



ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO ALGORITMO IMPLEX EM PROBLEMA DE RUPTURA EMPREGANDO TÉCNICA DE DESCONTINUIDADES FORTES

Sensitivity Analysis of IMPLEX Algorithm in Rupture Problem using Strong Discontinuities Technique

Nayara Torres Belfort Acioli Magalhães (1), Ana Itamara Paz de Araujo (2), Kátia Torres Botelho Galindo (2), Igor Fernandes Gomes (3), Leonardo José do Nascimento Guimarães (3)

(1)Doutoranda, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife – PE, Brasil

(2) Doutoranda, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife – PE, Brasil

(3)Dr. Prof., Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife – PE, Brasil

Email para Correspondência: ntbelfort@gmail.com; (P) Apresentador (1)

Resumo: Com o objetivo de prever o comportamento elastoplástico dos geomateriais são idealizadas modelagens computacionais através de métodos aproximados como o método dos elementos finitos aliado a técnicas como a de descontinuidades fortes incorporadas no contínuo. Essa técnica é utilizada com o objetivo de inserir no domínio do problema uma descontinuidade que permite capturar o efeito de deslocamentos concentrados em 10% do tamanho do elemento, necessitando de malhas relativamente pouco refinadas. Diante disso, nesse trabalho foi realizada a simulação de um cenário de estabilidade de talude através do programa em elementos finitos CODE-BRIGHT para verificar a sensibilidade do algoritmo de integração de tensões IMPLEX aliando à técnica de descontinuidades fortes para descrever esforços de cisalhamento em superfícies planas numa superfície potencial de ruptura de um talude vertical de 10 metros de altura. O modelo constitutivo elastoplástico adotado foi o de Drucker-Prager, no qual se verificou a conformidade entre a solução numérica e analítica de altura crítica de Terzaghi. Foi avaliado o comportamento constitutivo do material com o parâmetro da tolerância variando com valores da ordem de 10^{-5} até 10^{-1} , no qual se verificou uma resposta semelhante para todos os valores de tolerâncias avaliados. Também foi observado que para esse problema hipotético de estabilidade de talude, o comportamento do estado de tensões se mostrou muito semelhante para os diversos valores de tolerância adotados, permitindo concluir que esse algoritmo IMPLEX é estável e eficaz na previsão do comportamento de geomateriais em problemas desse porte.

Palavras chaves: IMPLEX; Elementos finitos; Estabilidade de Talude; Descontinuidades Fortes; Drucker-Prager.

Abstract: In order to predict the elastoplastic behavior of geomaterials, constitutive models and numerical formulations in computational modeling have been applied through approximate methods as the finite element method and techniques as embedded



strong discontinuities. This technique is used input in the problem domain a discontinuity that allows to capture the effect of concentrated displacements in 10% of the element size, requiring relatively less refined meshes. In this work a simulation of a slope stability scenario was performed through the CODE-BRIGHT finite element program to verify the sensitivity of the IMPLEX stress integration algorithm combined with the technique of strong discontinuities. A Drucker-Prager constitutive model adopted to analyse plane shear surface of a potential rupture area of a vertical slope of 10 meters in height, in which it was verified the conformity between the numerical solution and the analytical solution of critical height of Terzaghi. It was evaluated the constitutive behavior of the material with the tolerance parameter varying with values ranging from 10^{-5} to 10^{-1} , in which a similar response was verified for all tolerance values evaluated. It was also observed that for the hypothetical slope stability problem the behavior of the stress state was very similar for the various tolerance values adopted, allowing to conclude that this IMPLEX algorithm is stable and effective in predicting the behavior of geomaterials in this-sized problems.

Keywords: IMPLEX; Finite Elements; Slope Stability; Strong Discontinuities; Drucker-Prager.

1 INTRODUÇÃO

O problema de estabilidade de taludes de origem natural ou antrópica está muito presente no dia a dia da engenharia geotécnica com uma literatura bem estabelecida (Park & Michalowski, 2017). A avaliação desse problema é realizada através de fatores de segurança, desta forma utiliza-se esse parâmetro para sugerir medidas de estabilização, evitando a ruptura e o consequente deslizamento (Fernandes, 2006) ocasionando possíveis tragédias.

A maior quantidade dos deslizamentos está associada a períodos de chuva, onde ocorre a infiltração de água pluvial no solo, o aumento da poro pressão e a redução da resistência do talude. Diante disso, a análise da resistência do solo se torna fundamental para a obtenção de informações que viabilizem a prevenção da ruptura. (Araújo et al., 2017)

De acordo com Fernandes (2006), a complexidade da ruptura depende dos cenários e tipos de obra e é complexa a seleção de procedimentos que permitam avaliar a resistência do solo e a estabilidade do talude. Neste sentido, o emprego de ferramentas computacionais (Gomes, 2006; Beserra, 2010; Oliveira, 2011; Magalhães, 2018) tem sido essencial para o estudo de problemas de engenharia, uma vez que permite reproduzir o problema e aplicar as condições de contorno desejadas para os diversos cenários. (Ferreira et. al., 2009).

Neste trabalho foi avaliado o comportamento elastoplástico de geomateriais diante do problema geotécnico de estabilidade de talude através do programa em elementos finitos CODE-BRIGHT e do algoritmo de integração de tensões IMPLEX associado à técnica de descontinuidades fortes incorporadas no contínuo. Nesse artigo foi avaliada a



sensibilidade desse algoritmo frente a diferentes configurações de malha e a diferentes fatores de tolerância da redução do passo de tempo.

2 MÉTODO NUMÉRICO

Nesse artigo, para a análise do comportamento geomecânico do solo, foi utilizado o critério de ruptura elastoplástico de Drucker-Prager baseado em Souza Neto et al. (2008), cuja plastificação se inicia quando o invariante das tensões desviadoras (J) e a tensão média (p) atingem uma combinação de valores críticos, tocando a superfície de fluência, Eq. 1. (Beserra, 2010).

$$f(\sigma, h) = J + \eta p - \xi c' \quad (1)$$

Sendo $\eta(c, \varphi)$ e $\xi(c, \varphi)$ função dos parâmetros do material, dos quais c é a coesão e φ é o ângulo de atrito.

Foi aplicado nesse artigo, aliado ao o modelo constitutivo elastoplástico de Drucker-Prager, a técnica de descontinuidades fortes incorporadas implementados na ferramenta numérica em elementos finitos CODE_BRIGHT, (COupled DEformation BRine Gas and Heat Transport) por Beserra (2010) e Beserra (2015).

Também foi adotado para a integração das tensões e deformações o algoritmo IMPLEX, validado por Magalhães et. al. (2018), que faz uma estimativa do multiplicador plástico de acordo com a projeção das deformações totais do tempo anterior. Como essa estimativa depende do incremento de tempo adotado entre as etapas, existe um controle do incremento de tempo, que visa impedir que o modelo viole a superfície de fluência reduzindo o incremento de tempo como um fator de redução chamado por Magalhães et. al. (2018) de fator de tolerância (F_{tol}), permitindo o retorno do estado de tensões para o critério de ruptura. Mais detalhes sobre a formulação estão descritos em Magalhães et. al. (2018).

Aliado a esse algoritmo, foi inserida a técnica de descontinuidades fortes embebida. Essa descontinuidade é inserida em deformações localizadas em bandas estreitas, denominadas fracas, e sabendo que os deslocamentos se concentram em zonas de processamento da fratura, quando ocorre a ruptura por completo do material, isso implica numa descontinuidade no campo de deslocamentos denominada de descontinuidade forte. A inserção dessa técnica permite representar uma descontinuidade no interior do elemento com 10 % da sua espessura, evitando a necessidade de malhas muito refinadas ou até mesmo de utilizar elementos de interface discretos. (Beserra, 2015)

3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Nesse artigo foi realizada a simulação numérica de um problema hipotético de estabilidade de talude. Nesse problema geotécnico o peso do próprio solo causa a instabilidade do material, que no modelo numérico foi representado através de um

artifício da inserção de um fator multiplicador da gravidade que aumenta a gravidade e consequentemente o peso do solo até a ruptura.

As análises foram feitas baseadas no critério de altura crítica de Terzaghi (Caputo, 1987), Figura 1, que afirma que taludes verticais se tornam instáveis no momento em que a condição de altura crítica não for mais atendida.

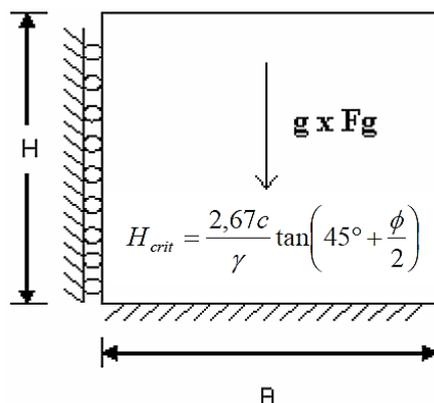


Figura 1 – Condições de contorno para Estabilidade de Talude. Fonte: (Gomes, 2006).

Dessa maneira, para verificar a solução analítica de Terzaghi para esse cenário foram adotadas as características do solo descritas na Tabela 1, dentre eles: módulo de elasticidade (E), coesão (c), ângulo de atrito (ϕ), dilatância (ϕ), coeficiente de Poisson (ν) e peso específico (γ).

Tabela 1 – Parâmetros Físicos do Solo

E (MPa)	c (MPa)	$\phi = \varphi$	ν	γ (Kg/m ³)
100	5	30°	0,30	2611,3

Foi adotado para esse cenário um talude vertical com a geometria composta por largura de 20 metros e altura de 10 metros. A geometria e as condições de contorno estão ilustradas na Figura 2.

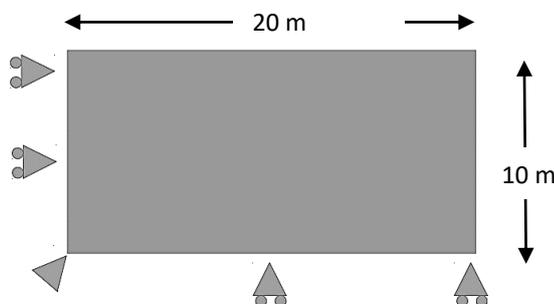


Figura 2 - Condições de contorno e Geometria do Problema

Assim, através da solução analítica de Terzaghi foi possível verificar o fator de gravidade $F_g = 90$, Figura 3, necessário para se atingir a altura crítica de 10 metros da geometria.

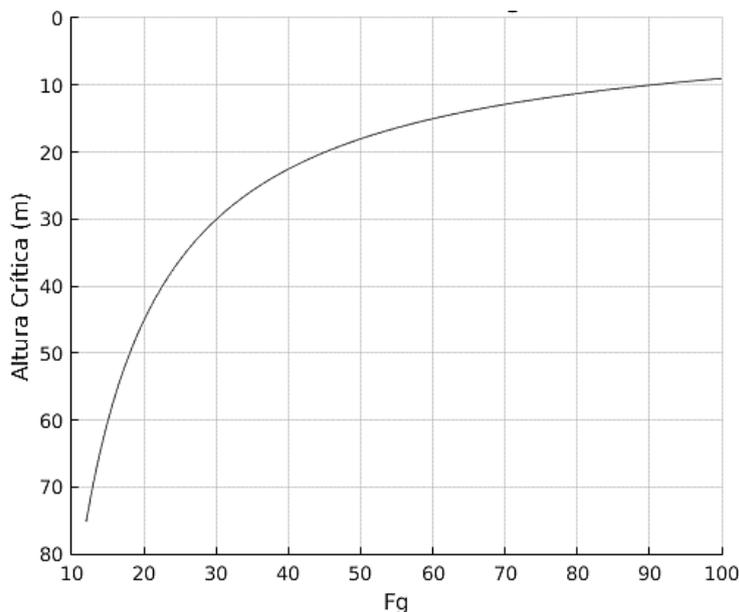


Figura 3 – Solução Analítica da Altura Crítica de Terzaghi

3.1 Avaliação da Estabilidade de Talude

A simulação desse cenário foi realizada em elementos finitos 2D. A malha de elementos finitos foi discretizada, seguindo a geometria da Figura 2, com elementos triangulares, com 1 ponto de Gauss em cada elemento, possuindo no total 1400 nós e 2655 elementos, Figura 4.

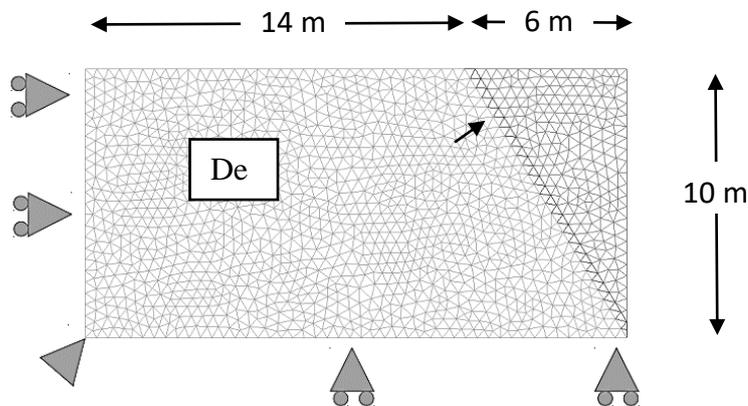


Figura 4 - Condições de contorno e Geometria do Problema

Nessa geometria, foi inserida uma descontinuidade incorporada em uma linha de elementos alinhados com inclinação de 60 graus, para isso, foram discriminadas três

regiões no corpo do talude com as mesmas propriedades físicas da Tabela 1. As condições de contorno do problema estão ilustradas na Figura 4. Nessa modelagem, seguindo a sugestão de Magalhães et. al. (2018), foi utilizado um incremento de tempo inicial de $1E-03$ s e uma tolerância de $2E-03$.

Na Figura 5 observa-se o campo dos deslocamentos horizontais do talude, que se mostrou uniformemente variado e crescente a medida que se aproxima da margem direita do talude, que se encontra na ruptura. Semelhante à distribuição dos deslocamentos, a distribuição de tensões horizontais se torna mais expressiva ao se aproximar da margem direita do talude, Figura 6.

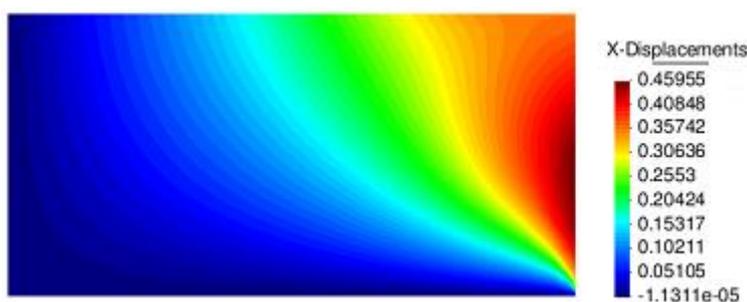


Figura 5 – Campo dos Deslocamentos Horizontais (MPa)

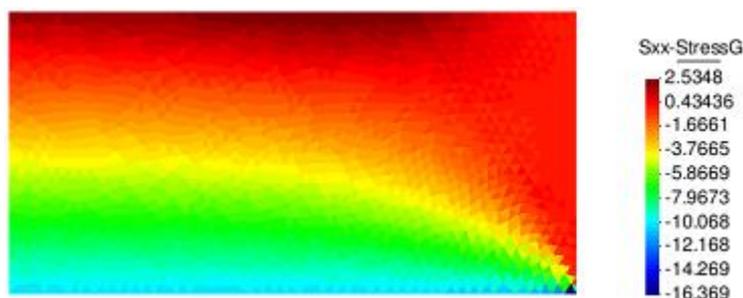


Figura 6 – Campo das Tensões Horizontais (MPa)

Na Figura 7 observa-se um aumento da tensão desviadora nas mediações da fratura e principalmente no pé do talude, onde a ruptura tem início e por isso as tensões se tornam mais expressivas. De maneira semelhante a abertura de fratura, Figura 8, mostra uma concentração na região da descontinuidade, que indica o processo de ruptura do material.

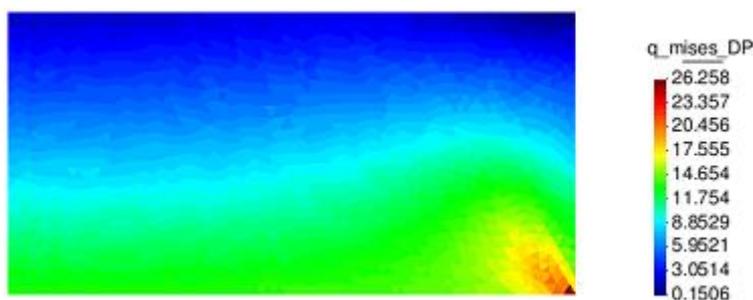


Figura 7 – Campo das Tensões Desviadoras (MPa)

Em seguida, foi avaliada, no item seguinte, a sensibilidade do algoritmo IMPLEX com diferentes valores de tolerâncias para esse cenário hipotético.

A subsidência na superfície do terreno é outro fator de grande importância a ser avaliado. Nesse caso, a subsidência do terreno aumenta conforme se aproxima da descontinuidade, possuindo um recalque máximo de 0,16 m a uma distância de 18,5 m da extremidade esquerda do talude, Figura 9. Vale salientar que essa subsidência se torna um fator não realístico após a ruptura do talude, nessa figura, porém, pode ser vista a subsidência máxima antes da ruptura do talude.

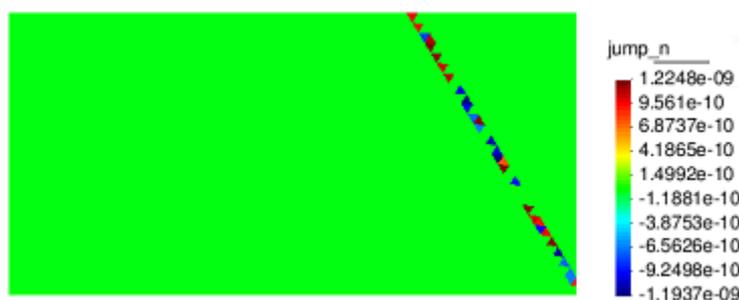


Figura 8 – Abertura de Fratura em Metros

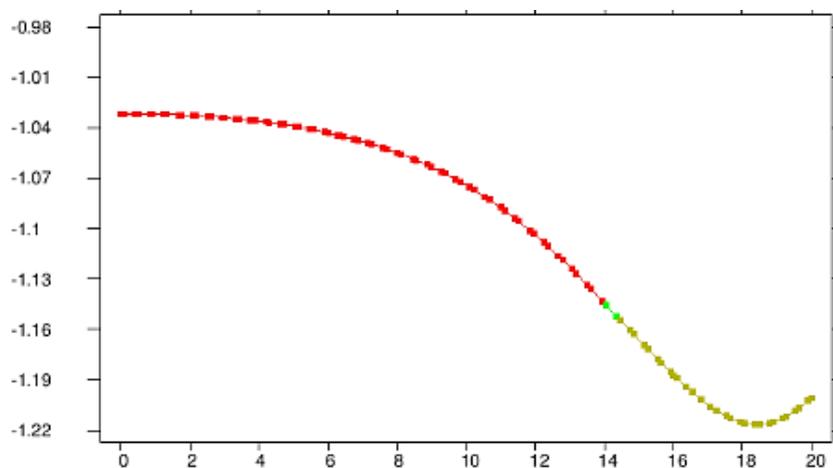


Figura 9 – Subsidência na Superfície do Talude

3.2 Sensibilidade Do Algoritmo IMPLEX

Nesse item foram realizadas várias modelagens mantendo os parâmetros e condições de contorno e variando apenas a tolerância adotada para o algoritmo entre os valores de 2E-01, 2E-02, 1E-02, 2E-03, 2E-04 e 2E-05. Para essa análise foram gerados gráficos comparativos para avaliar o critério analítico de altura crítica de Terzaghi e o fator de gravidade relacionado a essa altura crítica.

Primeiramente a avaliação do comportamento do algoritmo na evolução das tensões que se superpõe no gráfico da trajetória de tensões e permanecem na envoltória de Drucker-Prager, Figura 10.

Avaliando o comportamento do talude quanto a altura crítica vista anteriormente que foi 10 metros, na Figura 11 se observa que a evolução da tensão desviadora e do deslocamento horizontal evoluem até a ruptura, quando atingem a altura crítica, descrita no gráfico de 10 m.

Já com relação ao fator de gravidade, pode ser observado na Figura 12 (a) que a evolução da tensão desviadora evolui até o valo de 14 Mpa, quando atinge a altura crítica, Figura 11 (a), e o fator de gravidade relacionado a essa altura crítica, visto anteriormente com valor de 90.

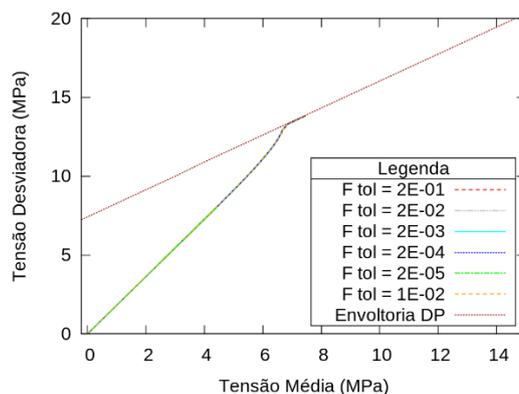


Figura 10 – Envoltória de Drucker-Prager

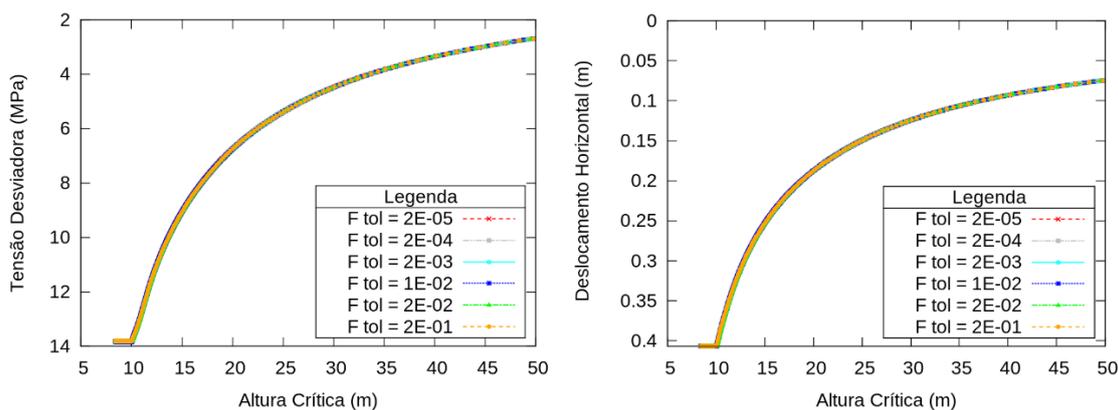


Figura 11 – Evolução da Tensão Desviadora (a) e dos Deslocamentos Horizontais (b) com a Altura Crítica

De maneira semelhante, na Figura 12 (b), a evolução da porosidade ocorre até a ruptura com o fator de gravidade de 90, onde interrompe, indicando a ruptura e corroborando com o resultado da tensão desviadora.

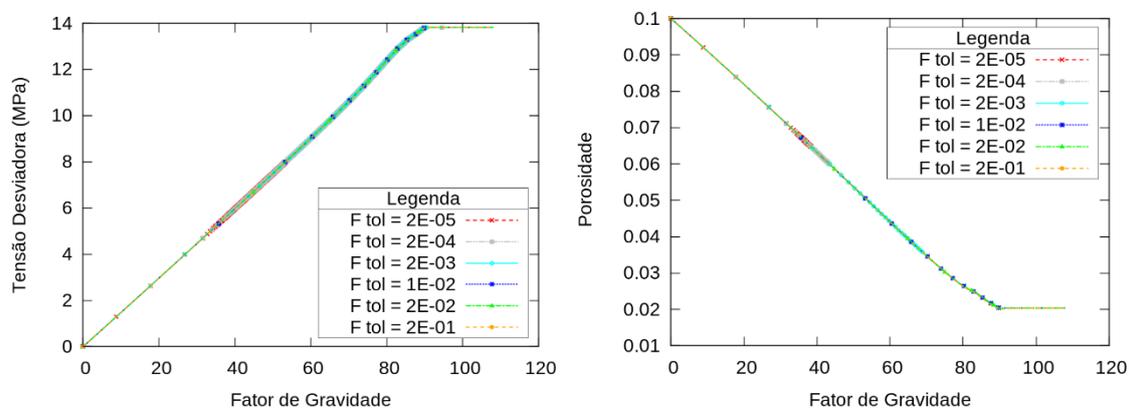


Figura 12 – (a) Porosidade e (b) Tensão Desviadora versus Fator de Gravidade (Fg)

4 CONCLUSÕES

O objetivo principal desse artigo foi verificar a sensibilidade do algoritmo IMPLEX com o modelo constitutivo elastoplástico de Drucker-Prager acoplado à técnica de descontinuidades fortes incorporadas no contínuo em um cenário fictício que é o problema de estabilidade de talude, um problema muito comum na engenharia geotécnica. Também, verificar a resposta do algoritmo frente a previsão de ruptura de taludes com superfície de ruptura plana por cisalhamento, que se mostrou eficiente quando comparado com a solução analítica de altura crítica de Terzaghi.

Foi, então, comparada a resposta do algoritmo IMPLEX e a solução analítica de Terzaghi de altura crítica, no qual foi observada a compatibilidade do resultado com a solução de 10 m de altura crítica para um fator de aumento da gravidade de 90, indicando um aumento na gravidade de 90 vezes a gravidade da Terra.

Com esse trabalho pôde-se comparar com o artigo de Magalhães et. al. (2018), que possui um estado de tensão inicial menor em comparação com a modelagem do presente artigo, e verificar que o algoritmo é estável com qualquer dos valores de tolerância avaliados nesse trabalho, sendo adotado o incremento de tempo de 1E-03 s sugerido pela autora como mais estável e eficiente e confirmado nesse trabalho.

Esse trabalho permitiu a conclusão de que o algoritmo IMPLEX é estável e coerente na avaliação do campo das tensões e dos deslocamentos, capaz de prever o comportamento de cenários de ruptura por cisalhamento de superfícies planas em problemas de como estabilidade de talude vertical.

Agradecimentos

Agradeço ao Laboratório de Métodos Computacionais e Geomecânica (LMCG), à Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), a Energi Simulation e à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo apoio e pelos recursos fornecidos durante a pesquisa.



REFERÊNCIAS

Araújo, C. B. C.; Mendes, A. J. F.; Gomes, J. K. P.; Monteiro, L. M.; Campos, M. T.; Magalhães, M. M.; Vale, V. M.; Dantas Neto, S. A. & Rodrigues, D. T. (2017) Análise Comparativa da Estabilidade de Taludes nas Condições Saturada e Não Saturada. XII Conferencia Brasileira sobre Estabilidade de Encostas. Florianópolis, Santa Catarina, Brasil ABMS.

Beserra, L. de S. (2010) Implementação de Algoritmos de Integração Implícita para Modelos Constitutivos Elasto-Plásticos na Simulação Geomecânica. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco.

Beserra, L. de S. (2015) Análise Hidromecânica do Fraturamento Hidráulico via Elementos Finitos com Descontinuidades Fortes Incorporadas. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, 158 p.

Fernandes, M. M. (2006) Mecânica dos solos, Vol. 2. FEUP Edições, Porto.

Ferreira, Y. A. Lira, W. W. M. Ramos, V. C. L. Vieira, L. C. L. M. (2009) Uma Proposta para a Análise de Estabilidade de Taludes Utilizando o Método dos Elementos Discretos. COBRAE, ABMS.

Gomes, I. F. (2006) Implementação de métodos explícitos de integração com controle de erro para modelos elasto-plásticos e visco-elasto-plásticos. Dissertação de mestrado: Mestrado em Engenharia Civil, UFPE, Recife.

Magalhães, N. T. B. A.; Guimarães, L. J. do N.; Gomes, I. F.; Beserra, L. & Teixeira, J. C. (2018). Validação e Análise de Sensibilidade de Algoritmo De Integração IMPLEX via Técnica de Elementos Finitos com o Modelo Elastoplástico de Drucker-Prager. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - Cobramseg 2018, Salvador, Bahia, Brasil.

Manzoli, O. L. (2008) Contribuições à simulação numérica de descontinuidades fortes. Tese de Livre Docência – Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho, Bauru.

Oliveira, N. P., Almeida, Sylvia R.M. (2011) Análise da estabilidade de taludes usando técnicas de busca automática. 63ª Reunião Anual da SBPC - ISSN 2176-1221.

Olivella, S., Gens A., Carrera J. and E.E. Alonso (1995) Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media. Engineering Computations, v.13, p. 87-112.



Park, D. Michalowski, R. L. (2017) Three-dimensional stability analysis of slopes in hard soil/soft rock with tensile strength cut-off. Engineering Geology Volume 229, n 7, Pages 73-84.

Sousa, R. M. (2004) Modelagem Acoplada Hidro-Mecânica da Perfuração de Poços em Rochas Frágeis. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UFPE, Recife.

Souza Neto, E. D.; Peric, D.; Owens, D. (2008) Computational Methods for Plasticity: Theory and Applications. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.