peso específico saturado (kN/m^3)	19,9
φ'_{cv}(°)	30,2
φ'_{peak} (°)	32,0
C' (kPa)	0
k_B^e	230
k_G^e	320
k_G^p	1750
m_e	0,5
n_e	0,5
n_p	0,4
R_f	0,9

Para as simulações, foram selecionados três sismos reais, com diferentes espectros de resposta. Os acelerogramas foram obtidos a partir do banco de dados *Shallow Crustal Earthquakes in Active Tectonic Regimes Ground-Motion Characterization* (NGA-West2) do Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). A Figura 4 apresenta estes sismos.

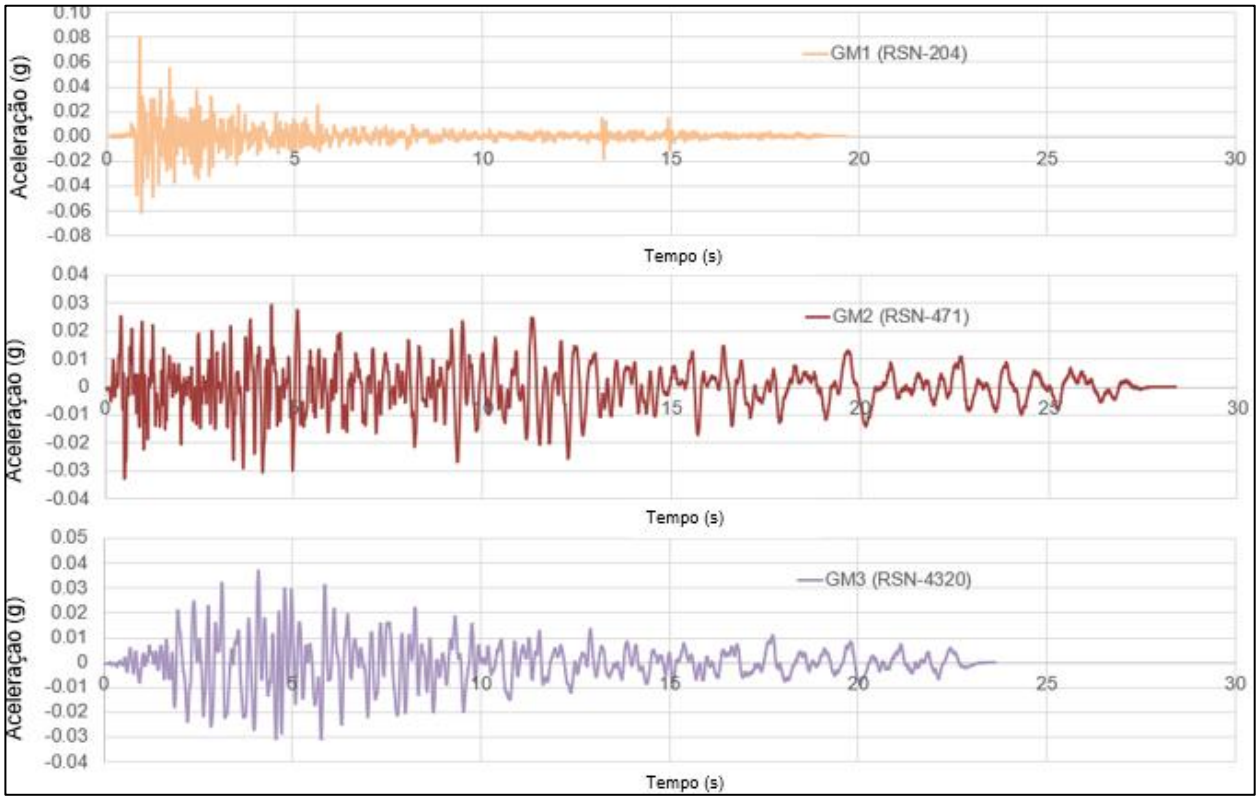


Figura 4. Acelerogramas de três eventos sísmicos reais selecionados

Com o modelo numérico definido, os materiais caracterizados e os eventos sísmicos selecionados, procede-se com as simulações. As Figuras 5, 6 e 7 apresentam os espectros de resposta resultantes. Para avaliação dos efeitos de amplificação, foram considerados três pontos de observação: a base do modelo, onde foi imposto o sismo; o contato geológico que define a transição da fundação para o depósito arenoso; e a superfície, configurada pelo topo do depósito arenoso.

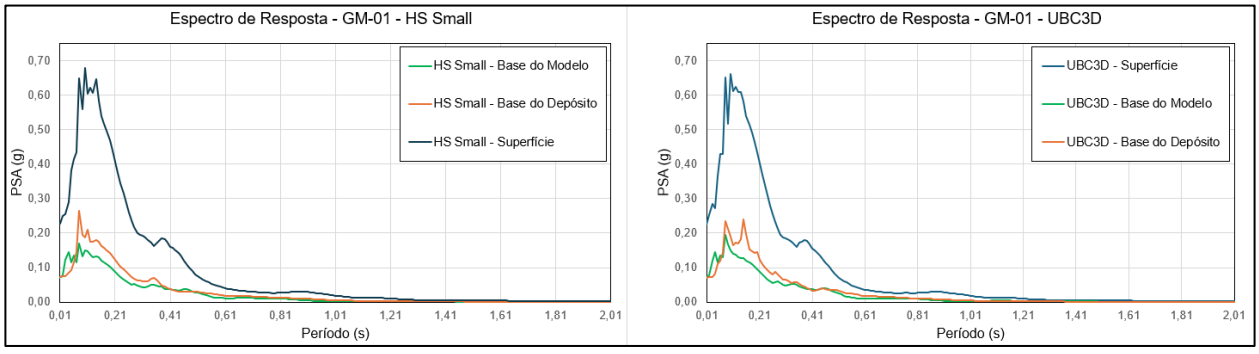


Figura 5. Comparação dos espectros de resposta – GM-01.

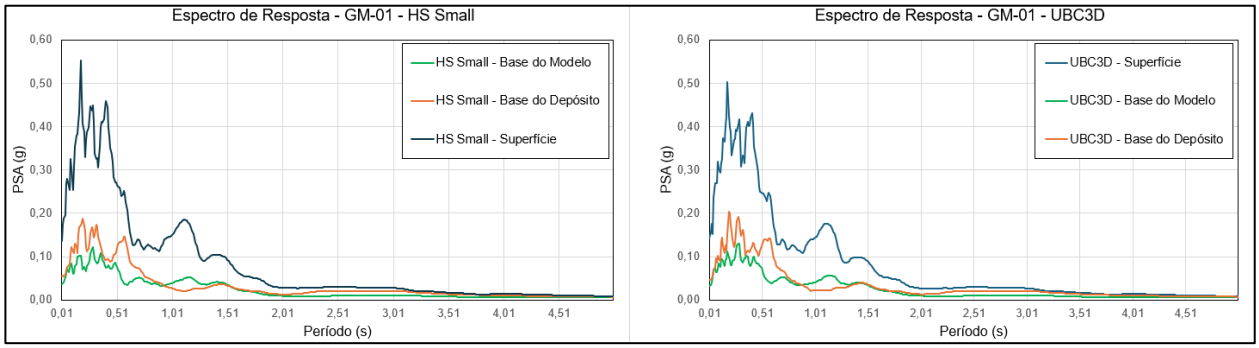


Figura 6. Comparação dos espectros de resposta – GM-02.

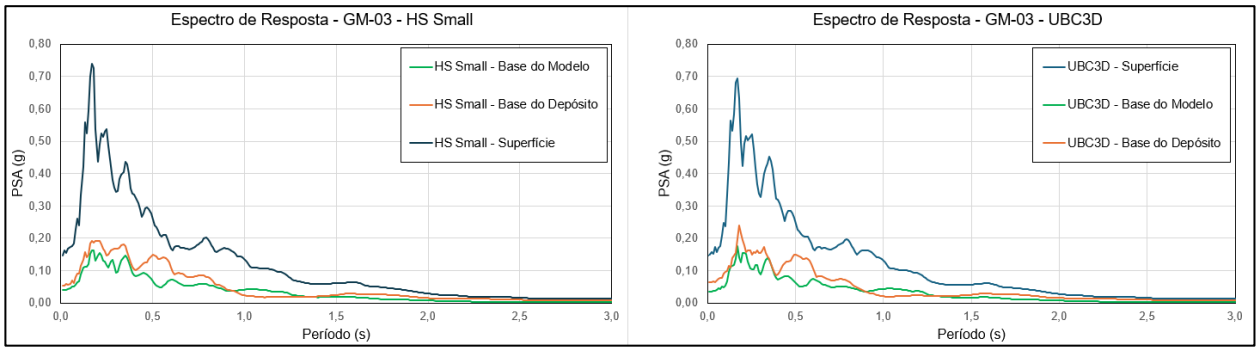


Figura 7. Comparação dos espectros de resposta – GM-03.

Os resultados indicam que os dois modelo constitutivos foram capazes de imprimir efeitos similares de amplificação ao depósito arenoso. Para o GM-01, o valor de PGA obtido em superfície atinge 0,68g com o HS Small e 0,66g, para o UBC3D. Comportamento similar acontece nos sismos GM-02 e GM-03, em que o PGA com o HS Small se mostra levemente superior, porém preservando as mesmas ordens de grandeza.

Observa-se que a camada do depósito arenoso é a principal responsável pelo efeito de amplificação. Entre a base do modelo e o topo da fundação rígida o efeito é sentido em pequena escala. Este comportamento corrobora o conhecimento físico do fenômeno, em que a propagação de ondas demanda menor energia para passar por camadas de menor rigidez, o que conduz a um efeito de amplificação significativo para os materiais inconsolidados.

Adicionalmente, nota-se que os espectros de resposta obtidos com o depósito arenoso adotando os modelo constitutivo HS Small e UBC3D conseguem preservar bastante do formato da curva original, encontrada para camadas inferiores. Os trechos de pico, contudo, são acentuados, resultando em um maior gradiente de variação do sinal entre os diferentes conteúdos de frequência que compõem os terremotos estudados.

A similaridade das respostas encontradas valida que, apesar de formulações constitutivas diferentes, os parâmetros de entrada para caracterizar ambos os modelos foram compatíveis, utilizando-se ajustes de curva que partem de uma mesma base de dados de ensaios de campo e laboratório. Quanto maior for o distanciamento entre os dados de entrada utilizados para caracterizar cada modelo, maior é a tendência de que as respostas obtidas também irão demonstrar divergências em maior escala.

É importante destacar que a modelagem dinâmica conduzida não considerou efeitos de Rayleigh Damping. Aplicando fatores adicionais de amortecimento, é possível alterar os espectros de resposta calculados, minimizando a amplificação identificada. Esse procedimento, contudo, deve ser feito a partir de calibrações numéricas minuciosas ou procedimentos específicos de caracterização paramétrica do Rayleigh Damping em campo e/ou laboratório.

4 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados pelo estudo desenvolvido demonstram a tendência dos modelos constitutivos UBC3D e HS Small em imprimirem aos materiais inconsolidados efeitos similares de amplificação quando caracterizados à luz de uma mesma base de entrada. Para isso, foi utilizado um modelo numérico dinâmico unidimensional que simula uma camada de depósito arenoso. Este material contou com ensaios de laboratório específicos que possibilitaram a parametrização de ambos os modelos constitutivos de forma compatibilizada, conforme estudo de Barrueto et al. (2017).

Evidencia-se a importância da definição do modelo constitutivo mais adequado para capturar o fenômeno físico modelado no contexto de cada projeto específico, tendo em vista que mesmo com respostas potencialmente similares no que tange à amplificação, os modelos capturam características diferentes do comportamento tensão-deformação das camadas. Para materiais inconsolidados, com comportamento *strain-softening* e caracterizados por perdas extremas de resistência pós-pico, que os enquadra como suscetíveis à liquefação, o modelo UBC3D é o mais recomendado para a simulação de eventos sísmicos, uma vez que ele é capaz de descrever de forma efetiva as trajetórias de tensão cíclica às quais o material estará submetido. É importante ressaltar, contudo, que existe uma ampla gama de modelos constitutivos que podem ser avaliados caso a caso.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Tetra Tech pela oportunidade de desenvolver este trabalho e por fomentar o avanço científico na área de engenharia. Para além da equipe envolvida na elaboração deste artigo, vários profissionais foram imprescindíveis nas etapas de concepção das abordagens, aquisição e processamento dos dados, aplicação da metodologia. Estendemos nosso agradecimento a todos estes colegas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barrueto, C.; Sáez, E.; Ledezma, C. (2017) *Seismic demand on piles in sites prone to liquefaction-induced lateral spreading*. In: 16th World Conference on Earthquake, Santiago, Chile.

Hardin, B. O.; Drnevich, V. P. (1972) *Shear Modulus and Damping in Soils: I. Measurement and Parameter Effects; II. Design Equations and Curves*. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, v. 98, n. 6–7, p. 603–691.

Petalas, A.; Galavi, V. (2012). *PLAXIS liquefaction model UBC3D-PLM*. PLAXIS Knowledge Base.

Tsegaye, A. (2010). *PLAXIS liquefaction model*. External Report. PLAXIS Knowledge Base.