XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/100

Modelagem de Rupturas com Método CEL para Dimensionamento de Barreiras Flexíveis em Taludes

Bernardo Emanuel Lopes Silva
Engenheiro Geotécnico, Universidade de Brasília (UnB), Brasília, Brasil, bernardo.silva@gmail.com

Gabriel Barbosa de Souza
Engenheiro Geotécnico, Universidade de Brasilia, Brasília, Brasil, Gabrielbarbosa361529@gmail.com

Manoel Porfírio Cordão Neto
Professor UnB, Universidade de Brasilia, Brasília, Brasil, mporfírio76@gmail.com

RESUMO: Este trabalho tem como objetivo avaliar a utilização do método numérico Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) para o dimensionamento de barreiras flexíveis de contenção. Para isso, será realizada modelagem numérica no software ABAQUS/CAE, empregando o método CEL, que permite simular o comportamento dinâmico de rupturas e o escoamento de material. As análises serão conduzidas em um modelo 3D simplificado, com espessura unitária (1 m) no eixo Z, de modo a representar uma condição aproximadamente plana, mantendo a formulação volumétrica do CEL. Na apresentação e interpretação dos resultados, os campos serão exibidos em cortes/visões que se assemelham a uma resposta bidimensional. Será apresentado um modelo com a incorporação de um elemento simplificado que represente a barreira flexível, permitindo a obtenção de parâmetros como a força de reação na estrutura. Esses dados serão utilizados como base para o dimensionamento de barreiras flexíveis empregadas na contenção de fluxos de detritos. Os principais aspectos analisados incluem a evolução do deslocamento das massas, o tempo de impacto, a interação com a estrutura de contenção e a quantificação da força exercida. Os resultados apresentados oferecem uma abordagem complementar, prática e eficiente, para o dimensionamento de estruturas de contenção flexíveis.

PALAVRAS-CHAVE: modelagem numérica, método CEL, barreiras flexíveis, ruptura de taludes, Abaqus

ABSTRACT: This work aims to evaluate the use of the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) numerical method for the design of flexible containment barriers. To this end, numerical modeling will be performed using ABAQUS/CAE software, employing the CEL method, which allows simulation of the dynamic behavior of failures and material flow. The analyses are conducted in a simplified 3D model with unit thickness (1 m) along the Z-axis, representing an approximately plane condition while preserving the inherently volumetric (3D) nature of the CEL formulation. For presentation and interpretation purposes, results are shown through slices/views that resemble a two-dimensional response. A model incorporating a simplified element representing the flexible barrier is presented, enabling the acquisition of parameters such as the reaction force on the structure. These data serve as a basis for the design of flexible barriers used in debris flow containment. The main analyzed aspects include the evolution of mass displacement, impact time, interaction with the containment structure, and quantification of the exerted force. The presented results offer a practical and efficient complementary approach for the design of flexible containment structures.

KEYWORDS: numerical modeling, CEL method, flexible barriers, slope failure, Abaqus.

1 INTRODUÇÃO

A ocorrência de desastres naturais decorrentes de movimentos de massa é algo relativamente comum em diferentes regiões do brasil e do mundo, e podem ocorrer devido a processos naturais e antrôpicos, principalmente em regiões de maior declividade. Entretanto, mesmo sendo considerado algo comum, esses processos podem ter grande impactos na sociedade e economia (PRIETO et al., 2017). Dados do Emergency Events Database (EM-DAT) mostram que 26.750 pessoas morreram em todo mundo entre 1991 e 2020 devido a deslizamentos, enquanto no Brasil 629 mortes ocorreram pelo mesmo motivo (MELO et al, 2021 apud PAVEI. 2023).

Os movimento de massa podem ser classificados em: Queda; Tombamento; Escorregamento;Espalhamento e Fluxo (HUNGR et al, 2014). Dentro da categoria de fluxo, é possível destacar o fluxo de detritos, que apresentam caracteristicas de alta velocidade, altas forças de impacto e escoamento em distancias significativas (SHA et al., 2023). Esse tipo de movimento de massa apresenta resultados devastadores, causando grandes impactos a zonas habitadas e perda de vidas. Esse tipo de movimento normalmente considste da massa de solo saturado com diferentes granulometrias que fluem em canais atingindo velocidade de 0,5 a 20 m/s (MARCHELLI; DE BIAGI, 2019).

Para a proteção de ambientes urbanos e infraestrutura, barreiras podem ser construidas para reduzir a energia cinética do fluxo, podendo ser classificadas com rígidas ou flexiveis, a depender de sua rigidez. As barreiras flexiveis ainda podem ser classificadas como fechadas ou abertas, a depender da forma de interceptação dos detritos (MARCHELLI; DE BIAGI, 2019).

O uso de barreiras flexíveis para conter fluxo de detritos apresenta diversas vantagens, como custo-beneficio, baixo impacto para o meio ambiente e sua eficiência (VOLKWAIN et al., 2015). Diversos métodos semi-empiricos podem ser utilizados no dimensionamento de barreiras flexíveis, com foco em estimar a máxima força de impacto do fluxo de detritos. Essa estimativa é feita a partir da máxima velocidade do fluxo e de sua espessura, valores que também são estimados (SHEN et al., 2017). Entretanto, é importante destacar que esses métodos tem dificuldade de conciliar alguns conceitos téoricos com observações feitas em campo e em experimentos (KOO et al., 2017).

Ferrero et al. (2015) destaca que grande parte dos testes realizados em barreiras flexiveis não contam com análises numéricas e análiticas para a interpretação dos resultados, muito devido a alta complexidade da iteração entra as barreiras flexíveis e o fluxo de detritos. Por esse motívo, o autor destaca a necessidade de simplificações para o projeto de barreiras flexíveis.

Uma alternativa para o dimensionamento de barreiras é a utilziação do método numérico *Coupled Eulerian-Lagrangian* (CEL). Esse método é muito utilziado para a simulação da dinâmica de fluidos, além de possibilitar a simulação de fluxos de detritos, devido a sua capacidade de simular grandes deformações, combinando referenciais eulerianos e lagrangianos. Em resumo, a formulação Lagrangiana é aplicada aos corpos sólidos, onde a malha se deforma junto com o material. Já a formulação Euleriana é utilizada para o fluido ou solo, onde o material flui através de uma malha fixa e indeformável, o que evita erros numéricos durante o movimento do fluxo (SHA et al, 2024).

O presente estudo tem como objetivo apresentar uma metodologia para o dimensionamento de barreiras flexíveis a partir de análises com o método numérico Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL). As análises serão realizadas com base em um modelo simplificado e têm como principal finalidade a identificação das forças de contato máximas entre o fluxo de detritos e a barreira. A partir das informações obtidas, será apresentada uma proposta de barreira flexível com especificações compatíveis com as solicitações estimadas pelo modelo. Ressalta-se que o foco do trabalho é demonstrar a aplicabilidade do procedimento e como executá-lo, por meio de um exemplo representativo; embora seja possível variar parâmetros como altura e geometria da barreira, bem como propriedades do solo e condições do cenário, não se justifica explorar múltiplos casos hipotéticos neste artigo, tanto por objetivo quanto por limitações de espaço.

2 METODOLOGIA

2.1 Modelo Físico

A Figura 1 apresenta a geometria utilizada para a aplicação da metodologia proposta, adotou-se uma seção típica com talude de 10 m de altura e inclinação de 1V:1H. A seção possui 100 m de extensão e 12,5 metros de altura, conforme apresentado na Figura 1. Além disso, foi considerado seção com 1 metro de espessura, com o objetivo de otimizar o custo computacional. A barreira representada neste estudo apresenta 5 metros de comprimento, com ancoragem de 2 metros na fundação.

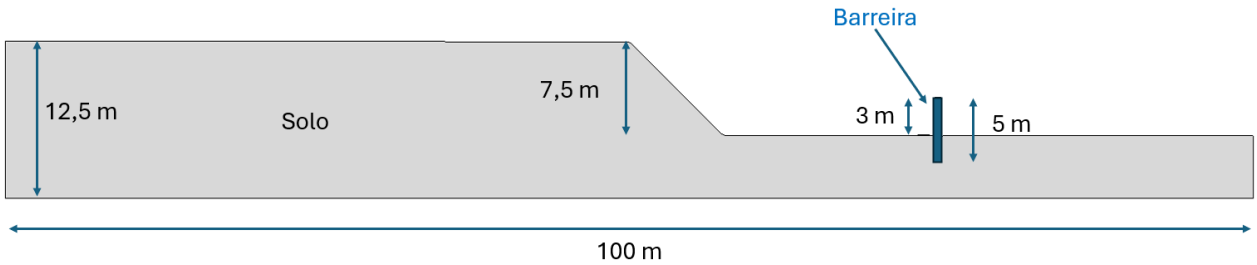


Figura 1. Seção Simplificada adotada no estudo.

2.3 Configuração do Método CEL

O estudo foi dividido em três etapas: (i) inicialização e obtenção do equilíbrio geostático, adotando-se temporariamente parâmetros de resistência majorados para favorecer a estabilidade numérica; (ii) transição gradual para as propriedades físicas iniciais do talude; e (iii) análise dinâmica da ruptura e da propagação do movimento de massa. Na etapa final, a ruptura foi deflagrada por meio de um modelo constitutivo com amolecimento em função da deformação plástica acumulada, permitindo a mobilização do material e a simulação do escoamento. Como o Abaqus/Explicit (CEL) não utiliza *local damping* como recurso principal de estabilização, empregou-se a viscosidade artificial volumétrica (*bulk viscosity*), definida pelos parâmetros adimensionais μL (linear bulk viscosity) e μQ (quadratic bulk viscosity), que atuam apenas em regiões sob compressão volumétrica, reduzindo oscilações numéricas associadas a compressões rápidas, frentes de choque e bandas de cisalhamento.

Durante a estabilização inicial das tensões (etapa i), foram utilizados os valores padrão recomendados no manual (μL = 0,06 e μQ = 1,2). Já na fase dinâmica (etapa iii), esses parâmetros foram reduzidos para evitar dissipação artificial excessiva de energia e preservação do comportamento físico do modelo, adotando-se após calibração μL = 0,002 e μQ = 0,2 (valores menores levaram a instabilidades/inconvergência numérica).

Para modelar o a interação do solo e barreira, foi escolhido a adoção da iteração *General Contact*, no modo de interação do Abaqus. Foi considerado comportamento normal (Normal Behavior), para o qual utilizou-se a opção Hard Contact. Para o comportamento tangencial, foi definido um atrito de interface de 0,3. A extração dos resultados de força de impacto foi realizada a partir de configuração em History Output Requests no módulo Step, o que permitiu o monitoramento dessas variáveis ao longo de toda a simulação da ruptura

As condições de contorno foram aplicadas para garantir o confinamento do solo e imobilziar barreira, que tinha com objetivo principal o registro de informações a respeito do movimento de massa. Na base do domínio euleriano, as velocidades nos eixos X, Y e Z foram restringidas (V=0). Nas faces laterais, aplicou-se restrição de velocidade nos eixos X (transversal) e Z (longitudinal) para simular as condições de contorno do maciço.

Para a barreira, todos os sentidos foram restringidos no reference point criado. O reference point foi então acoplado ao restante do elemento que representa a barreira, impedindo translações e rotações do elemento durante o processo de ruptura e o subsequente impacto da massa de solo.

Para a correta formulação do domínio euleriano no ambiente CEL, utilizou-se a ferramenta de fração volumétrica, que permite ao solver identificar a presença de massa nos elementos da malha. Com essa técnicas duas frações volumétricas foram criadas, um com material 'Soil' como material mobilizado (primeiros 7,5m) e outro material abaixo de resistência maior.

O carregamento de gravidade foi aplicado com magnitude de 9,81m/s² em todo o domínio no eixo Y. Para a resolução numérica, adotou-se o procedimento Dynamic Explicit com um tempo de análise de 12,5 segundos, período suficiente para a estabilização do fluxo e do impacto. A discretização do solo foi feita com elementos de 0,2 x 0,2, totalizando 187.660 elementos no domínio euleriano. Já para a barreira, com elementos de 0,25 x 0,25 (80 elementos). A Figura 2 apresenta a malha de elementos adotada.

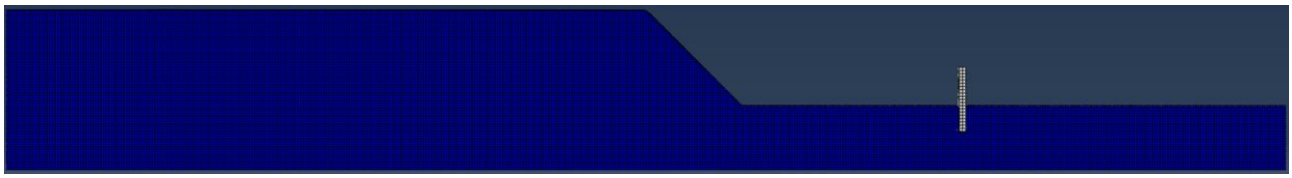


Figura 2. Malha de elementos adotada – vista lateral.

2.2 Propriedades dos Materiais

Para que as simulações fossem realistas, foi necessário definir as propriedades dos materiais. Como o objetivo principal é medir a força do impacto para escolher a barreira ideal, a estrutura foi modelada como um sólido com comportamento linear elástico. Essa escolha foi feita porque, neste modelo, a barreira funciona apenas como um obstáculo de medição, registrando os dados da massa de solo no momento do impacto. É importante mencionar que, em um projeto completo, a deformação da tela (deflexão) também é um parâmetro crítico que o modelo simplificado pode não capturar totalmente

No caso do solo, adotou-se o modelo constitutivo de Drucker–Prager com amolecimento por deformação, de forma a representar de maneira mais realista o comportamento do material sob grandes deformações durante a fase de ruptura. A geometria foi discretizada com dois materiais de solo: (i) a fundação, correspondente aos primeiros 5 m a partir da base, e (ii) o talude, correspondente à região inclinada, com 7,5 m de altura, responsável pelo movimento de massa. Para facilitar a avaliação dos resultados, cada uma dessas regiões foi considerada homogênea (propriedades constantes em seu volume). Os parâmetros adotados para os solos e para a barreira estão apresentados na Tabela 1, e a Figura 3 apresenta a curva de amolecimento por deformação utilizada para o material do talude e da fundação.

Tabela 1. Parâmetros Geotécnicos Adotados.

Elemento	Step	Φ' (º)	c' (kPa)	E' (MPa)	ρ (kg/m³)	υ
Solo	Inicialização	60	-	15	1600	0,3
	Transição	0	-	15	1600	0,3
	Ruptura	0	-	15	1600	0,3
Fundação	Inicialização	60	-	45	1900	0,3
	Transição	13	-	45	1900	0,3
	Ruptura	13	-	45	1900	0,3
Barreira	Inicialização	-	-	30	1000	0,2
	Transição	-	-	30	1000	0,2
	Ruptura	-	-	30	1000	0,2

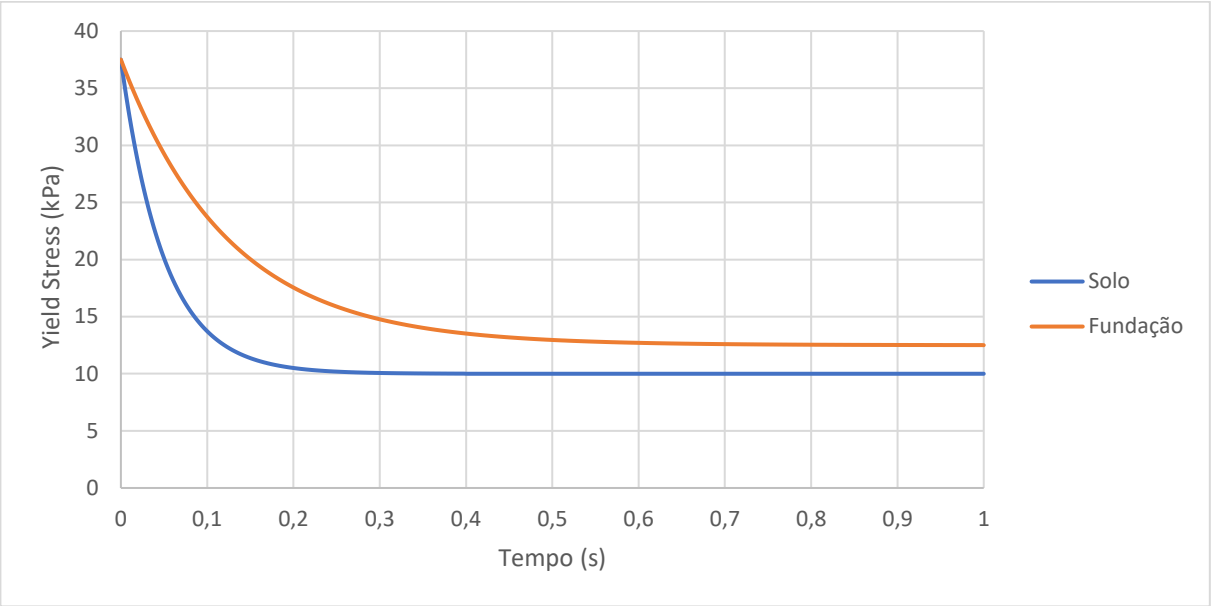


Figura 3. Curva de Amolecimento por Deformação (*Strain Softnening*) – solo

2.4 Dimensionamento de Barreiras Flexíveis

O fornecimento de barreiras flexíveis no Brasil é realizado por diversas empresas nacionais e multinacionais, que usualmente empregam ferramentas próprias de caráter empírico-analítico para estimar a trajetória de blocos/massas e a energia a ser dissipada pelo sistema de contenção. A partir desses resultados, seleciona-se, em geral, a solução que melhor atende aos requisitos do projeto dentre os modelos disponíveis no catálogo do fornecedor.

O procedimento apresentado neste artigo busca complementar essa prática, mostrando como obter, via modelagem CEL, as solicitações mecânicas atuantes na barreira (forças e, se desejado, momentos de reação), que podem ser utilizadas como balizadores na seleção e no dimensionamento de sistemas comerciais. Para fins de demonstração, foi analisado um caso representativo, com uma geometria e um conjunto de parâmetros específicos; contudo, a mesma metodologia pode ser aplicada variando-se, por exemplo, a altura e a geometria da barreira, as propriedades do solo. Em particular, uma campanha paramétrica com diferentes alturas permite avaliar, de forma objetiva, se o fluxo ultrapassa a estrutura e como se altera o campo de velocidades e a interação solo–barreira.

Além disso, a barreira pode ser modelada com diferentes graus de liberdade (por exemplo, deslocável/deformável); neste trabalho, optou-se por mantê-la restrita para reduzir variáveis e favorecer a leitura direta da força de reação, que é o parâmetro de interesse para a estimativa das solicitações. Para o presente estudo, os resultados foram comparados com soluções disponíveis no catálogo da Geobrugg, adotado aqui como referência de mercado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 apresenta o resultado da simulação de ruptura do modelo. Observa-se que o movimento de massa atinge a barreira aproximadamente 4 s após o início da ruptura. A Figura 5 apresenta os campos de velocidade, úteis para caracterizar a cinemática do fluxo e subsidiar análises complementares.

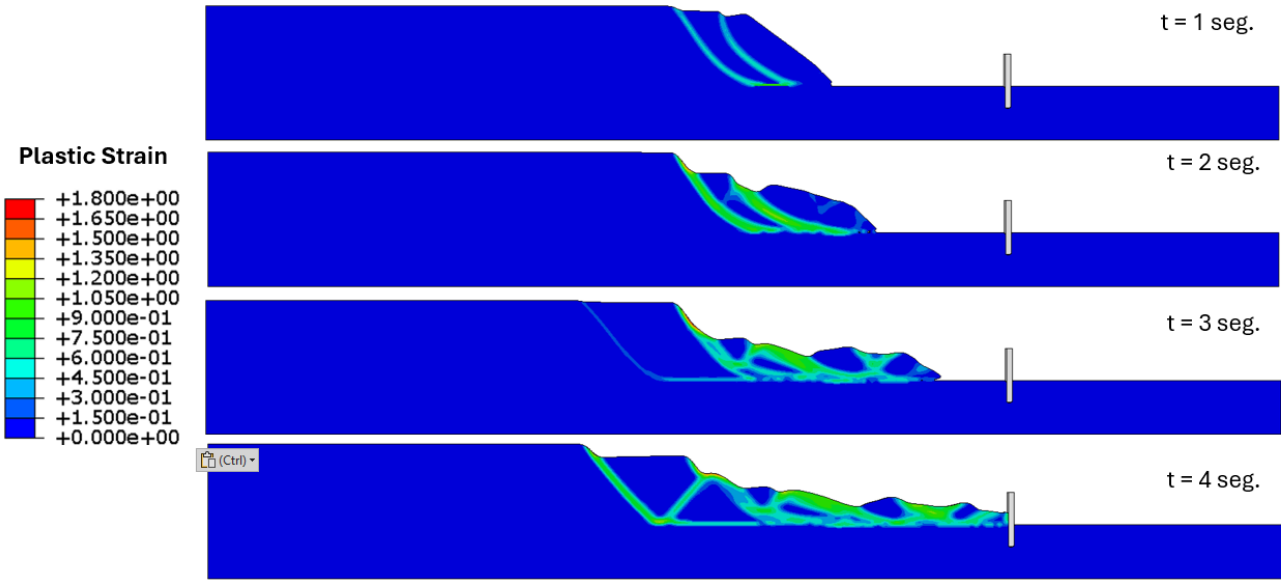


Figura 4. Resultado da simulação de ruptura – Deformação Plastica

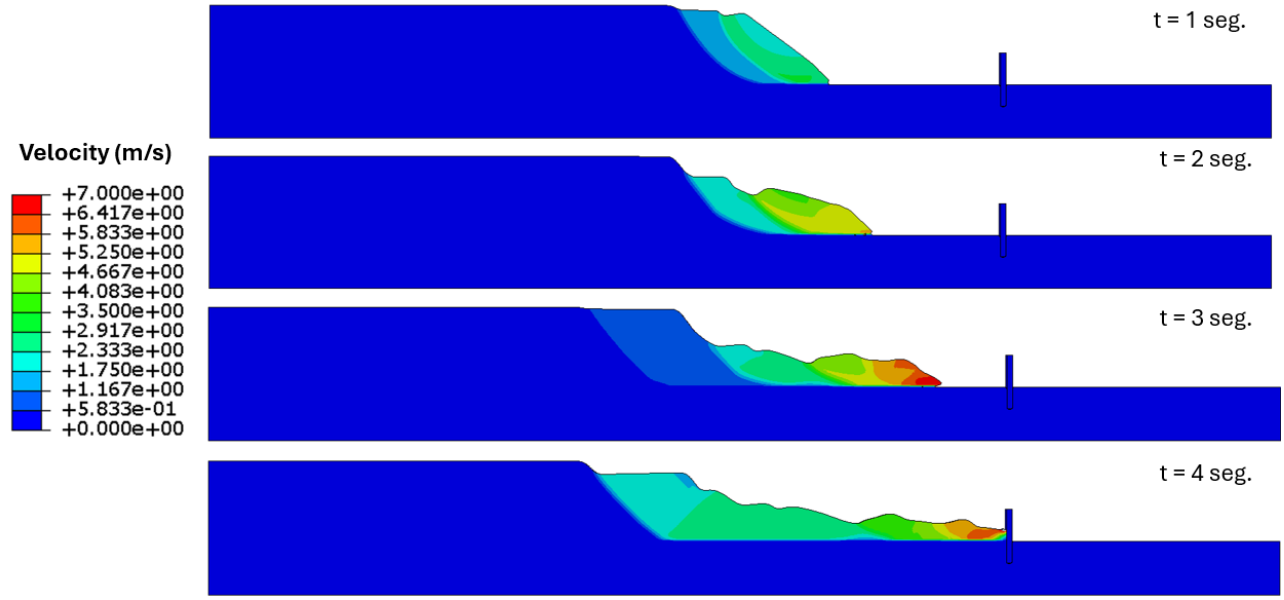


Figura 5. Resultado da simulação de ruptura – Velocidade

Para o dimensionamento das barreiras, é necessária a avaliação das forças de reação no elemento que as representa. O Abaqus permite extrair as componentes em todas as direções (RF1, RF2, RF3), bem como a magnitude resultante e, caso requerido, os momentos de reação (RM). Neste trabalho, apresenta-se a componente horizontal em X (RF1) por ser a mais diretamente associada à solicitação principal do impacto no arranjo adotado. O gráfico da Figura 6 mostra a evolução temporal dessa força. Nota-se a existência de um nível de reação antes do impacto principal, associado ao fato de a barreira estar parcialmente enterrada e em contato do tipo penalty com o solo, o que gera interação mesmo antes da chegada do fluxo mobilizado. Ainda assim, destaca-se um pico pronunciado em torno de 4 s, correspondente ao instante em que a massa efetivamente atinge a estrutura, seguido pela evolução até o valor máximo registrado.

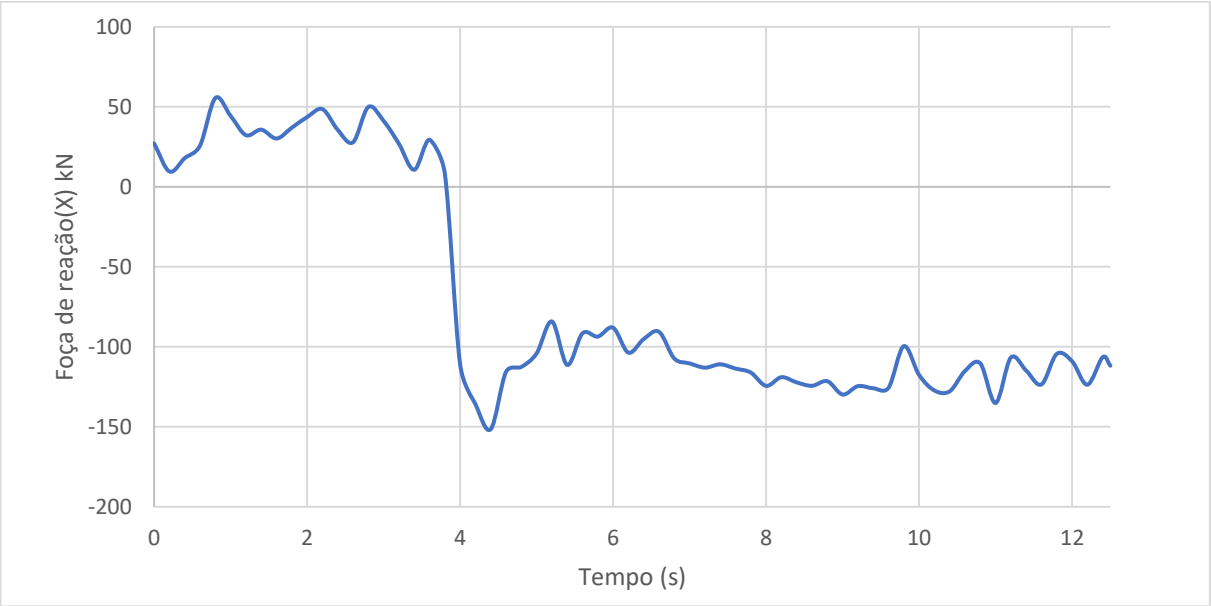


Figura 6.Gráfico de forças de reação da barreira

Com base na força horizontal máxima registrada, é possível estimar uma pressão dinâmica equivalente para fins de dimensionamento. O valor máximo observado foi de 150 kN, aplicado sobre a área representativa da barreira no modelo (3 m de altura × 1 m de largura), resultando em 50 kN/ m² Para os esforço identificado, seria possível a utilização do sistema UX060L – H4 da Geobrugg, para FS de 1,2, que apresenta uma resistência à pressão dinâmica de 60 kN/m² e com altura padrão de 4 m, conforme figura 7. Além da capacidade de carga, a seleção final deve considerar as especificações do sistema, como a largura máxima de topo e a altura padrão, conforme os detalhes de certificação do fabricante.

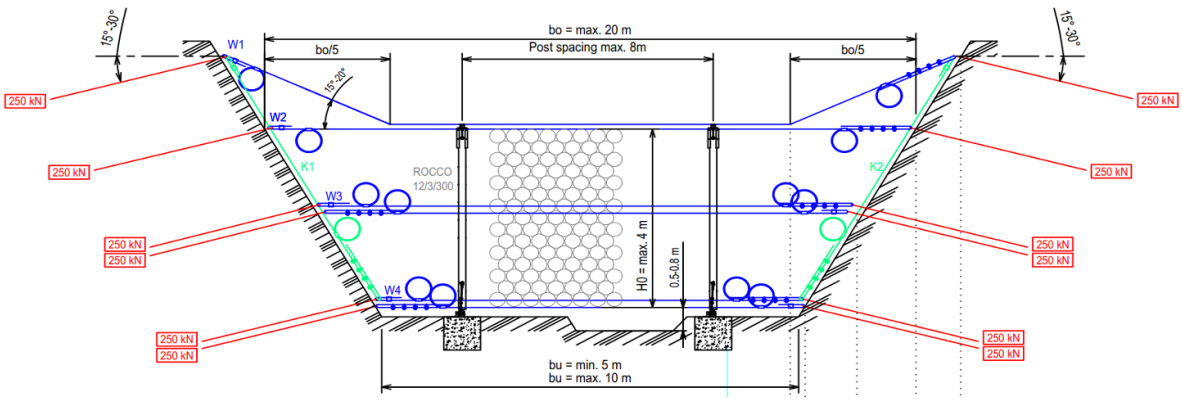


Figura 7. Detalhes Técnicos da Barreira Flexível UX060L – H4
Fonte: Geobrugg (2023)

4 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou método para utilização do método numérico Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) como ferramenta adicional para o dimensionamento de sistemas de contenção flexíveis. O método utilizado, indicado para grandes deformações, permitiu a simulação de um processo de ruptura, e é capaz de fornecer parâmetros diretamente úteis ao projeto, como tempo de chegada, campos de velocidade e esforços transmitidos à barreira, etc. Informações relevantes para a definição de barreira flexível adequada. Ressalta-se que o estudo foi conduzido por meio de um caso representativo, com geometria e propriedades definidas, visando demonstrar a aplicabilidade do procedimento.

Os resultados das análises indicaram que o impacto da massa contra a estrutura atingiu valor máximo de força de reação de aproximadamente 150 kN. Considerando a espessura de 1 m da seção modelada e a altura exposta de 3 m da barreira, obteve-se uma pressão dinâmica de projeto de 50 kN/m² Esses dados serviram como balizadores técnicos para a seleção de barreira flexível, sendo considerado no presente estudo a utilização da barreira UX060L – H4 da Geobrugg, que com resistência a pressão dinâmica de 60 kN/m2 assegura um Fator de Segurança de 1,20.

Adicionalmente, a adoção de um sistema com altura padrão de 4 m proporcionou uma borda livre de 1 m em relação à altura de impacto observada, mitigando o risco de transbordamento do fluxo (overtopping). Também pode-se destacar que o modelo apresentado permitiu a estimativa do tempo de deslocamento da massa rompida até o contato com barreira flexível e permitiu a identificação das máximas velocidades atingidas pela volume mobilizado, de 7 m/s.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ferrero, A. M., Segalini, A., Umili, G. (2015) Experimental tests for the application of an analytical model for flexible debris flow barrier design. Engineering Geology, v. 185, p. 33-42.

Geobrugg (2023) Debris flow protection barrier UX060L - H4: Technical Data Sheet. Romanshorn, Switzerland: Geobrugg AG. Disponível em: https://www.geobrugg.com/. Acesso em: 20 fev. 2026.

Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L. (2014) The Varnes classification of landslide types, an update. Landslides, v. 11 (2), p. 167-194.

Koo, R. C. H. et al. (2017) Velocity attenuation of debris flows and a new momentum-based load model for rigid barriers. Landslides, v. 14 (1), p. 239-253.

Marchelli, M., De Biagi, V. (2019) Dynamic effects induced by the impact of debris flows on protection barriers. International Journal of Protective Structures, v. 10 (1), p. 77-96.

Pavei, S. B. (2023) Simulação e análise de fluxo de detritos na Bacia do Rio Timbé, localizada no município de Timbé do Sul/SC, Brasil. Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 116 p.

Prieto, C. C. et al. (2017) Comparação entre a aplicação do modelo SHALSTAB com mapas de suscetibilidade e risco de deslizamentos na bacia do Córrego Piracuama em Campos do Jordão – SP. Revista Brasileira de Cartografia, v. 69 (1), p. 71-87.

Sha, S. et al. (2023) Simulation of debris flow-barrier interaction using the smoothed particle hydrodynamics and coupled Eulerian Lagrangian methods. Finite Elements in Analysis and Design, v. 214, art. 103864.

Sha, S. et al. (2024) Modelling of debris flow-boulder-barrier interactions using the Coupled Eulerian Lagrangian method. Applied Mathematical Modelling, v. 127, p. 143-171.

Shen, W. et al. (2017) Quantifying the impact of dry debris flow against a rigid barrier by DEM analyses. Landslides, v. 14 (3), p. 913-923.

Volkwein, A. et al. (2015) New approach for flexible debris flow barriers. In: IABSE Conference – Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges, Geneva. Anais... IABSE. p. 1-8.