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/COBRAMSEG2026.4/73

Estudo Comparativo entre Equilíbrio Limite e Tensão Deformação em Estrutura de Contenção do Tipo Terramesh

Gabriel Mendes Cabral
Engenheiro Civil, TBretas, Belo Horizonte, Brasil, gabriel@tbretas.com

Ariadne Martins da Silva
Engenheira Geotécnica, TBretas, Belo Horizonte, Brasil, ariadne@tbretas.com

Thiago Cruz Bretas
Engenheiro Civil, TBretas, Belo Horizonte, Brasil, tbretas@tbretas.com

Thiago Ribeiro Dib
Engenheiro Civil, TBretas, Belo Horizonte, Brasil, thiago.dib@tbretas.com

Isabele Altoé Bissoli
Engenheira Civil, Ausenco, Belo Horizonte, Brasil, altoeisabele@gmail.com

Zharry Bueno
Estudante, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, zharryrb@gmail.com

RESUMO: As estruturas de contenção feitas com solo reforçado, como o sistema Terramesh, são bastante utilizadas em projetos geotécnicos. Isso se deve à sua alta resistência, ao bom controle de deformações e à sua viabilidade em ambientes com condições limitadas. Apesar de parecerem simples, com camadas de aterro reforçadas por geogrelhas/tela metálica e envolvidas por faces em gabião, o desempenho desse sistema depende muito da interação entre o solo e o reforço, além da maneira como é construído. Durante a construção, o aterro é colocado em camadas, as geogrelhas/tela metálica são encaixadas, e o solo é compactado em cada etapa, o que ajuda a aumentar a rigidez e a redistribuir tensões à medida que a obra avança. No entanto, as análises de estabilidade dessas estruturas ainda costumam ser feitas apenas com métodos de equilíbrio limite, que medem a segurança com base em possíveis superfícies de ruptura e em um fator de segurança geral, sem levar em conta o histórico de carga ou como as deformações evoluem durante a execução. Diante disso, este trabalho apresenta uma comparação entre os métodos de equilíbrio limite e de tensão-deformação aplicados a uma estrutura de contenção em Terramesh. Os resultados indicam diferenças significativas na previsão de deslocamentos e na redistribuição de tensões, mostrando que considerar o processo construtivo pode levar a uma avaliação mais precisa do comportamento e da estabilidade da estrutura.
PALAVRAS-CHAVE: Solo reforçado; Terramesh; Equilíbrio limite; Tensão-deformação.

ABSTRACT: Containment structures built with reinforced soil, such as the Terramesh system, are widely used in geotechnical projects due to their high resistance, good deformation control, and feasibility in environments with limited conditions. Although they appear simple, consisting of soil layers reinforced with geogrids and enclosed by gabion facing, the performance of this system strongly depends on the interaction between the soil and the reinforcement, as well as on the construction procedure. During construction, the fill is placed in layers, the geogrids are installed, and the soil is compacted at each stage, which helps increase stiffness and redistribute stresses as the structure is built. However, the stability analyses of these structures are still commonly performed using limit equilibrium methods, which evaluate safety based on potential failure surfaces and an overall factor of safety, without considering the loading history or how deformations evolve during construction. In this context, this study presents a comparison between limit equilibrium and stress–strain methods applied to a Terramesh retaining structure. The results indicate significant differences in the prediction of displacements and in the redistribution of stresses, demonstrating that considering the construction process may lead to a more accurate assessment of the structural behavior and stability.
KEYWORDS: Reinforced soil; Terramesh; Limit equilibrium; Stress–strain.

1 INTRODUÇÃO

A estabilização de taludes e encostas representa um importante desafio em obras geotécnicas, especialmente em regiões urbanas ou em áreas com relevo acentuado. Nos últimos anos, as construções de contenção que usam solo reforçado ganharam destaque devido a sua eficiência estrutural, flexibilidade construtiva e viabilidade econômica. Essas estruturas consistem na inclusão de elementos resistentes à tração, como geogrelhas, geotêxteis ou malhas metálicas, em camadas de solo compactado, formando um material composto com maior resistência ao cisalhamento e menor deformabilidade quando comparado ao solo natural (Palmeira, 1992; Massad, 2010). Dentre as opções existentes, o Terramesh se sobressai por unir o reforço interno do solo com uma parte frontal feita de gabião metálico, o que gera estruturas fortes e que se encaixam em vários tipos de obra.

Apesar da relativa simplicidade construtiva dessas estruturas, seu desempenho está ligado à forma como o solo e os reforços interagem, e às condições de execução do aterro. Durante a construção, o aterro é lançado em camadas sucessivas, com instalação dos reforços e compactação progressiva do solo, o que promove alterações no estado de tensões e deformações do maciço ao longo do processo construtivo. No entanto, na prática de projeto, a avaliação da estabilidade dessas estruturas ainda é frequentemente realizada por métodos baseados no equilíbrio limite, que consideram apenas o estado final de ruptura potencial. Segundo Koerner (2012) e Jewell (1996), análises baseadas em modelos tensão-deformação podem representar de forma mais realista o comportamento dessas estruturas, permitindo avaliar a evolução das tensões e deslocamentos ao longo da construção.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Solo reforçado

O princípio do solo reforçado baseia-se na incorporação de elementos resistentes à tração em camadas de solo compactado, formando um material composto com maior resistência e menor deformabilidade que o solo natural. Esses elementos podem ser geossintéticos (geogrelhas e geotêxteis) ou metálicos, atuando na limitação de deformações e no aumento da resistência ao cisalhamento. O desempenho depende da interação solo-reforço, por meio de atrito e intertravamento (Palmeira, 1992; Jewell, 1996).

A presença dos reforços promove a redistribuição de tensões, aumentando a estabilidade e reduzindo deslocamentos. Quando há tendência de deformação lateral, os reforços são tracionados, contribuindo para o equilíbrio do sistema. Assim, o solo reforçado passa a apresentar comportamento pseudo-coesivo, permitindo estruturas mais inclinadas e elevadas (Koerner, 2012).

Entre as soluções construtivas, destacam-se sistemas que integram reforço e paramento frontal, como o Terramesh, amplamente aplicado em contenções e estabilização de taludes. Nesses casos, os reforços atravessam a superfície potencial de ruptura, com parte na zona ativa e parte na zona resistente, garantindo a ancoragem e a mobilização das forças de tração.

2.2 Sistema Terramesh

O sistema Terramesh é uma solução de contenção em solo reforçado que integra o reforço interno do maciço com uma face frontal composta por gabiões metálicos. Nesse sistema, os painéis metálicos estão ligados às malhas de reforço que se estendem para o interior do aterro compactado, criando uma estrutura unificada. Ao longo da execução, o aterro é aplicado em camadas sucessivas, com a instalação dos reforços e a compactação do solo em cada fase da construção. Esse processo de construção ajuda tanto na mobilização gradual das tensões dentro do maciço quanto no desenvolvimento do comportamento estrutural da contenção.

A face frontal em gabião exerce um papel importante tanto estrutural quanto funcional, contribuindo para a contenção do material granular, proteção do aterro e controle da deformação da estrutura. Ademais, o sistema possui uma alta capacidade de drenagem graças à natureza permeável dos gabiões, o que diminui a

formação de pressões neutras no interior do maciço. Essas propriedades fazem do sistema Terramesh uma opção eficaz e frequentemente empregada em projetos de estabilização de taludes, contenções rodoviárias e obras de infraestrutura (Koerner, 2012). A Figura 1 ilustra esquematicamente o funcionamento de uma estrutura de solo reforçado com face em gabião, destacando a atuação dos reforços, o solo compactado e uma possível superfície de ruptura.

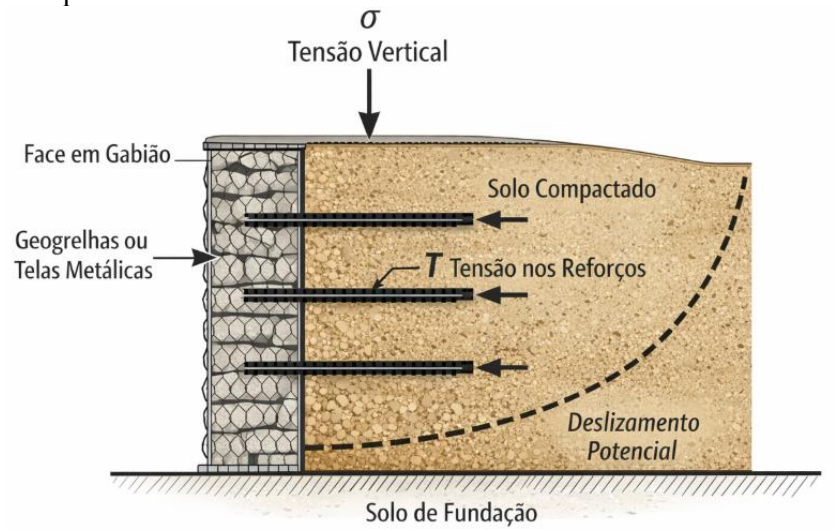


Figura 1. Esquema conceitual de uma estrutura de contenção em solo reforçado com face em gabião, destacando o solo compactado, os elementos de reforço e uma possível superfície de ruptura.

2.3 Métodos de análise de estabilidade

A estabilidade de estruturas de contenção em solo reforçado pode ser avaliada por várias abordagens analíticas, destacando-se os métodos fundamentados no equilíbrio limite e as análises de tensão deformação. Essas abordagens se distinguem principalmente na maneira como retratam o comportamento do maciço e na consideração da progressão das tensões e deformações durante a construção da estrutura.

2.3.1 Método de equilíbrio limite

Na prática da engenharia geotécnica, os métodos de equilíbrio limite são frequentemente empregados para analisar a estabilidade de taludes e estruturas de contenção. Nesta metodologia, a estabilidade é analisada por meio da avaliação de possíveis superfícies de ruptura, onde se estabelece o equilíbrio entre as forças que resistem e as forças que atuam ao longo da superfície potencial de falha. A segurança de uma estrutura é representada pelo fator de segurança, que é definido como a relação entre a resistência disponível e as demandas que o sistema mobiliza.

Apesar de esses métodos possibilitarem uma avaliação confiável da estabilidade global do maciço, o comportamento deformacional do solo e o histórico de carregamento relacionado ao processo construtivo não são levados em conta de maneira explícita. Neste estudo, utilizaram-se métodos rigorosos de equilíbrio limite, amplamente aceitos na literatura técnica, para avaliar a estabilidade global da estrutura.

A análise foi conduzida usando o software Slide2 (Rocscience), empregando os métodos de Morgenstern e Price (1965), Spencer (1967) e Sarma (1973) para calcular o fator de segurança em várias configurações de projeto. Essa metodologia possibilitou a identificação das condições críticas de estabilidade e a avaliação do impacto dos parâmetros geométricos e das características dos reforços no desempenho da estrutura.

2.3.2 Análise tensão-deformação

As análises baseadas em modelos tensão deformação visam retratar de maneira mais precisa o comportamento do solo e das estruturas geotécnicas, levando em conta a relação entre as tensões aplicadas e as deformações ocorridas no maciço. Esse tipo de abordagem é normalmente executado por meio de métodos

numéricos, como o método dos elementos finitos, que possibilitam a simulação do comportamento do solo, dos elementos de reforço e das interações entre esses componentes.

Uma das principais vantagens dessas análises é a capacidade de integrar o processo de construção na modelagem, o que possibilita a avaliação da progressão das tensões e deslocamentos durante as diversas fases de execução da estrutura. Assim, é possível obter uma representação mais precisa do comportamento do maciço reforçado, abrangendo a redistribuição de tensões e o desenvolvimento progressivo das deformações (Duncan & Wright, 2005).

Neste estudo, as análises de tensão deformação foram conduzidas com o auxílio do software RS2 (Rocscience), fundamentado no método dos elementos finitos. As simulações possibilitaram a análise do desempenho da estrutura em condições de carregamento estático, levando em conta a realização da obra em etapas construtivas. Foram examinados os movimentos do maciço, as forças atuantes nos reforços, além da distribuição de tensões e deformações ao longo da estrutura. Os resultados gerados por essa metodologia foram, posteriormente, comparados com os derivados das análises de equilíbrio limite. O objetivo era verificar a consistência das soluções e caracterizar o desempenho global da estrutura em diferentes condições de projeto.

3 METODOLOGIA

3.1 Parâmetros

Para conduzir as análises numéricas, estabeleceram-se os parâmetros geotécnicos que representam os materiais constituintes da estrutura de contenção em solo reforçado, englobando o aterro, o solo de fundação, o material passivo, o aterro reforçado e o material do gabião. As simulações foram realizadas com base em parâmetros que levaram em conta propriedades como peso específico, ângulo de atrito, coesão, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. O modelo constitutivo de Mohr-Coulomb foi empregado para descrever o comportamento mecânico dos materiais de solo.Os valores utilizados nas análises foram incorporados ao modelo numérico de acordo com o mostrado na Tabela 1, que reúne os parâmetros geotécnicos adotados para os materiais considerados nas simulações.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos adotados para os materiais considerados nas análises numéricas.

MATERIAL	PESO ESPECÍFICO [kN/m³]	Coeficiente de Poisson -	Módulo de Young [kPa]	Coesão [kPa]	Ângulo de Atrito φ' (º)
Aterro	18	0,3	50000	**21**	**28.5**
Fundação	20	0,3	100000	**26**	**31**
Passivo	18	0,3	70000	**22**	**32**
Aterro reforçado	20	0,3	80000	**14**	**30.5**
Gabião	20	0,3	50000	**22**	**32**

O comportamento elástico linear foi considerado para os elementos de reforço, utilizando-se um módulo de rigidez axial que corresponde às propriedades do material geossintético empregado, com força à tração de 500 kN/m. Esses reforços foram concebidos como componentes estruturais incorporados ao interior do maciço reforçado, possibilitando a mobilização de esforços de tração durante as fases de construção.

3.2 Geometria da estrutura

A estrutura analisada foi projetada para simular uma contenção comum em solo reforçado do tipo Terramesh, empregada em projetos de estabilização de taludes e contenções. O sistema é composto por um maciço de aterro compactado, fortalecido por camadas horizontais de elementos resistentes à tração, que estão ligados ao paramento frontal formado por gabiões. A Figura 4 mostra um exemplo de estrutura de contenção realizada com o sistema Terramesh, evidenciando a configuração usual desse tipo de obra e a disposição das camadas de reforço ligadas ao paramento frontal em gabiões.



Figura 4. Exemplo da estrutura de contenção em solo reforçado do tipo Terramesh.

3.4 Construção do modelo

A simulação das etapas de construção sucessivas representou o processo de construção da estrutura, com o lançamento progressivo das camadas de aterro e a inclusão dos elementos de reforço no modelo numérico.

Essa metodologia possibilitou uma representação mais precisa do comportamento do maciço reforçado, levando em conta a progressão das tensões e deformações durante as diversas etapas de execução da obra. Assim, foi possível analisar o desenvolvimento gradual das deformações e a mobilização das forças de tração nos elementos de reforço durante o processo de construção. A Figura 5 mostra as várias fases envolvidas na modelagem, retratando o progresso passo a passo da estrutura até sua configuração final.

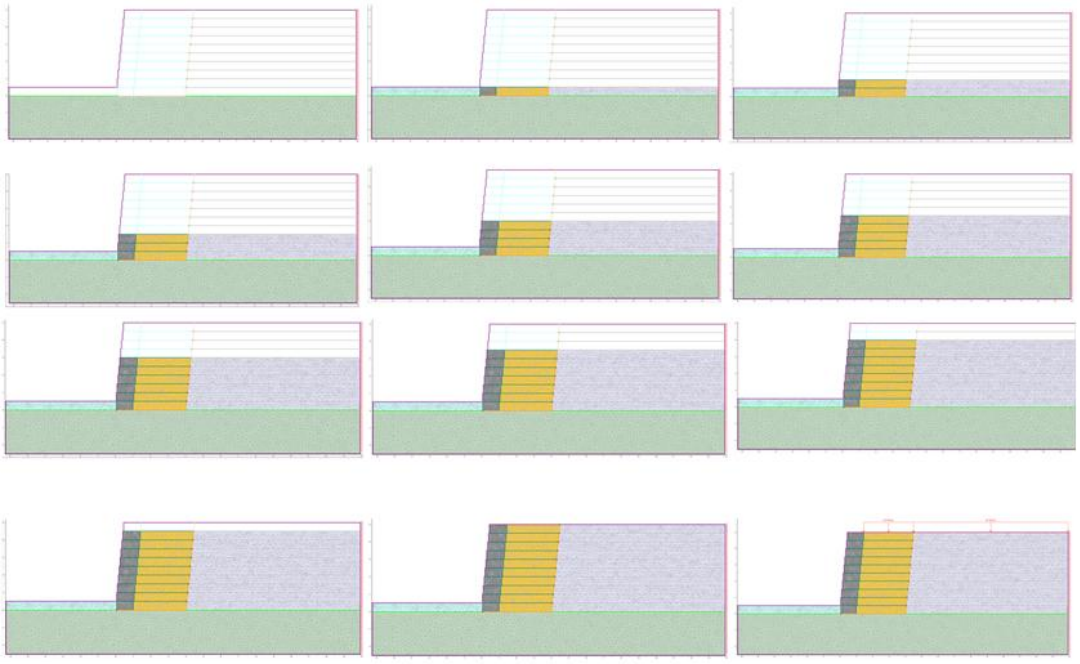


Figura 5. Etapas construtivas

Para executar as análises numéricas usando o método dos elementos finitos, o domínio do modelo foi dividido em uma malha formada por elementos triangulares com seis nós. A discretização foi estabelecida de maneira uniforme, assegurando uma representação geométrica apropriada da estrutura e a estabilidade numérica das simulações.

A qualidade da malha foi verificada utilizando os critérios de controle do software, que avaliaram aspectos como a distorção dos elementos, ângulos internos e presença de elementos invertidos. Não foram encontrados elementos de qualidade insuficiente, garantindo a confiabilidade das análises executadas.

3.5 Procedimento de análise

As análises LEM foram realizadas no Slide2 (Rocscience), utilizando os métodos de Morgenstern e Price (1965), Spencer (1967) e Sarma (1973), com busca automática da superfície crítica não circular via Particle Swarm. Isso permitiu identificar as condições críticas e a influência dos parâmetros no desempenho.

As análises tensão-deformação foram feitas no RS2 (Rocscience), avaliando deslocamentos, forças nos reforços e distribuição de tensões. Por fim, os resultados foram comparados para caracterizar o comportamento da estrutura.

4 RESULTADOS

4.1 Método de Equilíbrio Limite

As análises de estabilidade global da estrutura foram conduzidas por meio dos métodos de equilíbrio limite, utilizando os critérios de Morgenstern e Price (1965), Spencer (1967) e Sarma (1973). Os resultados obtidos (Figura 6), indicaram fatores de segurança consistentes entre os diferentes métodos, com valores variando entre 2,04 e 2,07, evidenciando a estabilidade global da estrutura nas condições analisadas.

A superfície crítica de ruptura identificada apresentou geometria predominantemente não circular, interceptando parcialmente a região reforçada e se desenvolvendo em direção ao maciço de fundação. Observa-se que os reforços atuam de forma efetiva na interceptação da superfície potencial de ruptura, contribuindo para o aumento da resistência global do sistema.

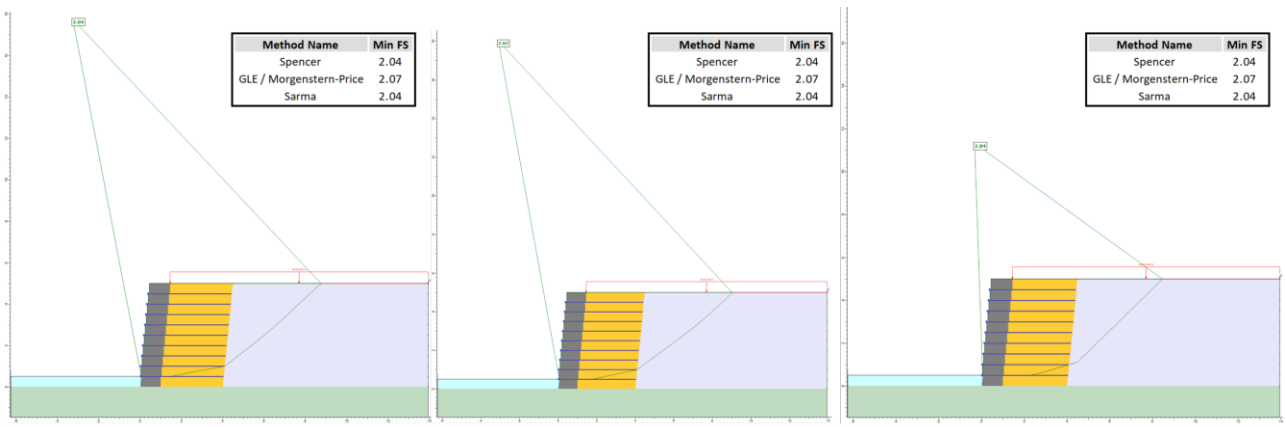


Figura 6. Fator de segurança por equilíbrio limite

4.2 Análise Tensão deformação

As análises numéricas baseadas no método dos elementos finitos permitiram avaliar o comportamento deformacional da estrutura ao longo das etapas construtivas. Os resultados indicaram que os deslocamentos horizontais máximos e ocorreram na região do paramento frontal, atingindo valores da ordem de 20 mm, enquanto os deslocamentos verticais foram da ordem de 20 mm, porém, ao término do solo reforçado(Figura 7).

A evolução dos deslocamentos ao longo das etapas construtivas evidenciou um comportamento progressivo do maciço, com incremento gradual das deformações à medida que novas camadas de aterro foram adicionadas. Esse comportamento está diretamente associado à mobilização progressiva das tensões e à interação entre o solo e os elementos de reforço.

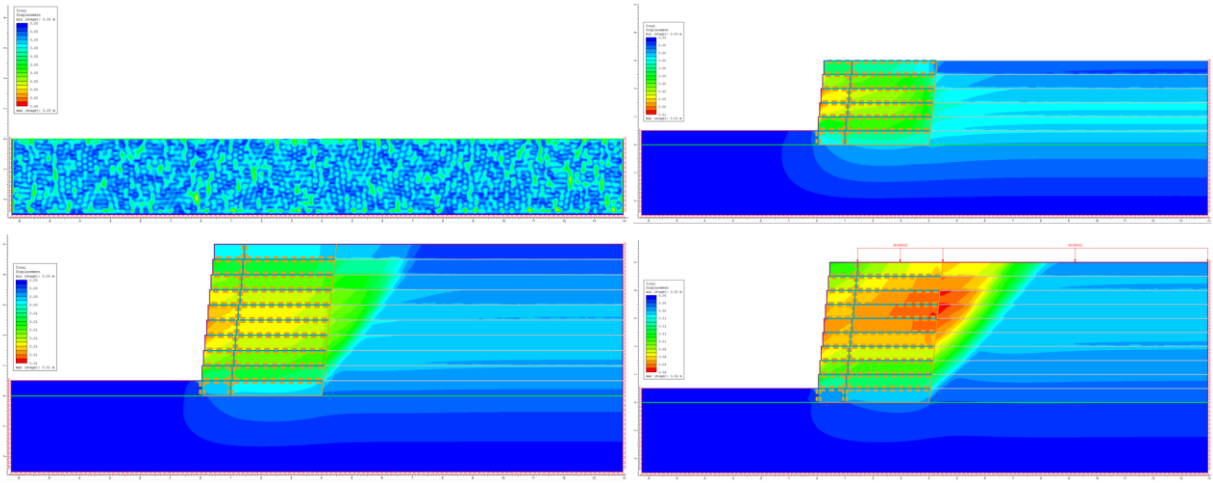


Figura 7. Deslocamentos totais

Além da avaliação dos deslocamentos e da redistribuição de tensões, foi realizada a análise de estabilidade global por meio do método de redução de resistência (Shear Strength Reduction – SSR). Nesse método, os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, como coesão e ângulo de atrito, são progressivamente reduzidos até que o modelo atinja uma condição de ruptura numérica, caracterizada pela não convergência da solução ou pelo desenvolvimento de deformações excessivas. O fator de redução aplicado nesse ponto é definido como o Strength Reduction Factor (SRF), sendo interpretado como um fator de segurança global da estrutura.

A partir dessa abordagem, obteve-se um valor de SRF igual a 1,65 (Figura 8), indicando a condição limite de estabilidade do sistema considerando o comportamento tensão-deformação e a evolução das deformações no maciço.

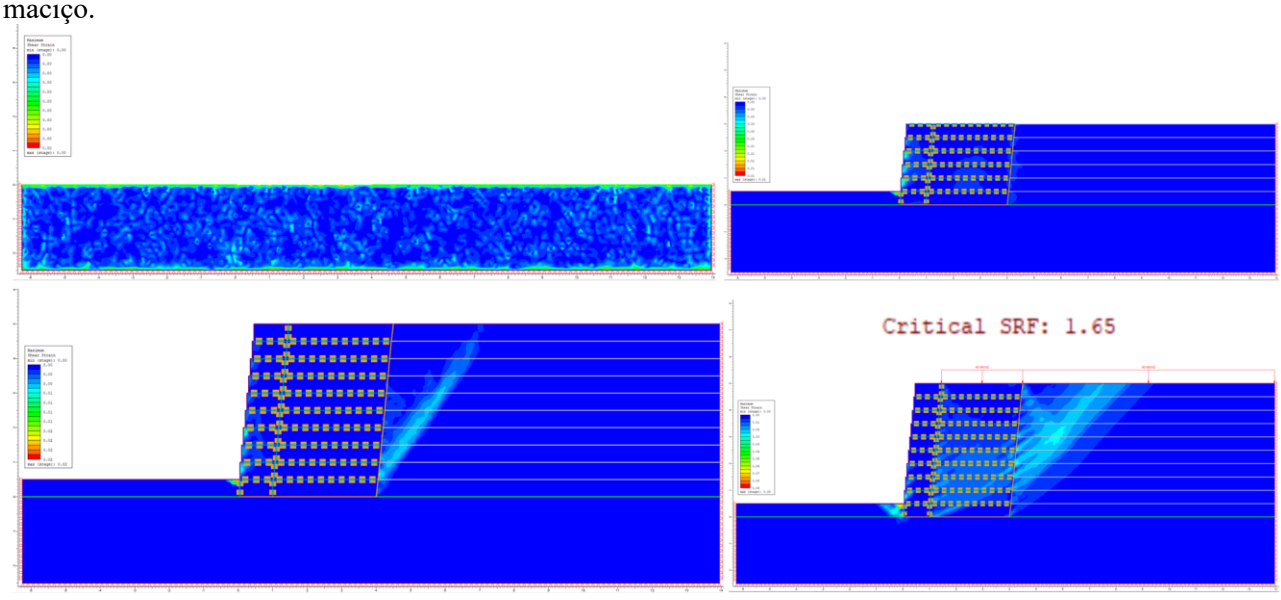


Figura 8. Deformações cisalhantes e SRF

4.3 Comparação entre métodos

Os resultados obtidos evidenciam diferenças relevantes entre os fatores de segurança calculados pelos métodos de equilíbrio limite e pela análise tensão-deformação. As análises realizadas com base nos métodos de equilíbrio limite resultaram em fatores de segurança variando entre 2,04 e 2,07, enquanto a análise numérica por elementos finitos, utilizando o método de redução de resistência (SSR), forneceu um fator de segurança equivalente (SRF) de 1,65.

Considerando esses valores, observa-se que o fator de segurança obtido pelos métodos de equilíbrio limite é aproximadamente 24% a 25% superior ao valor obtido na análise tensão-deformação.

5 CONCLUSÕES

A partir dos estudos conduzidos, é possível notar que a análise por tensão-deformação, além de fornecer um fator de segurança equivalente por meio do SRF, permite a avaliação direta dos deslocamentos e da distribuição de deformações na estrutura. Nesse contexto, embora a estrutura atenda aos critérios de estabilidade global sob o ponto de vista normativo, há deformações associadas ao seu comportamento que não são capturadas pelas análises de equilíbrio limite.

Mesmo em situações em que os fatores de segurança indicam condições adequadas de estabilidade, as deformações podem atingir níveis que impactam o funcionamento da estrutura, o desempenho do paramento ou elementos adjacentes. Assim, a análise tensão-deformação possibilita a verificação de estados limites de serviço, permitindo avaliar se os deslocamentos são compatíveis com os critérios de projeto e com as exigências de desempenho da obra.

Dessa forma, os resultados demonstram que, embora ambos os métodos indiquem estabilidade global da estrutura, a análise baseada em tensão-deformação fornece uma avaliação mais completa do comportamento do sistema, incorporando não apenas a segurança à ruptura, mas também aspectos relacionados ao desempenho em serviço.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Duncan, J.M.; Wright, S.G. (2005). Soil Strength and Slope Stability. Hoboken: John Wiley & Sons.

Jewell, R.A. (1996). Soil Reinforcement with Geotextiles. London: CIRIA.

Koerner, R.M. (2012). Designing with Geosynthetics. 6th ed. Bloomington: Xlibris Publishing.

Massad, F. (2010). Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia. São Paulo: Oficina de Textos.

Morgenstern, N.R.; Price, V.E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. Géotechnique, v. 15, n. 1, p. 79–93.

Palmeira, E.M. (1992). Soil–geosynthetic interaction: Modelling and analysis. Geotextiles and Geomembranes, v. 11, p. 481–505.

Sarma, S.K. (1973). Stability analysis of embankments and slopes. Géotechnique, v. 23, n. 3, p. 423–433.

Spencer, E. (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. Géotechnique, v. 17, n. 1, p. 11–26.

Teixeira, A. H.; Godoy, N. S. Análise, projeto e execução de fundações rasas. In: HACHICH, Waldemar; et al. (Ed.). Fundações: teoria e prática. 2. ed. (6. tir. rev.aum.). São Paulo: Editora Pini, ABMS/ABEF, 1998/2003. cap. 7, p. 227-264.