



Análise Sísmica de Resposta de Sítio 1D no Domínio do Tempo para Materiais com Potencial de Geração de Poropressão

Evelyn Anne Pereira dos Santos

Pesquisadora, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, evelyn.santos@coc.ufrj.br

Cristian Yair Soriano Camelo

Pesquisador, Université Gustave Eiffel, Nantes, França, cristian.soriano-camelo@univ-eiffel.fr

Maria Cascão Ferreira de Almeida

Professora Titular, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, mariacascao@poli.ufrj.br

RESUMO: As análises de resposta de sítio (Site Ground Response Analyses – SGRA) permitem avaliar a propagação de ondas através de um meio contínuo estratificado, sendo essenciais para a avaliação do comportamento dinâmico dos materiais, particularmente no que se refere ao desenvolvimento das acelerações, velocidades e dos níveis de deformação induzidos por carregamentos sísmicos nestes depósitos. Tradicionalmente, análises unidimensionais são realizadas no domínio da frequência por meio de modelos lineares-equivalentes, os quais apresentam limitações na representação de materiais com comportamento fortemente não-linear, como rejeitos de mineração suscetíveis à liquefação e solos residuais, em que o potencial de geração de poropressão não pode ser desconsiderado. Neste estudo, foram realizadas análises unidimensionais (1-D) de resposta de sítio em um perfil hipotético elaborado a partir de características geológico-geotécnicas representativas de estruturas de contenção de rejeitos localizadas no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, utilizando abordagens linear-equivalente e não-linear, no domínio da frequência e do tempo, respectivamente. As simulações foram conduzidas no software DEEPSOIL, empregando o modelo constitutivo GQ/H (*Generalized Quadratic/Hyperbolic*), além de modelos para geração de poropressão, como GMP e Matasovic & Vucetic para areias. Os resultados reforçam a relevância da representação adequada do comportamento não-linear dos materiais e do potencial de geração de poropressão durante a ocorrência dos sismos, para a obtenção de resposta de sítio mais realistas em estruturas de armazenamento de rejeitos. Verificou-se que os métodos não-lineares, em comparação com o método linear-equivalente, oferecem a vantagem de possibilitar a formulação em termos de tensões efetivas, permitindo a modelagem da geração, redistribuição e dissipação do excesso de poropressão durante e após a solicitação sísmica.

PALAVRAS-CHAVE: Resposta de sítio 1-D; Barragem de rejeitos; Poropressão; Domínio do tempo; Modelos constitutivos não-lineares.

ABSTRACT: Site Ground Response Analyses (SGRA) allow for the assessment of wave propagation through a continuous stratified medium and are essential for evaluating the dynamic behavior of materials, particularly regarding the development of accelerations, velocities, and deformation levels induced by seismic loading within these deposits. Traditionally, one-dimensional analyses are performed in the frequency domain using equivalent-linear models, which exhibit limitations in representing materials with strongly non-linear behavior, such as mine tailings susceptible to liquefaction and residual soils, where the potential for excess pore pressure generation cannot be disregarded. In this study, one-dimensional (1-D) site response analyses were conducted on a hypothetical profile developed based on geological-geotechnical characteristics representative of tailings storage facility located in the ‘Quadrilátero Ferrífero’ region, in Minas Gerais, Brazil. Both equivalent-linear and non-linear approaches were employed, in the frequency and time domains, respectively. The analyses were performed along a vertical soil column crossing the profile, characterized by shear wave velocity and shear strength of the materials. Simulations were carried out using software DEEPSOIL, employing the GQ/H (*Generalized Quadratic/Hyperbolic*) constitutive model, as well as pore pressure generation models such as GMP and Matasovic & Vucetic for sands. The results highlight the importance of accurately representing the non-linear behavior of materials and their potential for excess pore pressure generation during seismic events in order to obtain more realistic site response predictions for



2 0 2 5

tailings structures. It was observed that non-linear methods, when compared to the equivalent-linear approach, offer the advantage of being formulated in terms of effective stresses, allowing for the modeling of the generation, redistribution, and dissipation of excess pore water pressure during and after seismic loading.

KEYWORDS: 1-D Site Response; Tailings Dam; Pore Pressure; Time Domain; Nonlinear Constitutive Models.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, eventos sísmicos de alta magnitude têm reforçado a importância das condições locais do subsolo na modificação da resposta sísmica do terreno. Ocorrências como o terremoto de Tōhoku em 2011 (Japão), que desencadeou um tsunami devastador, o terremoto do Haiti em 2010, o de Qinghai em 2010 (China), e, mais recentemente, os terremotos de Hualien em 2024 (Taiwan) e de Mianmar em 2025, evidenciam que fatores como as condições geológicas e geomorfológicas locais exercem papel crucial na amplificação das ondas sísmicas.

Esses efeitos locais, conhecidos como efeitos de sítio, resultam em alterações significativas na amplitude, no conteúdo de frequência e na duração do movimento do solo, impactando diretamente o comportamento dinâmico de estruturas durante sismos. Dentre os métodos empregados para avaliar tais influências, destacam-se as análises unidimensionais de resposta de sítio (*Site Ground Response Analyses – SGRA*), que têm como objetivo estimar os movimentos do solo na superfície, sendo fundamentais para a elaboração de espectros de resposta para projeto, bem como para a avaliação de tensões, deformações e deslocamentos dinâmicos ao longo do perfil geotécnico, além de servirem como base para estudos de suscetibilidade à liquefação (Hashash et al., 2015). O procedimento analítico consiste na propagação das ondas sísmicas a partir do embasamento rochoso em direção às camadas de solo que o sobrepõe.

Essas análises podem ser realizadas a partir de duas abordagens principais: no domínio da frequência, utilizando o método linear-equivalente; e no domínio do tempo, por meio de modelos com formulações não lineares que consideram o comportamento real dos materiais frente às solicitações cíclicas. O método linear-equivalente, embora amplamente utilizado, não representa adequadamente a geração de poropressão nem a degradação cíclica dos materiais, o que limita sua aplicação em solos saturados. Nesses casos, o cisalhamento cíclico pode levar à redução da tensão efetiva e, consequentemente, da rigidez e resistência do solo, afetando de forma significativa a resposta sísmica do perfil (Matasovic, 1993).

Com o objetivo de avaliar os processos de geração e dissipaçao de excesso de poropressão induzido por carregamentos cíclicos, foram realizadas análises unidimensionais de resposta de sítio no *software* DEEPSOIL, utilizando tanto a abordagem linear-equivalente quanto a não linear. Para a modelagem do comportamento não linear dos materiais, adotou-se o modelo constitutivo GQ/H (*Generalized Quadratic/Hyperbolic*) proposto por Groholski et al. (2016), enquanto os efeitos associados à geração de poropressão foram representados pelos modelos GMP (Green et al., 2000) e Matasovic e Vucetic (1993) para areias.

As simulações foram conduzidas com base em um perfil estratigráfico hipotético, elaborado a partir de características geotécnicas e geológicas representativas de estruturas de contenção de rejeitos localizadas no domínio do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. O perfil é composto, da superfície à base, por camadas de aterro, rejeito de mineração, solo residual, saprolito e rocha. A investigação concentrou-se, sobretudo, na resposta dinâmica das camadas com maior suscetibilidade à geração de poropressão, tais como o rejeito e solo residual.

3 ANÁLISE SÍSMICA DE RESPOSTA DE SÍTIO 1-D

Neste estudo, foram realizadas análises unidimensionais de resposta de sítio, com a aplicação de um registro sísmico de alta magnitude sobre um perfil estratigráfico hipotético, representativo de estruturas de contenção de rejeitos situadas no domínio do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais.

Com o objetivo exclusivo de ilustrar o comportamento da resposta sísmica, adotou-se, como exemplo, o registro do sismo de Kobe (1995), disponível na biblioteca do DEEPSOIL (versão 7.1). Esse evento, de magnitude 6,9 Mw, é reconhecido pela elevada intensidade e pelos danos causados em área urbana. Sabe-se que sismos dessa magnitude não são característicos da realidade sísmica brasileira, e sua utilização neste estudo possui caráter exclusivamente demonstrativo.



2025

As simulações foram conduzidas no software DEEPSOIL, por meio de abordagens linear-equivalente, no domínio da frequência, e não linear, no domínio do tempo, empregando o modelo constitutivo GQ/H (*Generalized Quadratic/ Hyperbolic*) proposto por Groholski et al. (2016). Para a modelagem da geração de poropressão induzida por carregamentos cíclicos, foram utilizados os modelos GMP (Green et al., 2000) e Matasovic e Vucetic (1993) para areias.

3.1 Perfil Geológico-Geotécnico

O perfil geológico-geotécnico (Figura 1) é composto, do topo à base, por aterro, rejeito de mineração, solo residual, saprolito e rocha, totalizando cerca de 75 metros de profundidade. O nível d'água está localizado a 22 metros, no interior da camada de rejeito. As velocidades de onda cisalhamente (V_s) aumentam progressivamente com a profundidade, variando de 200 m/s no aterro até 1800 m/s na rocha. A análise 1-D foi realizada em uma coluna vertical representativa que atravessa esse perfil.

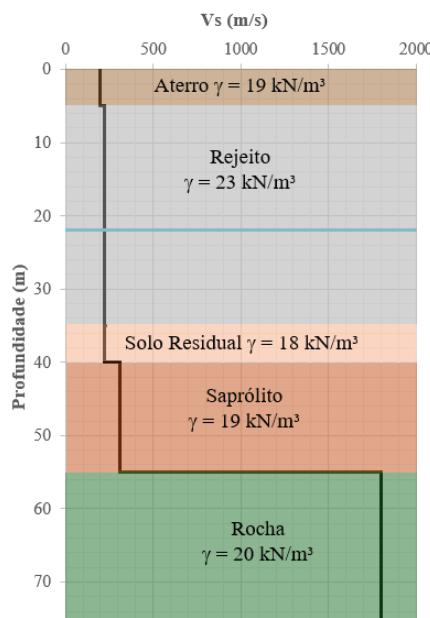


Figura 1. Perfil estratigráfico analisado.

3.2 Metodologia

Para a simulação do comportamento dinâmico do perfil geotécnico, adotou-se uma análise não linear em tensões efetivas, incorporando os processos de geração e dissipação de poropressão induzidos por carregamentos sísmicos. Os materiais constituintes do perfil foram modelados por meio do modelo constitutivo GQ/H, aliado à formulação de recarregamento e descarregamento “*Non-Masing*” (Masing, 1926). A funcionalidade “*Generate Excess Porewater Pressure*” foi habilitada, viabilizando a dissipação de poropressão e estabelecendo condições de contorno permeáveis tanto na superfície quanto na base do modelo.

Com o intuito de assegurar a adequada propagação das ondas sísmicas ao longo do perfil, as espessuras das camadas de solo foram ajustadas de forma a garantir que os períodos mínimos admissíveis fossem compatíveis com a faixa de frequências de interesse. Considerando que movimentos sísmicos com períodos inferiores à capacidade de propagação das camadas são significativamente atenuados, optou-se por configurar o modelo para uma frequência mínima de propagação de 30 Hz, conforme recomendado no manual do DEEPSOIL (2024). Essa medida visa preservar a fidelidade espectral da resposta, especialmente em análises não lineares, nas quais há tendência à subestimação das amplitudes em altas frequências.

A condição de contorno inferior (*Bedrock*) foi representada por uma base flexível, cuja resposta dinâmica foi definida a partir dos seguintes parâmetros: $V_s = 1800$ m/s, peso específico de 20 kN/m^3 e razão de amortecimento nula (0%).



2025

A maioria dos dados empregados na modelagem foi baseada em valores experimentais obtidos *in situ* ou em laboratório, excetuando-se as curvas de redução do módulo de cisalhamento e de amortecimento. Nesses casos, foram utilizadas as formulações empíricas propostas por Darendeli (2001) para todas as camadas. A calibração das curvas de redução do módulo e de amortecimento (*Modulus Reduction and Damping Curve Fitting – MRDF*) com o fator de redução UIUC foi utilizada para representar o comportamento “*Non-Masing*”. Desta forma, o modelo GQ/H é ajustado para um intervalo de deformação de cisalhamento de até 0,05%, considerando a curva de redução do módulo sob a condição de que as tensões de cisalhamento atinjam 95% da resistência última ao cisalhamento na deformação de 10%. Os perfis normalizados de redução do módulo de cisalhamento e de amortecimento, no topo das camadas dos materiais utilizados nas análises, são apresentados na Figura 2, cuja legenda indica as respectivas profundidades dos materiais.

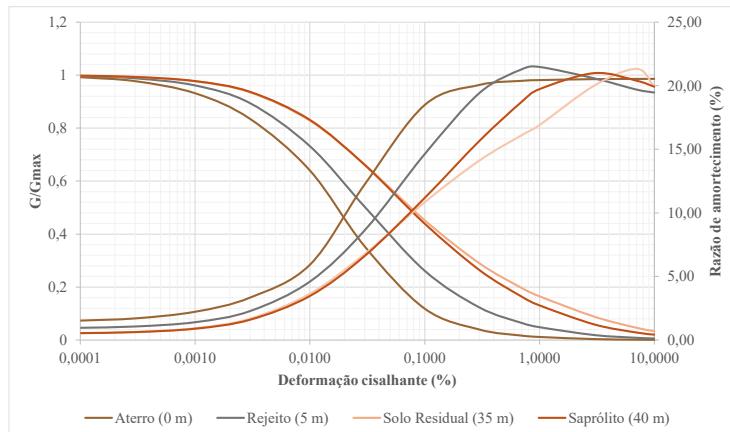


Figura 2. Perfis normalizados de redução do módulo de cisalhamento e amortecimento.

Nas análises não lineares em tensões efetivas desenvolvidas, foram aplicados separadamente dois modelos de geração de poropressão: o modelo proposto por Matasovic e Vucetic (1993), voltado para areias e siltes de baixa plasticidade, e o modelo GMP (Green–Mitchell–Polito), desenvolvido por Green et al. (2000), com formulação baseada em dados laboratoriais para diferentes tipos de solos suscetíveis à liquefação. Ambos os modelos estão implementados no DEEPSOIL, o qual permite simulações acopladas entre degradação do módulo de cisalhamento e geração de excesso de poropressão, conforme as curvas de redução e os parâmetros de ajuste fornecidos. Para fins comparativos e de avaliação da sensibilidade do comportamento dinâmico do perfil, cada modelo foi aplicado de forma independente em todo o domínio da coluna de solo analisada, permitindo observar as variações na dissipação de poropressão e no desenvolvimento das deformações ao longo do tempo. A Tabela 1 indica os parâmetros utilizados nas simulações para ambos os modelos.

Tabela 1. Parâmetros dos modelos de poropressão utilizados nas simulações.

Material	Modelo GMP				Matasovic e Vucetic (1993)					
	α	Dr (%)	FC	v	f	p	F	s	γ_{typ}	v
Aterro	2	80	84	3,8	1	1	1,03	1,74	0,02	1
Rejeito	2	73	57	3,8	1	1	0,89	1,66	0,02	1
Solo Residual	2	55	93	3,8	1	1	0,86	1,77	0,02	1
Saprolito	2	70	61	3,8	1	1	0,52	1,68	0,02	1

3.3 Resultados e Discussões

Dentre os aspectos avaliados, destacam-se os espectros de resposta em aceleração com 5% de amortecimento, a evolução temporal do excesso de poropressão, os deslocamentos máximos observados ao longo do perfil, o comportamento da aceleração máxima do solo (PGA – *Peak Ground Acceleration*) em profundidade, bem como as relações entre razão de resistência ao cisalhamento e deformação cisalhante.

O gráfico da Figura 3 apresenta os espectros de aceleração com 5% de amortecimento obtidos no topo

das camadas de aterro, rejeito e solo residual, comparando os resultados das análises não lineares (NL) com aqueles obtidos por meio do método linear equivalente (EL), além do espectro de entrada referente ao sismo de Kobe (1995). O período relativo à frequência natural da coluna de solo (1.078 Hz) está indicado no gráfico, representado por uma linha vermelha. O acelerograma referente ao sismo de Kobe é apresentado na Figura 4.

De maneira geral, observou-se que, para baixos períodos (até $\sim 0,7$ s), os valores de aceleração espectral obtidos por meio do método linear equivalente foram superiores aos obtidos nas análises não lineares. Resultados semelhantes também foram observados na análise que utilizou o modelo GMP de Green et al. (2000), corroborando a consistência da tendência observada independentemente do modelo de poropressão adotado.

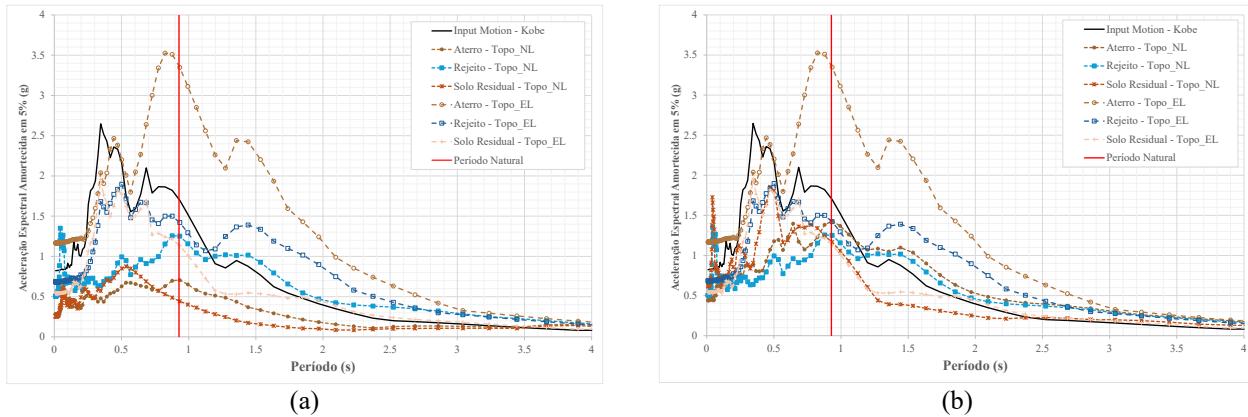


Figura 3. Aceleração espectral considerando abordagens não linear e linear equivalente para o topo das camadas de aterro, rejeito e solo residual, considerando (a) GMP e (b) modelo de Matasovic e Vucetic (1993).

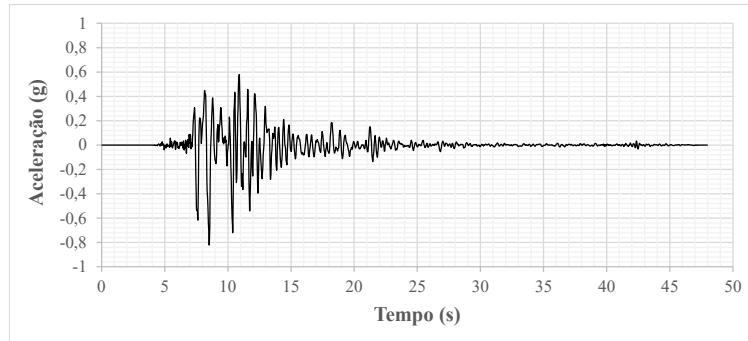


Figura 4. Acelerograma – Sismo Kobe (1995)

Adicionalmente, a evolução do excesso de poropressão (R_u) foi analisada para o meio das camadas de saprolito, solo residual e rejeito utilizando os modelos de Matasovic e Vucetic (1993) e GMP (Green et al., 2000). Os resultados ilustrados na Figura 5 indicaram que o solo residual apresentou os maiores valores de R_u em ambas as abordagens, com destaque para o modelo GMP, em que os valores superaram 0,90. O rejeito apresentou valores intermediários, variando entre 0,53 e 0,60, enquanto o saprolito exibiu os menores valores de R_u segundo o modelo de Matasovic e Vucetic (1993). No entanto, quando analisado com base no modelo GMP, o saprolito apresentou valores superiores aos observados para o rejeito, evidenciando a sensibilidade da resposta à escolha do modelo de geração de poropressão adotado.

Ao comparar os modelos constitutivos, observou-se que o comportamento do modelo GMP é marcado por uma geração mais rápida e instável de poropressão, enquanto o modelo de Matasovic e Vucetic (1993) apresentou resposta mais suavizada, com menor oscilação das curvas de R_u e comportamento mais progressivo. Dessa forma, os resultados reforçam a necessidade de uma seleção criteriosa do modelo de poropressão em análises não lineares, principalmente em contextos onde o comportamento dinâmico do solo pode ser altamente sensível à evolução das poropressões. Em especial, a adoção de modelos calibrados para os materiais específicos em estudo é essencial para garantir representatividade nos resultados e,



2025

consequentemente, maior confiabilidade nas análises de segurança de estruturas geotécnicas submetidas a carregamentos sísmicos.

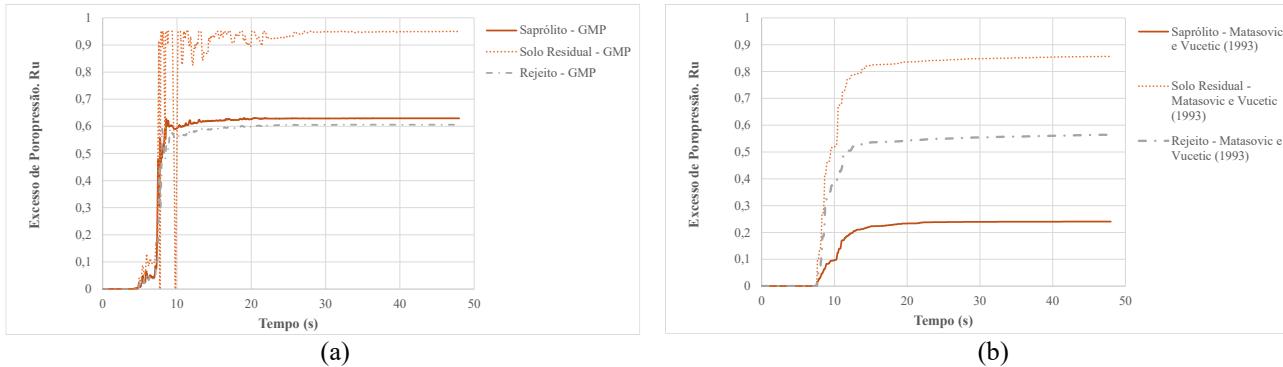


Figura 5. Evolução do excesso de poropressão (R_u) no tempo a partir dos modelos (a) GMP (Green et al., 2000) e (b) Matasovic e Vucetic (1993).

A Figura 6 ilustra a relação entre a razão de resistência ao cisalhamento e deformação cisalhante no meio das camadas de rejeito e solo residual, com base no modelo de poropressão de Matasovic e Vucetic (1993) e GMP (Greent et al. 2000), considerando as abordagens não linear e linear-equivalente. As curvas em cinza e laranja correspondem às análises não lineares e evidenciam o comportamento histerético do rejeito e do solo residual, respectivamente, quando submetidos a carregamentos cílicos, refletindo a degradação progressiva da rigidez dos materiais e o aumento das deformações à medida que os ciclos de carregamento se repetem. Por outro lado, as linhas tracejadas em vermelho e azul representam as análises linear-equivalentes, que indicam um comportamento puramente elástico e linear, sem considerar os efeitos de histerese, atenuação e degradação de rigidez. Tal simplificação resulta em uma representação menos realista da resposta dos materiais sob carregamentos cílicos, sobretudo em condições nas quais a geração de poropressão e o acúmulo de deformações desempenham um papel significativo.

Ao que se refere aos deslocamentos máximos registrados nas diferentes camadas que compõem o perfil geotécnico analisado, a Tabela 2 apresenta os valores obtidos nas simulações para o topo de cada unidade litológica e para a base do modelo.

Tabela 2. Deslocamentos máximos observados nas simulações.

Material	Deslocamentos Máximos (m)		
	Análise NL - Modelo GMP	Análise NL - Matasovic e Vucetic (1993)	Análise EL
Aterro (0 m)	0,46	0,35	0,44
Rejeito (5 m)	0,46	0,33	0,33
Solo Residual (35 m)	0,43	0,21	0,17
Saprólito – Topo (40 m)	0,40	0,21	0,13
Saprólito – Base (55 m)	0,22	0,02	0,02

De maneira geral, os maiores deslocamentos foram registrados nas análises não lineares com o modelo GMP, embora os valores observados nas camadas de aterro, rejeito e solo residual não tenham apresentado variações expressivas entre si, com o aumento da profundidade. As simulações conduzidas com o modelo de Matasovic e Vucetic (1993) resultaram nos menores deslocamentos ao longo do perfil, com destaque para a camada de solo residual, na qual os valores permaneceram praticamente constantes com a profundidade. No caso da abordagem linear-equivalente, o maior deslocamento foi observado no topo da camada de aterro (0,44 m), reduzindo gradualmente até 0,33 m na base dessa camada. Para esta análise, na camada de rejeito, os deslocamentos reduziram com a profundidade, seguindo o mesmo comportamento da análise linear-equivalente.

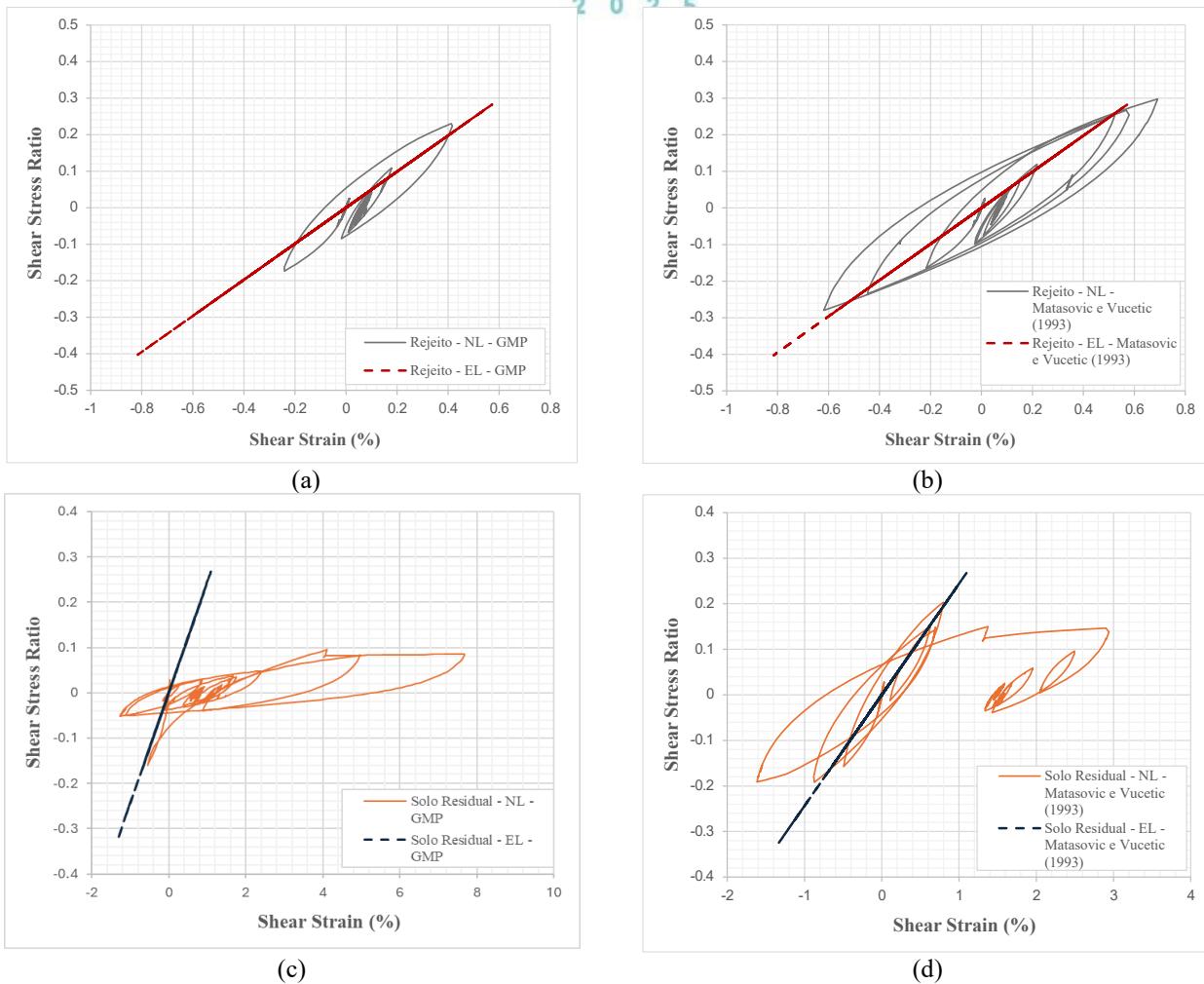


Figura 6. Relação entre a razão de resistência ao cisalhamento e deformação cisalhante no meio das camadas de rejeito e solo residual, considerando os modelos (a,c) NL, EL – GMP e (b,d) NL, EL – Matasovic e Vucetic (1993).

No que tange à distribuição do PGA ao longo da profundidade do perfil, os resultados (Tabela 3) evidenciaram que a análise não linear com o modelo GMP apresentou os menores valores de PGA em praticamente toda a extensão do perfil, particularmente entre 0 e 35 metros de profundidade, onde os valores não ultrapassaram 0,37 g. Em contrapartida, as análises lineares-equivalentes resultaram em valores significativamente mais elevados, alcançando aproximadamente 1,2 g na superfície. A análise não linear com o modelo de poropressão de Matasovic e Vucetic (1993) apresentou valores intermediários de PGA, superiores aos observados com o modelo GMP, mas ainda inferiores aos estimados pelas abordagem linear-equivalente. Ressalta-se que, a partir de aproximadamente 13 metros de profundidade, as acelerações obtidas com a análise não linear para o modelo de Matasovic e Vucetic (1993) passaram a superar aquelas obtidas pela abordagem linear-equivalente. Na região correspondente à camada de saprolito, a partir de 35 metros de profundidade, a análise não linear com o modelo GMP passou a registrar valores médios de PGA em torno de 0,64 g, próximos aos estimados pelas análises linear-equivalentes para a mesma profundidade. Por sua vez, a análise não linear empregando o modelo de Matasovic e Vucetic (1993) continuou apresentando os maiores valores entre todas as abordagens analisadas nessa porção do perfil.

A Tabela 3 apresenta também os valores de amplificação sísmica obtidos a partir da razão entre o PGA registrado na superfície do perfil (PGA_{Solo}) e na base rochosa (PGA_{Rocha}), considerando diferentes abordagens de modelagem numérica. A análise comparativa entre os métodos empregados evidencia que as abordagens lineares equivalentes tendem a superestimar os valores de PGA ao longo do perfil, com destaque para a superfície, onde os valores registrados são superiores ao dobro daqueles estimados pelas análises não lineares.



Tabela 3. Amplificações da máxima aceleração ($\text{PGA}_{\text{Solo}}/\text{PGA}_{\text{Rocha}}$) no perfil analisado.

Tipo de Análise	$\text{PGA}_{\text{Solo}} (\text{g})$	$\text{PGA}_{\text{Rocha}} (\text{g})$	Amplificação
NL – GMP	0,28		0,34
EL associada - GMP	1,17		1,43
NL – Matasovic e Vucetic (1993)	0,44	0,82	0,54
EL associada – Matasovic e Vucetic (1993)	1,17		1,43

4 CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou a resposta sísmica de um perfil geotécnico representativo de barragens de rejeitos, comparando diferentes abordagens de análise. Os resultados evidenciam as limitações do método linear-equivalente, que tende a superestimar as acelerações sísmicas, especialmente em períodos curtos. Em contraste, as análises não lineares no domínio do tempo, utilizando o modelo constitutivo GQ/H, mostraram-se mais adequadas para representar o comportamento real dos materiais, capturando fenômenos críticos como a geração de poropressão, a degradação da rigidez e o comportamento histerético.

A comparação entre os modelos de poropressão revelou diferenças significativas: enquanto o modelo GMP apresentou respostas mais extremas e rápidas, com valores de R_u atingindo até 0,90 no solo residual, o modelo de Matasovic e Vucetic (1993) mostrou uma evolução mais gradual e estável. Essas diferenças se refletiram diretamente nos deslocamentos máximos e na distribuição de acelerações ao longo do perfil, com o GMP produzindo deslocamentos maiores (até 0,46 m) em comparação com Matasovic e Vucetic (0,35 m).

Quanto à amplificação sísmica, as análises lineares-equivalentes indicaram valores significativamente superestimados ($\text{PGASolo}/\text{PGARocha} \approx 1,43$) em relação às não lineares (0,34-0,54), reforçando a importância de métodos mais avançados para previsões realistas. Além disso, apenas as análises não lineares foram capazes de representar as deformações cíclicas e a degradação de rigidez, aspectos relevantes para a avaliação da estabilidade de estruturas geotécnicas sob carregamento sísmico.

Os resultados obtidos enfatizam a importância da utilização de abordagens não lineares em tensões efetivas para a análise de estruturas contendo materiais suscetíveis à geração de poropressão, como rejeitos de mineração e solos residuais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DEEPSOIL. (2024). V7.1, *A nonlinear and Equivalent Linear Seismic Site Response of 1-D Soil Columns, User Manual*. Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL.
- Green, R.A., Mitchell, J.K. and Polito, C.P. (2000). *An Energy-Based Pore Pressure Generation Model for Cohesionless Soils*. Proceedings: John Booker Memorial Symposium, Melbourne, Australia, November 16-17, 2000.
- Groholski, David R. et al. (2016). *Simplified model for small-strain nonlinearity and strength in 1D seismic site response analysis*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 142, n. 9, p. 04016039, 2016.
- Hashash, Y.M.A., Dashti, S., Romero, M.I., Ghayoomi, M. & Musgrove M. (2015). Evaluation of 1-D seismic site response modeling of sand using centrifuge experiments. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **78**, 19–31.
- Masing, G. (1926). *Eignespannungen und Verfestigung beim Messing*. Second International Congress on Applied Mechanics, Zurich, Switzerland, 332-335.
- Matasovic, N., and Vucetic, M. (1993). *Cyclic Characterization of Liquefiable Sands*. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 119, No. 11, pp 1805-1822.