

Modelagem da Interface Solo-Geomembrana-Rejeito para Projeto de Pilha de Rejeito Filtrado

Saymon Porto Servi

Engenheiro Geotécnico, Green Geotecnia, Belo Horizonte, Brasil, saymon.servi@greengeotecnia.com.br

Álvaro Cândido Santos

Diretor Técnico, Green Geotecnia, Belo Horizonte, Brasil, alvaro@greengeotecnia.com.br

Hugo Santana

Diretor Administrativo, Green Geotecnia, Belo Horizonte, Brasil, hugo@greengeotecnia.com.br

Fernando Oliveira de Queiroz

Engenheiro Geotécnico, Green Geotecnia, Belo Horizonte, Brasil, fernando.queiroz@greengeotecnia.com.br

RESUMO: A utilização de geomembranas em projetos de armazenamento de rejeitos contaminados tem se mostrado essencial como barreira de proteção ambiental. Este trabalho busca avaliar, por meio de modelagem numérica no *software* Slide2, o comportamento mecânico da inclusão de uma geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD) na interface entre o rejeito e o solo de fundação. Duas diferentes metodologias de modelagem disponíveis no *software* foram analisadas: (i) camada fraca (*weak layer*) com resistência reduzida, e (ii) adição da geomembrana por meio da função adição de suporte (*support*). Os modelos foram avaliados quanto à localização da superfície crítica de ruptura e aos fatores de segurança obtidos utilizando o método de equilíbrio limite. Os resultados indicam que a modelagem da interface geomembrana-solo exerce influência significativa nos mecanismos de ruptura e nos valores de coeficientes de segurança. A abordagem mais conservadora foi o método *weak layer*, porém a abordagem utilizando a ferramenta *support* mostrou-se mais realista em relação à configuração geotécnica, pois permite a diferenciação entre as interfaces superior e inferior a geomembrana. O estudo contribui para o aperfeiçoamento das análises numéricas do comportamento de interface fundação-geomembrana-rejeito em fundação pilhas de rejeito filtrados.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeitos, Geomembrana, Estabilidade de Taludes, Modelagem Numérica.

ABSTRACT: The use of geomembranes in contaminated tailings storage projects has proven essential as an environmental protection barrier. This study aims to evaluate, through numerical modeling in Slide2 software, the mechanical behavior of a high-density polyethylene (HDPE) geomembrane at the interface between the tailings and the foundation soil. Two different modeling methodologies available in the software were analyzed: (i) weak layer with reduced strength, and (ii) geomembrane addition through the support function. The models were evaluated regarding the location of the critical failure surface and the safety factors calculated using the limit equilibrium method. The results indicate that modeling the geomembrane-soil interface significantly influences the failure mechanisms and the stability results. The most conservative approach was the weak layer method, while the support function proved to be more realistic with respect to the geotechnical configuration, as it allows differentiation between the interfaces above and below the geomembrane. The study contributes to the improvement of numerical analyses of the behavior of the foundation-geomembrane-tailings interface in foundations of filtered tailings piles.

KEYWORDS: Tailings, Geomembrane, Slope Stability, Numerical Modeling.

1 INTRODUÇÃO

A elaboração de projetos geotécnicos exige compreender as condições de contorno da situação em análise. Na mineração, incidentes recentes envolvendo barragens de contenção resultaram no aumento do uso da solução de armazenamento de rejeitos filtrados e compactados em pilhas de disposição (Servi *et al.*, 2022). Neste cenário, é de fundamental importância conhecer a topografia do terreno, características geológico-geotécnicas dos materiais de fundação, propriedades físico-químico dos rejeitos utilizados, entre outros.



As diversas características físico-químico de rejeitos de mineração relatada por diversos autores (Qiu e Sego, 2001; Bastos *et al.*, 2016; Velten *et al.*, 2022) reforça a importância da execução de ensaios de laboratório para aferição destas propriedades. Do ponto de vista químico, ao longo do processo de beneficiamento dos minerais de interesse, é observada uma alteração das propriedades originais do material, em que, no caso dos rejeitos de mineração, pode haver potencial de lixiviação e/ou solubilização de compostos acima dos limites preconizados pela NBR 10.004 (ABNT, 2024).

A disposição de rejeitos de mineração, especialmente os considerados contaminados, requer sistemas de contenção com impermeabilização de fundação para garantia da segurança geotécnica e ambiental. A ocorrência de rompimentos de estruturas de contenção em empreendimentos minerários evidencia a necessidade de projetos mais robustos, em que tanto os aspectos estruturais quanto os ambientais sejam tratados com igual rigor. Nesse contexto, o uso de barreiras artificiais como as geomembranas torna-se estratégico para o controle de percolação de contaminantes para o subsolo.

As geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) são amplamente utilizadas por promoverem a impermeabilização da fundação, resistência química e durabilidade. Quando instaladas na base de pilhas de rejeito, atuam como elemento de contenção, protegendo o solo de fundação e o lençol freático contra eventuais lixiviações. No entanto, a inclusão de geomembranas também altera o comportamento mecânico da estrutura, uma vez que a interface entre o rejeito e a geomembrana pode apresentar resistência ao cisalhamento significativamente inferior aos materiais envolventes.

A resistência da interface entre solo e geomembrana depende de diversos fatores, como tipo de solo, rugosidade da superfície polimérica, tensão normal aplicada e presença de umidade. Estudos como os de Koerner (2005) mostram que, em certas condições, o ângulo de atrito pode ser reduzido a valores inferiores a 10° , o que pode favorecer o desenvolvimento de planos de ruptura ao longo da interface. Assim, o correto entendimento e representação desse contato é essencial para garantir a segurança das estruturas, tanto do ponto de vista estrutural, quanto ambiental.

Diversas abordagens são utilizadas em softwares de análise de estabilidade para simular a presença de uma geomembrana. No Slide2 (versão 9.031), *software* baseado em métodos de equilíbrio limite, é possível representar a interface com diferentes níveis de sofisticação, variando desde linhas de descontinuidade com resistência própria até camadas finas com propriedades diferenciadas. A escolha do modelo mais apropriado depende dos dados disponíveis, da finalidade do projeto e do nível de realismo desejado.

Este trabalho tem como objetivo comparar duas diferentes metodologias de representação da geomembrana no *software* Slide2, verificando sua influência na localização da superfície de ruptura e nos fatores de segurança. A comparação entre essas abordagens visa contribuir com diretrizes práticas para projetos de pilhas de rejeito e outras estruturas dotadas de sistema de impermeabilização em contextos ambientais sensíveis, como é o caso dos rejeitos contaminados.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Definição do Perfil Estratigráfico e Propriedades Geotécnicas

Para o presente estudo, considerou-se a experiência técnica dos autores, trazendo condições de contorno observadas ao longo de diversos projetos desenvolvidos na área da mineração. Logo, serão estabelecidos conceitos iniciais como, topografia do talude em análise e parâmetros geotécnicos do solo de fundação, do rejeito filtrado e compactado e do solo de cobertura, de forma conceitual, não exibindo ensaios/análises que venham a justificar tais condições, tendo em vista que o foco do trabalho é o estudo envolvendo as relações de interface rejeito-geomembrana-solo de maneira generalista.

Neste cenário, a Tabela 1 apresenta as propriedades geotécnicas dos materiais que constituem o perfil em estudo, considerando um comportamento puramente friccional para o rejeito compactado e um comportamento coesivo-friccional para o solo natural de fundação e o aterro de regularização. Ressalta-se que, para a estrutura considerou-se uma inclinação do talude de 1,8:1,0 (H:V) para o solo natural e 2,0:1,0 (H:V) para o empilhamento de rejeito.

Tabela 1 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais avaliados no estudo – Envolvória de Mohr-Coulomb.

Material	Parâmetros Geotécnicos		
	γ	c'	ϕ'
	[kN/m ³]	[kPa]	[°]
Aterro de regularização	20,0	5,0	30,0
Rejeito compactado	22,0	0,0	35,0
Solo natural	20,0	20,0	30,0

2.2 Definição das Geomembranas Empregadas e Metodologias de Modelagem no Slide2

Em relação a proteção de fundação, considerou-se o uso de geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD) e serão avaliadas duas situações, sendo: (i) uso de geomembrana lisa em ambas as faces; e (ii) uso de geomembrana texturizada em ambas as faces. Koerner (2005) exhibe dados de ângulo de atrito efetivo entre os solos de contato e a interface com as geomembranas texturizadas e/ou lisas. O *software* Slide2 utiliza um conceito identificado como “coeficiente de interação” que define-se como a razão da tangente do ângulo de atrito de interface e da tangente do ângulo de atrito efetivo do solo. Logo, segundo informado por Koerner (2005), o coeficiente de interação é identificado entre 0,83 e 1,00 para geomembranas texturizadas, enquanto este é da ordem de 0,56 a 0,63 para geomembranas lisas.

Para avaliação da análise de estabilidade da estrutura são empregadas duas metodologias de inserção da geomembrana entre as camadas de rejeito compactado e solo natural, sendo: (i) ferramenta *weak layer*: insere uma superfície de resistência determinada na seção através de uma camada de espessura muito pequena (menor que 1,0 cm), sendo atribuído apenas um conjunto de parâmetros de resistência sem considerar a possibilidade de diferença de interações entre a base e o topo da geomembrana; e (ii) ferramenta *support*: insere um elemento entre as camadas de solo com espessura reduzida, porém considerando a possibilidade de diferença entre as interfaces com topo e base.

Neste cenário, a Tabela 2 apresenta os parâmetros de resistência considerados para as geomembranas em estudo e seus diferentes métodos de inserção. Cabe destacar que foram considerados coeficientes de interação de 0,55 e 0,80 para as geomembranas de ambas as faces lisas e texturizadas, respectivamente, e, a partir destes parâmetros, foram calculados os ângulos de atrito de interface. Foram adotados valores inferiores aos observados por Koerner (2005), objetivando uma análise mais conservadora, principalmente pelo fato de estes dados estarem relacionados a solos convencionais, não levando em conta rejeitos de mineração que, por vezes, exibem comportamentos não convencionais do ponto de vista geotécnico.

Tabela 2 – Propriedades do comportamento de interface material geotécnico-geomembrana.

Geomembrana	Coeficiente de Interação	Adesão e Ângulo de Interface por Ferramenta			
		<i>Weak Layer</i> (a' e δ')		<i>Support</i> (a' e δ')	
Faces lisas	0,55	11,0 kPa / 17,6°	Cenário 02	11,0 kPa / 17,6°	Cenário 06
		0,0 kPa / 21,1°	Cenário 04	0,0 kPa / 21,1°	
Faces texturizadas	0,80	16,0 kPa / 24,9°	Cenário 03	16,0 kPa / 24,9°	Cenário 07
		0,0 kPa / 29,3°	Cenário 05	0,0 kPa / 29,3°	

Para a ferramenta *weak layer* há uma dificuldade de determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, tendo em vista que, para o cenário em estudo, é identificado uma maior contribuição por fricção do rejeito compactado em relação ao solo natural, porém o inverso é observado para a parcela de resistência coesiva. Neste sentido, de forma a avaliar distintas condições, optou-se pela consideração da relação material geotécnico-geomembrana em duas situações, sendo: (i) parâmetros determinados a partir da relação rejeito compactado-geomembrana, condição utilizada nos cenários 4 e 5; e (ii) parâmetros determinados a partir da relação solo natural-geomembrana, condição empregada nos cenários 2 e 3.

2.3 Detalhamento do Processo de Modelagem da Geomembrana no *Software Slide2*

Para ambas as metodologias de inserção de geomembrana, o local de aplicação é o mesmo, sendo localizado no contato direto entre o solo natural e o rejeito compactação, não tendo contato com o aterro de regularização, conforme exibido na Figura 1 através da linha pontilhada identificada em marrom.

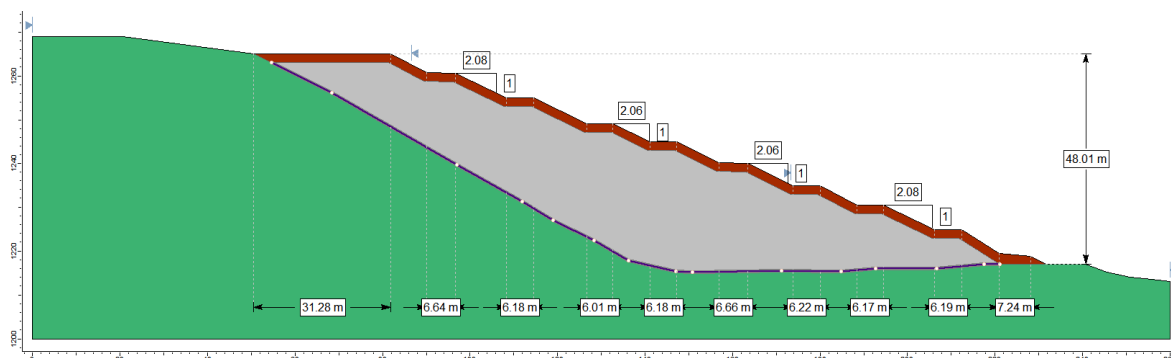
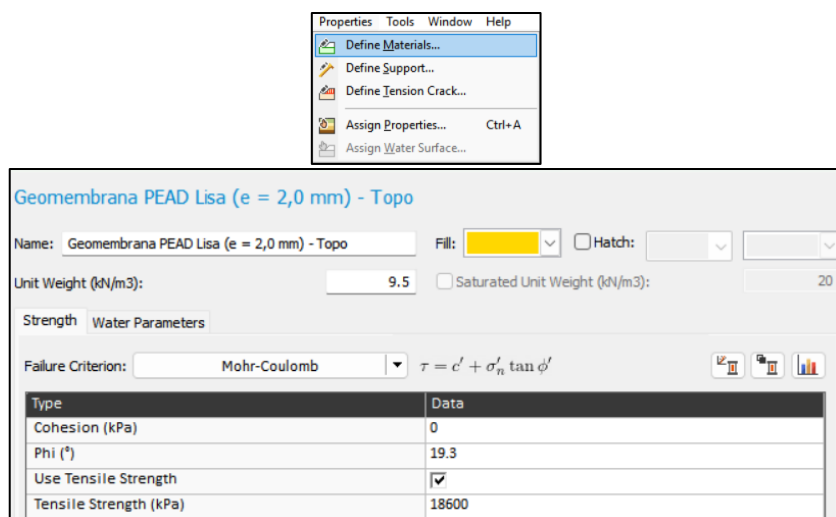


Figura 1 – Região de aplicação da geomembrana.

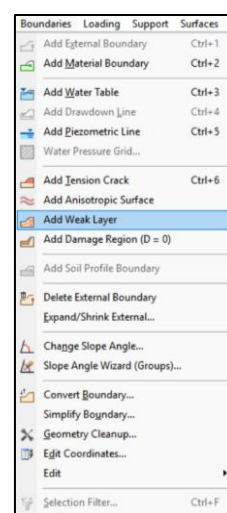
2.3.1 Ferramenta *Weak Layer*

A ferramenta *Weak Layer* permite inserir zona de baixa resistência que, para o presente estudo, representa uma superfície preferencial de ruptura dado ao potencial de deslizamento do rejeito compactado sobre a geomembrana. Neste cenário, descreve-se, em detalhes, o processo de utilização do método:

- 1º Passo: Criar um material com as propriedades da geomembrana na barra de *menus*: “*Properties*” > “*Define Materials...*” (Figura 2a);
- 2º Passo: Definir superfície de aplicação da *weak layer* através do caminho na barra de *menus*: “*Boundaries*” > “*Add Weak Layer*” (Figura 2b).



(a)



(b)

Figura 2 – Procedimento de aplicação da geomembrana através da ferramenta *Weak Layer*.

2.3.2 Ferramenta *Support*

A ferramenta *Support* permite inserir um elemento com propriedades de resistência ao cisalhamento intrínsecas ao material ou relacionadas aos materiais em contato. Neste cenário, descreve-se, em detalhes, o processo de utilização do método:

- 1º Passo: Criar um tipo de suporte com as propriedades da geomembrana na barra de *menus*: “*Properties*” > “*Define Support...*” (Figura 3a);
- 2º Passo: Definir superfície de aplicação do suporte através do caminho na barra de *menus*: “*Support*” > “*Add Support*” (Figura 3b).

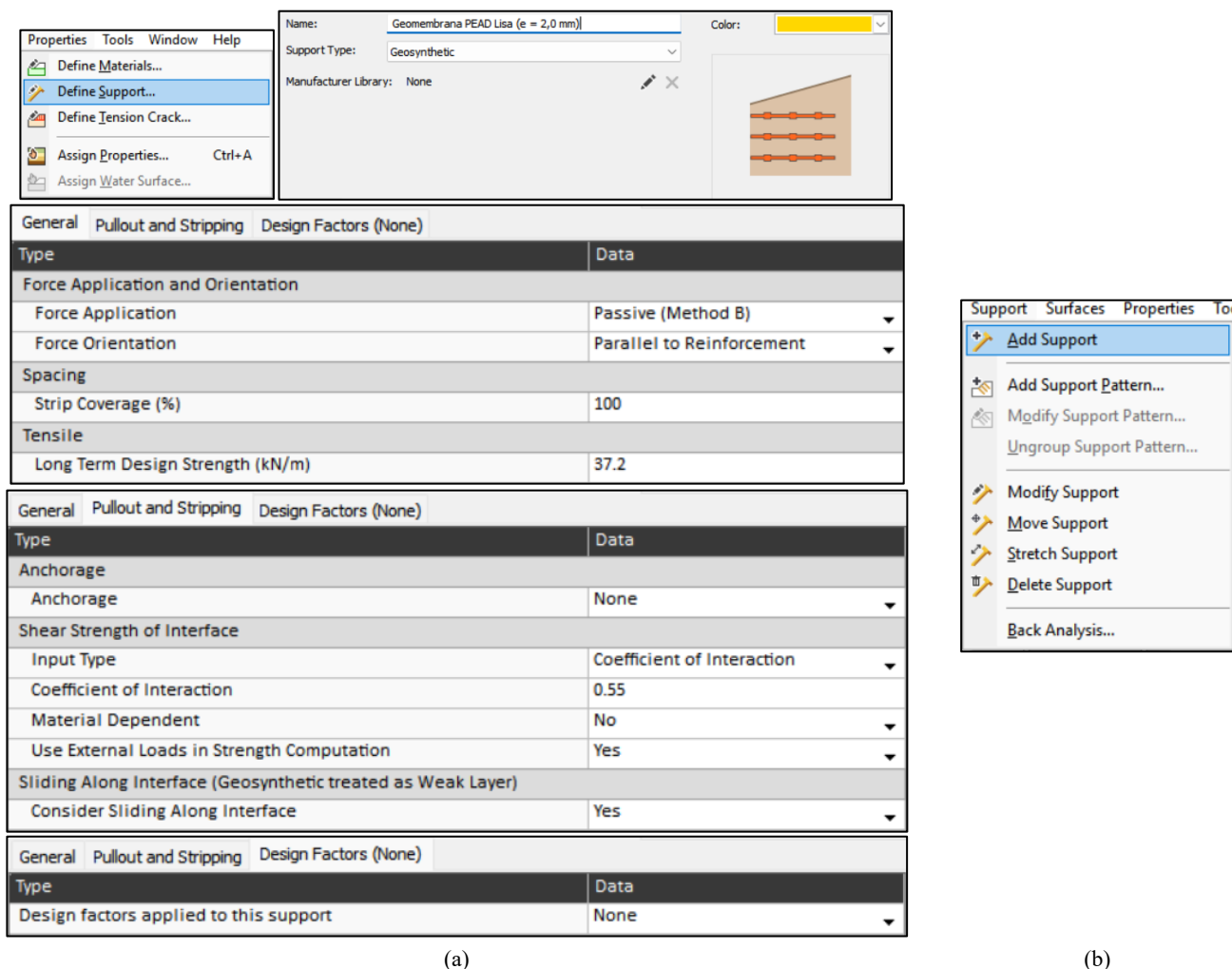


Figura 3 – Procedimento de aplicação da geomembrana através da ferramenta *Support*.

2.4 Síntese dos Cenários Avaliados

A Tabela 3 apresenta uma síntese dos cenários avaliados no presente estudo.

Tabela 3 – Cenários em estudo.

Cenário	Método de Simulação	Geomembrana		Parâmetros de Controle	
		Uso	Textura	Coefficiente de Interação	Interface
01	-	Não	-	-	-
02	<i>Weak layer</i>	Sim	Faces lisas	0,55	Rejeito-Geomembrana
03	<i>Weak layer</i>		Faces texturizadas	0,80	Rejeito-Geomembrana
04	<i>Weak layer</i>		Faces lisas	0,55	Solo Natural-Geomembrana
05	<i>Weak layer</i>		Faces texturizadas	0,80	Solo Natural-Geomembrana
06	<i>Support</i>		Faces lisas	0,55	Rejeito-Geomembrana-Solo Natural
07	<i>Support</i>		Faces texturizadas	0,80	Rejeito-Geomembrana-Solo Natural

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base na metodologia proposta foram simulados os diferentes cenários em estudo, sendo os resultados dos fatores de segurança e do tempo computacional necessários para análise apresentados, de forma sucinta, na Tabela 4. As superfícies de ruptura de todos os cenários são exibidas na Figura 4.

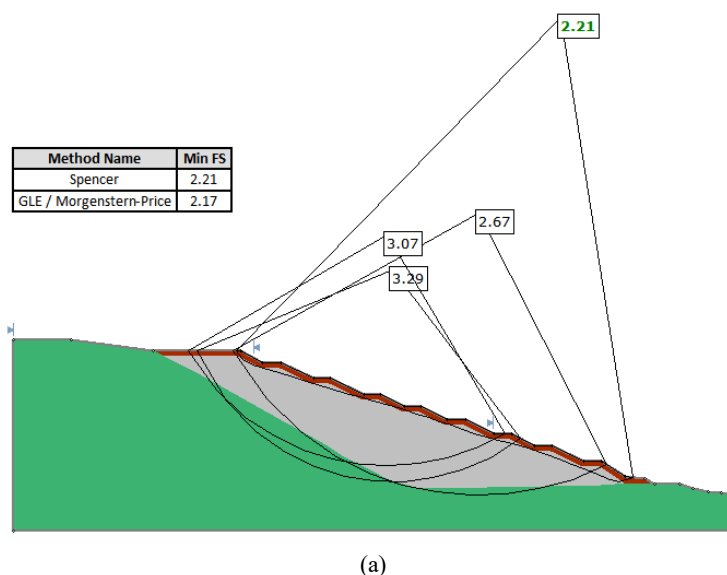
Tabela 4 – Análises de estabilidade da pilha de rejeitos avaliada para os diferentes cenários de interação solo-geomembrana-rejeito.

Cenário	Método de Simulação	Fator de Segurança / Método de Avaliação		Tempo de Processamento [s]	Referência
		GLE/Morgenstern-Price	Spencer		
01	-	2,170	2,210	6,0	Figura 4a
02	<i>Weak layer</i>	1,537	1,545	8,0	Figura 4b
03	<i>Weak layer</i>	2,247	2,227	8,0	Figura 4c
04	<i>Weak layer</i>	1,391	1,383	7,0	Figura 4d
05	<i>Weak layer</i>	2,020	2,002	7,0	Figura 4e
06	<i>Support</i>	1,551	1,537	89,0	Figura 4f
07	<i>Support</i>	2,274	2,254	125,0	Figura 4g

A análise de estabilidade da pilha sem geomembrana (Figura 4a) apresentou os maiores fatores de segurança, 2,170 (GLE) e 2,210 (Spencer), com superfície crítica restrita ao interior da pilha. Isso mostra que, na ausência da geomembrana, a estabilidade depende mais da resistência interna do rejeito do que da interação com a fundação. Já a inclusão da geomembrana redireciona a ruptura para a base, tornando a interface fundação-geomembrana-rejeito um plano frágil.

Entre os cenários, a geomembrana lisa sobre o solo resultou nos menores fatores (1,391 e 1,383), evidenciando baixa interação. Em contraste, a geomembrana texturizada modelada como *Support* apresentou os maiores valores (2,274 e 2,254), próximos à condição sem geomembrana, comprovando o ganho de resistência ao cisalhamento pela texturização.

Também se observaram diferenças de tempo computacional: o método *Weak Layer* foi até 15 vezes mais rápido, mas o *Support* forneceu fatores ligeiramente superiores, capturando melhor o efeito da interface. Por fim, verificou-se que tanto a rugosidade da geomembrana quanto a posição relativa de materiais mais fracos na interface influenciam diretamente a estabilidade.



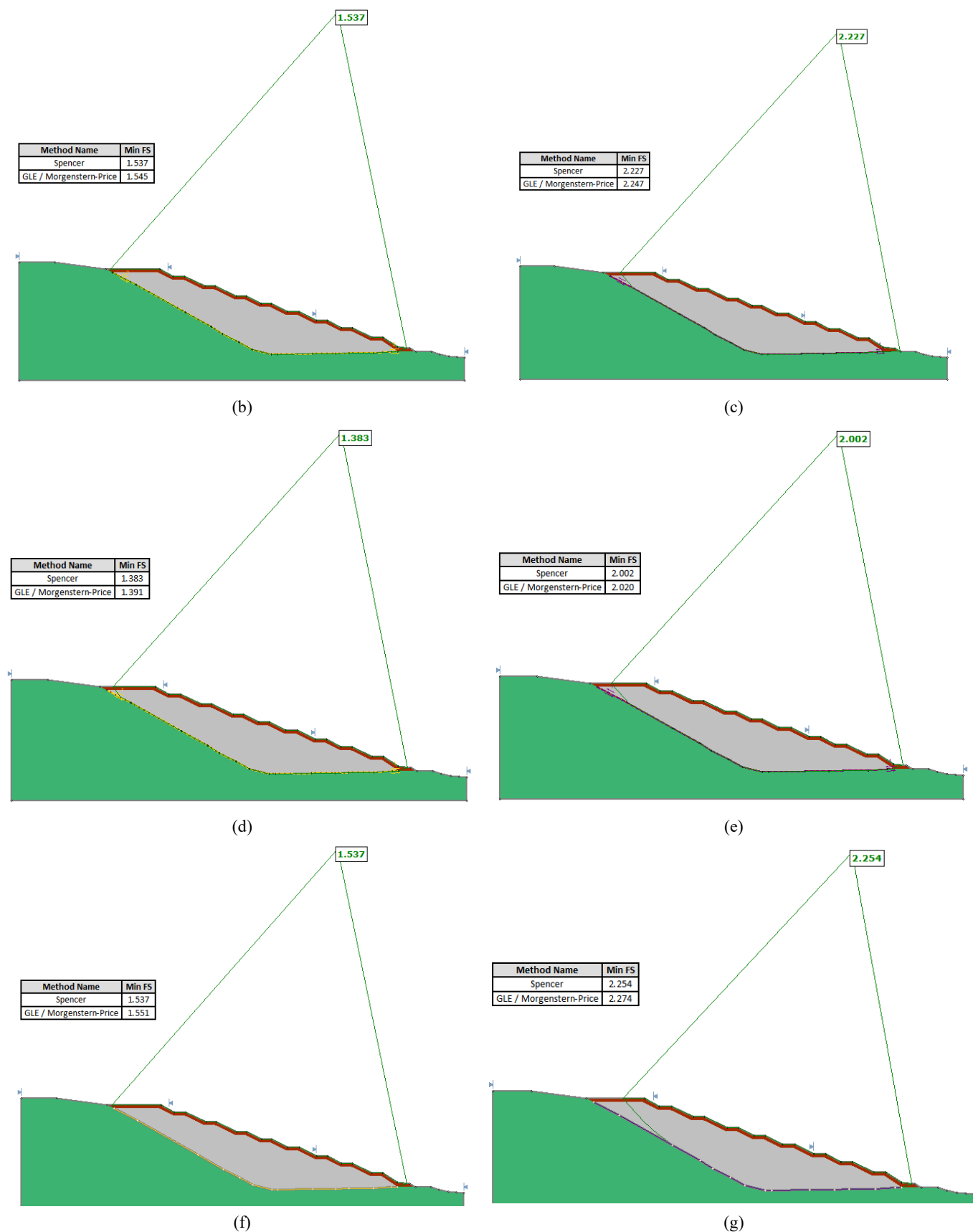


Figura 4 – Superfícies de ruptura das análises de estabilidade avaliadas.



4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados apresentados, observa-se que a ferramenta *Weak Layer* (Cenários 02 a 05) apresentou tempos computacionais inferiores, variando entre 7 e 8 segundos. Essa agilidade na obtenção dos dados torna essa abordagem especialmente indicada para projetos conceituais, onde análises comparativas entre diferentes cenários e alternativas construtivas são frequentes e exigem respostas rápidas para embasar decisões iniciais de engenharia. Ainda assim, a variação dos fatores de segurança obtidos com *Weak Layer* evidencia a importância de considerar o tipo de geomembrana e o material em contato, pois há sensível influência desses parâmetros na estabilidade global da estrutura.

Por outro lado, os cenários 06 e 07, modelados com a ferramenta *Support*, apresentaram tempos de cálculo até 15 vezes maiores. Em contrapartida, os fatores de segurança obtidos foram os maiores entre todos os casos com geomembrana, indicando diferença na representação da interação entre os materiais na interface, quando comparado a ferramenta *Weak Layer*. Assim, essa abordagem mostra-se mais detalhada quanto a inserção das condições de contorno, resultando em maior custo computacional na modelagem do comportamento estrutural. Ademais, destaca-se que o uso de geomembrana texturizada com modelagem via *Support* (Cenário 07) resultou no melhor desempenho de estabilidade entre todos os casos analisados com presença de interface.

Em termos conceituais, a modelagem com *Support* apresenta maior robustez física pois simula o ângulo de interface entre todos os materiais envolvidos, ou seja, interação fundação-geomembrana-rejeito, o que exige significativo tempo computacional. Por outro lado, a modelagem com *Weak Layer* é uma abordagem simplificada que necessita da tomada de decisão por parte do projetista em relação a qual material será considerado como mais frágil para simular uma fina camada de baixa resistência. Importante aspecto a ser observado é que os métodos avaliados podem apresentar resultados muito distintos, necessitando em tomadas de decisões para alterações estruturais significativas ao projeto.

A lacuna do conhecimento em relação a estudos brasileiros sobre a interface solo/rejeito-geomembrana em termos de modelagem física e/ou numérica, destaca a necessidade de cuidado na elaboração, análise e tomada de decisão para estes cenários. Assim, apesar da simulação com *Support* ser mais robusta por considerar a relação de interface em todos os materiais de contato com a geomembrana, a avaliação com *Weak Layer* é mais rápida e conservadora, sendo recomendada por esses autores para avaliações em projetos com baixo nível de informação. Recomenda-se que a simulação com uso da técnica *Support* a nível de projeto deve ver sustentada com robusta campanha de ensaios específicos para simular o real ângulo de interface da geomembrana com os materiais de projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2024). NBR 10.004 - *Resíduos sólidos*. Rio de Janeiro.
- Bastos, L. A. D. C. *et al.* (2016). *Using Iron Ore Tailings from Tailing Dams as Road Material*. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 28, n. 10.
- Qiu, Y.; Sego, D. C. (2001) *Laboratory properties of mine tailings*. Canadian Geotechnical Journal, v. 38, n. 1, p. 183–190, 1.
- Koerner, R. M. (2005). *Designing with Geosynthetics*. Pearson Prentice Hall.
- Servi, S. *et al.* (2022). *Mechanical response of filtered and compacted iron ore tailings with different cementing agents: Focus on tailings-binder mixtures disposal by stacking*. Construction and Building Materials, v. 349.
- Velten, R. Z. *et al.* (2022). *Influence of grading and fabric arising from the initial compaction on the geomechanical characterisation of compacted copper tailings*. Géotechnique, p. 1–12, 25.