

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

MECÂNICA DA FRATURA LINEAR ELÁSTICA APLICADA NA
ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES DE ROCHA
EMPREGANDO O CVBM

CARLOS ANDRÉS BOADA BECERRA
ORIENTADOR: LEANDRO LIMA RASMUSSEN, PhD.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-419/2025
BRASÍLIA/DF: MARÇO/2025

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

MECÂNICA DA FRATURA LINEAR ELÁSTICA APLICADA
NA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES DE ROCHA
EMPREGANDO O CVBM

CARLOS ANDRÉS BOADA BECERRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:

LEANDRO LIMA RASMUSSEN, PhD (ENC, UnB)
(ORIENTADOR)

MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO, PhD (ENC, UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

HERNAN MARTINEZ CARVAJAL, PhD (EEC, UFG)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 31 de março de 2025.

FICHA CATALOGRÁFICA

BECERRA, CARLOS BOADA

Mecânica da fratura linear elástica aplicada na análise de estabilidade de taludes de rocha empregando o CVBM [Distrito Federal] 2025

xviii, 96p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2025) Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Mecânica da fratura linear elástica
3. Modelo Continuo de Blocos Voronoi

2. Estabilidade de taludes
4. Modelagem Numérica

I. ENC/FT/UNB

II. Mestre

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

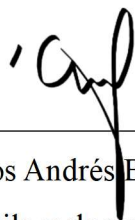
BECERRA, C.B. (2025). Mecânica da fratura linear elástica aplicada na análise de estabilidade de taludes de rocha empregando o CVBM. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-419/2025, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 96p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Carlos Andrés Boada Becerra.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Mecânica da fratura linear elástica aplicada na análise de estabilidade de taludes de rocha empregando o CVBM. GRAU: Mestre / ANO: 2025.

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



Carlos Andrés Boada Becerra

E-mail: carlosandresboada@gmail.com

DEDICATÓRIA

A mi padre Carlos, mi madre Clara y mi hermana Natalia,
mi mayor inspiración.

AGRADECIMENTOS

Deus permitiu que eu nascesse em um lar cheio de bênçãos. Meus pais, Carlos e Clara, me deram todo o amor que eu poderia humanamente receber, além de me derem a melhor companhia, minha irmã, Natalia. Nessas condições, Deus permitiu que eu crescesse com saúde e foco em aspectos que moldaram a pessoa que sou hoje. Por isso, sou grato a Ele pelo meu passado e pelo meu presente.

Deus também guiou minha trajetória até uma escola de qualidade, onde desenvolvi meu interesse pela natureza e pela matemática, contando com professores que se dedicaram ao máximo, ensinando com o coração. Entre eles, gostaria de lembrar o professor Fausto Castro, que me revelou a beleza da física e me motivou a seguir até a graduação em Engenharia.

Na Universidad Nacional de Colombia, obtive o título de Engenheiro Civil, após ter sido aluno dos professores David Zapata, Francisco Nanclores e Hernán Martínez, de quem recebi não apenas uma formação técnica, mas também uma perspectiva profissional e pessoal completa. Com eles, aprendi a missão de acordar cedo, trabalhar com honra e desenvolver uma visão da engenharia geotécnica que despertou meu interesse em crescer na área.

Com a recomendação de Fabio Ramírez, meu mentor nas quatro virtudes cardinais; prudência, justiça, fortaleza e temperança, ingressei posteriormente no programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Durante essa etapa, tive aulas com professores ilustres, entre eles meu orientador, o professor Leandro Lima Rasmussen, que, além de contribuir para minha formação como mestre, confiou em mim e esteve sempre disposto a me guiar ao longo desta pesquisa. A todos os meus professores, expresso minha profunda gratidão.

Agradeço aos meus colegas de mestrado Katherine, Maria, Ágatha, Juliana, Felipe, Rafael Lima, Rafael Méndez, Gustavo e Milena, com quem compartilhei longos e exaustivos dias de estudo e que tornaram os momentos mais difíceis, suportáveis. Agradeço à minha namorada, Anaira Taynar, que foi meu alicerce nos momentos de fraqueza ao longo deste caminho de pesquisa e escrita, e que sempre trouxe mais felicidade à minha vida.

Aos integrantes do grupo “Os sem-família”, que foram uma companhia fantástica e inesquecível, e aos migrantes colombianos, peruanos, argentinos, uruguaios, haitianos, congolese, sul-africanos, beninenses, espanhóis, franceses, e japoneses, que se tornaram um apoio essencial neste processo de migração, assim como a todos aqueles com quem compartilhei refeições no Restaurante Universitário e que se tornaram grandes amigos, expresso

meu sincero reconhecimento. Eles passaram a ocupar um lugar importante na minha vida nesses últimos dois anos. Eles sabem quem são, que Deus abençoe suas vidas.

Agradeço também aos membros da banca examinadora, cujas observações e sugestões enriqueceram significativamente este trabalho.

Por fim, expresso minha gratidão ao povo brasileiro, que me acolheu calorosamente, e fizeram possível, por meio da UnB e a instituição de fomento CNPq, o desenvolvimento desta pesquisa. Ressalto, ainda, o caráter público e inclusivo da educação brasileira, que, por meio dessas oportunidades, contribui para a construção do Projeto Nação.



MECÂNICA DA FRATURA LINEAR ELASTICA APLICADA NA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES DE ROCHA EMPREGANDO O CVBM

RESUMO

O fenômeno da propagação de fraturas é fundamental em taludes rochosos, onde descontinuidades formam sistemas de ruptura que se mantêm estáveis devido a pontes de rocha intacta. A estabilidade é afetada quando as fraturas se propagam, criando superfícies contínuas que facilitam o deslizamento ou a queda de material. A Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) aborda a propagação de fraturas em meios elásticos, exceto na ponta da fratura, onde a fratura se propaga e o fenômeno de concentração de tensões é significativo. Para investigar esse fenômeno, são empregadas alternativas computacionais como os “Extended Finite Element Method” (XFEM) e “Discrete Element Method” (DEM), que, embora eficazes, enfrentam limitações devido ao alto custo computacional.

Dessa forma, este estudo examina a viabilidade de integrar conceitos da MFLE na avaliação da estabilidade de taludes de rocha fraturada utilizando o “Continuum Voronoi Block Model” (CVBM), uma abordagem pseudodescontínua, baseada em partículas, que utiliza a tesselação de Voronoi e as juntas de Goodman. Disponível no software RS2 (versão 11.0.2.0), esse modelo, por ser estruturado em elementos finitos, reduz significativamente o tempo de processamento em comparação com as alternativas mencionadas.

Para a calibração do modelo com a metodologia proposta, além das propriedades de deformabilidade e resistência à tração, a tenacidade à propagação da fratura no modo I é calibrada por meio do ensaio “Center Cracked Tension”. O desempenho em outras condições de contorno é avaliado com testes nos ensaios “Semi-Circular Bending” e “Cracked Straight Through Brazilian Disc”, permitindo concluir que a propriedade de tenacidade à fratura no modo I foi calibrada com sucesso.

O material calibrado é aplicado a duas tipologias de taludes com geometrias simplificadas, como um bloco deslizando sobre um plano de descontinuidade e um talude com uma fratura centrada, permitindo comparação com abordagens teóricas baseadas na MFLE. A estabilidade também é avaliada em geometrias complexas, que configuram os mecanismos de ruptura planar, tombamento e espalhamento lateral. Os resultados são comparados com outras metodologias, como o Equilíbrio Limite e o modelo Mohr Coulomb Elastoplástico, demonstrando que o modelo proposto representa adequadamente os mecanismos avaliados, apresentando diferenças significativas em relação às metodologias contrastadas.

LINEAR ELASTIC FRACTURE MECHANICS APPLIED IN THE STABILITY ANALYSIS OF ROCK SLOPES USING THE CVBM

ABSTRACT

The phenomenon of fracture propagation is crucial in rock slopes, where discontinuities create rupture systems that maintain stability due to intact rock bridges. Stability is compromised when fractures propagate, leading to the formation of continuous surfaces that promote sliding or material fall. Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM) addresses fracture propagation in elastic media, except for the fracture tip, where propagation occurs, and stress concentration becomes significant. To explore this phenomenon, computational methods such as Extended Finite Element Methods (XFEM) and Discrete Elements (DEM) are utilized. However, these methods, while effective, encounter limitations due to high computational costs.

This study investigates the feasibility of integrating LEFM concepts into the assessment of fractured rock slope stability, employing the Continuous Voronoi Block Model (CVBM). Implemented in RS2 software (version 11.0.2.0), this model adopts a pseudo-discontinuous approach based on particles, utilizing Voronoi tessellation and Goodman joints. This results in polygonal blocks structured as finite elements, significantly reducing processing time compared to the previously mentioned alternatives.

For model calibration using the proposed methodology, in addition to deformability and tensile strength properties, the toughness in mode I is calibrated through the “Center Cracked Tension” test. Performance under various boundary conditions is evaluated through the “Semi-Circular Bending” and “Cracked Straight Through Brazilian Disc” tests, concluding that the fracture toughness property in mode I was successfully calibrated.

The calibrated material is applied to two types of slopes with simplified geometries, including a block sliding over a discontinuity plane and a slope with a centered fracture, facilitating comparison with theoretical approaches based on LEFM. Stability is also assessed in complex geometries that configure planar rupture mechanisms, overturning, and lateral spreading. The stability results are compared with other methodologies, such as Limit Equilibrium and the Mohr Coulomb Elasto-Plastic model, demonstrating that the proposed model adequately represents the evaluated mechanisms, revealing significant differences compared to the contrasted methodologies.

MECÁNICA DE LA FRACTURA LINEAL ELÁSTICA APLICADA EN EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES DE ROCA EMPLEANDO EL CVBM

RESUMEN

El fenómeno de propagación de fracturas es fundamental en taludes rocosos, donde las discontinuidades conforman sistemas de ruptura que se mantienen estables debido a puentes de roca intacta. La estabilidad se ve afectada cuando estas fracturas se propagan, creando superficies continuas que facilitan el deslizamiento o la caída de material. La Mecánica de la Fractura Lineal Elástica (MFLE) aborda la propagación de fracturas en medios elásticos, excepto en la punta de la fractura, donde esta se propaga y el fenómeno de concentración de tensiones es significativo. Para investigar este fenómeno, se emplean alternativas computacionales como los “Extended Finite Elements Method” (XFEM) y “Discrete Elements Method” (DEM), que, aunque eficaces, enfrentan limitaciones debido al alto costo computacional.

Este estudio examina la viabilidad de integrar conceptos de la MFLE en la evaluación de la estabilidad de taludes de roca fracturada utilizando el “Continuum Voronoi Block Model” (CVBM), un enfoque pseudodiscontinuo, basado en partículas que utiliza la teselación de Voronoi y las juntas de Goodman, y está disponible en el software RS2 (versión 11.0.2.0), el cual, al estar estructurado en elementos finitos, reduce significativamente el tiempo de procesamiento en comparación con las alternativas mencionadas.

Para la calibración del modelo con la metodología propuesta, además de las propiedades de deformabilidad y resistencia a la tracción, la tenacidad en el modo I se calibra mediante el ensayo “Center Cracked Tension”. La calibración es verificada en los ensayos “Semi-Circular Bending” y “Cracked Straight Through Brazilian Disc”, concluyendo que la propiedad de tenacidad a la fractura en el modo I fue calibrada con éxito.

El material calibrado es aplicado en dos tipologías de taludes con geometrías simplificadas, tales como un bloque deslizándose sobre un plano de discontinuidad y un talud con una fractura centrada, permitiendo la comparación con enfoques teóricos basados en la MFLE. También es evaluada la estabilidad en geometrías complejas, que configuran los mecanismos de ruptura planar, vuelco y esparcimiento lateral. Los resultados se comparan con otras metodologías, como el Equilibrio Límite y el modelo Mohr Coulomb Elastoplástico, demostrando que el modelo propuesto representa adecuadamente los mecanismos evaluados, presentando diferencias significativas en relación con las metodologías contrastadas.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - APRESENTAÇÃO	1
1.2 - MOTIVAÇÃO	2
1.3 - OBJETIVOS	3
1.4 - ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	4
2 - MECÂNICA DA FRATURA LINEAR ELÁSTICA	7
2.1 - FENÔMENO DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES	7
2.2 - SIF COMO UM CRITÉRIO DE PROPAGAÇÃO	9
2.3 - ENSAIOS DE PROPAGAÇÃO NO MODO I	10
2.3.1 - ENSAIO “CENTER CRACKED TENSION”	10
2.3.2 - ENSAIO “CRACKED STRAIGHT THROUGH BRAZILIAN DISC”	11
2.3.3 - ENSAIO “SEMI CIRCULAR BENDING”	12
2.4 - CRITÉRIOS DE PROPAGAÇÃO NO MODO MISTO	13
2.5 - ENSAIOS DE PROPAGAÇÃO NO MODO MISTO	15
2.5.1 - ENSAIO “CRACKED STRAIGHT THROUGH BRAZILIAN DISC” COM ENTALHA INCLINADA	15
2.5.2 - ENSAIO “SEMI CIRCULAR BENDING” COM ENTALHA INCLINADA	16
2.5.3 - CONDIÇÃO DE CONTORNO DA PLACA COM ENTALHA INCLINADA	17
3 - TALUDES DE ROCHA FRATURADA	20
3.1 - MECANISMOS DE RUPTURA EM TALUDES DE ROCHA	20
3.2 - MECANISMOS DE RUPTURA COM PREDOMINÂNCIA DO MODO I DE PROPAGAÇÃO DE FRATURA	21
3.2.1 - MECANISMO DE RUPTURA ESCALONADO	22
3.2.2 - MECANISMO DE RUPTURA POR TOMBAMENTO	23
3.2.3 - ESPALHAMENTO DE TALUDES ROCHOSOS	24
3.3 - MECÂNICA DA FRATURA E ESTABILIDADE DE TALUDES DE ROCHA	25
3.4 - TESSELAÇÃO DE VORONOI APLICADA NA ESTABILIDADE DE TALUDES	26
4 - MODELO “CONTINUUM VORONOI BLOCK MODEL”	29
4.1 - CVBM E O FENOMENO DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES	31
4.2 - VARIÁVEIS ENVOLVIDAS	33
4.2.1 - RIGIDEZ NORMAL E CISALHANTE	34
4.2.2 - CRITÉRIO DE RESISTÊNCIA	35
4.2.3 - TAMANHO DOS BLOCOS VORONOI	35

4.2.4 - ALGORITMO DE CALIBRAÇÃO PROPOSTO	36
5 - CALIBRAÇÃO DO MATERIAL	38
5.1 - APRESENTAÇÃO DO MATERIAL DE ESTUDO	38
5.2 - CALIBRAÇÃO DE DEFORMABILIDADE E RESISTÊNCIA A TRAÇÃO	38
5.3 - CALIBRAÇÃO DA TENACIDADE A FRATURA NO MODO I	39
5.4 - ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS	41
5.5 - RESULTADOS DOS ENSAIOS COMPLEMENTARES NO MODO I	43
5.5.1 - RESULTADOS DO ENSAIO CSTBD NO MODO I	43
5.5.2 - RESULTADOS DO ENSAIO SCB NO MODO I	44
5.6 - CONCLUSÕES PARCIAIS	45
6 - COMPORTAMENTO DO MATERIAL NO MODO MISTO	46
6.1 - RESULTADOS DO ENSAIO CSTBD COM FRATURA INCLINADA	46
6.2 - RESULTADOS DO ENSAIO SCB COM ENTALHA INCLINADA	49
6.3 - RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE CONTORNO DA PLACA COM ENTALHA INCLINADA	50
6.4 - ENVOLTÓRIAS DE PROPAGAÇÃO DE FRATURA	53
6.5 - MODO MISTO COM VALORES DE K_I NEGATIVOS	54
6.6 - CONCLUSÕES PARCIAIS	56
7 - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES DE GEOMETRIAS SIMPLES	57
7.1 - BLOCO DESLIZANDO SOBRE UM PLANO INCLINADO	57
7.1.1 - COMPOSIÇÃO DO MODELO DE TALUDE	58
7.1.2 - RESULTADOS DA MODELAGEM	59
7.1.3 - SOLUÇÃO TEÓRICA DE REFERÊNCIA	62
7.1.4 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM OUTRAS METODOLOGIAS	65
7.1.5 - CONCLUSÕES PARCIAIS	65
7.2 - BLOCO COM UMA FRATURA CENTRADA	66
7.2.1 - COMPOSIÇÃO DO MODELO DE TALUDE COM FRATURA CENTRADA	66
7.2.2 - RESULTADOS DA MODELAGEM	67
7.2.3 - SOLUÇÃO TEÓRICA DE REFERÊNCIA	70
7.2.4 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM OUTRAS METODOLOGIAS	73
7.2.5 - CONCLUSÕES PARCIAIS	73
8 - APLICAÇÃO DO MODELO EM MECANISMOS DE RUPTURA DE MAIOR COMPLEXIDADE GEOMÉTRICA	75
8.1 - COMPOSIÇÃO DOS MODELOS	75
8.1.1 - COMPOSIÇÃO DO MODELO DE ANÁLISE DE RUPTURA ESCALONADA	75

8.1.2 - COMPOSIÇÃO DO MODELO DE ANÁLISE DA RUPTURA POR TOMBAMENTO	76
8.1.3 - COMPOSIÇÃO DO MODELO DE ANÁLISE DE RUPTURA POR ESPALHAMENTO	78
8.2 - RESULTADOS DOS DIFERENTES MECANISMOS DE RUPTURA	79
8.2.1 - RESULTADOS DE ESTABILIDADE DO MODELO DE RUPTURA ESCALONADA	79
8.2.2 - RESULTADOS DE ESTABILIDADE DO MODELO DE RUPTURA POR TOMBAMENTO	81
8.2.3 - RESULTADOS DE ESTABILIDADE DO MODELO DE RUPTURA POR ESPALHAMENTO	82
8.3 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM OUTRAS METODOLOGIAS	84
8.4 - CONCLUSÕES PARCIAIS	85
9 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	86
9.1 - RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	88
REFERÊNCIAS	89
APÊNDICES	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Parâmetros do material GldB empregados na calibração e nos modelos de comparação (Martin 1994).	38
Tabela 5.2 - Propriedades do material Granito Lac du Bonnet (Martin, 1994) e propriedades do material calibrado empregando CVBM.	40
Tabela 5.3 - Parâmetros que calibram o material de estudo GLdB com o modelo CVBM	40
Tabela 5.4 - Sensibilidade da tenacidade a fratura no modo I respeito ao tamanho dos elementos da malha do FEA.....	41
Tabela 6.1 - Resultados das superfícies obtidas no ensaio CSTBD com fratura inclinada.	47
Tabela 6.2 - Resultados das superfícies obtidas no ensaio SCB com entalha inclinada.	49
Tabela 6.3 - Resultados do SIF no modo I e II com as condições de contorno da placa com entalha inclinada a 70°.	51
Tabela 6.4 Resultados da condição da placa entalhada aplicando deslocamentos, com a entalha inclinada 70°.....	52
Tabela 7.1 - Resultados da análise de estabilidade do talude com inclinação de 45° e superfícies de propagação da fratura obtidas com diferentes persistências.....	59
Tabela 7.2 - Resultados da análise de estabilidade do talude inclinado 70° e superfícies de propagação da fratura obtidas com diferentes persistências.	61
Tabela 7.3 - Resultados da análise de estabilidade do talude com fratura centrada, com inclinação de 45°	68
Tabela 7.4 - Resultados da análise de estabilidade do talude com fratura centrada, com inclinação de 70°	69
Tabela 7.5 - Análise de estabilidade do talude com a fratura centrada empregando a envoltória de propagação de fratura.	72
Tabela 8.1 - Definição dos parâmetros das redes de fraturas discretas empregada no modelo de ruptura escalonada.....	75
Tabela 8.2 - Definição da rede de fraturas discretas empregada como base – Modelo de tombamento.....	76
Tabela 8.3 - Resultados da análise de estabilidade do talude com suscetibilidade a ruptura escalonada.	79
Tabela 8.4 - Resultados da análise de estabilidade do talude no mecanismo de tombamento.	81
Tabela 8.5 - Resultados da análise de estabilidade do talude no mecanismo de ruptura por espalhamento.....	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Desenho esquemático mostrando os três modos fundamentais da propagação da fratura. (a) Modo I, de tensão ou abertura; (b) Modo II, cisalhamento plano ou modo de deslizamento; (c) Modo III, modo de rasgamento.	7
Figura 2.2 - Redistribuição de tensões em materiais fraturados e concentração de tensões na ponta da fratura (modificado - ACI Committee 446, 1992).	8
Figura 2.3 - Esquema do ensaio CCT	11
Figura 2.4 - Esquema do ensaio CSTBD	12
Figura 2.5 - Esquema do ensaio SCB.....	13
Figura 2.6 - Esquema do ensaio CSTBD com fratura inclinada	16
Figura 2.7 - Esquema do ensaio SCB com fratura inclinada	17
Figura 2.8 - Esquema da condição de contorno de fratura inclinada no modo misto.	18
Figura 3.1 - Representação na rede estereográfica de diferentes famílias de descontinuidades que conformam mecanismos cinemáticos em taludes (modificado - C Wyllie & W Mah, 2005)	20
Figura 3.2 - Mecanismo de ruptura planar com susceptibilidade a conformação de mecanismos de ruptura escalonadas (Hearn, 2011).	22
Figura 3.3 - Trajetórias críticas em diferentes configurações de juntas (modificado - Einstein et al., 1983) (a) trajetória de ruptura planar e (b) trajetória de ruptura escalonada.	22
Figura 3.4 - Tipos de tombamento, (a) por flexão, (b) em blocos, e (c) em bloco-flexão. (modificado - Amini et al. 2012).....	23
Figura 3.5 - Mecanismos de espalhamento lateral. (a) Modelo digital do Rdm il-Qammiepromontory (Galone et al. 2024). (b) Seção do mecanismo de espalhamento lateral (modificado - Cruden & Varnes, 1993).	24
Figura 3.6 - Geometrias de taludes estudadas por Tharp & Coffin (1985). Taludes com (a) descontinuidade na borda do talude, (b) descontinuidade centrada, (c) bloco deslizando num plano inclinado.	25
Figura 4.1 - Semelhança entre a estrutura do GLdB e a tesselação de Voronoi. (a) Petrografia polarizada e fluorescente do GLdB 4,15x4,15 mm (modificado de Åkesson, 2009) e (b) geometria da tesselação Voronoi de regularidade média e definição da junta aberta ou fechada do CVBM no software RS2.	29
Figura 4.2 - Esquema do princípio de geração dos polígonos da tesselação Voronoi a partir dos núcleos (Bolander & Saito 1998).....	30

Figura 4.3 - Esquema do modelo e a formulação empregada por Potyondy & Cundall (2004).	31
Figura 4.4 - Variação da tenacidade a fratura no modo I normalizada pela resistência a tração do material intacto V.S. a raiz do diâmetro mínimo das células (modificado de Rasmussen & Min 2024).....	33
Figura 4.5 - Algoritmo de calibração da tenacidade a fratura empregando o modelo CVBM.	37
Figura 5.1 - Valores de K_n e K_s que calibram os parâmetros de deformabilidade para cada tamanho de lado de bloco Voronoi avaliado como parte do processo de calibração	39
Figura 5.2 - Relação entre o tamanho do bloco Voronoi e a tenacidade a fratura obtida com o modelo no ensaio CCT.	39
Figura 5.3 - Superfície obtida no ensaio CCT com o modelo do material calibrado do GLdB40	
Figura 5.4 - Malha de elementos finitos gerada com elementos de (a) 0.03m e (b) 0.015m. ..	43
Figura 5.5 - Superfície obtida no ensaio CSTBD com o modelo do material calibrado.....	44
Figura 5.6 - Superfície obtida no ensaio SCB com o modelo do material calibrado.	44
Figura 6.1 - Comparação dos resultados obtidos nos ensaios SCB, CSTBD, e os testes na placa com entalha inclinada, com as envoltórias de propagação de fratura no modo misto, MERR, e os critérios elipsoidais.	54
Figura 6.2 - Envoltória com o critério de propagação ajustado aos resultados da placa com entalha inclinada, incluído valores negativos de K_I	55
Figura 7.1 - Geometria dos taludes com bloco deslizando num plano inclinado. (a) Talude inclinado 45° (b) Talude inclinado 70°.	57
Figura 7.2 - Esquema de descrição de condições de contorno, geometria e modelos adotados.	58
Figura 7.3 - Condições de contorno do ensaio (a) DENT e (b) sua equivalência com um modelo de simetria bilateral.	63
Figura 7.4 - Condições de contorno do ensaio SENT	64
Figura 7.5 - Comparação dos fatores de segurança obtidos com diferentes metodologias para (a) o talude inclinado 45° e (b) para o talude inclinado 70°.....	65
Figura 7.6 - Geometria dos taludes analisados. (a) Talude com descontinuidade a 45° e (b) talude com descontinuidade a 70°.....	66
Figura 7.7 - Geometria, modelos e condições de contorno adotadas no modelo de talude com uma fratura centrada.....	67
Figura 7.8 - Esquema da simplificação empregada por Tharp & Coffin (1985) para o cálculo dos SIF.....	71

Figura 7.9 - Fatores de segurança de taludes com uma descontinuidade centrada a 45° (a) e 70° (b) com diferentes alturas estimados com o modelo CVBM, a envoltória elipsoidal de propagação, o modelo MCEP, e o método de equilíbrio limite.....	73
Figura 8.1 - Condições de contorno, geometria e modelos adotados – Modelo de ruptura escalonada	76
Figura 8.2 - Condições de contorno, geometria e modelos adotados – Modelo de ruptura por tombamento	77
Figura 8.3 - Condições de contorno, geometria e modelos adotados – Modelo de ruptura por espalhamento	78
Figura 8.4 - Fatores de segurança obtidos com o modelo CVBM e o modelo MCEP nos diferentes mecanismos avaliados.	84

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

A : Área gerada pela propagação da fratura,

a : Metade do comprimento da fratura,

B : Espessura do corpo de prova,

C_{pj} : Coesão pico da junta,

C_{rj} : Coesão residual da junta,

D : Diâmetro do corpo de prova,

E : Módulo de Young,

E' : Módulo equivalente dependente de estado plano de tensões ou de deformações,

F_I : Função que considera as condições de contorno para o cálculo do K_I ,

F_{II} : Função que considera as condições de contorno para o cálculo do K_{II} ,

F_n : Força normal entre partículas,

F_n^{max} : Força normal máxima entre partículas,

$f_1\left(\frac{K_{II}}{K_I}\right)$: Função que descreve a forma da superfície de propagação da fratura no modo I e II,

G : Taxa de liberação de energia,

H : Altura do talude,

K_N : Rigidez normal da junta,

K_S : Rigidez cisalhante da junta,

K_I : Fator de intensidade de tensões no modo I,

K_{II} : Fator de intensidade de tensões no modo II,

K_{III} : Fator de intensidade de tensões no modo III,

K_{Ic} : Tenacidade a fratura no modo I,

K_{IIc} : Tenacidade a fratura no modo II,

K_{IIIc} : Tenacidade a fratura no modo III,

m : Contador de valores inteiros, que descreve a distância entre a ponta da fratura e os contatos entre partículas em um modelo de partículas com distribuição cúbica.

n : Número de ensaios,

P : Carga pontual,

r : Raio medido desde a ponta da fratura,
 s : Espaçamento entre apoios no ensaio SCB,
 t : Espessura,
 U : Energia potencial elástica,
 u_I : Expoente de ajuste da relação $\frac{K_I}{K_{Ic}}$ no critério de propagação da fratura proposto,
 u_{II} : Expoente de ajuste da relação $\frac{K_{II}}{K_{IIc}}$ no critério de propagação da fratura proposto,
 W : Largura do corpo de prova,
 W : Trabalho externo total,
 α : Coeficiente de minoração da tensão horizontal na definição de condições de contorno,
 β : Inclinação da fratura,
 σ : Tensão resultante da aplicação de uma carga nas condições de contorno,
 σ_f : Resistencia limite do contato entre partículas,
 σ_n : Tensão normal, resultado de uma carga aplicada de forma remota.
 σ_T : Resistencia a tração do material intacto,
 $\sigma_{T_{pj}}$: Resistencia a tração pico da junta.
 $\sigma_{T_{rj}}$: Resistencia a tração residual da junta.
 σ_1 : Tensão principal maior,
 γ : Peso unitário.
 ϕ_{pj} : Ângulo de atrito pico da junta,
 ϕ_{rj} : Ângulo de atrito residual da junta,
 τ : Tensão cisalhante,
 ν : Coeficiente de Poisson.

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - APRESENTAÇÃO

A rocha é provavelmente um dos materiais naturais mais complexos, com uma história de milhões de anos de formação que lhe conferem fraturas em uma ampla variedade de escalas (Fairhurst 2013). Este processo gera um material com uma estrutura e comportamento mecânico que se diferencia dos materiais comumente usados na engenharia. A interação entre a fratura e o material intacto ocorre com a propagação da fratura, processo em que as pontes de rocha são interconectadas, culminando na conformação de superfícies contínuas e a ruptura do material.

Na modelagem convencional de materiais rochosos, são empregados modelos baseados na mecânica dos meios contínuos. No entanto, seu uso pode introduzir imprecisões nas análises, uma vez que esses modelos não representam adequadamente a distribuição heterogênea de tensões que ocorre em materiais fraturados, nos quais coexistem micro e macroestruturas. Essas deficiências dificultam a reprodução das superfícies de fratura observadas e podem gerar variações significativas nas tensões de ruptura, já que os modelos empregados não refletem com precisão as características de resistência à fratura do material real.

O fenômeno da fratura em materiais dessa natureza tem sido abordado por meio da Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE), uma teoria que simplifica a propagação das fraturas em materiais elásticos por considerar o meio elástico em toda a sua extensão, exceto na ponta da fratura, onde a propagação ocorre (Bazant & Planas 1998). A MFLE tem sido aplicada com sucesso em materiais frágeis, com resultados satisfatórios, além de ser avaliada em materiais quase-frágeis, como rochas e concreto.

Dessa maneira, Tharp & Coffin (1985) empregaram a MFLE em uma abordagem analítica para casos de taludes simplificados, obtendo resultados condizentes com a estabilidade observada. No entanto, a metodologia utilizada pelos autores é limitada a geometrias simplificadas, não abrangendo sistemas de ruptura mais complexos, contexto em que métodos numéricos computacionais apresentam suas maiores vantagens.

De forma semelhante, no trabalho de Gao et al. (2017), a análise de estabilidade de taludes rochosos com fraturas iniciais foi conduzida por meio de um critério analítico fundamentado na mecânica da fratura, utilizando o SIF de maneira iterativa. Esse procedimento permitiu determinar as superfícies de propagação das fraturas em geometrias simples, com validação por meio de modelagem numérica.

Neste sentido, aplicar a teoria da MFLE aos modelos numéricos computacionais representa algumas vantagens ao conseguir se aproximar a geometrias de difícil solução analítica, permitindo sua interação com condições como água subterrânea, elementos de suporte, entre outros. Algumas das metodologias numéricas computacionais que podem considerar a MFLE como os “Extended Finite Element Method” (XFEM) e “Discrete Element Method” (DEM), já conseguiram resultados próximos aos observados em diferentes materiais, no entanto, essas metodologias têm em comum um alto custo computacional derivado de sua robustez matemática.

Nesse contexto, o modelo “Continuum Voronoi Block Model” (CVBM), um modelo pseudodescontínuo baseado em blocos poligonais conectados por juntas que permitem deslocamento relativo, apresenta eficiência computacional em comparação com modelos similares. Essa característica é destacada por Valderrama (2023), Sanipour et al. (2022), Hamediazad & Bahrani (2022), Soares et al. (2021) e Li & Bahrani (2021), cujos estudos apresentaram resultados notáveis, representando diversos fenômenos de fratura, tornando o CVBM uma ferramenta promissora para o estudo de materiais fraturados.

Neste estudo, a abordagem da MFLE para a propagação de fraturas é combinada à versatilidade dos métodos numéricos computacionais. O CVBM é empregado para a calibração do Granito Lac du Bonnet (GLdB) em modelos de ensaios laboratoriais utilizando o software RS2, com o objetivo de analisar seu comportamento no modo II de propagação de fratura e estabelecer um critério para a propagação no modo misto do material calibrado.

A estabilidade de taludes com geometria simplificada, semelhantes aos estudados por Tharp & Coffin (1985), é analisada. Os resultados são comparados aos obtidos empregando a envoltória de propagação de fratura no modo misto e contrastados aos obtidos com o modelo Mohr Coulomb Elastoplástico (MCEP). Por fim, se analisam taludes com geometrias mais complexas, suscetíveis à ruptura por mecanismos de ruptura escalonada, tombamento, e espalhamento lateral, são analisados com o modelo proposto, avaliando sua capacidade de replicar mecanismos de ruptura típicos. Os resultados são novamente contrastados com os obtidos pelo modelo MCEP.

1.2 - MOTIVAÇÃO

De acordo com Froude & Petley (2018), entre 2004 e 2016, 4862 movimentos de terra resultaram na morte de mais de 55000 pessoas. Além das significativas perdas humanas, os

impactos econômicos desses eventos são expressivos, totalizando cerca de 20000 milhões de dólares anuais em todo o mundo (Sim et al. 2023).

Wyllie & Mah (2005) destacam que, além dos custos diretos, os deslizamentos de terra acarretam elevados custos indiretos em rodovias. Esses custos incluem danos a veículos, lesões em passageiros, atrasos no tráfego, interrupções no transporte de mercadorias e desvalorização de terrenos devido ao risco de instabilidade.

Nas operações de mineração, as rupturas de taludes rochosos podem interromper a linha de produção, gerar custos elevados com a remoção do material mobilizado e exigir modificações no projeto de exploração. Em áreas próximas a reservatórios de água, esses eventos podem gerar de gerar ondas com capacidade de comprometer a integridade de barramentos, colocando em risco as comunidades a jusante.

A abordagem dos problemas de estabilidade por meio de metodologias realistas é essencial para avaliar e controlar os riscos associados a essas atividades. Nesse contexto, a engenharia desempenha um papel fundamental na melhoria das metodologias de avaliação, buscando compreender os mecanismos de ruptura a fim de desenvolver soluções mais eficazes para esses problemas, priorizando a segurança e a proteção das pessoas.

A análise de estabilidade de taludes com metodologias convencionais apresenta limitações na representação dos fenômenos de concentração de tensões que ocorrem na ponta das fraturas. Como consequência, materiais como rochas fraturadas não são adequadamente modelados, o que resulta em imprecisões nos resultados.

A Mecânica da Fratura (MF) é a teoria mais adequada para a análise dos processos de propagação de fraturas. Dessa forma, esta pesquisa busca aprimorar as análises de estabilidade de taludes em rochas, representando de forma mais precisa os fenômenos de ruptura. O objetivo é fortalecer a capacidade da engenharia em lidar com problemas de estabilidade em materiais rochosos, contribuindo para a segurança das estruturas e, consequentemente, das pessoas.

1.3 - OBJETIVOS

Incorporar a Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) em análises de estabilidade de taludes em rochas fraturadas, utilizando o modelo Continuum Voronoi Block Model (CVBM) para calibrar a tenacidade à propagação no modo I do material.

Especificamente, pretende-se:

- Avaliar a capacidade do modelo CVBM em replicar a tenacidade à fratura no modo I do material sob diferentes condições de contorno, utilizando os ensaios “Center Cracked Tension” (CCT), “Semi-Circular Bending” (SCB) e “Cracked Strength Through Brazilian Disc” (CSTBD).
- Apresentar um procedimento de calibração para o CVBM que inclua, além da deformabilidade e resistência à tração, a tenacidade à fratura no modo I como um dos parâmetros de calibração.
- Explorar o comportamento do modelo calibrado em modos mistos de propagação de fratura, utilizando os ensaios SCB e CSTBD com fratura inclinada, além da condição de contorno da Placa com entalha inclinada (PEI), para determinar se existe um critério de propagação que corresponda ao comportamento observado.
- Validar o desempenho do modelo na análise de estabilidade de taludes com geometrias simplificadas, tais como um talude com um bloco deslizando sobre um plano inclinado e um talude com uma fratura centrada, as quais permitem sua comparação com abordagens fundamentados na MFLE por sua simplicidade geométrica.
- Avaliar a estabilidade de taludes com geometrias complexas, representando mecanismos de ruptura escalonada, tombamento por bloco-flexão e espalhamento lateral, comparando os resultados obtidos com o modelo Mohr Coulomb Elastoplástico.

1.4 - ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em nove capítulos.

Inicialmente, o Capítulo 1 apresenta a introdução ao trabalho, abordando o tema de pesquisa, a descrição do problema, a justificativa, o objetivo geral e os objetivos específicos. Ao final, se descreve a organização da dissertação, esboçando um resumo do conteúdo de cada capítulo.

No Capítulo 2 trata dos fundamentos da MFLE considerados essenciais para o entendimento desta pesquisa. O conceito e a natureza do fenômeno de concentração de tensões são explicados, assim como os conceitos de SIF e os ensaios utilizados nesta pesquisa para estimar a tenacidade à fratura no modo I. Além disso, revisa-se a aplicação dos critérios mais amplamente utilizados para a propagação de fratura no modo misto, juntamente com as condições de contorno dos ensaios empregados na pesquisa para a determinação das envoltórias de propagação.

O Capítulo 3 aborda os mecanismos de ruptura em taludes de rocha, destacando a influência significativa das pontes de rocha intacta na estabilidade. Fez-se uma revisão das abordagens baseadas na mecânica da fratura para a análise de estabilidade de taludes, abrangendo desde simplificações geométricas e soluções pseudoanalíticas até modelos numéricos avançados. Além disso, analisam-se as diferentes interpretações da tesselação de Voronoi, uma vez que essa técnica é utilizada de formas variadas para diferentes tipos de problemas de estabilidade de taludes.

Posteriormente no Capítulo 4 descreve-se a estrutura e composição do modelo CVBM, incluindo suas aplicações, com ênfase no uso de modelos baseados em grãos para representar a propagação de fraturas. Adicionalmente, analisam-se as variáveis que influenciam o modelo e que são relevantes para o processo de calibração. Por fim, apresenta-se o algoritmo de calibração adotado na metodologia proposta.

No que se refere à calibração do material de estudo, o Capítulo 5 detalha o processo de calibração a partir de parâmetros disponíveis na literatura. Descrevem-se os ensaios realizados e as variáveis avaliadas em cada estágio da calibração, culminando na definição dos parâmetros calibrados do material. Também se analisa o impacto do tamanho dos elementos finitos no desempenho do modelo em relação à propagação da fratura. Por fim, apresentam-se os modelos dos ensaios complementares que validam o comportamento do material no modo I de propagação de fratura.

No Capítulo 6 se investiga o comportamento do material calibrado em modo misto de propagação de fratura, e analisam-se três diferentes condições de contorno. Com base nos resultados obtidos nos testes da placa com entalha inclinada, propõe-se um critério de propagação no modo misto que considera as tensões compressivas na face da fratura, representando o comportamento dos taludes analisados na Seção 7.2.

No Capítulo 7 se apresenta a análise de estabilidade de duas tipologias de taludes com geometrias simplificadas. A primeira trata de um talude com um bloco de rocha deslizando sobre um plano inclinado, avaliando diferentes persistências da fratura a propagar. Os resultados são comparados com aqueles obtidos pelo modelo Mohr Coulomb Elastoplástico e com soluções teóricas de referência. A segunda tipologia envolve taludes com uma fratura centralizada, avaliando sua estabilidade em diferentes escalas. Para esse segundo caso, os resultados são comparados com os do modelo Mohr Coulomb Elastoplástico e com os valores

de estabilidade obtidos a partir da envoltória proposta no Capítulo 6 utilizando uma metodologia iterativa.

Em seguida, o Capítulo 8 amplia a análise de estabilidade para três taludes com configurações distintas, nas quais a propagação de fratura no modo I é o principal mecanismo de ruptura. Devido à complexidade geométrica dessas configurações, a aplicação de abordagens analíticas baseadas na MFLE se torna inviável, de modo que os resultados são comparados exclusivamente com aqueles obtidos pelo modelo Mohr Coulomb Elastoplástico.

Por fim, o Capítulo 9 expõe as conclusões gerais do estudo e propõe direções para pesquisas futuras na área.

2 - MECÂNICA DA FRATURA LINEAR ELÁSTICA

A Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) é uma teoria que estuda a interação das fraturas abertas em corpos elásticos. Trata-se de um modelo simplificado, aplicável sob condições específicas, como a suposição de que o material se comporta elasticamente em toda a sua extensão, exceto na ponta da fratura. Nesse ponto, ocorre a concentração de tensões, resultando no surgimento de comportamentos inelásticos na região próxima à ponta da fratura, onde a propagação ocorre.

Para os materiais aos quais a teoria se aplica, a região de comportamento inelástico é pequena em comparação com as dimensões do corpo e o tamanho da fratura. Isso torna razoável a simplificação que assume a elasticidade do material em quase toda a sua extensão, sendo essa aproximação rigorosamente válida para materiais em que a zona inelástica é extremamente reduzida (Bazant & Planas 1998).

Esta teoria considera três modos fundamentais nos quais a fratura se propaga, os quais são esquematizados na Fig. 2.1.

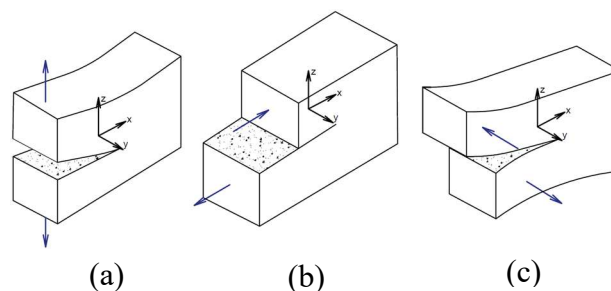


Figura 2.1 - Desenho esquemático mostrando os três modos fundamentais da propagação da fratura. (a) Modo I, de tensão ou abertura; (b) Modo II, cisalhamento plano ou modo de deslizamento; (c) Modo III, modo de rasgamento.

As três configurações de propagação da fratura levam o corpo a experimentar diferentes estados de tensão até atingir uma condição limite, na qual a fratura se propaga. Essa condição é discutida na seção seguinte.

2.1 - FENÔMENO DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES

Um corpo elástico e fraturado, como o mostrado na Fig. 2.2, apresenta redistribuição de tensões com uma zona de alívio ao longo das faces da fratura e uma região de concentração de tensões próxima à ponta da fratura. De acordo com a solução de Inglis (1913) (apud Bazant & Planas, 1998), na ponta da fratura ocorre uma singularidade que leva as tensões a tenderem a infinito.

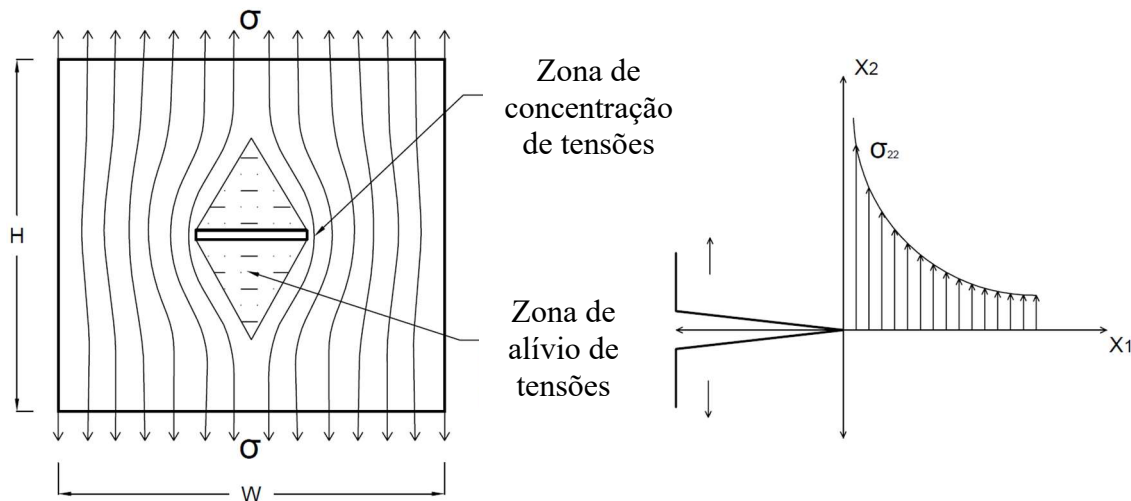


Figura 2.2 - Redistribuição de tensões em materiais fraturados e concentração de tensões na ponta da fratura (modificado - ACI Committee 446, 1992).

A abordagem ao problema de concentração de tensões proposta por Griffith (1921, 1924) (apud Bazant & Planas, 1998), considera que a propagação de uma fratura em um corpo é um processo que requer energia, a qual é empregada na deformação elástica do corpo, e é gasta na criação da nova superfície propagada. Nesse sentido, a energia total que leva ao corpo a propagar uma fratura é aquela que, por meio da deformação do corpo elástico, submete a ponta da fratura em uma condição que concentra tensões em um valor crítico, gerando a sua propagação.

Desse balanço energético pode ser descrita a quantidade de energia necessária para propagar uma área “A” a fratura, como a diferença entre a energia total ingressada ao sistema em forma de trabalho externo, e a energia potencial elástica, esta variável é denominada Taxa de Liberação de Energia (G) e sua definição é mostrada na Eq. 2.1,

$$G = \frac{dW}{dA} - \frac{dU}{dA} \quad [2.1]$$

Onde:

G: Taxa de liberação de energia,

W: Trabalho externo total,

U: Energia potencial elástica,

A: Área gerada pela propagação da fratura.

Esta variável guarda uma forte relação com o Fator de Intensidade de Tensões (SIF), que descreve a concentração de tensões na ponta da fratura, e representam, de fato, duas

interpretações diferentes do mesmo fenômeno, uma abordando o problema desde a energia e a outra desde a concentração de tensão. Irwin (1957) (apud Bazant & Planas, 1998) encontrou a relação entre a G e o SIF no modo I (K_I), descrita com a Eq. 2.2,

$$G = \frac{K_I^2}{E'} \quad ; \quad E' = \begin{cases} \frac{E}{E} & \text{Para estado plano de tensões} \\ \frac{E}{1-\nu} & \text{Para estado plano de deformações} \end{cases} \quad [2.2]$$

Onde:

G : Taxa de liberação de energia,

K_I : Fator de intensidade de tensões no modo I,

E' : Módulo equivalente dependente de estado plano de tensões ou de deformações,

E : Módulo de Young,

ν : Coeficiente de Poisson.

Com este marco teórico, o valor crítico pode ser interpretado como um critério de propagação, diferenciando-se de abordagens como metodologias de distribuição plana de tensões e de análises de tensão deformação clássicas, que não consideram o fenômeno de concentração de tensões, ou que consideram, mas de forma imprecisa, por não ser um parâmetro do modelo definido explicitamente ou obtido indiretamente através de um processo de calibração.

2.2 - SIF COMO UM CRITÉRIO DE PROPAGAÇÃO

Uma vez que um carregamento em um corpo é aplicado, a fratura modifica seu estado de tensões e, portanto, seu SIF. Se o carregamento continua e chega a ser suficiente, o SIF pode chegar em um valor crítico que é propriedade de cada material. Este valor crítico é conhecido como Tenacidade da fratura, convertendo-se em um valor interessante ao ser um valor limite, e, portanto, pode ser interpretado como um critério de propagação de fratura, com o qual:

Se $K_I < K_{Ic}$ não há propagação,

Se $K_I = K_{Ic}$ é um estado quase-estático,

Se $K_I > K_{Ic}$ a fratura se propaga.

Para conhecer o valor numérico da tenacidade a fratura dos materiais, são executados ensaios com carregamentos e condições de contorno controladas, empregando equações dependentes da geometria para cada caso particular. No livro “The stress analysis of cracks

handbook” (Tada 2000) é feita uma recopilação de diferentes casos de carregamento com as suas equações para avaliar o Stress Intensity Factor nos diferentes modos de propagação de fratura.

A tenacidade da fratura é amplamente estudada, pois é suscetível a variações com o confinamento, a temperatura e a umidade da rocha, entre outros parâmetros. Metodologias que empregam os ensaios e as equações para determinar a tenacidade dos materiais são abundantes na literatura, com trabalhos de natureza experimental e numérica, utilizando ensaios como o “Cracked Straight Through Brazilian Disc” (CSTBD), no caso do trabalho de Omidimanesh et al. (2023) e Huang et al. (2023), e ensaios de flexão em corpos de prova semicirculares (SCB), como no trabalho de Wang et al. (2023), Rabiei et al. (2023), Deyab et al. (2023) e Suo et al. (2022), para determinar o comportamento dos materiais ou modelos na fratura.

2.3 - ENSAIOS DE PROPAGAÇÃO NO MODO I

Como foi descrito anteriormente, o SIF está relacionado com a variação de energia no corpo. Diversos autores têm trabalhado para encontrar as soluções analíticas e numéricas que descrevem os SIFs, muitas das quais correspondem a estimativas do valor em ensaios empregados para conhecer as propriedades na propagação da fratura dos materiais. Neste texto são empregados alguns dos ensaios que submetem o corpo ao modo I puro, suas condições de contorno e as equações usadas para a estimação do K_{Ic} em cada ensaio são apresentadas a seguir.

2.3.1 - ENSAIO “CENTER CRACKED TENSION”

O ensaio “Center Cracked Tension” (CCT) é um dos ensaios empregados para calcular o SIF no modo I, a Eq. 2.3 corresponde a solução desenvolvida por Tada (2000) e descreve seu SIF no modo I de propagação da fratura,

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \left[\sec \left(\frac{\pi a}{2W} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \left[1 - 0.025 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 0.06 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right] \quad [2.3]$$

Onde:

K_I : Fator de intensidade de tensões no modo I,

σ : Tensão resultante da aplicação de uma carga nas condições de contorno,

a : Metade do comprimento da fratura,

W : Largura do corpo de prova.

As condições de contorno do ensaio são mostradas na Fig. 2.3.

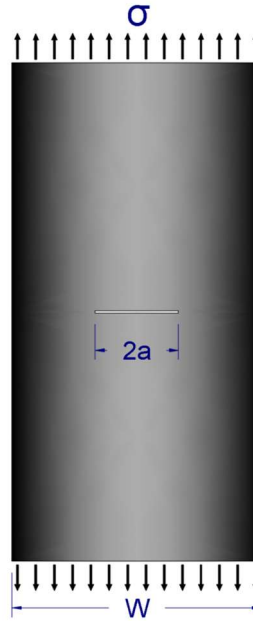


Figura 2.3 - Esquema do ensaio CCT

2.3.2 - ENSAIO “CRACKED STRAIGHT THROUGH BRAZILIAN DISC”

O ensaio "Cracked Straight Through Brazilian Disc" (CSTBD) dispõe da Eq. 2.4 para o cálculo do SIF no modo I, onde Ke et al. (2008) sugerem o valor de 1.343 para o caso de ensaio com a fratura alinhada com a vertical e com a relação $\frac{2a}{D} = 0.50$,

$$K_I = \frac{2P\sqrt{a}}{\sqrt{\pi DB}} F_I \quad ; \quad F_I = 1.343 \Leftrightarrow \frac{2a}{D} = 0.50 \quad [2.4]$$

Onde:

K_I : Fator de intensidade de tensões no modo I,

P : Carga pontual,

a : Metade do comprimento da fratura,

D : Diâmetro do corpo de prova,

B : Espessura do corpo de prova,

F_I : Função que considera as condições de contorno para o cálculo do K_I .

As condições de contorno do ensaio são mostradas na Fig. 2.4.

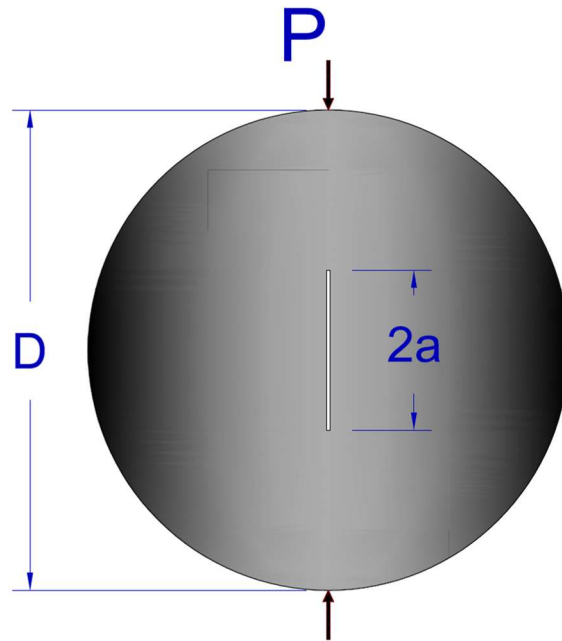


Figura 2.4 - Esquema do ensaio CSTBD

2.3.3 - ENSAIO “SEMI CIRCULAR BENDING”

Na Eq. 2.5 é apresentada a solução para o SIF no modo I do ensaio “Semi Circular Bending” (SCB) obtida por Atkinson et al. (1982) (apud Omidimanesh et al., 2023),

$$K_I = \left(\frac{P}{DB} \right) \sqrt{\pi a} \left(-1.297 + 9.516 \frac{s}{D} - \left(0.47 + 16.457 \frac{s}{D} \right) \left(\frac{2a}{D} \right) + \left(1.071 + 34.401 \frac{s}{D} \right) \left(\frac{2a}{D} \right)^2 \right) \quad [2.5]$$

Onde:

K_I : Fator de intensidade de tensões no modo I,

P : Carga pontual,

a : Metade do comprimento da fratura,

D : Diâmetro do corpo de prova,

B : Espessura do corpo de prova,

s : Espaçamento entre apoios no ensaio SCB.

As condições de contorno do ensaio são mostradas na Fig. 2.5.

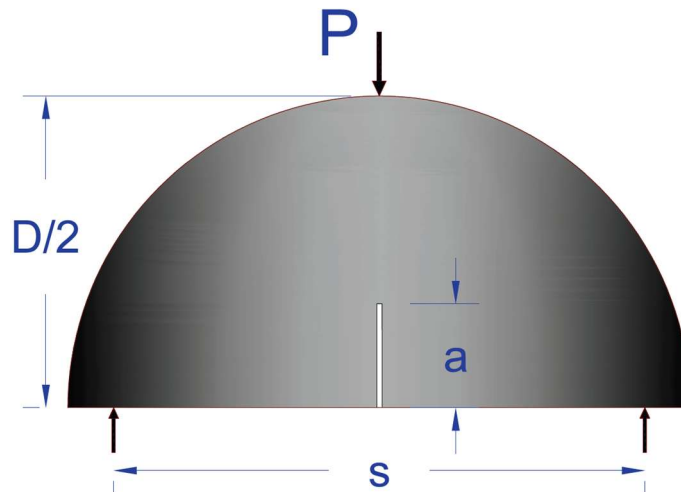


Figura 2.5 - Esquema do ensaio SCB

2.4 - CRITÉRIOS DE PROPAGAÇÃO NO MODO MISTO

O modo misto resulta da atuação simultânea de dois modos de propagação de fratura. Neste documento, será tratado exclusivamente o modo misto envolvendo o modo I e o modo II de propagação. A interação dos campos de tensões gerados por ambos os modos é combinada e, na condição limite, compõe a envoltória de propagação, a partir da qual a fratura se propaga de forma descontrolada.

Diversos critérios matemáticos descrevem essa superfície, definindo as envoltórias de propagação em função da tenacidade à fratura do material nos modos I e II, além de outras variáveis dependendo do critério adotado. Entre os critérios mais relevantes destacam-se o Critério Elipsoidal, o Critério de Máxima Tensão Principal e o Critério de Máxima Taxa de Liberação de Energia.

O Critério Elipsoidal estabelece uma combinação dos fatores de intensidade de tensão nos três modos (I, II e III), sendo representado por um elipsoide no espaço tridimensional e por uma elipse no espaço bidimensional, conforme descrito pela Eq. 2.6,

$$\left(\frac{K_I}{K_{Ic}}\right)^2 + \left(\frac{K_{II}}{K_{IIc}}\right)^2 = 1 \quad [2.6]$$

Onde:

K_I : Fator de intensidade de tensões no modo I,

K_{II} : Fator de intensidade de tensões no modo II,

K_{Ic} : Tenacidade a fratura no modo I,

K_{IIc} : Tenacidade a fratura no modo II.

Neste critério, a superfície de propagação da fratura tem forma elíptica com interseções nos valores de K_{Ic} e K_{IIc} os quais são definidos explicitamente.

O critério de Máxima taxa de Liberação de Energia (MERR) estabelece que a fratura inicia sua propagação quando a energia, para uma pequena parte de fratura, é igual ou maior do que um valor crítico que permite que a fratura se propague na direção da maior taxa de liberação de energia. A forma matemática do critério é descrita na Eq. 2.7,

$$G = \frac{1}{E'} \left[K_I^2 + K_{II}^2 + \frac{K_{III}^2}{1 - \nu^2} \right] \quad [2.7]$$

Onde:

G : Taxa de liberação de energia,

E' : Modulo equivalente dependente de estado plano de tensões ou de deformações,

K_I : Fator de intensidade de tensões no modo I,

K_{II} : Fator de intensidade de tensões no modo II,

K_{III} : Fator de intensidade de tensões no modo III,

ν : Coeficiente de Poisson.

Neste critério é definida a taxa de liberação de energia, portanto, o valor de K_{Ic} é consequência da sua relação mostrada na Eq. 2.2.

O critério da máxima tensão principal estabelece que a fratura se propagará na direção em que a tensão normal na ponta da fratura seja máxima, principal e de tração, ocorrendo de forma perpendicular a essa tensão. A envoltória é descrita pela Eq. 2.8, que possui diversas configurações a depender da função f_1 .

$$\sigma_1 = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot f_1 \left(\frac{K_{II}}{K_I} \right) \quad [2.8]$$

Onde:

σ_1 : Tensão principal maior,

K_I : Fator de intensidade de tensões no modo I,

r : Raio medido desde a ponta da fratura,

$f_1 \left(\frac{K_{II}}{K_I} \right)$: Função que descreve a forma da superfície de propagação da fratura no modo I e II.

Neste critério, a fratura se propaga se σ_1 atinge o valor de resistência a tração máxima do material.

2.5 - ENSAIOS DE PROPAGAÇÃO NO MODO MISTO

Nesta seção se apresentam os ensaios CSTBD e SCB com a com entalha inclinada, que junto a condição da placa com entalha inclinada (PEI) constituem metodologias que podem ser empregadas para determinar a envoltória de propagação de fratura no modo misto através da variação das condições de contorno.

2.5.1 - ENSAIO “CRACKED STRAIGHT THROUGH BRAZILIAN DISC” COM ENTALHA INCLINADA

O ensaio CSTBD descrito, na Seção 2.3.2, permite estimar os valores do SIF no modo misto através da mudança da inclinação da fratura. Zhao et al. (2024) disponibilizam a curva de coeficientes F_I e F_{II} , para o cálculo do SIF nos modos I e II, permitindo estabelecer a envoltória de propagação no modo misto para o caso geométrico específico que cumpre com a relação $a/R=0.4$. As Eq. 2.9 e 2.10, são empregadas para o cálculo do SIF em cada modo,

$$K_I = \frac{P}{WB} \sqrt{\pi a} \cdot F_I \quad [2.9]$$

Onde:

K_I : Fator de intensidade de tensões no modo I,

P : Carga pontual,

W : Largura do corpo de prova,

B : Espessura do corpo de prova,

a : Metade do comprimento da fratura,

$$K_{II} = \frac{P}{WB} \sqrt{\pi a} \cdot F_{II} \quad [2.10]$$

Onde:

K_{II} : Fator de intensidade de tensões no modo II,

P : Carga pontual,

W : Largura do corpo de prova,

B : Espessura do corpo de prova,

a : Metade do comprimento da fratura.

A geometria deste ensaio, embora não varie significativamente em relação ao ensaio homônimo no modo I, faz com que a inclinação da fratura (β) se torne a variável com a qual é construída a envoltória de propagação. A geometria do ensaio é mostrada na Fig. 2.6.

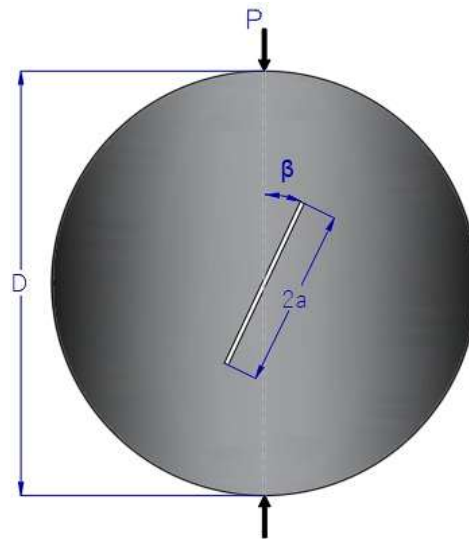


Figura 2.6 - Esquema do ensaio CSTBD com fratura inclinada

2.5.2 - ENSAIO “SEMI CIRCULAR BENDING” COM ENTALHA INCLINADA

O ensaio SCB, descrito na Seção 2.3.3, possui a versatilidade de avaliar de forma simples o comportamento dos materiais no modo misto através da mudança da inclinação da fratura. Zhao et al. (2024), disponibilizam as curvas dos coeficientes F_I e F_{II} , para o cálculo do SIF nos modos I e II deste ensaio, em função da inclinação da fratura para o caso geométrico específico que cumpre com as relações $a/R=0.4$ e $S/R=0.4$. As Eq. 2.11 e 2.12, são empregadas para o cálculo do SIF em cada modo,

$$K_I = \frac{P}{WB} \sqrt{2a} \cdot F_I \quad [2.11]$$

Onde:

K_I : Fator de intensidade de tensões no modo I,

P : Carga pontual,

W : Largura do corpo de prova,

B : Espessura do corpo de prova,

a : Metade do comprimento da fratura,

F_I : Função que considera as condições de contorno para o cálculo do K_I .

$$K_{II} = \frac{P}{WB} \sqrt{2a} \cdot F_{II} \quad [2.12]$$

Onde:

K_{II} : Fator de intensidade de tensões no modo II,

P : Carga pontual,

W : Largura do corpo de prova,

B : Espessura do corpo de prova,

a : Metade do comprimento da fratura,

F_{II} : Função que considera as condições de contorno para o cálculo do K_{II} .

De forma similar ao ensaio CSTBD com fratura inclinada, a inclinação da fratura (β) também se torna uma variável importante na determinação da envoltória. As condições de contorno do ensaio são esboçadas na Fig. 2.7.

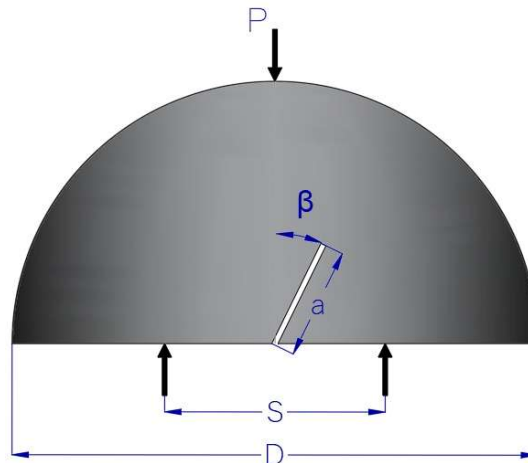


Figura 2.7 - Esquema do ensaio SCB com fratura inclinada

2.5.3 - CONDIÇÃO DE CONTORNO DA PLACA COM ENTALHA INCLINADA

A condição de contorno da Placa com entalha inclinada (PEI) é uma abordagem teórica que consiste em uma placa de dimensões infinitas, que possui uma entalha inclinada e se encontra carregada de forma remota no eixo vertical e horizontal. Esta condição possui solução teórica para o cálculo dos fatores de intensidade de tensão nos modos I e II, permitindo avaliar a resistência a propagação da fratura dos materiais em diferentes combinações de SIF no modo misto. As soluções empregadas para determinar o SIF nos modos I e II, obtidas por Theocaris & Michopoulos (1983), são apresentadas na Eq. 2.13 e 2.14, e suas condições de contorno são esquematizadas na Fig. 2.8.

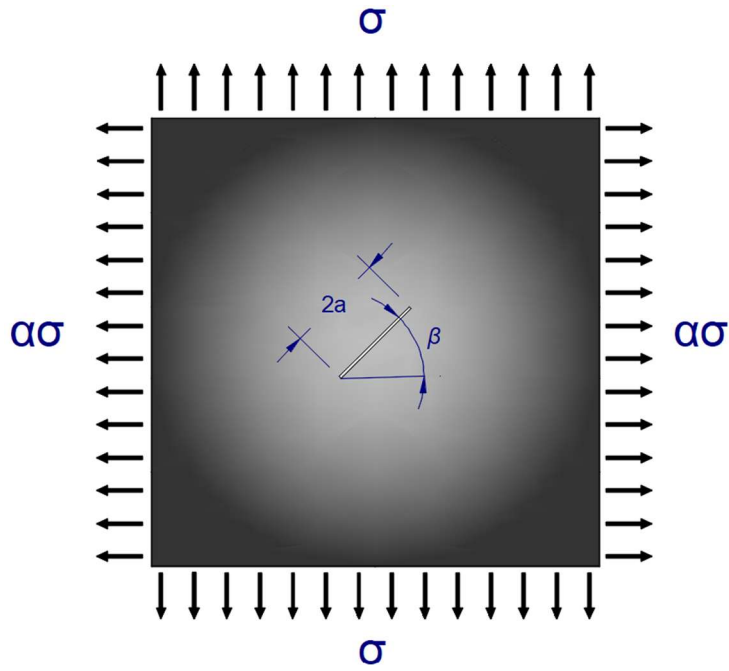


Figura 2.8 - Esquema da condição de contorno de fratura inclinada no modo misto.

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a}(\cos^2 \beta + \alpha \sin^2 \beta) \quad [2.13]$$

Onde:

K_I : Fator de intensidade de tensões no modo I,

σ : Tensão resultante da aplicação de uma carga nas condições de contorno,

a : Metade do comprimento da fratura,

α : Coeficiente de minoração da tensão horizontal na definição de condições de contorno,

β : Inclinação da fratura,

$$K_{II} = \sigma\sqrt{\pi a}(1-\alpha) \sin \beta \cdot \cos \beta \quad [2.14]$$

Onde:

K_{II} : Fator de intensidade de tensões no modo II,

σ : Tensão resultante da aplicação de uma carga nas condições de contorno,

a : Metade do comprimento da fratura,

α : Coeficiente de minoração da tensão horizontal na definição de condições de contorno,

β : Inclinação da fratura.

O parâmetro α corresponde a um escalar que relaciona as cargas vertical e horizontal. Esse valor permite variar a distribuição do carregamento para modificar o campo de tensões e, consequentemente, provocar a propagação da fratura em diferentes combinações dos modos I e II.

3 - TALUDES DE ROCHA FRATURADA

3.1 - MECANISMOS DE RUPTURA EM TALUDES DE ROCHA

Na análise de estabilidade de taludes em rocha fraturada, a existência de mecanismos cinemáticos é principalmente definida pela orientação e ângulo de mergulho das famílias de descontinuidades presentes, bem como por sua relação com a face do talude. Tais mecanismos podem ser identificados por meio do mapeamento das descontinuidades, metodologia na qual as redes estereográficas são uma ferramenta útil para interpretar essas informações e obter as configurações de fraturamento que originam os diferentes mecanismos de ruptura mostrados na Fig. 3.1.

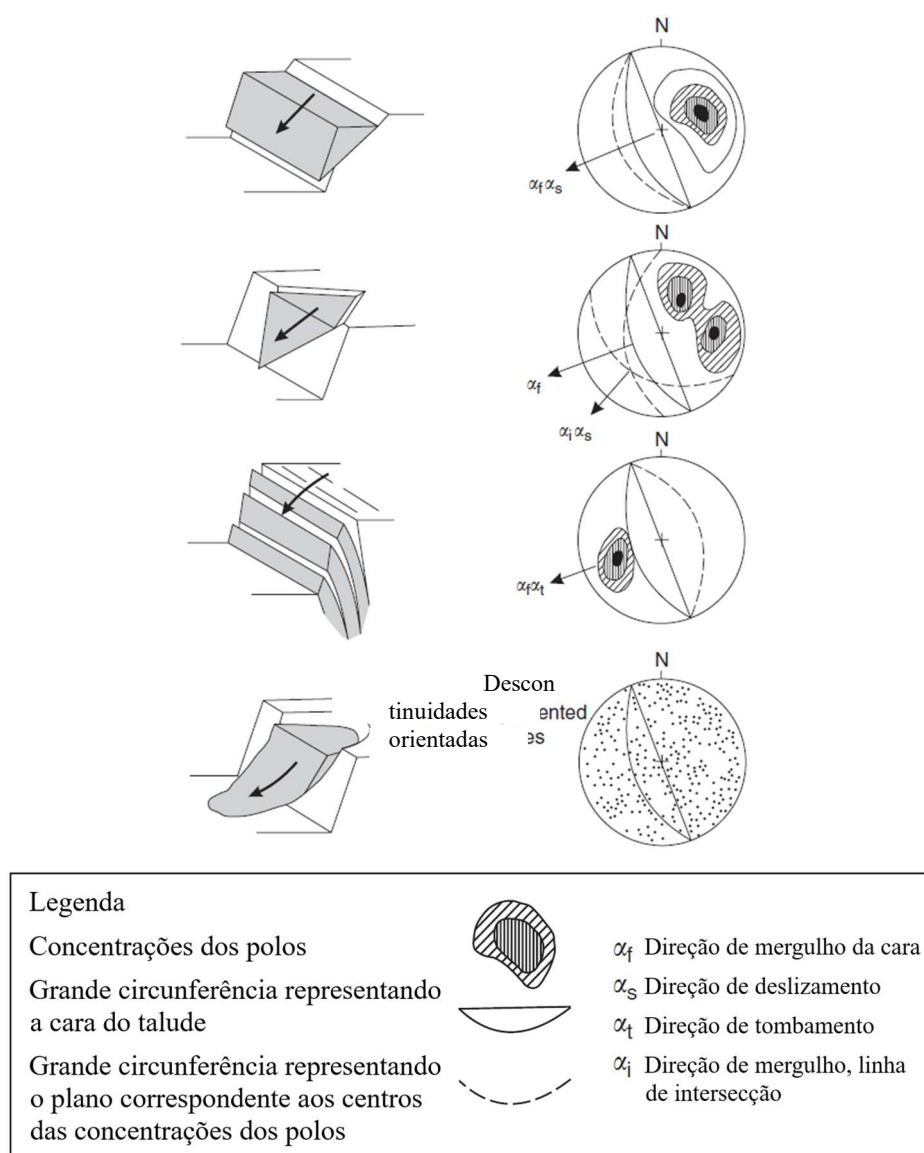


Figura 3.1 - Representação na rede estereográfica de diferentes famílias de descontinuidades que conformam mecanismos cinemáticos em taludes (modificado - C Wyllie & W Mah, 2005)

A conformação dos mecanismos descritos na Fig. 3.1 indica a suscetibilidade à geração de superfícies sobre as quais pode ocorrer o deslizamento ou queda de blocos. Em função da persistência das famílias, essas superfícies são interrompidas por pontes de rocha intacta, cujo efeito estabilizante é desprezado na implementação de teorias como juntas chave, que assomem a junta infinitamente persistente, condição raramente observada, sendo uma sobre simplificação da realidade que leva a estimativas de estabilidade altamente conservadoras, sendo que o problema é uma interação complexa entre descontinuidades naturais existentes e a propagação da fratura frágil através da rocha intacta (Gao et al. 2017).

O processo de geração de blocos com suscetibilidade a deslizar começa na ponta da descontinuidade, onde as pontes de rocha experimentam tensões normais e cisalhantes. Se a magnitude desses campos de tensões for suficiente, a fratura se propaga, conectando superfícies de descontinuidade e formando um mecanismo cinemático que permite o deslizamento do bloco ou desencadeia outros sistemas de ruptura.

Diante da impossibilidade prática de mapear com precisão 100% das descontinuidades existentes em um maciço rochoso, uma das alternativas para modelá-los é analisar o comportamento de uma ou algumas das famílias de descontinuidades mais relevantes, as quais podem formar uma superfície de deslizamento potencial que segue trajetórias críticas, como descrito por Einstein et al. (1983).

Esses autores reconhecem dois cenários nos quais os taludes de rochas duras rompem, que dependem do estado de tensões normais. Em baixos níveis de tensões normais, os círculos de Mohr não atingem a envoltória de cisalhamento, e a tensão principal menor alcança a resistência à tração, o que configura mecanismos de fratura predominantemente no modo I. Com tensões normais maiores, a resistência à tração não é atingida, pois os círculos de Mohr são tangentes à envoltória, ocorrendo fratura em uma combinação dos modos I e II.

3.2 - MECANISMOS DE RUPTURA COM PREDOMINÂNCIA DO MODO I DE PROPAGAÇÃO DE FRATURA

Os problemas de estabilidade de taludes rochosos frequentemente possuem tensões compressivas *in situ* que em comparação com a resistência a compressão do material rochoso são relativamente baixas. Adicionalmente, por conta destas baixas tensões compressivas, as tensões de cisalhamento dificilmente atingem a envoltória de ruptura como descrito pelos autores Einstein et al. (1983).

A heterogeneidade, e fraturamento em diferentes escalas do material rochoso, facilita o arqueamento de tensões, surgindo a tração como principal mecanismo de ruptura de taludes rochosos. Como foi descrito no Capítulo 2, na MFLE, a tração é considerada e quantificada com o SIF no modo I. Nesta seção são apresentados alguns dos mecanismos nos que o modo I de propagação de fratura age dominantemente, aproximando-se ao modo I puro.

3.2.1 - MECANISMO DE RUPTURA ESCALONADO

O mecanismo de ruptura escalonado surge como uma variação do mecanismo de ruptura planar mostrado na Fig 3.2.



Figura 3.2 - Mecanismo de ruptura planar com susceptibilidade a conformação de mecanismos de ruptura escalonadas (Hearn, 2011).

Devido a que as superfícies de descontinuidade raramente são 100% persistentes, são geradas pontes de rocha intacta que configuram as trajetórias de ruptura mostradas na Fig 3.3.

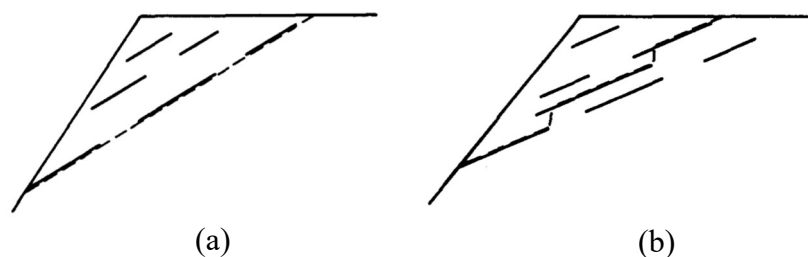


Figura 3.3 - Trajetórias críticas em diferentes configurações de juntas (modificado - Einstein et al., 1983) (a) trajetória de ruptura planar e (b) trajetória de ruptura escalonada.

Como citado anteriormente, os autores Einstein et al. (1983) descrevem as dificuldades que as tensões nos taludes rochosos têm para atingir a envoltória de cisalhamento, pelo anterior as superfícies escalonadas tendem a ser as trajetórias típicas de deslizamento em este tipo de mecanismo.

3.2.2 - MECANISMO DE RUPTURA POR TOMBAMENTO

O tombamento é outro dos mecanismos cinemáticos pelos quais ocorrem rupturas em taludes de rocha fraturada. De acordo com Goodman & Bray (1976), e C Wyllie & W Mah, (2005), são identificados três tipos de tombamento: tombamento em bloco, tombamento por flexão e tombamento em bloco-flexão, as características destes mecanismos são mostradas na Fig. 3.4.

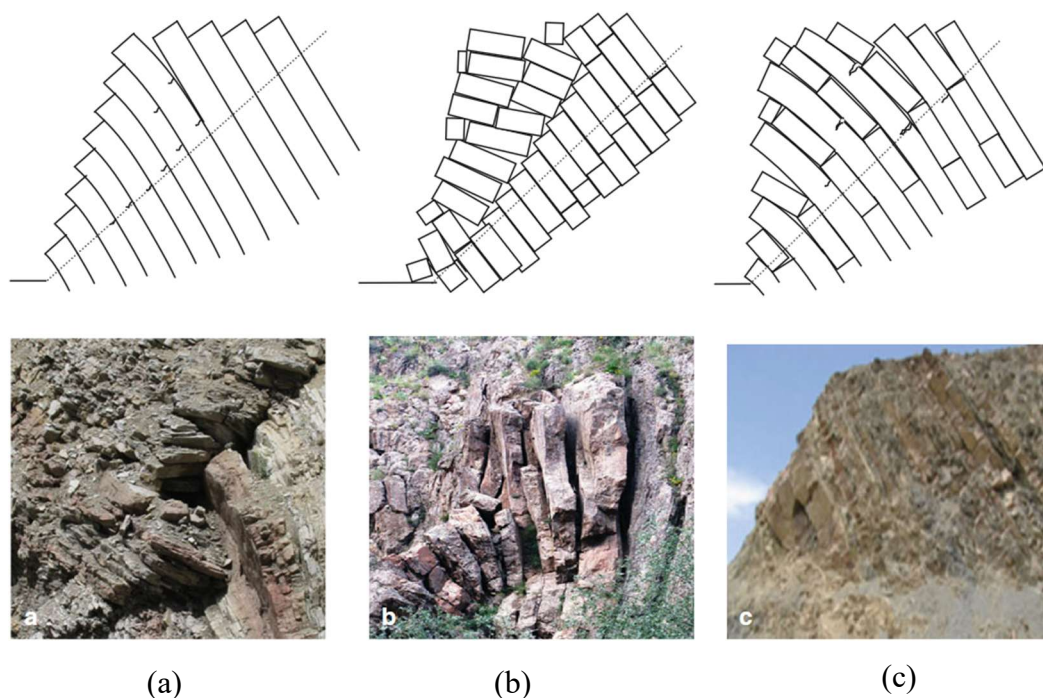


Figura 3.4 - Tipos de tombamento, (a) por flexão, (b) em blocos, e (c) em bloco-flexão.
(modificado - Amini et al. 2012)

O tombamento em bloco ocorre com pelo menos duas famílias de descontinuidades na seção transversal, uma conformando colunas e outra disposta ortogonalmente, interrompendo as colunas gerando os blocos. Nesse tipo de ruptura, os blocos da frente são empurrados pelos blocos de trás, geralmente formando superfícies escalonadas.

O tombamento por flexão ocorre com uma família de descontinuidades cujo espaçamento forma colunas esbeltas e contínuas. As famílias de descontinuidades ortogonais frequentemente não são claras, portanto, não têm uma influência direta no mecanismo. Na ruptura, as colunas finas deslizam sobre as vizinhas, rompendo por efeito da flexão. O movimento das colunas frontais desconfinas as colunas posteriores, gerando uma ruptura regressiva.

O tombamento em bloco-flexão é um mecanismo intermediário entre os anteriores, ocorrendo com uma família que forma colunas parcialmente interrompidas por

descontinuidades ortogonais. A interrupção parcial impede que os blocos sejam completamente formados, fazendo necessário que o mecanismo de ruptura inclua a propagação das fraturas através das pontes de rocha, até conformar os blocos em uma superfície de ruptura contínua.

3.2.3 - ESPALHAMENTO DE TALUDES ROCHOSOS

O espalhamento de taludes rochosos ou "rock spreading" é um fenômeno de ruptura, que acontece com materiais rochosos apoiados sobre materiais suscetíveis a liquefação ou amolecimento, desencadeado por processos erosivos, sismos, entre outros, que retiram o apoio da massa rochosa, permitindo a propagação das trincas por tração e a posterior queda, tombamento ou fluxo de blocos (Soldati & Pasuto 1991). A geomorfologia das regiões suscetíveis a este mecanismo mostra perfis de disgregação progressiva do maciço rochoso, como consequência do fenômeno, como é mostrado na Fig 3.5.

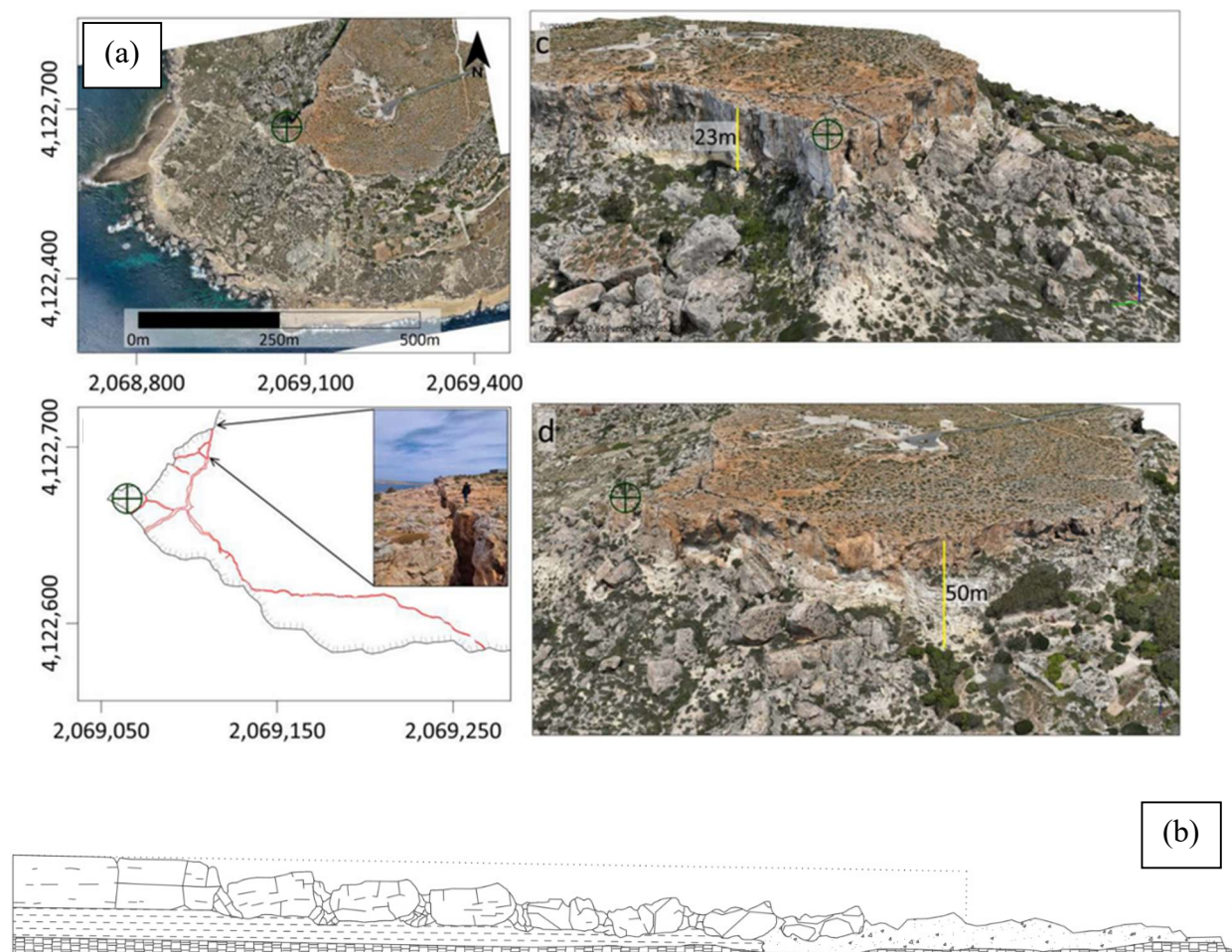


Figura 3.5 - Mecanismos de espalhamento lateral. (a) Modelo digital do Rdum il-Qammieèpromontory (Galone et al. 2024). (b) Seção do mecanismo de espalhamento lateral (modificado - Cruden & Varnes, 1993).

A estabilidade deste tipo de taludes evolui lentamente até a ruptura, essa evolução é estudada por Spreafico et al. (2017) quem modelam este problema, empregando a tesselação de Voronoi para representar a mesoestrutura do material. Encontra se também na literatura estudos como o desenvolvido por Galone et al. (2024) que avalia a suscetibilidade de ocorrência deste fenômeno, mostrando sua capacidade de mobilizar grandes volumes de rocha.

3.3 - MECÂNICA DA FRATURA E ESTABILIDADE DE TALUDES DE ROCHA

A abordagem feita por Tharp & Coffin (1985) emprega uma metodologia fundamentada na MFLE para estudar a contribuição das pontes de rocha na estabilidade, comparando os seus resultados com métodos tradicionais como o critério de Mohr Coulomb e a abordagem do bloco rígido em numerosos casos de estudo. Os autores estudaram três casos típicos simplificados nos quais ocorre a ruptura dos taludes de rocha fraturada, os quais consideram as geometrias apresentada na Fig 3.6.

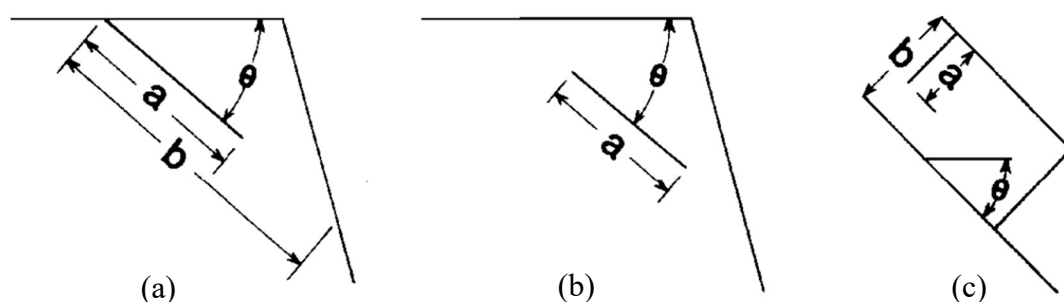


Figura 3.6 - Geometrias de taludes estudadas por Tharp & Coffin (1985). Taludes com (a) descontinuidade na borda do talude, (b) descontinuidade centrada, e (c) bloco deslizando num plano inclinado.

A simplicidade geométrica considerada pelos autores, fez possível que propuseram solução aproximada para o cálculo do SIF, empregando o critério de propagação no modo misto de Edrogon & Sih, para as condições que apresentaram modo I e II de forma simultânea, conseguindo avaliar o fator de segurança fundamentado na MFLE para cada caso. A abordagem fundamentada na MFLE foi comparada com outras metodologias concluindo que a solução proposta fornece uma predição de estabilidade mais ajustada com a observada nos casos de estudo.

Uma abordagem mais recente foi desenvolvida pelos autores Gao et al. (2017), quem propõem uma metodologia de avaliação de estabilidade que permite determinar o fator de segurança e a superfície de propagação da fratura em taludes fraturados, adotando como critério de propagação o SIF, avaliando com uma metodologia analítica-iterativa se a fratura se propaga, e a direção e comprimento de propagação, comparando os resultados com os obtidos em

modelagem numérico. Esta abordagem resulta interessante ao permitir a avaliação, da superfície de ruptura em geometrias de complexidade intermediária, empregando uma solução analítica-iterativa fundamentada na mecânica da fratura.

No trabalho de Wang et al. (2023) são empregados os critérios de propagação da fratura de Máximo arco de tensão e o critério de Máxima Tensão de Cisalhamento, para o início do fraturamento e o processo de propagação respectivamente. Esta abordagem segue o raciocínio iterativo de Gao et al. (2017) para a avaliação da direção e o comprimento de propagação, mas emprega a modelagem numérica em elementos finitos, estendendo a sua aplicação para geometrias complexas.

Os autores validam o comportamento a fratura da metodologia empregada modelando o ensaio de dupla entalha inclinada, conseguindo replicar a coalescência na propagação da fratura. Adicionalmente, os autores aplicam a metodologia na análise de estabilidade da escavação em várias etapas de um talude, concluindo na análise que a trajetória crítica de propagação ocorre no modo I e no modo misto nas diferentes configurações das pontes de rocha intacta.

Kou et al. (2024) empregaram o modelo “Discrete Fracture Network-Spring Based-Smoothed Particle Hydrodynamics” (DFN-SB-SPH) na análise de estabilidade de taludes, validando o comportamento na propagação da fratura do modelo no ensaio de compressão uniaxial com dupla entalha, comparando os resultados obtidos com a curva de tensão-deformação de uma amostra real. Os resultados na análise de estabilidade dos taludes com redes de descontinuidades discretas em cruzes, mostram a conformação de diferentes mecanismos de propagação ao longo do processo de fratura que acontecem em diferentes ângulos de mergulho e relações de comprimento dos sets de juntas.

Ainda que os autores não insiram de forma explícita o conceito de tenacidade a fratura, a validação do comportamento a fratura na comparação da curva de tensão de formação do ensaio real com o modelo do ensaio, é uma aproximação a teoria da Mecânica da Fratura, pelo que os resultados obtidos, tanto na calibração do material em escala laboratorial como a sua aplicação em escala de campo, resultam promissórios.

3.4 - TESSELAÇÃO DE VORONOI APLICADA NA ESTABILIDADE DE TALUDES

Uma tesselação é uma composição de formas geométricas que se encaixam sem deixar espaços vazios, podendo ser regulares ou não. A tesselação de Voronoi, composta por polígonos convexos descrita no Capítulo 4 - , tem sido empregada para modelar fenômenos em

taludes de diferentes tipos e em diferentes escalas, a capacidade de permitir o deslocamento relativo entre os blocos é aproveitada, dando flexibilidade ao seu uso. Pelo anterior o termo “blocos Voronoi” sofre uma reinterpretação a depender do problema modelado, nesta secção é feita a revisão de alguns dos casos nos quais a tesselação de Voronoi tem sido usada no contexto de estabilidade de taludes.

Um exemplo dessa versatilidade pode ser visto no estudo de Spreafico et al. (2017), que investigaram a evolução da estabilidade de taludes suscetíveis ao espalhamento lateral de rochas, na região do Plateau, em Rimini, Itália. Neste caso, a tesselação de Voronoi foi utilizada para representar a mesoestrutura do material intacto, que junto com uma rede de fraturas preexistentes usando o modelo DFN (Fracture Discrete Network) e o método FEM (Finite Element Method) no software Phase 2 modelaram o material rochoso.

Outro estudo relevante foi realizado por Lv et al. (2017), que aplicaram a tesselação de Voronoi para avaliar a criação e propagação de fraturas em taludes de rocha sob condições dinâmicas, como terremotos. Nesse trabalho, os blocos Voronoi representaram grandes blocos de rocha frágil, produzidos como parte dos mecanismos de ruptura que ocorrem durante um sismo. A tesselação de Voronoi foi aplicada em três dimensões, utilizando o método DEM no software "3 Dimensional Distinct Element Code" (3DEC). Esse estudo demonstrou como a tesselação de Voronoi pode ser eficaz para modelar a fragmentação e os deslocamentos resultantes de forças externas, como as causadas por terremotos.

De forma semelhante, Ji et al. (2024) também adotaram uma abordagem baseada no DEM para avaliar a estabilidade de taludes em condições dinâmicas. No entanto, o foco deste estudo foi a utilização de um modelo baseado em grãos, com a tesselação de Voronoi sendo incorporada na distribuição heterogênea das propriedades das partículas. Nesse caso, a técnica permitiu uma representação detalhada da variação na resistência e nas propriedades dos materiais constituintes, facilitando a análise da propagação de fraturas em taludes rochosos durante eventos sísmicos.

Em outro contexto, Mohanty et al. (2022) propuseram uma abordagem diferente, utilizando a tesselação de Voronoi e o DEM no software UDEC para simular os blocos presentes em depósitos de materiais de cobertura heterogêneos, típicos de minas de carvão. Nesse estudo, a heterogeneidade foi representada por meio de uma abordagem probabilística, tanto nos blocos quanto nas juntas, o que se mostrou útil na simulação dos contatos entre diferentes materiais presentes nos blocos. A aplicação da tesselação de Voronoi neste contexto mostrou-se eficaz

para modelar o comportamento mecânico de depósitos de materiais de cobertura, especialmente em termos de interação entre os blocos e a evolução das fraturas nas juntas de contato.

Em geral, a geometria da tesselação de Voronoi é uma poderosa ferramenta para representar a heterogeneidade e as interações complexas entre blocos em diferentes contextos. Ao permitir a modelagem precisa das superfícies de ruptura e da propagação de fraturas, essa abordagem pode ser aplicada na representação da mesoestrutura do material intacto, na simulação de grandes volumes de rocha fraturada por explosivos ou sismos, bem como na análise de materiais disgregados e outros cenários geotécnicos complexos.

4 - MODELO “CONTINUUM VORONOI BLOCK MODEL”

O modelo “Continuum Voronoi Block Model” (Soares et al. 2021), também conhecido como “Voronoi Tessellation Model” (VTM) (Amiri & Bahrani 2023) e “Continuum Grain based model” (CGBM) (Satheesh et al. 2024), é um modelo pseudodescontínuo que representa a mesoestrutura dos materiais a partir de um conjunto de blocos e juntas que seguem a geometria e distribuição da tesselação Voronoi. Este modelo é construído no software RS2, um software de análise 2D de elementos finitos, e aproveita as Redes de Fraturas Discretas (DFN) para gerar uma rede de juntas em formato de Voronoi dividem o material em blocos, ainda sobre um meio em princípio contínuo.

A implementação da tesselação Voronoi nos elementos finitos é feita usando as Juntas Goodman, que configuram polígonos fechados, sendo que a malha de elementos finitos é gerada no seu interior. As juntas Goodman, podem ser definidas como juntas abertas ou fechadas, condição que é refletida no deslocamento relativo entre os blocos, assim, sua escolha é função do problema a modelar. Estas juntas têm espessura zero e comprimento finito, sendo definidas pelas rigidezes normal e cisalhante, modificando o deslocamento entre blocos, e, portanto, em escala macro, a deformabilidade do corpo.

O software RS2 permite a definição da geometria da tesselação Voronoi com as variáveis de tamanho do lado ou densidade de blocos/área, que determina a quantidade de elementos no domínio e o tamanho deles, a junta aberta ou fechada, e a regularidade dos elementos. Na Fig. 4.1, é mostrado o princípio do modelo, sendo o caso mostrado uma geometria de regularidade média com junta definida aberta e fechada.

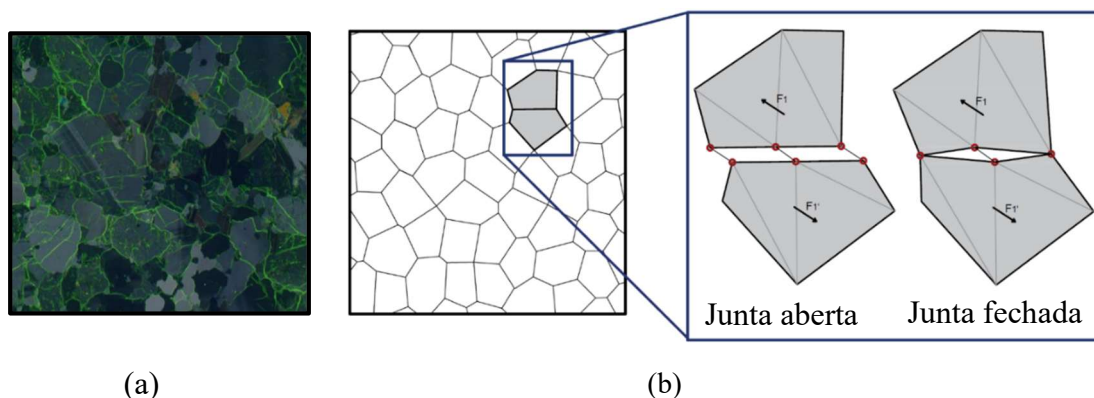


Figura 4.1 - Semelhança entre a estrutura do GLdB e a tesselação de Voronoi. (a) Petrografia polarizada e fluorescente do GLdB 4,15x4,15 mm (modificado de Åkesson, 2009) e (b) geometria da tesselação Voronoi de regularidade média e definição da junta aberta ou fechada do CVBM no software RS2.

No modelo CVBM, a deformabilidade e a resistência do corpo não são definidas de forma explícita, mas resultam das interações entre as juntas e os blocos, de maneira semelhante ao comportamento observado na microescala mineral. Satheesh et al. (2024) destacam, entre as vantagens do CVBM, a sua semelhança com a estrutura do material real, uma vez que a forma poligonal dos blocos gerados pela tesselação propicia o surgimento do fenômeno de arqueamento de tensões, condição favorável ao início e à propagação de fraturas (Lan et al. 2010).

Embora essa similaridade seja vantajosa para a representação do fenômeno de propagação de fraturas, ressalta-se que a presente pesquisa não busca representar explicitamente os processos na escala mineral. Contudo, procura-se aproveitar as vantagens proporcionadas pelo arqueamento de tensões, especialmente no que se refere à representação do fenômeno de concentração de tensões nas pontas das fraturas.

A geração da geometria Voronoi da tesselação do modelo CVBM parte de pontos chamados núcleos, posicionados aleatoriamente no plano, aos quais encontra-se atrelado cada polígono da tesselação. O seu domínio está dado por meio do cálculo da distância média entre cada ponto do espaço, sendo assim, cada ponto no domínio de um núcleo “i” é mais próximo a este do que a qual quiser outro núcleo “j”, dando como resultado polígonos convexos que preenchem o espaço (Bolander & Saito 1998). Na Figura 4.2 apresenta-se um esquema ilustrativo do funcionamento de geração da estrutura da tesselação.

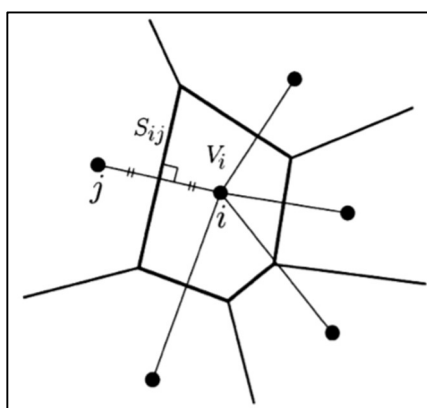


Figura 4.2 - Esquema do princípio de geração dos polígonos da tesselação Voronoi a partir dos núcleos (Bolander & Saito 1998)

A mecânica de geração da tesselação, junto à estruturação em elementos finitos dentro de um esquema de integração implícita, confere ao modelo uma eficiência computacional notável quando comparado a metodologias utilizadas para problemas semelhantes, como o DEM, conforme apontado por Valderrama (2023), Sanipour et al. (2022), Hamediazad &

Bahrani (2022), Soares et al. (2021) e Li & Bahrani (2021). Os resultados obtidos são promissores em diversas pesquisas relacionadas a obras subterrâneas que envolvem elevadas tensões insitu (Satheesh et al., 2024, Bahrani et al., 2023, Soares, 2021).

4.1 - CVBM E O FENOMENO DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES

Potyonndy & Cundall (2004) deduzem a relação existente entre a tenacidade a fratura no modo I e os Modelos Baseados em Grãos (GBM), empregando o modelo de partículas coladas (BPM). Os autores propõem a análise de uma placa com uma entalha com comprimento igual a metade da placa, e com espessura infinita, onde é possível definir as tensões em uma distância “r” próxima a ponta da fratura ($r \ll a$), a tensão normal é calculada pela Eq. 4.1,

$$\sigma_n = \sigma_f \sqrt{\frac{a}{2r}} \quad [4.1]$$

Onde:

σ_n : Tensão normal, resultado de uma carga aplicada de forma remota,

σ_f : Resistencia limite do contato entre partículas,

a : Metade do comprimento da fratura,

r : Raio medido desde a ponta da fratura.

Se for considerado um sistema equivalente composto por um arranjo de partículas coladas, com formato de disco de raio “R” e elementos de cola como é mostrado na Fig. 4.3, a força atuando no contato (F_n) está dada pela Eq. 4.2, considerando a distância $r = (2m - 1)R$ com “m” sendo um êntero que denota a sequência de posição das colas entre partículas.

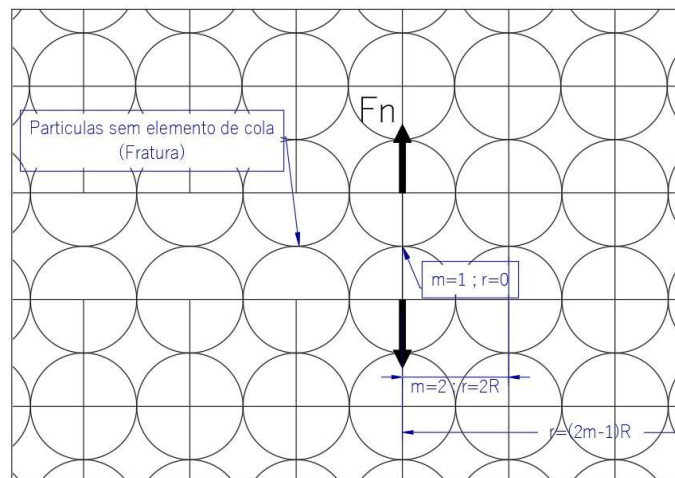


Figura 4.3 - Esquema do modelo e a formulação empregada por Potyonndy & Cundall (2004).

$$F_n = \int_{r-R}^{r+R} \sigma_n t \, dr \quad [4.2]$$

Se são combinadas as Eq. 4.1 e Eq. 4.2, e se resolve a integral, tem se a expressão da Eq. 4.3,

$$\begin{aligned} F_n &= \int_{r-R}^{r+R} \sigma_f \sqrt{\frac{a}{2r}} t \, dr = \sigma_f \sqrt{\frac{a}{2}} t \int_{r-R}^{r+R} \sqrt{\frac{1}{r}} \, dr = \sigma_f \sqrt{\frac{a}{2}} t \\ &= 2\sigma_f t \sqrt{aR} (\sqrt{m} - \sqrt{m-1}) \end{aligned} \quad [4.3]$$

Esta expressão tem seu máximo valor se $m=1$, portanto tem se a expressão da Eq. 4.4,

$$F_n^{max} = 2\sigma_f t \sqrt{aR} \quad [4.4]$$

Considerando que $K_I = \sigma_f \sqrt{\pi a}$, e inserindo este termo na Eq. 4.4, se obtém a Eq. 4.5,

$$F_n^{max} = 2tK_I \sqrt{\frac{R}{\pi}} \quad [4.5]$$

Se é considerada a resistência a tração direta que tem o corpo de partículas coladas sem considerar a concentração de tensões (σ_t'), esta será equivalente a força resistente por todas as colas (ϕ_n) distribuída na seção $\sigma_t' = \phi_n / 2Rt$. Adicionalmente, em uma condição limite, a força máxima F_n^{max} tende a atingir a resistência da cola ϕ_n da partícula mais próxima a ponta da fratura, portanto $F_n^{max} = \phi_n$ e $K_I = K_{Ic}$, assim substituindo na Eq. 4.5 obtém se finalmente a expressão na Eq. 4.6,

$$K_{Ic} = \sigma_t' \sqrt{\pi R} \quad [4.6]$$

Desta forma, os autores demonstram a capacidade de metodologias baseadas em grãos para seguir o comportamento dos materiais na fratura, onde o raio das partículas (R) e a variável que influi diretamente nesta relação.

Se bem o CVBM não está constituído explicitamente por partículas, sua estrutura poligonal faz com que as juntas cumpram a função de elementos de cola, e, portanto, seguiria a relação encontrada com modificações próprias da geometria do método que agora, não considera discos alinhados em quadricula e elementos de cola, e sim considera polígonos com juntas.

Esta relação tem sido verificada com o modelo Lattice de corpos rígidos unidos por redes de molas (RBSN) (Rasmussen, 2021) que emprega a tesselação de Voronoi no trabalho

de Rasmussen & Min, (2024). Os autores usam o ensaio CCT para demonstrar a relação entre a tenacidade a fratura no modo I e o tamanho dos blocos Voronoi como é mostrado na Fig. 4.4.

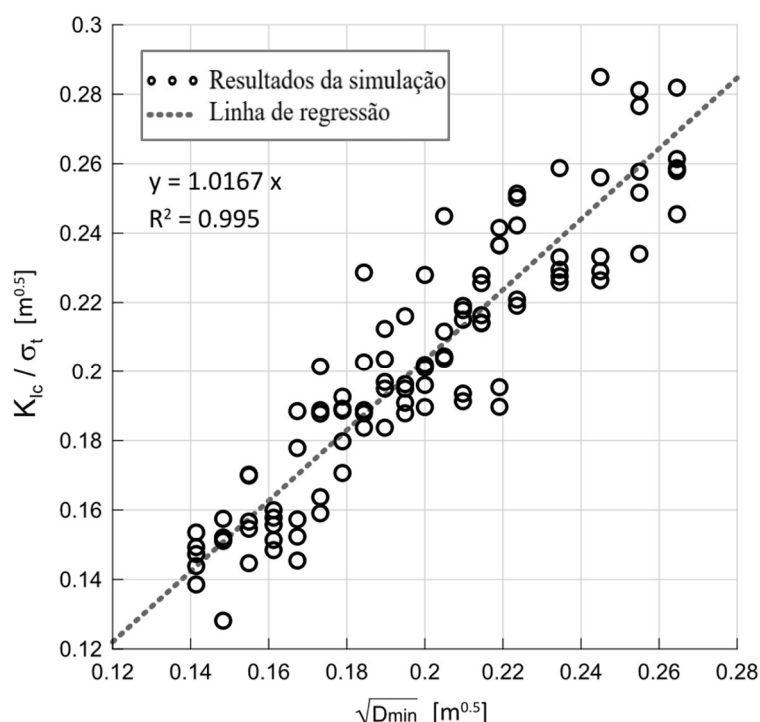


Figura 4.4 - Variação da tenacidade a fratura no modo I normalizada pela resistência a tração do material intacto V.S. a raiz do diâmetro mínimo das células (modificado de Rasmussen & Min 2024)

A capacidade de controlar a tenacidade a fratura no modo I (K_{Ic}) mantendo a resistência a tração do material intacto (σ_t) constante é o que faz que os modelos baseados em grãos apresentem as maiores vantagens ao se aproximar aos problemas de propagação da fratura, significando a possibilidade de calibrar materiais que cumpram os dois critérios de forma simultânea. Esta característica, e a possibilidade de ser implementada com uma maior eficiência computacional que outras metodologias, faz interessante o uso do modelo CVBM para modelar fenômenos de propagação de fratura.

4.2 - VARIÁVEIS ENVOLVIDAS

A natureza pseudodescontínua e a estruturação em elementos finitos do CVBM fazem com que o modelo inclua variáveis de deformabilidade e resistência relacionadas tanto ao material dos blocos de Voronoi quanto às juntas de Goodman e sua geometria. O resultado da interação entre essas variáveis determina o comportamento em escala macro do material, podendo tornar confuso o efeito de cada variável em um processo de calibração.

Considerando a quantidade de variáveis envolvidas, o material dos blocos de Voronoi foi considerado neste trabalho elástico de alta rigidez, reduzindo as variáveis que influenciam

as propriedades deformacionais e de resistência em escala macro. Adicionalmente, como descrito com anterioridade, diversos modelos GBM têm demonstrado que o tamanho do bloco influencia nas propriedades de propagação de fratura. Neste capítulo, essa influência é aproveitada para a calibração da tenacidade à fratura no modo I do material, tornando o tamanho da célula Voronoi e seu formato em variáveis de calibração.

As considerações adotadas para os blocos Voronoi reduzem as variáveis envolvidas no modelo, sendo definido desta forma pelas propriedades das juntas, as quais tem o critério de resistência de Mohr-Coulomb, e cuja deformabilidade é definida pelas variáveis de rigidez normal, e rigidez cisalhante. Neste capítulo, o efeito individual destas variáveis é apresentado, visando esclarecer o seu papel na metodologia de calibração dos parâmetros considerados, tais como o módulo de Young, coeficiente de Poisson, resistência à tração e tenacidade à propagação da fratura no modo I.

4.2.1 - RIGIDEZ NORMAL E CISALHANTE

Os parâmetros de rigidez normal (K_n) e rigidez cisalhante (K_s) das juntas do modelo CVBM, constituem os parâmetros de deformabilidade em escala macro, funcionando na junta como os coeficientes elásticos de elementos de mola que permitem o deslocamento relativo entre os blocos Voronoi, seja em sobreposição dos blocos, por efeito de força compressivas, afastando os blocos, por efeito de forças de tração, ou distorcendo o contato, por efeito de forças opostas paralelas agindo sobre a junta Goodman em cada bloco.

Com maiores valores absolutos dos parâmetros K_n e K_s , os deslocamentos normais e distorcivos são reduzidos, esta redução é evidenciada com o incremento do módulo de Young, portanto, a relação entre as variações de K_n e K_s é o módulo de Young é direta. Se bem o câmbio do valor em uma destas variáveis mantendo a outra constante tem efeito no módulo de Young, no processo de calibração de materiais se recomenda se manter fixa uma relação entre as variáveis, fazendo incrementos ou redução dos dois coeficientes de forma simultânea entre iterações.

Na literatura, frequentemente é adotada a notação " K_n/K_s " que descreve a relação destes parâmetros. Maiores valores de K_n/K_s significam a dominância da rigidez normal sobre a cisalhante, incrementando o protagonismo dos deslocamentos distorcivos nas juntas, seu efeito é evidenciado em escala macro com o incremento do coeficiente de Poisson, no entanto, menores valores na relação implicam a dominância dos deslocamentos normais entre as juntas

estando diretamente relacionada com as deformações volumétricas, reduzindo o coeficiente de Poisson, assim, a relação K_n/K_s guarda uma relação direta com o coeficiente de Poisson.

4.2.2 - CRITÉRIO DE RESISTÊNCIA

Como foi mencionado, o critério de resistência adotado para as juntas foi a envoltória de Mohr- Coulomb, portanto a resistência das juntas é definida pela coesão, ângulo de atrito e resistência a tração com seus valores pico e residuais. Considerando os materiais rochosos não recuperam a resistência no contato de juntas que já foram fraturadas e que o modo I de propagação de fratura afasta as faces da fratura gerada, foi considerado aceitável negligenciar a resistência residual na envoltória de resistência.

Conforme mencionado por Soares et al. (2021), no software RS2, quando são aplicadas redes de fraturas discretas no formato da tesselação Voronoi, e as juntas rompem pelo critério de "Tension Cut off" no critério de resistência ao cisalhamento de Mohr-Coulomb, ocorre um efeito de reconstituição das juntas quando as cargas que romperam a junta são reduzidas ou o mecanismo de ruptura leva a aparição de tensões compressivas.

O efeito de reconstituição de juntas também foi observado neste processo de calibração e foi considerado indesejável para modelar o fenômeno estudado, pois impede a propagação da fratura em uma superfície contínua. Para lidar com a reconstituição da junta o autor propõe o uso de valores altos no parâmetro de resistência a tração. Essa medida evita a ruptura do material pelo critério de "Tension Cut off", garantindo que todas as fraturas, inclusive as produzidas por tensões de tração, ocorram pela envoltória de resistência de Mohr Coulomb. Essa solução foi a adotada na calibração do material.

4.2.3 - TAMANHO DOS BLOCOS VORONOI

Como foi descrito no começo deste capítulo, em diversos modelos baseados em grãos estruturados em metodologias de elementos discretos, tem sido observado que o tamanho do grão tem efeito na distribuição de tensões e, portanto, se torna em uma variável adicional para considerar. Em cenários de propagação da fratura, a aparição da variável do tamanho de grão tem sido interpretada como uma vantagem dos modelos GBM ao evidenciar a existência de uma relação direta entre o tamanho do grão e a tenacidade a fratura no modo I.

Nesta pesquisa é empregada a relação entre essas variáveis para avaliar se o modelo CVBM, estruturado sobre elementos finitos, tem a capacidade de replicar o comportamento observado em GBMs. Sendo que o tamanho do bloco é uma das variáveis que define a rede de descontinuidades Voronoi no software RS2, esta avaliação requer de um processo iterativo

no qual diferentes tamanhos são avaliados, contribuindo na construção de uma curva semelhante à mostrada na Fig. 4.4, permitindo assim estabelecer o valor do tamanho de grão que calibra a tenacidade a fratura no modo I.

No processo iterativo as limitações computacionais impedem a aplicação de um grande número de elementos. Da mesma forma, as variações próprias dos GBM fazem necessário um número mínimo de elementos na seção para controlar a dispersão do comportamento do material. Trabalhos como os desenvolvidos por Potyondy & Cundall, (2004), Li & Bahrani (2021) e Sanipour et al. (2022), sugerem tamanhos da amostra que garantam o mínimo de 10 unidades de elementos na menor dimensão do corpo, vista a reduzir o efeito da variação do comportamento individual de cada bloco.

Assim, procurando manter um mínimo de elementos na seção transversal, e manter corpos de prova em diferentes escalas que sejam computacionalmente viáveis, foram avaliados corpos de prova que acompanham a taxa de câmbio na escala dos blocos Voronoi. Esta consideração garantiu que em todos os tamanhos de blocos Voronoi avaliados no processo de calibração o número de blocos Voronoi na seção fosse de entre 20 até 25 blocos, sendo computacionalmente viável e garantindo estabilidade nos resultados.

4.2.4 - ALGORITMO DE CALIBRAÇÃO PROPOSTO

Com o objetivo de definir os parâmetros a serem calibrados no estudo, foram consideradas as condições de tensão típicas em que ocorre a ruptura de taludes em rocha fraturada. Conforme mostrado no Capítulo 3, os diferentes mecanismos estudados ocorrem principalmente no modo I de propagação de fratura, ou em uma mistura entre o modo I e o modo II.

A fim de se aproximar ao problema com uma abordagem fundamentada na MFLE, o material foi calibrado o modo I de propagação da fratura, sendo que o comportamento no modo II é negligenciado no processo de calibração, mas é estudado posteriormente no Capítulo 6. Dessa forma, os parâmetros de deformabilidade, resistência à tração e a tenacidade à fratura no modo I foram definidos como os parâmetros de calibração objetivo.

Nesse sentido, modelaram-se ensaios de compressão simples, com os quais foi calibrado o módulo de Young e o coeficiente de Poisson do material, o ensaio de tração direta foi modelado com o objetivo de calibrar a resistência tração limite e, por fim, a tenacidade à propagação da fratura do material, característica atrelada ao tamanho do bloco Voronoi

avaliado, foi avaliada com o ensaio “Center Cracked Tension”. O algoritmo de calibração é apresentado na Fig. 4.4.

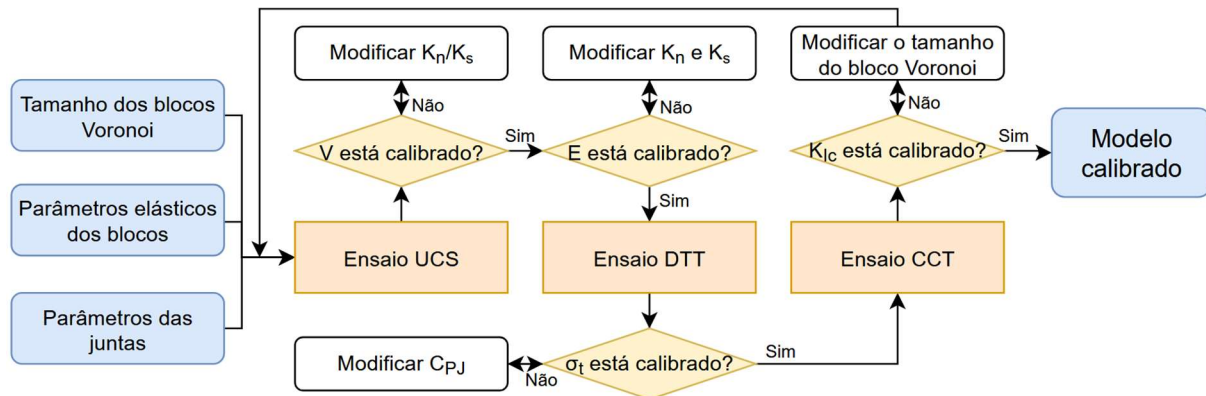


Figura 4.5 - Algoritmo de calibração da tenacidade a fratura empregando o modelo CVBM.

Pela natureza das metodologias baseadas em partículas coladas, nas quais as propriedades de resistência e de deformação não são estabelecidas de forma direta, mas são o resultado das propriedades das juntas e partículas, este algoritmo é aplicado de forma iterativa até se aproximar em uma grandeza aceitável na média de uma amostra, é importante mencionar que os câmbios no tamanho do bloco Voronoi, implicaram também um câmbio no tamanho da amostra, como foi descrito com anterioridade neste mesmo capítulo.

5 - CALIBRAÇÃO DO MATERIAL

5.1 - APRESENTAÇÃO DO MATERIAL DE ESTUDO

Para este estudo, foi buscado representar o comportamento do Granito Lac du Bonnet (GldB), um material amplamente estudado por Martin (1994), extraído no sudeste da província de Manitoba, Canadá, pelo "Underground Research Laboratory" (URL). A vasta quantidade de informações sobre as características deste material faz com que seja uma opção atraente para ser utilizado em trabalhos de pesquisa de modelagem, como os desenvolvidos por Lan et al. (2010), Ghazvinian et al. (2014), Soares et al. (2021) e Rasmussen & Min (2024).

Os parâmetros que descrevem o comportamento mecânico do material são mostrados na Tab. 5.1. Os valores de módulo de Young, coeficiente de Poisson, resistência a tração e tenacidade a fratura no modo I aqui mostrados, foram os valores objetivo no processo de calibração. Adicionalmente, os valores de ângulo de atrito, coesão, e resistência a tração, foram os empregados na definição das análises com os métodos de equilíbrio limite, e o método de tensão deformação com o modelo Mohr Coulomb Elastoplástico, usados para a comparação dos resultados.

Tabela 5.1 - Parâmetros do material GldB empregados na calibração e nos modelos de comparação (Martin 1994).

Parâmetro	Valor	Desv. Est.	n
Módulo de Young	69 GPa	± 5.8 GPa	81
Coeficiente de Poisson	0.26	± 0.04	81
Resistência a tração pico	6.9 MPa	-	-
Tenacidade a fratura (K_{Ic})	$1.82 \text{ MPa.m}^{0.5}$	$\pm 0.08 \text{ MPa.m}^{0.5}$	5
Ângulo de atrito	59°	-	-
Coesão	30 MPa	-	-

5.2 - CALIBRAÇÃO DE DEFORMABILIDADE E RESISTÊNCIA A TRAÇÃO

Por ser parte de um processo iterativo com variação no tamanho do bloco, os valores de K_n e K_s que calibram a deformabilidade e resistência a tração também variam. Na primeira iteração foi encontrado que o valor de K_n/K_s de 3,4 calibrou o módulo de Young e o coeficiente de Poisson, este valor foi mantido ao longo das seguintes iterações, sendo comprovado que este valor foi adequado em outras escalas de blocos Voronoi. Com a consideração de blocos elásticos de alta rigidez, o efeito da deformabilidade do bloco foi negligenciado, portanto a deformabilidade macro foi função das juntas Goodman. Assim, os valores de K_n e K_s que calibraram os parâmetros de deformabilidade para cada tamanho do lado do bloco são mostrados na Fig. 5.1.

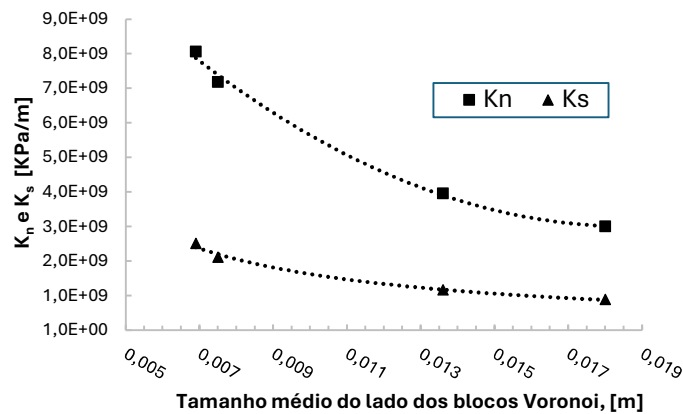


Figura 5.1 - Valores de K_n e K_s que calibram os parâmetros de deformabilidade para cada tamanho de lado de bloco Voronoi avaliado como parte do processo de calibração

Uma vez calibrada a deformabilidade do corpo, também foi ajustada a resistência no ensaio de tração direta. Para isso, na definição dos parâmetros da envoltória de resistência de Mohr-Coulomb, estabeleceu-se um valor elevado para a resistência à tração, com o objetivo de evitar o fenômeno de reconstituição das juntas e induzir a ruptura pela envoltória de cisalhamento.

5.3 - CALIBRAÇÃO DA TENACIDADE A FRATURA NO MODO I

O material obtido do processo de calibração para cada tamanho de bloco Voronoi, foi avaliado no ensaio CCT, os resultados de K_{Ic} em cada tamanho avaliado são mostrados na Fig. 5.2.

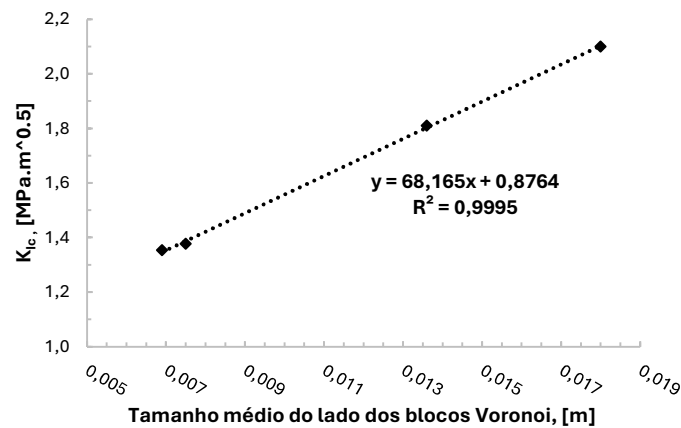


Figura 5.2 - Relação entre o tamanho do bloco Voronoi e a tenacidade a fratura obtida com o modelo no ensaio CCT.

A curva da Fig. 5.2, permite identificar o tamanho do bloco que leva à tenacidade a fratura no modo I do material, mediante a regressão, foi determinado que para calibrar a tenacidade a fratura no modo I do material de estudo Granito Lac du Bonnet no valor objetivo de $1,82 \text{ MPa.m}^{0.5}$ é necessário o tamanho de lado do bloco de 0,0136 m. O valor teórico foi

avaliado, passando pelo processo de calibração e obtendo os resultados apresentados na Tab. 5.2.

Tabela 5.2 - Propriedades do material Granito Lac du Bonnet (Martin, 1994) e propriedades do material calibrado empregando CVBM.

Variável por calibrar	Valor laboratorial	Desv. Est.	n	Valor obtido com o modelo	Desv. Est.	n
Módulo de Young	69.0 GPa	±5.8 GPa	81	69.1 GPa	±0.4 GPa	5
Coefficiente de Poisson	0.26	±0.04	81	0.263	±0.003	5
Resistência a tração pico	6.9 MPa	-	-	6.90 MPa	±0.07 MPa	5
Tenacidade no modo I	1.82 MPa.m ^{0.5}	±0.08 MPa.m ^{0.5}	5	1.79 MPa.m ^{0.5}	±0.09 MPa.m ^{0.5}	5

Os valores dos parâmetros do modelo que calibraram o material de estudo são mostrados na Tab. 5.3.

Tabela 5.3 - Parâmetros que calibram o material de estudo GLdB com o modelo CVBM.

Elemento	Y [kN/m ³]	v	E [kPa]	Critério de resistência	K _n [kPa/m]	K _s [kPa/m]	σ _{tpj} [kPa]	C _{pi} [kPa]	φ _{pi} [°]	σ _{tr} [kPa]	C _{ri} [kPa]	φ _{ri} [°]
Blocos Voronoi	26.7	0	6.90E+17	Mohr Coulomb Elástico	-	-	-	-	-	-	-	-
Juntas	-	-	-	Mohr Coulomb Elastoplástico	3.95E+09	1.162E+09	2.00E+20	13800	45°	0	0	35°

A superfície de propagação obtida no ensaio CCT do material calibrado do GLdB é mostrada na Fig. 5.5.

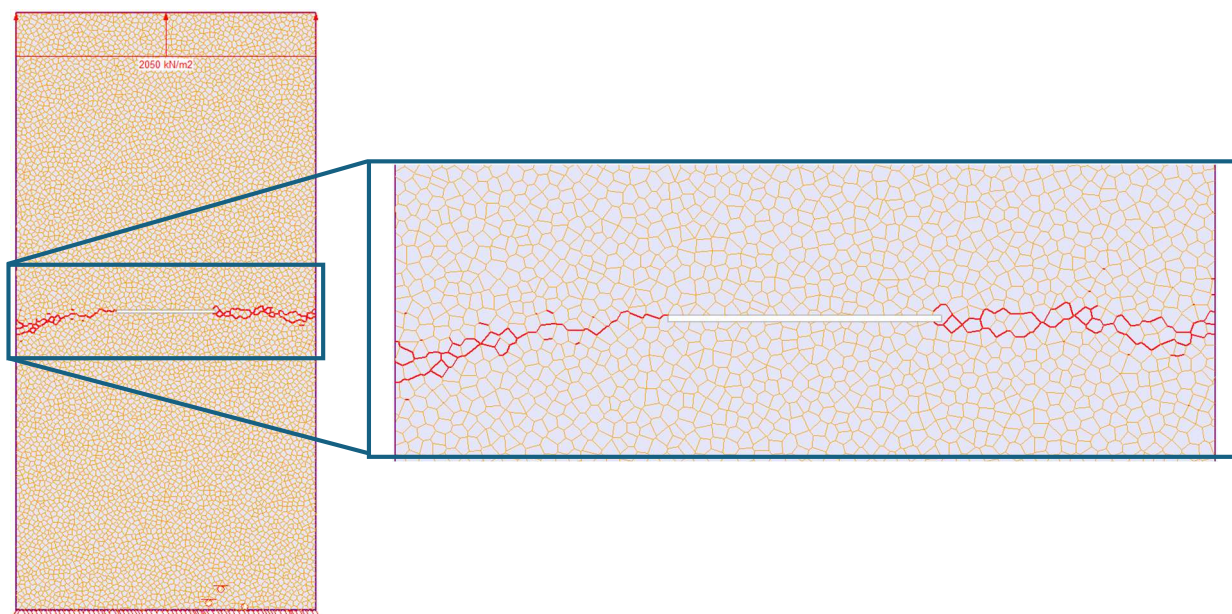


Figura 5.3 - Superfície obtida no ensaio CCT com o modelo do material calibrado do GLdB

Com esta geometria da tesselação Voronoi, a tenacidade a fratura no modo I do corpo foi de $1,86 \text{ MPa.m}^{0.5}$, no entanto, a natureza do modelo faz que os seus resultados apresentem variações em função da distribuição e arranjo dos blocos, para cobrir essas variações, a tenacidade foi avaliada com 5 modelos de corpos de prova no ensaio CCT, obtendo o valor médio de $K_{Ic} = 1.79 \text{ MPa.m}^{0.5} \pm 0.09 \text{ MPa.m}^{0.5}$.

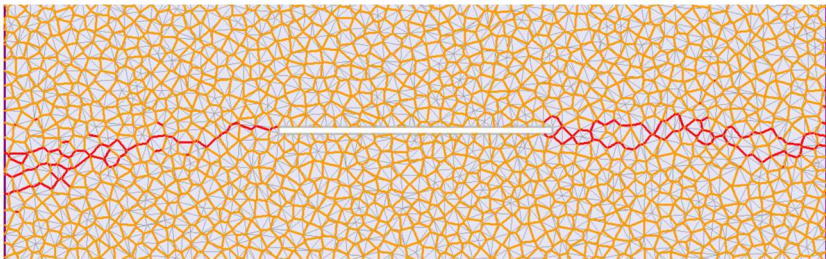
5.4 - ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

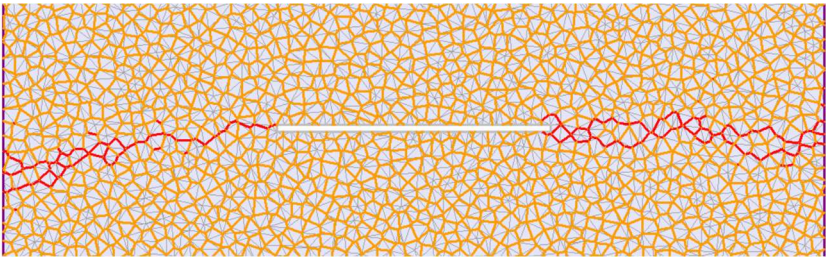
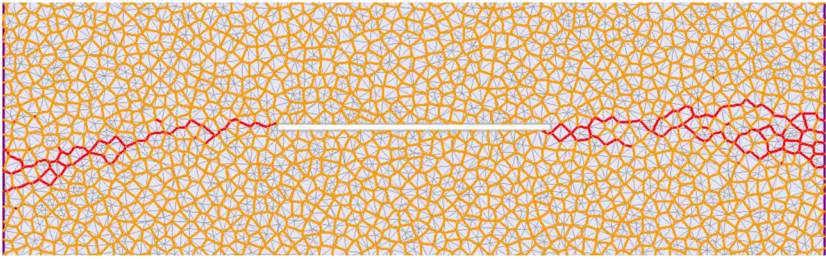
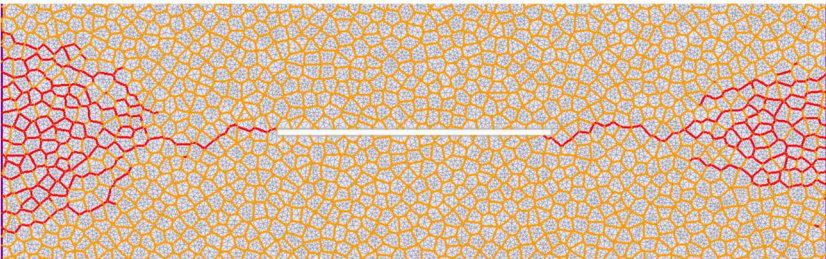
Como foi descrito no Capítulo 4, os blocos Voronoi do CVBM estão estruturados no programa RS2 de elementos finitos. Embora que os blocos sejam considerados elásticos de alta rigidez para negligenciar sua participação na deformação e fratura do corpo, esta seção avalia se o tamanho dos elementos finitos no interior dos blocos tem efeito na tenacidade à propagação da fratura. Para isto, foram feitos ensaios CCTs, utilizando malhas de elementos finitos triangulares de três nos, com diferentes tamanhos de lado.

Para o material calibrado, com blocos Voronoi de 0.0136 m de lado médio, constatou-se que malha com menor quantidade de elementos possíveis tem elementos do redor de 0.03 m, adotando-se este como o tamanho máximo para esta comparação. Já o tamanho mínimo avaliado foi de 0.01 m, considerando que tamanhos menores não são relevantes para o problema modelado, sendo pouco prático devido ao alto custo computacional.

Os resultados dos corpos de prova na ruptura e sua resistência última par uma mesma rede Voronoi são mostrados na Tab. 5.4.

Tabela 5.4 - Sensibilidade da tenacidade a fratura no modo I respeito ao tamanho dos elementos da malha do FEA.

Tamanho dos elementos [m]	K_{Ic} [MPa.m ^{0.5}]	Condição da ruptura
0.03	1.86	

Tamanho dos elementos [m]	K_{Ic} [MPa.m ^{0.5}]	Condição da ruptura
0.02	1.86	
0.015	1.86	
0.01	1.81	

Observaram-se superfícies de propagação semelhantes nos tamanhos de 0,03 m, 0,02 m e 0,015 m, nas quais a tenacidade à fratura obtida permaneceu constante. No modelo com elementos finitos de 0,01 m, a superfície de fratura apresentada foi distinta, exibindo uma distribuição mais ampla nos cantos, acompanhada por uma redução na tenacidade. As variações encontradas não são consideradas um inconveniente, pois, conforme mencionado, os tamanhos reduzidos dos elementos do FEA não são de interesse para o problema estudado.

Considerando que os blocos Voronoi estão compostos por elementos finitos, o tamanho máximo dos elementos está limitado pelo tamanho do bloco Voronoi. Embora que um baixo número de elementos gere modelos mais leves e rápidos computacionalmente, a geometria da rede de elementos finitos produzida com estas condições pode gerar deficiências na qualidade de malha e problemas na convergência dos modelos ao propiciar a configuração de elementos esbeltos como é mostrado na Fig. 5.4a.

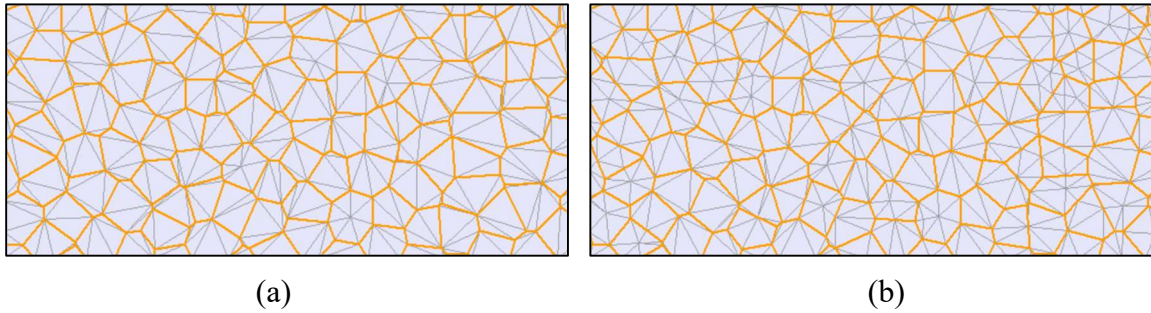


Figura 5.4 - Malha de elementos finitos gerada com elementos de (a) 0.03m e (b) 0.015m.

Este problema pode ser prevenido reduzindo o tamanho do elemento de forma que os elementos da malha se tornam mais regulares (Fig. 5.4b), tamanhos de elementos muito reduzidos são pouco práticos pois geram modelos mais pesados e custosos computacionalmente, sem apresentar vantagens adicionais significativas.

5.5 - RESULTADOS DOS ENSAIOS COMPLEMENTARES NO MODO I

A calibração do material foi feita empregando o ensaio CCT, que submete a fratura a propagação no modo I puro em condições de carga perpendiculares a fratura. Nesta seção são avaliados os ensaios complementários descritos na Seção 2.3, onde as condições de contorno induzem nos corpos de prova tração indireta e tração por flexão. Estes ensaios buscaram comparar as tenacidades obtidas destes ensaios como validação do comportamento do modelo calibrado no modo I de propagação de fratura em diferentes condições de carga.

5.5.1 - RESULTADOS DO ENSAIO CSTBD NO MODO I

Considerando que a concentração de tensões em proximidade do ponto de carga e o ponto de apoio não é uma variável desejada nem contemplada na equação empregada, procurando evitar a ruptura pontual de elementos, empregaram-se juntas elásticas (de cor verde) com uma espessura aproximada de 2 blocos Voronoi. Estas juntas facilitam a distribuição de tensões e possuem as mesmas propriedades de deformabilidade. A superfície de propagação encontrada é mostrada na Fig. 5.5.

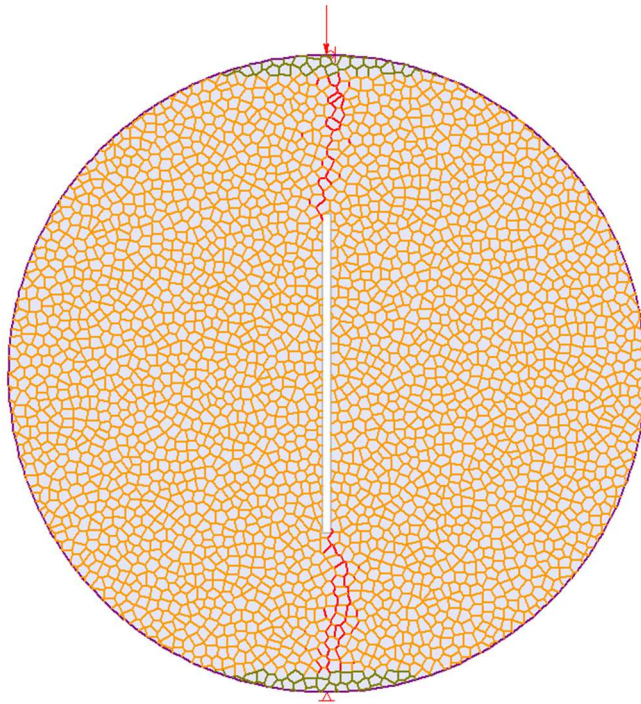


Figura 5.5 - Superfície obtida no ensaio CSTBD com o modelo do material calibrado

Neste ensaio, a tenacidade a fratura obtida foi de $1.76 \text{ MPa.m}^{0.5} \pm 0.07 \text{ MPa.m}^{0.5}$.

5.5.2 - RESULTADOS DO ENSAIO SCB NO MODO I

De forma similar ao ensaio anterior, empregaram-se juntas elásticas em proximidade ao ponto de aplicação da carga com uma espessura aproximada de 1 bloco Voronoi para evitar a fratura pontual de elementos (de cor verde). Neste ensaio também foram mantidas as propriedades deformacionais. A superfície de propagação encontrada é mostrada na Fig. 5.6.

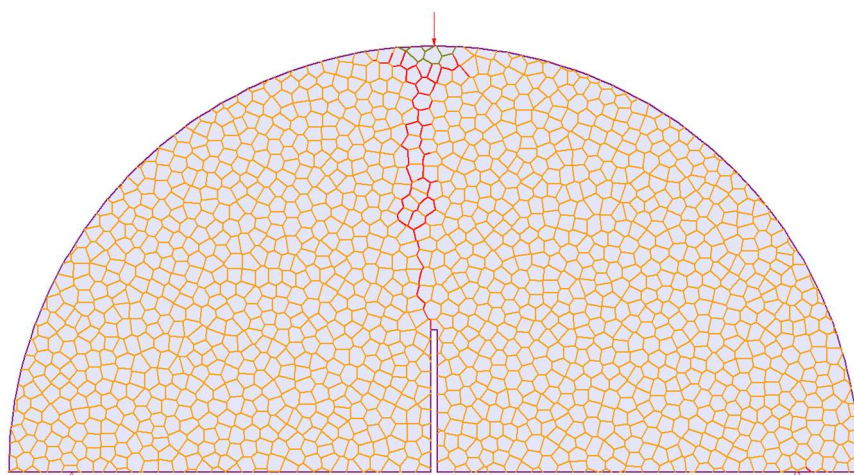


Figura 5.6 - Superfície obtida no ensaio SCB com o modelo do material calibrado.

Neste ensaio a tenacidade a fratura obtida foi de $1.75 \text{ MPa.m}^{0.5} \pm 0.08 \text{ MPa.m}^{0.5}$.

5.6 - CONCLUSÕES PARCIAIS

Comprovou-se que é possível aplicar a mecânica da fratura linear elástica com o modelo CVBM, após a calibração bem-sucedida da deformabilidade, resistência à tração e tenacidade no modo de propagação I, para o material de estudo. A capacidade do modelo CVBM de replicar as trajetórias esperadas com diferentes condições de contorno no modo I foi verificada nos ensaios CSTBD e SCB, dando como resultado superfícies contínuas, e orientadas de acordo ao esperado para as condições dos ensaios.

O conjunto de ensaios para avaliar a tenacidade no modo I, fornecem valores de K_{Ic} de 1.79 MPa.m^{0.5} (CCT), 1.76 MPa.m^{0.5} (CSTBD) e 1.75 MPa.m^{0.5} (SCB) com desvios padrão que cobrem as diferenças entre esses valores. O anterior indica que embora que as condições de contorno empregadas nos ensaios para a avaliação da tenacidade tenham mudado, a tenacidade a fratura no modo I puro mantém seu valor, refletindo um excelente comportamento do modelo em escala laboratorial.

A sensibilidade ao tamanho dos elementos finitos no processo de fratura foi verificada, encontrando estabilidade nos tamanhos achados convenientes para a modelagem. Embora tenham surgido diferenças nos resultados obtidos com o menor tamanho de elemento avaliado, estas são atribuídas à mudança no algoritmo de convergência e não implicam sensibilidade do método ao tamanho do elemento em processos de fratura.

6 - COMPORTAMENTO DO MATERIAL NO MODO MISTO

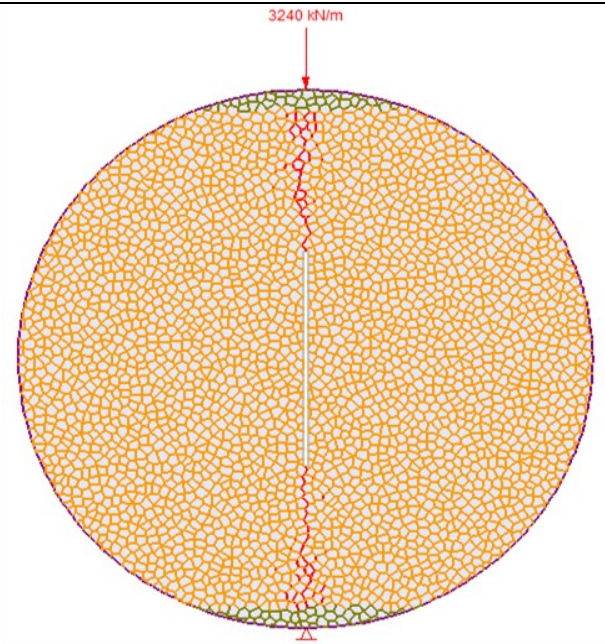
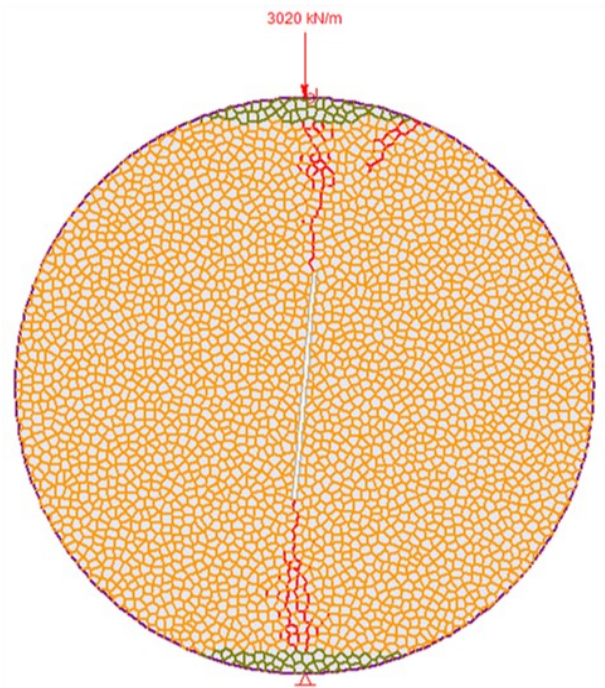
Conforme descrito no Capítulo 2, os mecanismos de propagação da fratura ocorrem por meio dos modos fundamentais de propagação ou de uma combinação deles. Nos taludes de rocha fraturada, os estados de tensões na seção transversal dependem dos mecanismos de ruptura aos que sejam suscetíveis, como foi mostrado no Capítulo 3. Alguns dos mecanismos típicos envolvem tanto tensões normais como cisalhantes, sendo dominante o modo misto dos modos I e II.

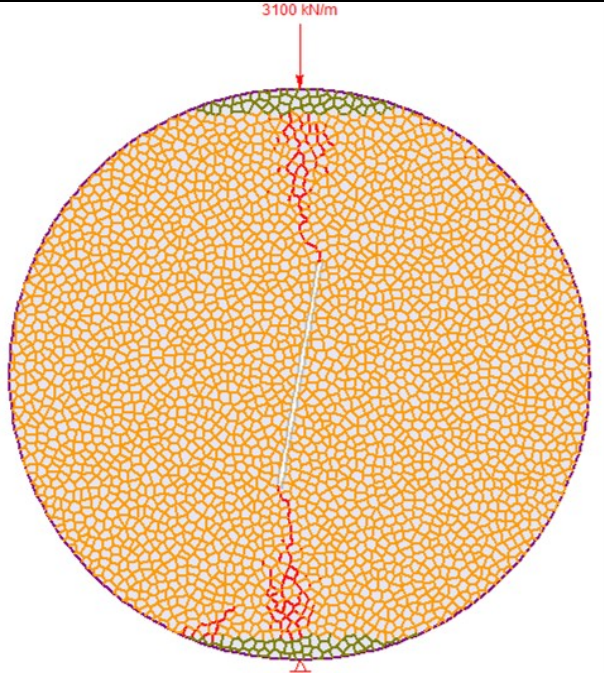
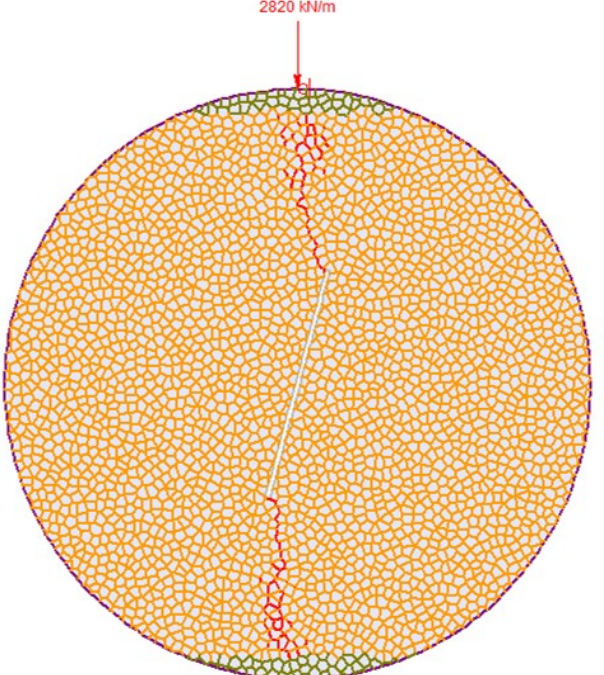
Neste capítulo, o material que foi calibrado na sua tenacidade á fratura no modo I, utilizando o modelo CVBM, avalia-se sob distintas configurações de carregamento que podem levar a sua ruptura no modo misto. Para isso, são empregados modelos dos ensaios SCB e CSTBD com entalha inclinada e a simplificação da condição de contorno da placa com entalha inclinada, que contam com a possibilidade de avaliar o SIF no modo I e II, permitindo encontrar as envoltórias de propagação, servindo como uma abordagem para compreender o modo misto de propagação de fratura no método estudado.

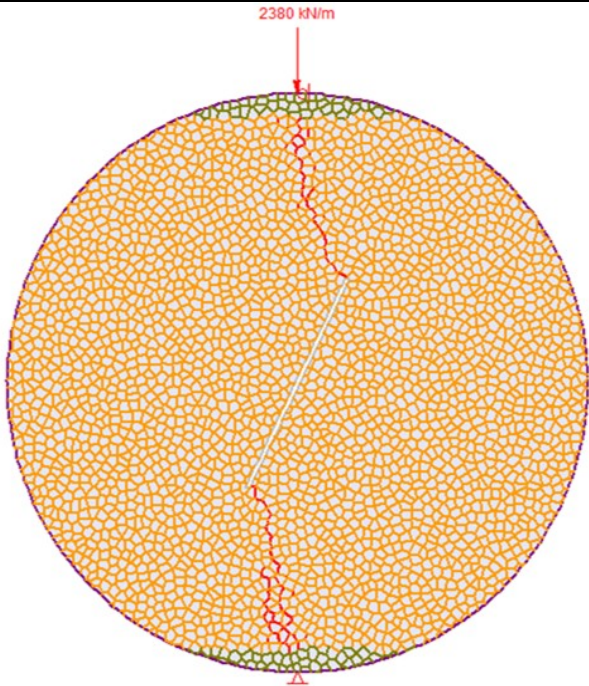
6.1 - RESULTADOS DO ENSAIO CSTBD COM FRATURA INCLINADA

Os valores dos SIF encontrados na ruptura para cada ângulo de inclinação da entalha, assim como as superfícies de propagação obtidas são mostradas na Tab. 6.1. Procurando evitar o fraturamento por carregamento pontual nos pontos de aplicação da carga e nos apoios, mecanismo que não está previsto nas condições do ensaio, empregaram-se elementos de junta elásticas com uma espessura aproximada de 2 blocos Voronoi, com as mesmas características deformacionais.

Tabela 6.1 - Resultados das superfícies obtidas no ensaio CSTBD com fratura inclinada.

β	K_I [MPa.m ^{0.5}]	K_{II} [MPa.m ^{0.5}]	Superfície de fratura
0°	1,75	0,00	
5°	1,47	0,65	

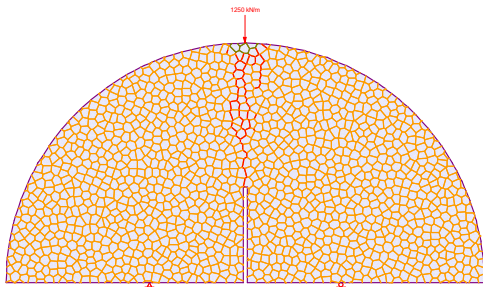
β	K_I [MPa.m ^{0.5}]	K_{II} [MPa.m ^{0.5}]	Superfície de fratura
10°	1,34	1,34	
15°	0,92	1,83	

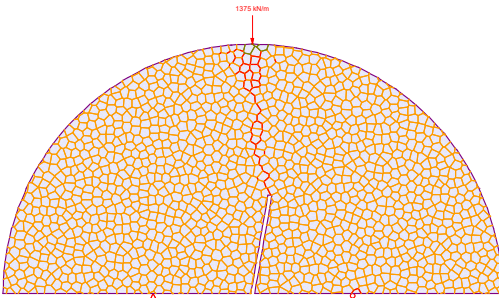
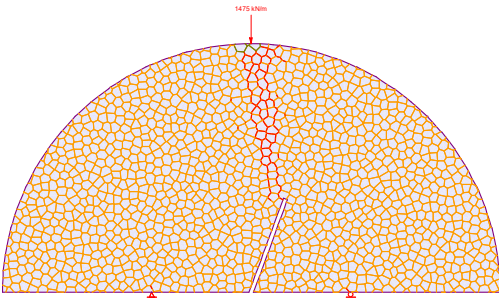
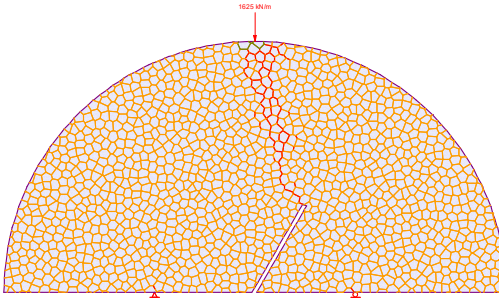
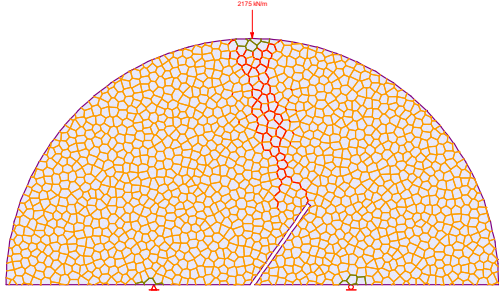
β	K_I [MPa.m ^{0.5}]	K_{II} [MPa.m ^{0.5}]	Superfície de fratura
25,4°	0,00	2,06	

6.2 - RESULTADOS DO ENSAIO SCB COM ENTALHA INCLINADA

Os valores dos SIF encontrados na ruptura para cada ângulo de inclinação da entalha, assim como as superfícies de propagação obtidas são mostradas na Tab. 6.2. De forma semelhante ao ensaio anterior, procurando evitar o fraturamento por carregamento pontual nos pontos de aplicação da carga e nos apoios, mecanismo que não está previsto nas condições do ensaio, empregaram-se elementos de junta elásticas com uma espessura aproximada de 1 bloco Voronoi com as mesmas características deformacionais.

Tabela 6.2 - Resultados das superfícies obtidas no ensaio SCB com entalha inclinada.

β	K_I [MPa.m ^{0.5}]	K_{II} [MPa.m ^{0.5}]	Superfície de fratura
0°	1,86	0,00	

β	K_I [MPa.m ^{0.5}]	K_{II} [MPa.m ^{0.5}]	Superfície de fratura
10°	1,69	0,53	
20°	1,25	0,94	
30°	0,48	1,24	
35°	0,00	2,40	

6.3 - RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE CONTORNO DA PLACA COM ENTALHA INCLINADA

Nas condições de contorno da PEI, torna-se desafiador obter superfícies de propagação completas, uma vez que a ruptura ocorre de maneira imediata e numericamente instável. Esta condição resulta em superfícies visíveis apenas nos momentos iniciais da propagação. A limitação mencionada está relacionada com a aplicação de carregamentos nos dois eixos

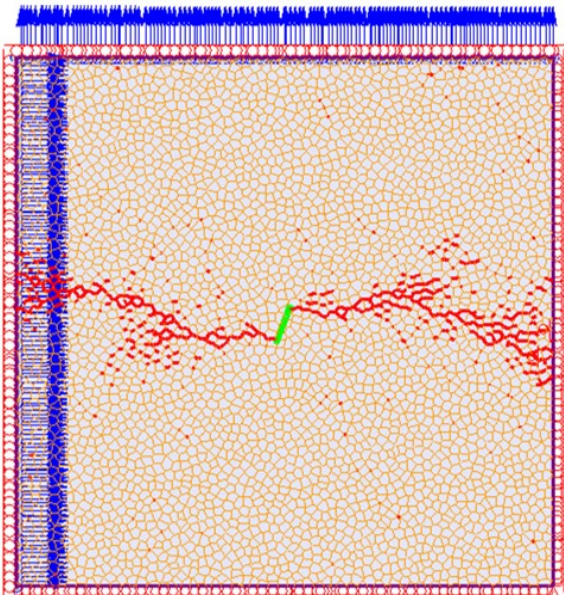
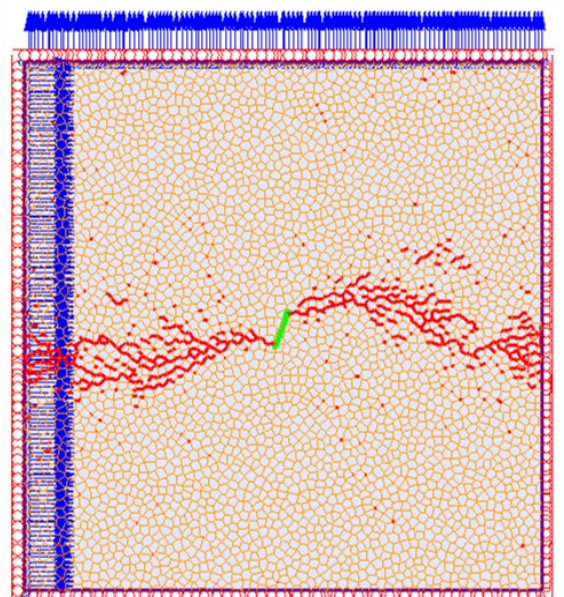
próprias das condições de contorno da PEI. Avaliaram-se diferentes combinações de cargas (α) com a entalha inclinada 70° , os resultados da resistência e os SIF com estas condições de contorno são mostrados na Tab. 6.3.

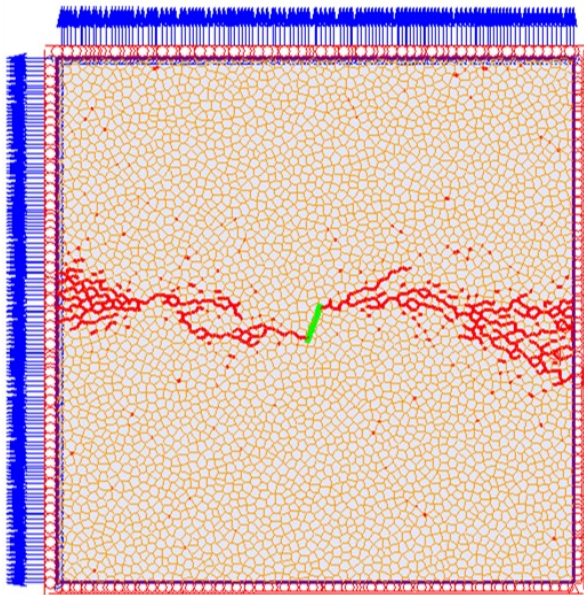
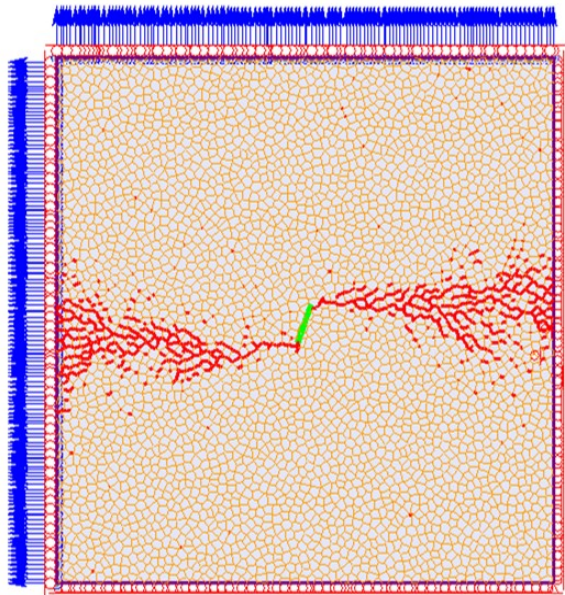
Tabela 6.3 - Resultados do SIF no modo I e II com as condições de contorno da placa com entalha inclinada a 70° .

α	K_I [MPa.m ^{0.5}]	K_{II} [MPa.m ^{0.5}]
-0,9	-1,16	1,04
-0,5	-0,63	0,94
-0,05	0,18	0,84
0,1	0,53	0,75
0,3	1,07	0,63
0,6	1,69	0,34
0,9	1,63	0,06

Diante das dificuldades de gerar superfícies impondo carregamentos, a fim de mostrar as superfícies geradas pelas diferentes condições avaliadas, foi feita a substituição do carregamento nas bordas da placa por deslocamentos fixados. Embora esta metodologia não é rigorosa por interferir na distribuição de tensões, é usada para permitir visualizar os resultados obtidos com essas condições. Os resultados das superfícies obtidas e os SIF calculados com esta metodologia são resumidos na Tab. 6.4.

Tabela 6.4 Resultados da condição da placa entalhada aplicando deslocamentos, com a entalha inclinada 70°.

α	K_I [MPa.m ^{0.5}]	K_{II} [MPa.m ^{0.5}]	Superfície de fratura (Com deslocamento fixado)
-0,5	-0,26	0,84	
-0,2	0,49	0,69	

α	K_I [MPa.m ^{0.5}]	K_{II} [MPa.m ^{0.5}]	Superfície de fratura (Com deslocamento fixado)
0,15	1,38	0,48	
0,3	1,74	0,31	

Conforme mostrado na Tab. 6.3 e 6.4, nos testes desenvolvidos foram obtidos valores negativos do SIF no modo I. Estes resultados serão objeto de discussão na Seção 6.5.

6.4 - ENVOLTÓRIAS DE PROPAGAÇÃO DE FRATURA

Os ensaios SCB, CSTBD, e os testes na PEI tem diferentes condições de contorno que submetem o corpo no modo misto I e II. Na Fig. 6.1 são comparados os resultados obtidos nestes modelos com os critérios de propagação da fratura no modo misto, MERR, e os critérios elipsoidais definidos com os valores de $K_{II} = 0.85 \text{ MPa.m}^{0.5}$ e $2.05 \text{ MPa.m}^{0.5}$.

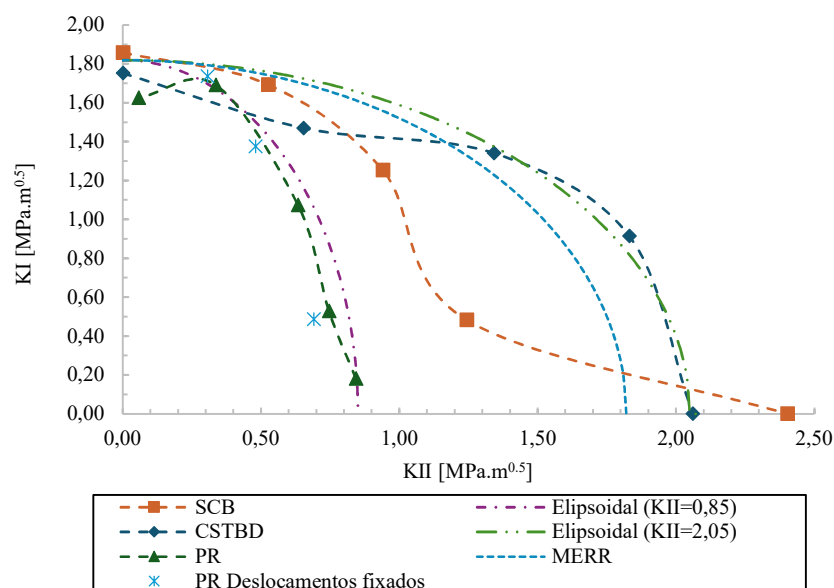


Figura 6.1 - Comparação dos resultados obtidos nos ensaios SCB, CSTBD, e os testes na placa com entalha inclinada, com as envoltórias de propagação de fratura no modo misto, MERR, e os critérios elipsoidais.

As variações encontradas entre as distintas metodologias refletem a dependência do modelo das condições de contorno quando é submetido a propagação no modo misto, estas diferenças incrementam à medida que o K_{II} incrementa, tendo um comportamento relativamente estável em K_{II} baixos. Na comparação realizada encontrou-se uma ampla faixa de valores de K_{IIc} sendo que para metodologias como a PEI se obteve o valor de $0.85 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$, com o ensaio CSTBD de $2.05 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ e com o ensaio SCB o valor de $2.40 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$, portanto não foi possível estabelecer um comportamento característico do modelo no modo II.

6.5 - MODO MISTO COM VALORES DE K_I NEGATIVOS

Quando a propagação da fratura ocorre em modo misto, com a atuação de forças compressivas no plano da fratura, e evolui até a ruptura por meio do modo II de propagação, a tensão compressiva influencia a resistência à propagação ao aproximar as superfícies fraturadas. Esse campo de tensões compressivas pode ser quantificado pelo SIF no modo I (K_I), que, nesse caso, assume um valor negativo.

A Fig. 6.2 apresenta a envoltória obtida considerando a condição de contorno da PEI, na qual foram aplicadas cargas de compressão para gerar valores negativos do K_I . Nesse contexto, as envoltórias convencionais não se ajustam de forma satisfatória à série de dados no ramo negativo. Por essa razão, propõe-se a envoltória com a forma matemática descrita na Eq. 6.1, em que os expoentes adotados para o ajuste foram $u_I = 1$ e $u_{II} = 3$, resultando em uma nova

envoltória com a forma matemática apresentada na Eq. 6.2. Tal abordagem visa garantir a continuidade da envoltória, mesmo para valores negativos de K_I .

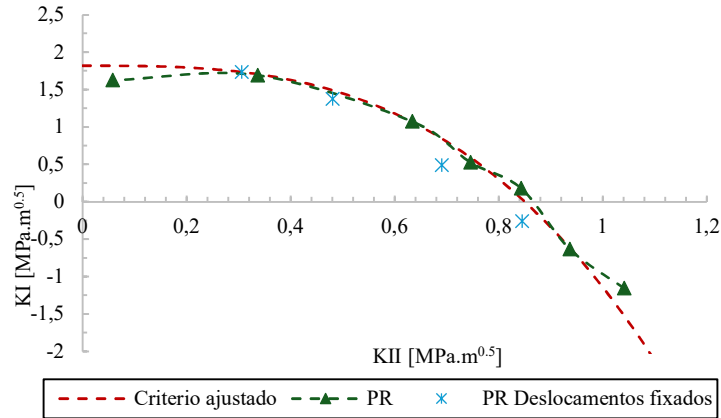


Figura 6.2 - Envoltória com o critério de propagação ajustado aos resultados da placa com entalha inclinada, incluído valores negativos de K_I .

$$\left(\frac{K_I}{K_{Ic}}\right)^{u_I} + \left(\frac{K_{II}}{K_{IIc}}\right)^{u_{II}} = 1 \quad [6.1]$$

Onde:

K_I : Fator de intensidade de tensões no modo I,

K_{Ic} : Tenacidade a fratura no modo I,

K_{II} : Fator de intensidade de tensões no modo II,

K_{IIc} : Tenacidade a fratura no modo II,

u_I : Expoente de ajuste da relação $\frac{K_I}{K_{Ic}}$ no critério de propagação da fratura proposto,

u_{II} : Expoente de ajuste da relação $\frac{K_{II}}{K_{IIc}}$ no critério de propagação da fratura proposto.

$$K_I = K_{Ic} * \left(\frac{K_{II}}{K_{IIc}}\right)^3 + K_{Ic} \quad [6.2]$$

Onde:

K_I : Fator de intensidade de tensões no modo I,

K_{Ic} : Tenacidade a fratura no modo I,

K_{II} : Fator de intensidade de tensões no modo II,

K_{IIc} : Tenacidade a fratura no modo II.

Embora este critério não siga a forma matemática dos critérios convencionais, será o empregado para definir a envoltória de propagação na análise proposta na Seção 7.2, com o objetivo de se ajustar aos resultados obtidos na envoltória considerando a condição de contorno da PEI, incluindo a região do critério correspondente a valores negativos de K_I .

6.6 - CONCLUSÕES PARCIAIS

Os ensaios SCB e CSTBD com fratura inclinada apresentaram comportamentos na fratura no modo misto que permitem a propagação da fratura em uma superfície contínua, seguindo as trajetórias de propagação esperadas. No entanto, os resultados obtidos na PEI não permitiram gerar superfícies contínuas, que se presume, surgem pelas condições de contorno que dificultam a convergência do método numérico.

As superfícies mostradas correspondem a uma alteração das condições de contorno que, se bem, obtiveram resultados próximos aos esperados na envoltória de propagação, não garantem que as superfícies de fratura obtidas sejam as esperadas nas condições de contorno originais.

Os modelos desenvolvidos neste capítulo resultaram em valores do SIF na ruptura no modo misto que parecem seguir, de forma independente, os critérios de propagação propostos em determinados trechos das curvas. No entanto, os resultados não replicaram a superfície sob outras condições de contorno em nenhuma das geometrias avaliadas. Portanto, considera-se que o modelo não apresenta um comportamento estável no modo misto, especialmente em condições nas quais o modo II de propagação da fratura é predominante.

7 - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES DE GEOMETRIAS SIMPLES

O material de estudo foi calibrado com o objetivo de representar o comportamento da rocha fraturada, considerando, no processo, o modo I de propagação de fratura. Nesta seção, o desempenho do material calibrado na propagação da fratura é avaliado em escala de campo. Para isso, foram modelados dois tipos de taludes com geometria simplificada e seus resultados foram comparados com aproximações teóricas.

Na primeira tipologia de talude, aproveitou-se a semelhança nas condições de contorno dos taludes com os ensaios DENT e SENT, para a estimativa de um fator de segurança teórico fundamentado na MFLE. Este fator é obtido avaliando o SIF atuante e comparando-o com o K_{Ic} , utilizando as soluções aproximadas disponíveis na literatura.

De forma similar, na segunda tipologia de talude, utilizou-se a envoltória de propagação de fratura obtida com as condições de contorno de placa com entalha inclinada, adotando o critério proposto na Seção 6.5, para estabelecer um fator de segurança no modo misto. Este fator é determinado por meio do código do Anexo I, que, com uma metodologia iterativa, estabelece o fator de segurança teórico fundamentado na MFLE.

7.1 - BLOCO DESLIZANDO SOBRE UM PLANO INCLINADO

A tipologia de talude com um bloco deslizando sobre um plano inclinado, é uma simplificação geométrica de mecanismos mais complexos como a ruptura escalonada, que junto com uma fratura aberta, perpendicular ao plano de deslocamento, propicia a propagação e conformação de uma superfície contínua, com o rompimento da ponte de rocha.

Nesta seção fizeram-se as análises considerando geometrias com planos inclinados a 45° e 70° , sem atrito, que seguem a configuração detalhada na Fig. 7.1.

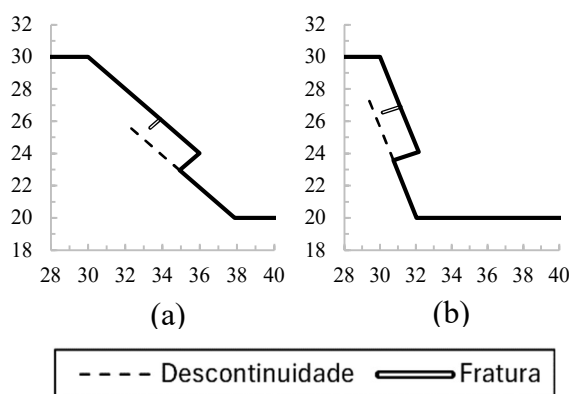


Figura 7.1 - Geometria dos taludes com bloco deslizando num plano inclinado. (a) Talude inclinado 45° (b) Talude inclinado 70° .

Para avaliar o efeito da persistência da fratura no desempenho do modelo e sua comparação com metodologias como o MCEP, foram analisadas fraturas cuja persistência representa o 30%, 50%, 70%, e 90% da superfície de fratura total, requerida para a ocorrência do deslizamento, avaliando a estabilidade do talude com o método de incrementos de gravidade.

7.1.1 - COMPOSIÇÃO DO MODELO DE TALUDE

Com o intuito de reduzir o custo computacional, o material calibrado foi aplicado nas regiões próximas a fratura, onde é esperado da fratura se propagar. Por outra parte, na fronteira da zona de propagação da fratura, foi usado o modelo Mohr Coulomb elástico. As condições adotadas para os modelos de talude a 45° e 70° de inclinação são esquematizadas na Fig. 7.2.

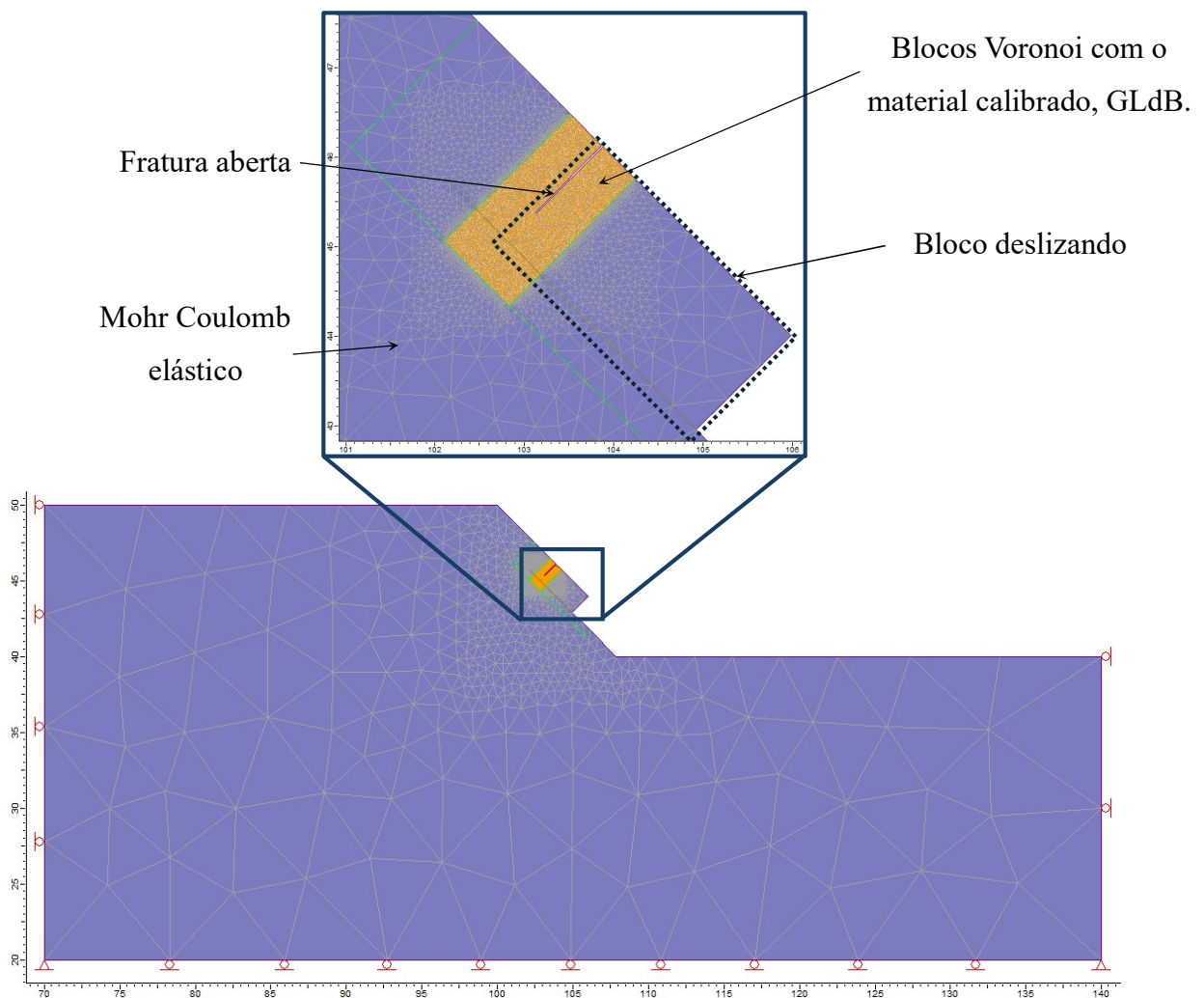
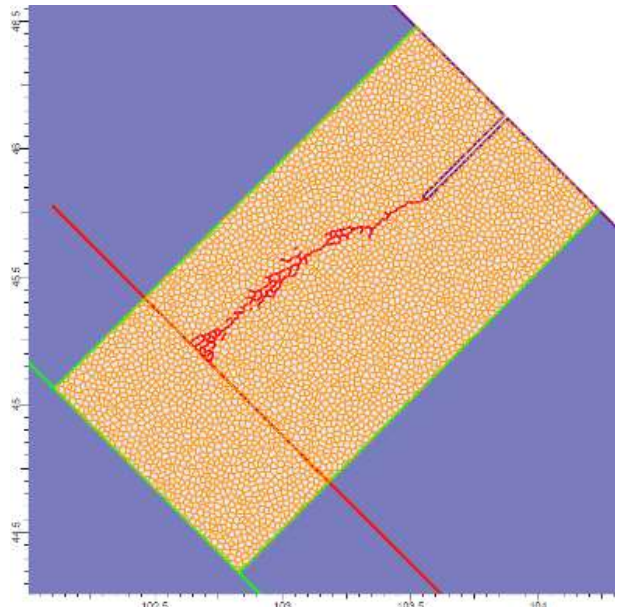
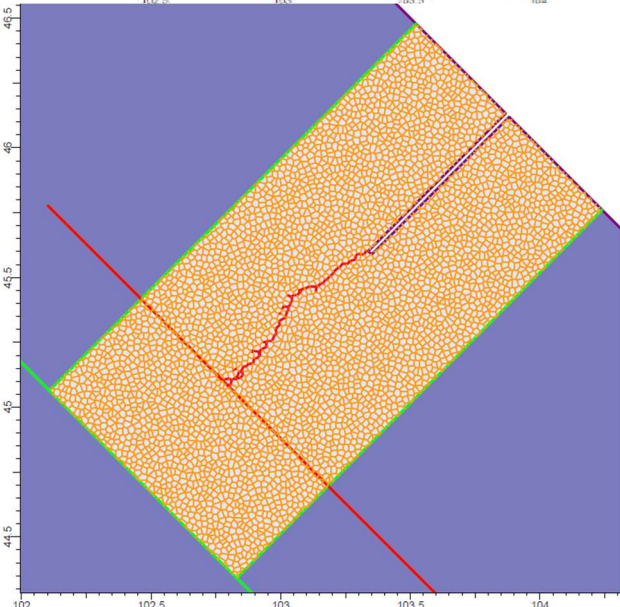


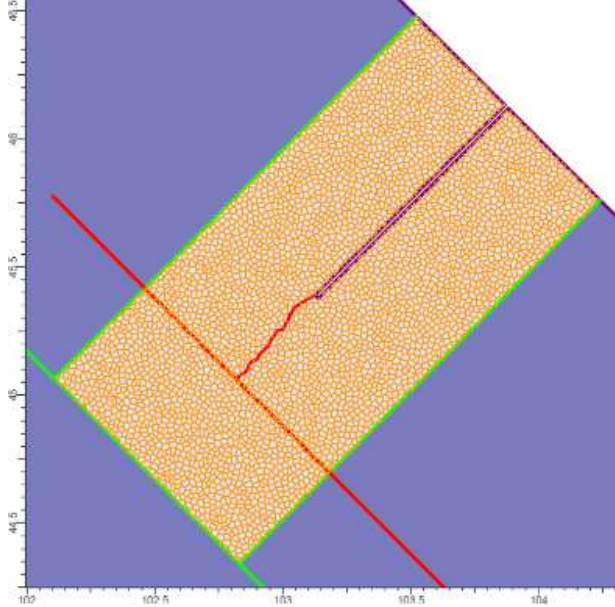
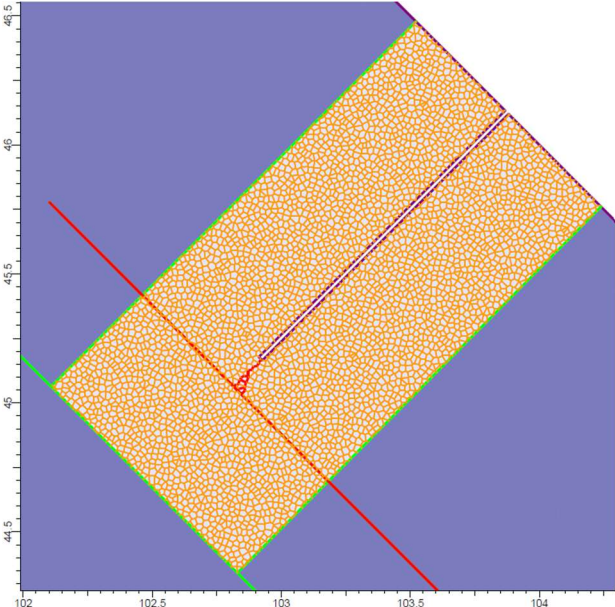
Figura 7.2 - Esquema de descrição de condições de contorno, geometria e modelos adotados.

7.1.2 - RESULTADOS DA MODELAGEM

Foram aplicados incrementos de gravidade até atingir a propagação do 100% da superfície de fratura. Os resultados das superfícies e os fatores de segurança encontrados com a metodologia em cada uma das persistências da fratura avaliadas são mostrados na Tab. 7.1.

Tabela 7.1 - Resultados da análise de estabilidade do talude com inclinação de 45° e superfícies de propagação da fratura obtidas com diferentes persistências.

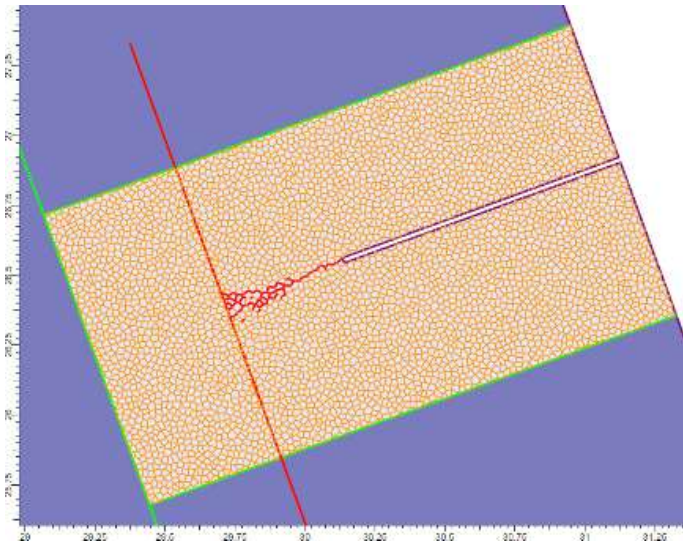
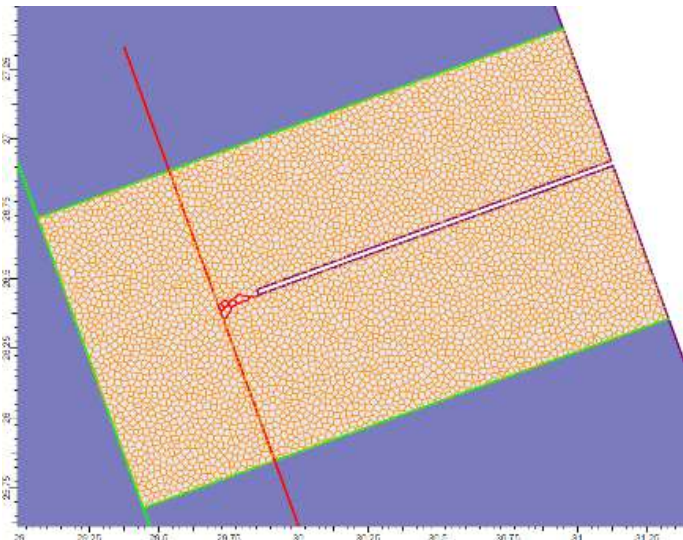
Persistência	FS	Superfície de propagação de fratura
30%	9.4	
50%	6.2	

Persistência	FS	Superfície de propagação de fratura
70%	4.3	
90%	3.6	

De forma similar, foi analisada a estabilidade do talude com o plano de deslizamento inclinado a 70° obtendo os resultados mostrados na Tab. 7.2 para as diferentes persistências.

Tabela 7.2 - Resultados da análise de estabilidade do talude inclinado 70° e superfícies de propagação da fratura obtidas com diferentes persistências.

Persistência	FS	Superfície de propagação de fratura
30%	12.5	
0%	7.9	

Persistência	FS	Superfície de propagação de fratura
70%	6.7	
90%	3.2	

7.1.3 - SOLUÇÃO TEÓRICA DE REFERÊNCIA

Com o objetivo de contrastar os resultados obtidos em escala de campo com o material calibrado no caso estudado, propõe-se a comparação das condições de contorno do talude com ensaios clássicos da mecânica da fratura que contam com uma equação para a estimativa do SIF. Aproveita-se a semelhança das condições de contorno dos ensaios “Double Edge Notched Tension” (DENT) e “Single Edge Notched Tension” (SENT), mostrados na Fig. 7.3a e 7.4, estes ensaios rompem o corpo de prova propagando a fratura no modo I.

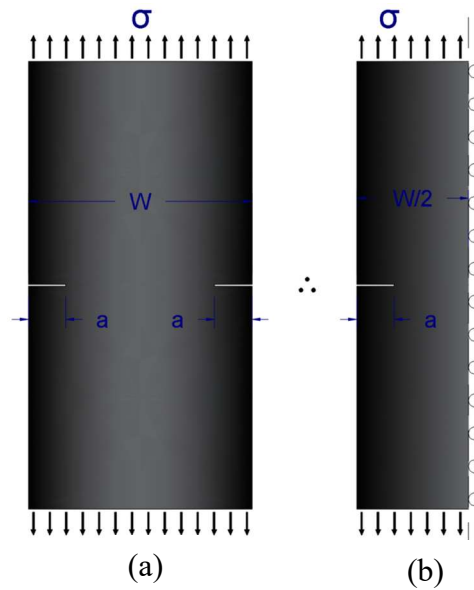


Figura 7.3 - Condições de contorno do ensaio (a) DENT e (b) sua equivalência com um modelo de simetria bilateral.

No ensaio DENT existe simetria bilateral, esta faz possível a simplificação da geometria em uma equivalente, mostrada na Fig. 7.3b. Possui a Eq. 7.1 (Tada 2000) que estima o SIF em função das condições de contorno,

$$K_1 = \sigma \sqrt{\pi a} \sqrt{\frac{W}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{W} \left(1 + 0.122 \cos^4 \left(\frac{\pi a}{W} \right) \right)} \quad [7.1]$$

Onde:

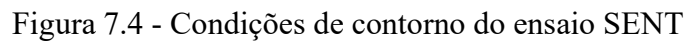
K_I : Fator de intensidade de tensões no modo I,

σ : Tensão resultante da aplicação de uma carga nas condições de contorno,

a : Metade do comprimento da fratura,

W : Largura do corpo de prova.

Da mesma forma, o ensaio SENT, conta com a Eq. 7.2 (Tada 2000) obtida de forma numérica para o cálculo do SIF.



64

fator de segurança como uma relação entre o SIF resistente (K_{Ic}) e o SIF presente na sua condição estática natural.

7.1.4 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM OUTRAS METODOLOGIAS

Foram comparados os resultados dos fatores de segurança obtidos empregando o modelo CVBM calibrado, com os resultados do modelo MCEP, e os estimados a partir das equações do SIF dos ensaios DENT e SENT. O resumo desta comparação para os taludes de 45° e 70° são apresentados na Fig. 7.5.

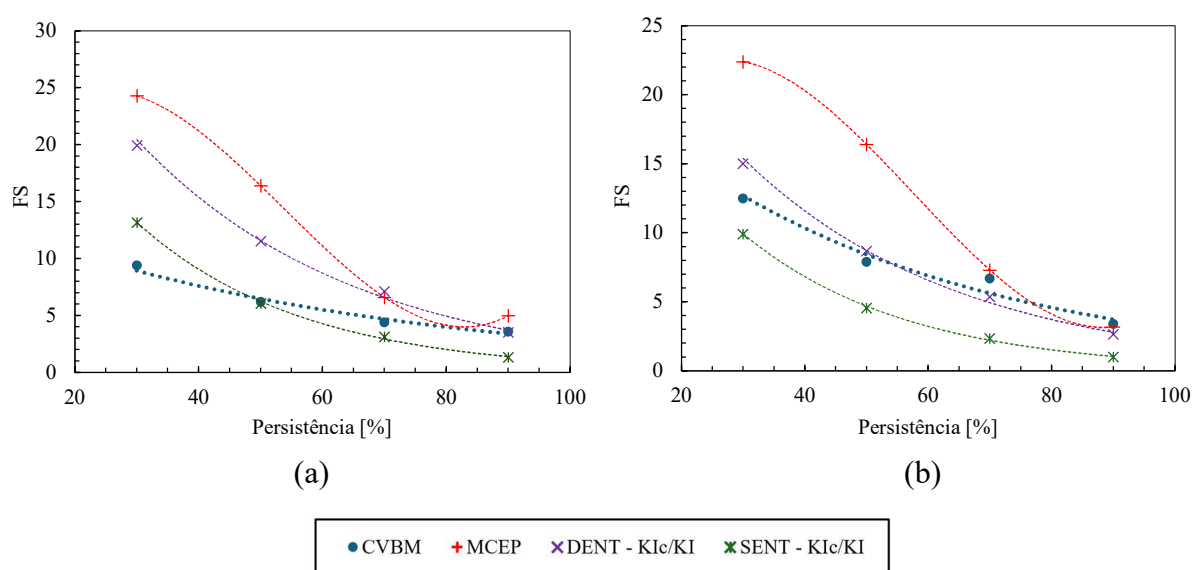


Figura 7.5 - Comparação dos fatores de segurança obtidos com diferentes metodologias para (a) o talude inclinado 45° e (b) para o talude inclinado 70°.

7.1.5 - CONCLUSÕES PARCIAIS

Confirma-se a capacidade do modelo de replicar a propagação da fratura empregando princípios fundamentados na MFLE, observando comportamentos que se ajustam as soluções teóricas com diferenças significativas em relação com metodologias convencionais. Essa condição foi esperada ao aplicar MFLE na análise de acordo com o evidenciado por Sharp & Coffin (1985), que demonstraram a capacidade da teoria de se enfrentar nesse tipo de problemas de uma forma mais ajustada ao comportamento observado.

Adicionalmente, observa-se a transição do comportamento dos fatores de segurança do talude avaliado que começa nos dois casos bastante próximo dos valores do ensaio DENT, evoluindo, à medida que incrementam as forças normais no plano de descontinuidade, a uma condição que envolve flexão, mais semelhante as condições do ensaio SENT. A diferença entre

os resultados obtidos nas duas inclinações avaliadas também se atribui à influência diferenciada das forças normais ao plano de descontinuidade, as quais são maiores no talude de 45°.

Finalmente, observa-se que os resultados do modelo em altas persistências são semelhantes aos obtidos com o MCEP, o que está relacionado à perda de relevância do fenômeno de concentração de tensões na ponte de rocha, devido à falta de elementos que permitam essa redistribuição de tensões. Este fenômeno que se torna mais relevante com uma maior quantidade de elementos na seção de fratura.

7.2 - BLOCO COM UMA FRATURA CENTRADA

Foi analisada a estabilidade de taludes verticais com uma descontinuidade centrada que conforma um bloco de secção triangular como e mostrado na Fig. 7.6. Esta tipologia de talude conforma um mecanismo similar ao da ruptura planar, mas necessita da propagação da fratura nos seus extremos para conformar uma superfície contínua e permitir o deslocamento.

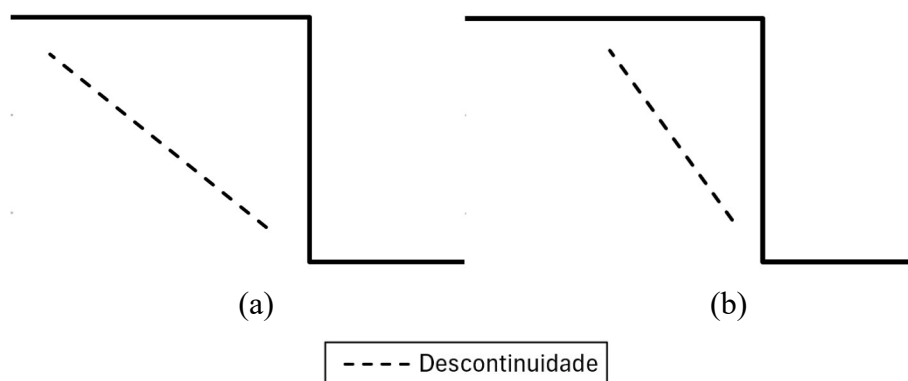


Figura 7.6 - Geometria dos taludes analisados. (a) Talude com descontinuidade a 45° e (b) talude com descontinuidade a 70°.

Foram avaliadas as inclinações de 45° e 70°, cujas fraturas têm persistência de 90%. Para cada ângulo foram testados taludes de 15m, 9.46m e 4.67m de altura, avaliando o efeito da escala no comportamento da estabilidade. Os resultados foram comparados com os obtidos empregando o MCEP, a solução teórica aproximada proposta por Tharp & Coffin (1985) que avalia a estabilidade no modo misto do caso de estudo, e a envoltória de propagação da fratura obtida no Capítulo 6 com o critério proposto.

7.2.1 - COMPOSIÇÃO DO MODELO DE TALUDE COM FRATURA CENTRADA

Para a execução das análises, foi empregado o modelo CVBM nas pontas da fratura conectando-as com a superfície do talude em uma região onde é esperado a fratura se propagar, em outras regiões foi empregado o modelo Mohr Coulomb elástico, procurando com isso

eficiência computacional do modelo. A geometria, os modelos e as condições de contorno adotadas estão esquematizadas na Fig. 7.7.

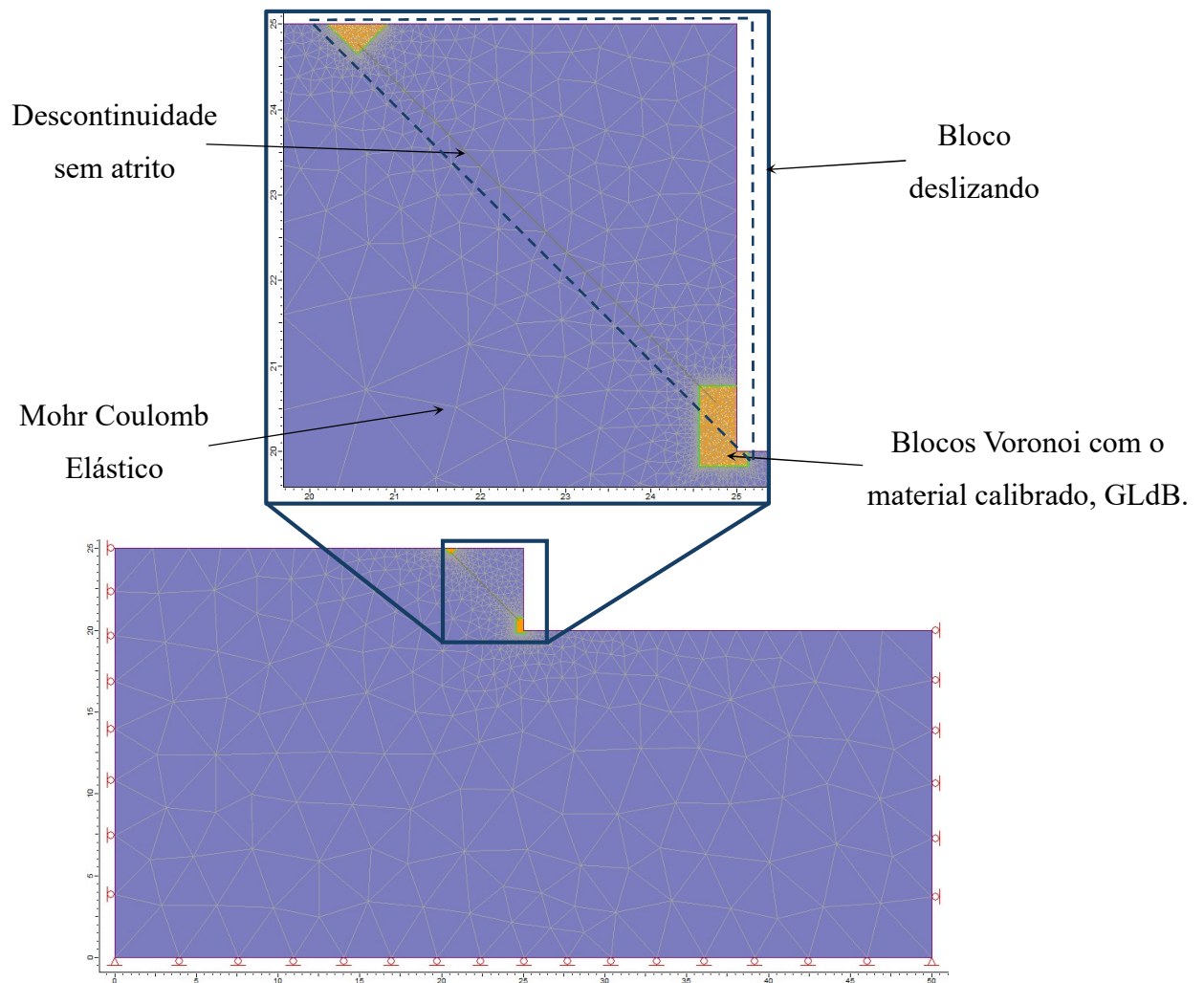
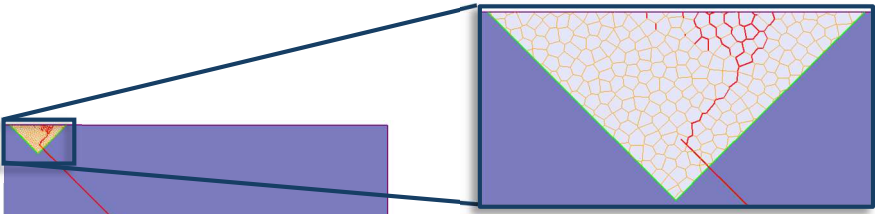
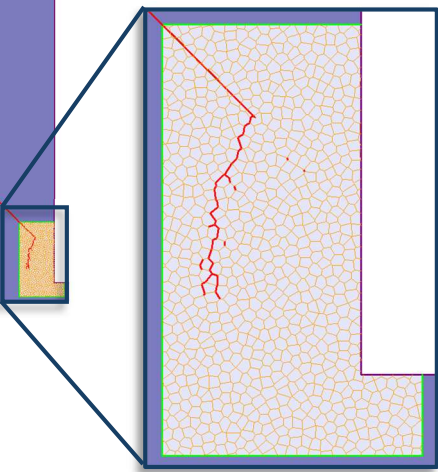
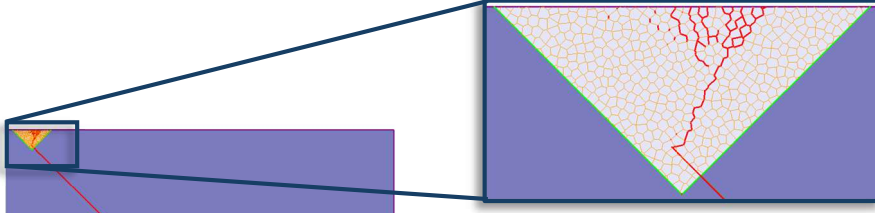
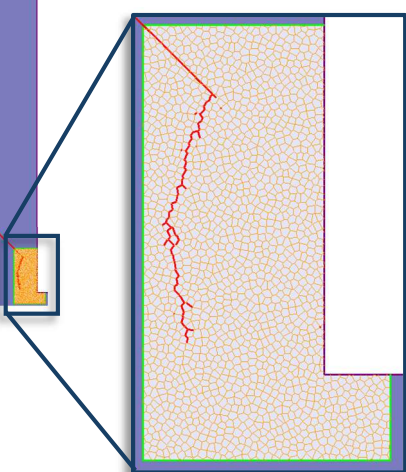


Figura 7.7 - Geometria, modelos e condições de contorno adotadas no modelo de talude com uma fratura centrada.

7.2.2 - RESULTADOS DA MODELAGEM

Foram aplicados incrementos de gravidade até atingir a propagação do 100% da superfície de fratura de alguma das bordas da descontinuidade. Os resultados das superfícies e os fatores de segurança encontrados com a metodologia em cada uma das escalas avaliadas, são mostrados na Tab. 7.3 e 7.4.

Tabela 7.3 - Resultados da análise de estabilidade do talude com fratura centrada, com inclinação de 45°.

Altura do bloco	FS	Superfície de propagação de fratura
4.66 m	10.3	
		
9.46 m	3.1	
		

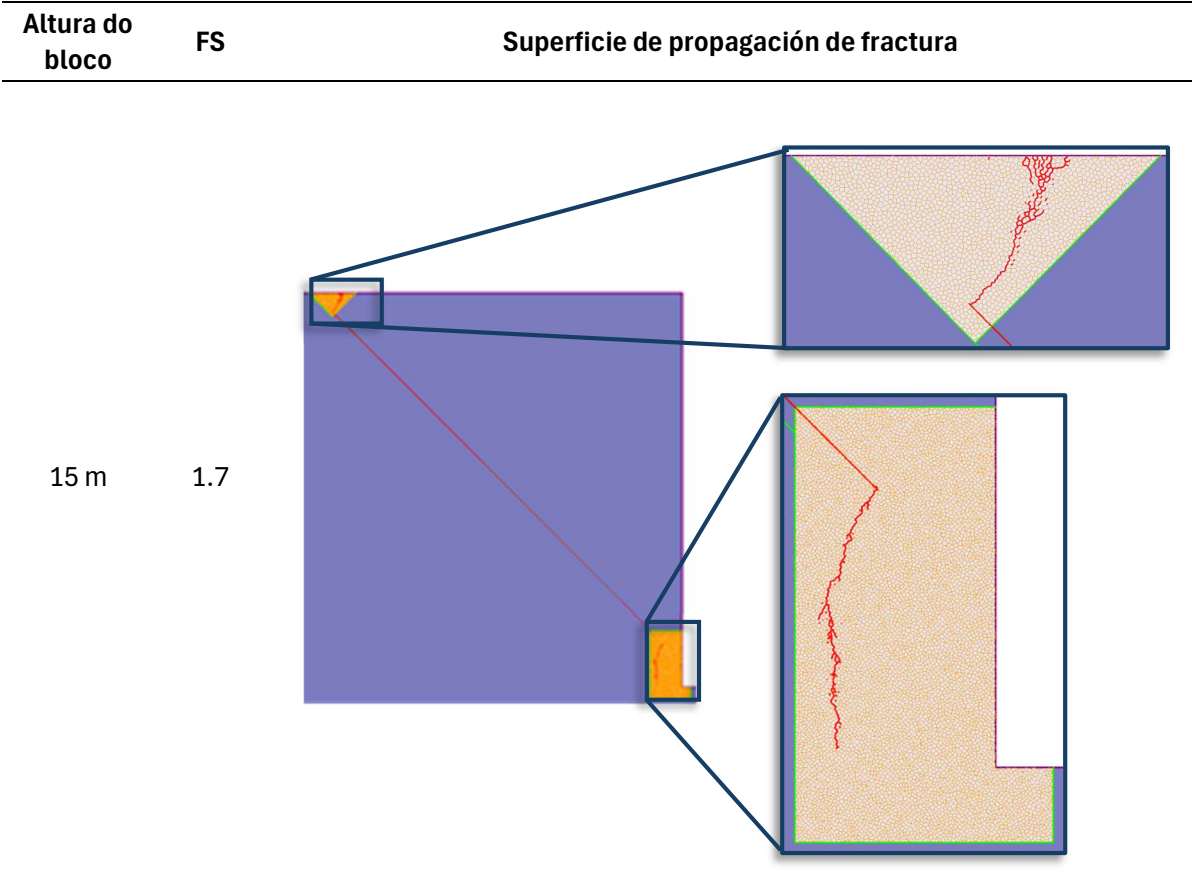
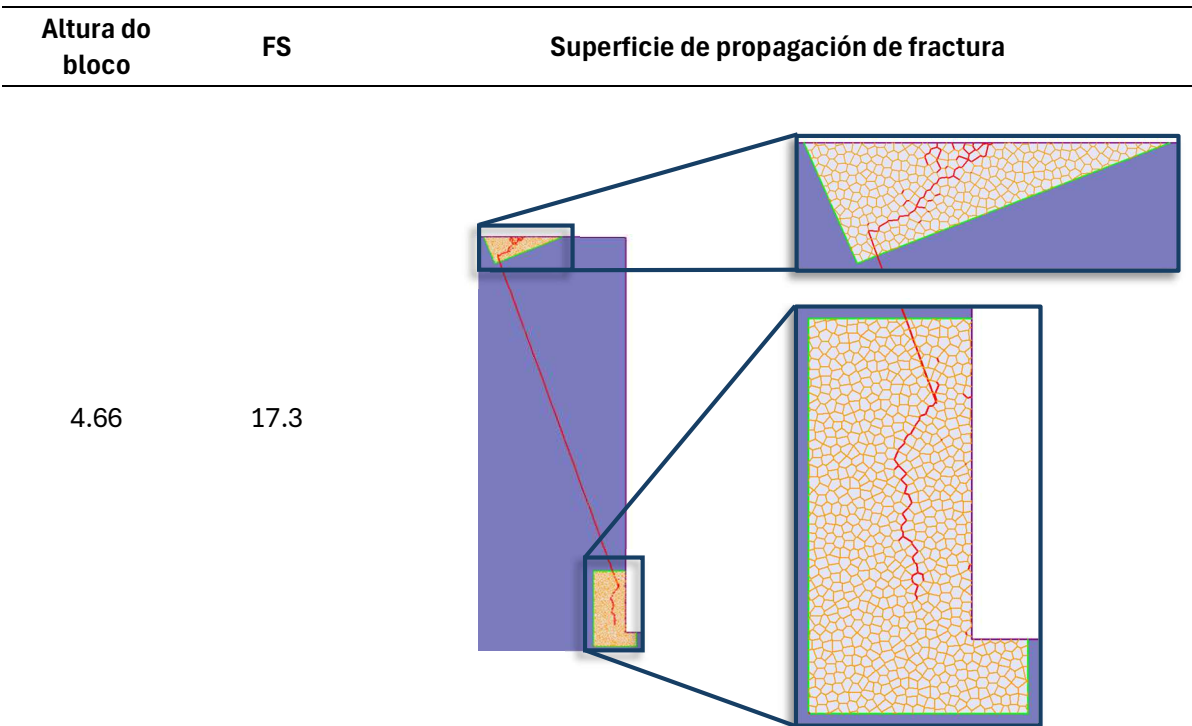
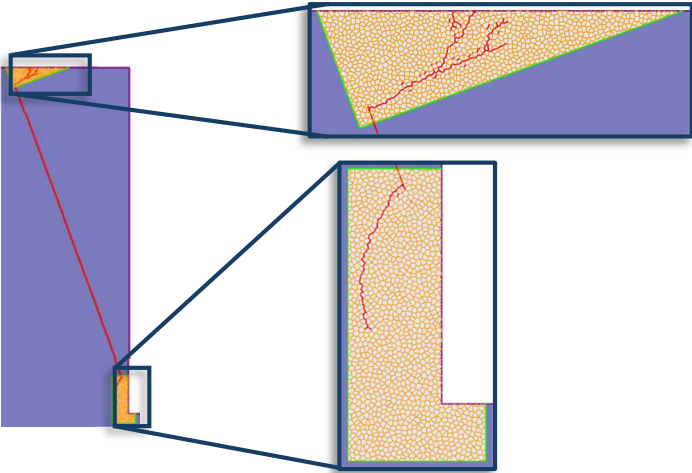
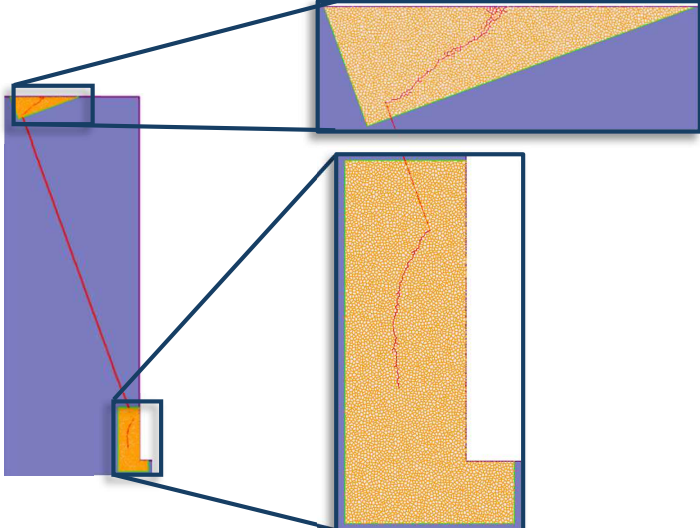


Tabela 7.4 - Resultados da análise de estabilidade do talude com fratura centrada, com inclinação de 70°.



Altura do bloco	FS	Superfície de propagação de fractura
9.46	5.9	
15	3.0	

7.2.3 - SOLUÇÃO TEÓRICA DE REFERÊNCIA

Os autores Tharp & Coffin (1985) propõem uma simplificação do problema facilitando o cálculo do SIF no modo I e no modo II. A solução consiste na decomposição das forças atuantes, normal e cisalhante atuantes no plano de descontinuidade, conforme esquematizado na Fig. 7.8.

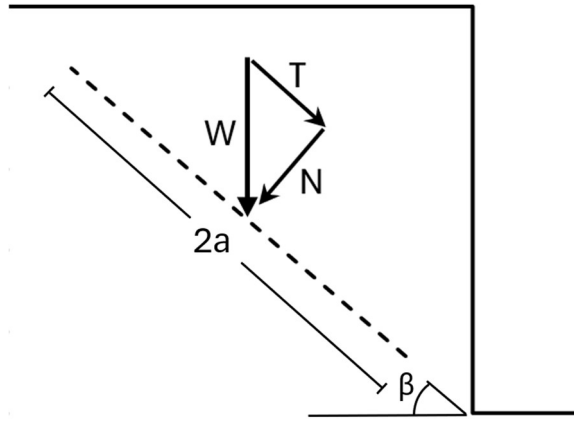


Figura 7.8 - Esquema da simplificação empregada por Sharp & Coffin (1985) para o cálculo dos SIF.

Com esta simplificação é possível estimar as componentes normal (N) e tangencial (T) para transformá-las nas tensões que agem no plano, com o intuito de calcular o SIF no modo I e II, empregando as Equações 7.3 e 7.4 respectivamente,

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad [7.3]$$

Onde:

K_I : Fator de intensidade de tensões no modo I,

σ : Tensão resultante da aplicação de uma carga nas condições de contorno,

a : Metade do comprimento da fratura.

$$K_{II} = \tau \sqrt{\pi a} \quad [7.4]$$

Onde:

K_{II} : Fator de intensidade de tensões no modo II,

τ : Tensão cisalhante,

a : Metade do comprimento da fratura.

Os valores de SIF obtidos representam o estado de tensões atuantes. Para estabelecer o ponto no qual ocorre a ruptura, foi desenvolvido um código iterativo que incrementa o estado de tensões até atingir a superfície de propagação. Como foi mostrado no Capítulo 6, com o material calibrado, não foi possível estabelecer uma envoltória de propagação de fratura única e característica, encontrando uma forte dependência das condições de contorno. Portanto, a escolha de uma superfície, neste caso, tem que ser função das condições de contorno que se deseja representar.

Neste sentido, para representar as condições das tensões que atuam no talude com a fratura centrada, a superfície considerada mais adequada para a determinação dos fatores de segurança teóricos foi a obtida com a condição de contorno da PR. Esta se encontra bem representada pelo critério de propagação proposto na Seção 6.5 e, portanto, o critério será o empregado para a estimação dos fatores de segurança teóricos.

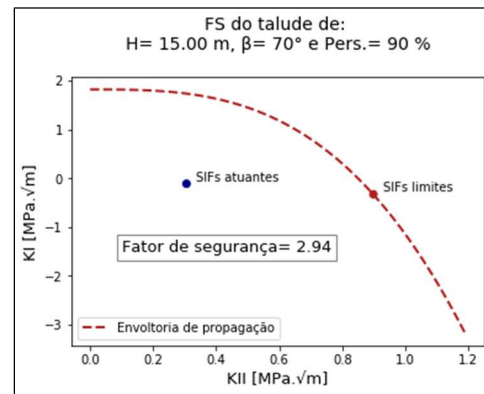
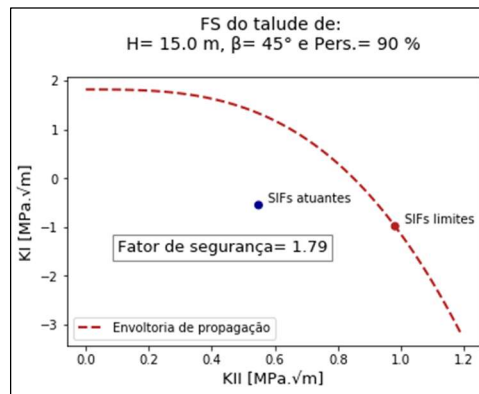
No Apêndice, disponibiliza-se o código em Python, empregado para a estimação dos fatores de segurança teóricos, o qual usa uma metodologia iterativa, incrementando a gravidade até atingir a envoltória de propagação. Nele são requeridas as informações das variáveis de altura do talude, ângulo da inclinação do talude (β), e a persistência da descontinuidade, e inclui na sua programação as propriedades do material calibrado, tais como peso específico, tenacidade a fratura, e a função da envoltória de propagação.

Na Tab. 7.5 são apresentados os resultados obtidos empregando esta metodologia para a estimação dos fatores de segurança teóricos.

Tabela 7.5 - Análise de estabilidade do talude com a fratura centrada empregando a envoltória de propagação de fratura.

Altura do talude	Fratura inclinada 45°	Fratura inclinada 70°
4.66 m	FS do talude de: H= 4.66 m, $\beta = 45^\circ$ e Pers. = 90 % KI [MPa.$\sqrt{m}$] SIFs atuantes SIFs limites Fator de segurança = 10.34 Envoltoria de propagação KII [MPa.$\sqrt{m}$]	FS do talude de: H= 4.66 m, $\beta = 70^\circ$ e Pers. = 90 % KI [MPa.$\sqrt{m}$] SIFs atuantes SIFs limites Fator de segurança = 16.97 Envoltoria de propagação KII [MPa.$\sqrt{m}$]
9.46 m	FS do talude de: H= 9.46 m, $\beta = 45^\circ$ e Pers. = 90 % KI [MPa.$\sqrt{m}$] SIFs atuantes SIFs limites Fator de segurança = 3.58 Envoltoria de propagação KII [MPa.$\sqrt{m}$]	FS do talude de: H= 9.46 m, $\beta = 70^\circ$ e Pers. = 90 % KI [MPa.$\sqrt{m}$] SIFs atuantes SIFs limites Fator de segurança = 5.87 Envoltoria de propagação KII [MPa.$\sqrt{m}$]

15.00 m



7.2.4 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM OUTRAS METODOLOGIAS

Nesta seção, os resultados de estabilidade obtidos no talude com uma fratura centrada, utilizando o modelo CVBM, são comparados com a solução teórica de referência fundamentada na MFLE mostrados na Tab. 7.5, o método de Equilíbrio Limite, e os resultados da análise empregando o modelo MCEP, essa comparação é mostrada na Fig. 7.9a e Fig. 7.9b para os taludes de 45° e 70° respectivamente.

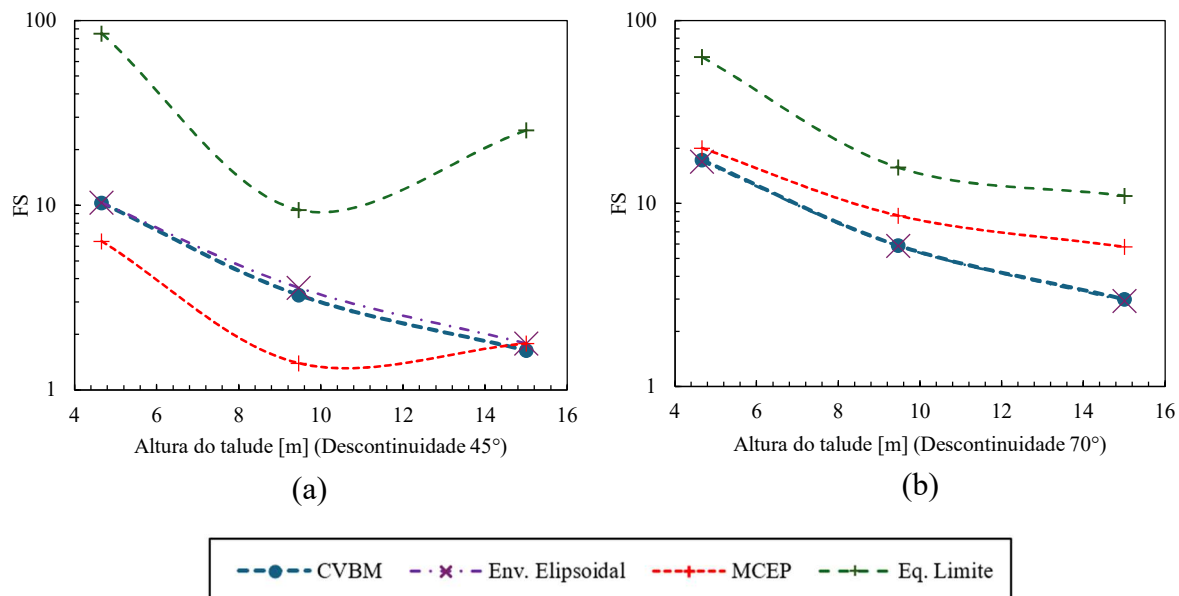


Figura 7.9 - Fatores de segurança de taludes com uma descontinuidade centrada a 45° (a) e 70° (b) com diferentes alturas estimados com o modelo CVBM, a envoltória elipsoidal de propagação, o modelo MCEP, e o método de equilíbrio limite.

7.2.5 - CONCLUSÕES PARCIAIS

As trajetórias de propagação obtidas com o modelo CVBM seguem uma trajetória inicial definida pela propagação no modo II nas duas pontas da descontinuidade. Esta tendência segue até atingir a superfície na ponta superior, no entanto, na ponta inferior a presença do modo

II e as condições de contorno do talude curvam a trajetória de propagação orientando-a ao pé do talude. O avanço da propagação da fratura na ponta inferior ocorre de forma lenta, se afastando das condições quase-frágeis da MFLE, e por tanto o critério de ruptura foi limitado à ruptura na ponta superior.

Os fatores de segurança apresentam resultados equivalentes aos procedentes da solução teórica de referência, como mostrado na Fig. 7.9. O anterior indica que a envoltória de propagação obtida com o as condições de contorno da PR é uma aproximação adequada para o problema em menção. É evidenciada a influência do SIF modo II na trajetória de propagação da ponta inferior dos taludes avaliados, que conforma uma superfície curva, convergente ao pé do talude.

A avaliação dos taludes em diferentes escalas permite visualizar a forte dependência dos fatores de segurança, da energia disponível para fraturamento no mecanismo de ruptura. É evidenciado que o método de equilíbrio limite sobre estima os fatores de segurança em relação aos outros métodos comparados, se identifica também que o material calibrado se diferencia do modelo MCEP nos dois ângulos avaliados, querendo dizer que o cisalhamento na propagação de fato é reinterpretado com o modelo proposto.

Embora que foram feitas comparações na avaliação da estabilidade, é difícil estabelecer valores analíticos exatos para o problema, portanto as comparações são feitas com o objetivo de contrastar os resultados com metodologias convencionais em problemas que envolvem o modo II de propagação, onde, como visto no Capítulo 6, o funcionamento do modelo está em função das condições de contorno.

8 - APLICAÇÃO DO MODELO EM MECANISMOS DE RUPTURA DE MAIOR COMPLEXIDADE GEOMÉTRICA

Nos casos previamente analisados, o material foi avaliado em escala laboratorial e aplicado a taludes com geometria simplificada, buscando comparar os resultados com aqueles obtidos por metodologias baseadas na MFLE. Os resultados obtidos sustentam seu desempenho no modo I e elucidam seu comportamento no modo misto. Nesta seção, analisam-se geometrias mais complexas, que são, de fato, as encontradas na maioria dos problemas de estabilidade de taludes de rocha fraturada, estudam-se os mecanismos cinemáticos de ruptura escalonada, tombamento e espalhamento lateral.

8.1 - COMPOSIÇÃO DOS MODELOS

A análise dos modelos dos diversos mecanismos de ruptura é apresentada nesta seção. Foram considerados taludes de 2 m de altura, com uma face inclinada a 90°. Os detalhes de cada modelo e suas condições de contorno são descritos a seguir.

8.1.1 - COMPOSIÇÃO DO MODELO DE ANÁLISE DE RUPTURA ESCALONADA

O modelo deste mecanismo integra a geometria de uma DFN do tipo Baecher, definida por “Dip/Dip-Direction”. Os valores para sua definição estão descritos na Tab. 8.1, utilizando inclinação, comprimento e intensidade de fraturamento com distribuição uniforme.

Tabela 8.1 - Definição dos parâmetros das redes de fraturas discretas empregada no modelo de ruptura escalonada.

Parâmetro	Média	Relação mínima	Relação máxima
Inclinação	45°	1°	1°
Comprimento	0.7 m	0.2 m	0.2 m
Intensidade de fraturamento	7.0 Joint/área	-	-

O resultado da rede foi utilizado como modelo inicial para gerar a geometria final, ajustando-a devido à necessidade de eliminar a conformação de blocos livres que, juntamente com a condição de atrito zero nas juntas, dificulta a convergência na obtenção da ruptura global. A geometria final, os modelos e as condições de contorno adotadas na análise são apresentados na Fig. 8.1.

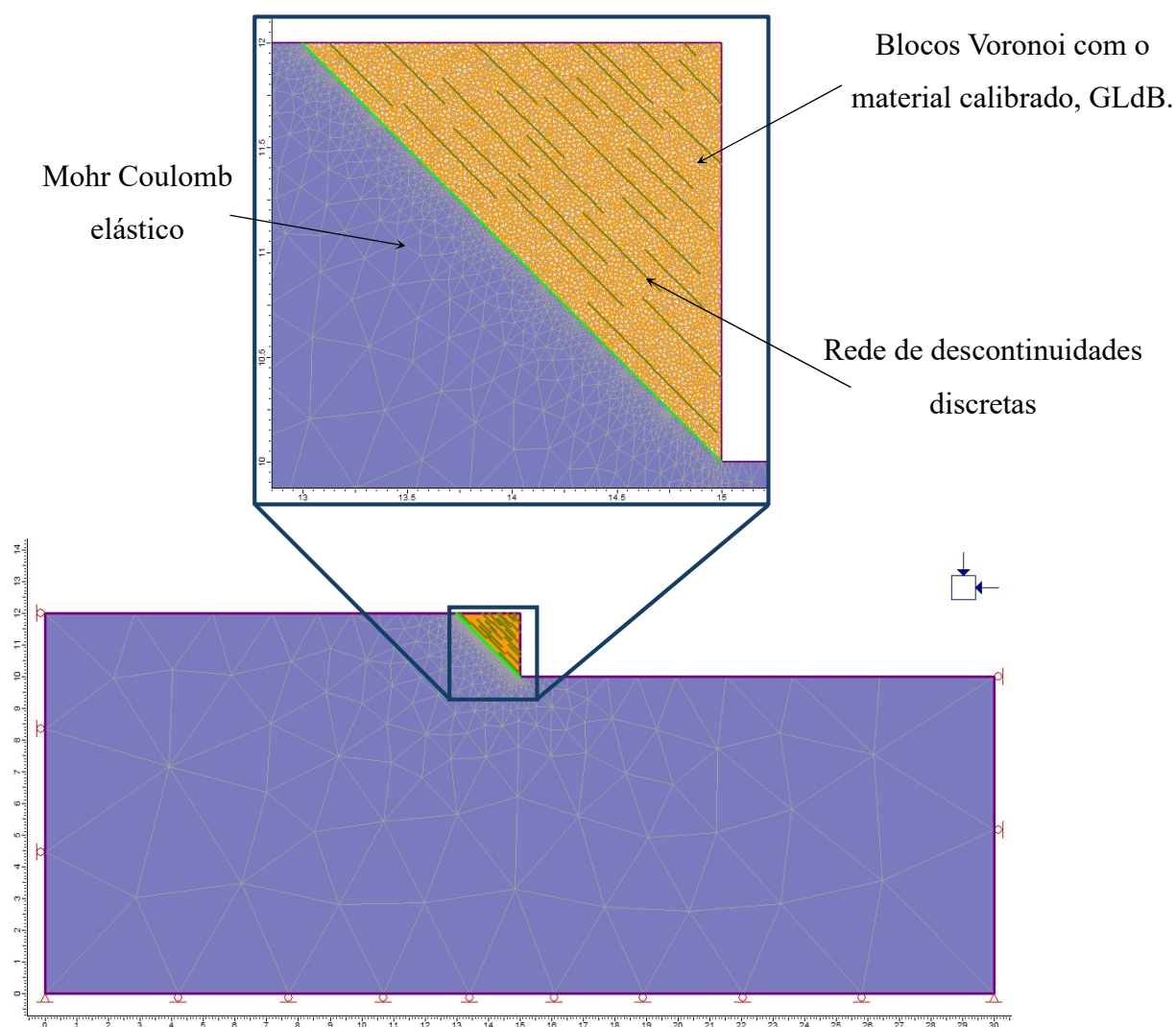


Figura 8.1 - Condições de contorno, geometria e modelos adotados – Modelo de ruptura escalonada.

8.1.2 - COMPOSIÇÃO DO MODELO DE ANÁLISE DA RUPTURA POR TOMBAMENTO

O modelo foi estruturado com uma rede de fraturas paralelas determinísticas a 80°, que gera colunas com espaçamento de 0.2 m. Para conformar o mecanismo de ruptura por bloco-flexão, utiliza-se uma rede de fraturas Baecher, definida pelo método "Dip/Dip-direction" com distribuição uniforme. Na Tab. 8.1, são apresentados os parâmetros de definição dessa última DFN.

Tabela 8.2 - Definição da rede de fraturas discretas empregada como base – Modelo de tombamento.

Parâmetro	Média	Relação mínima	Relação máxima
Inclinação	-10°	1°	1°
Comprimento	0.20 m	0.05 m	0.05 m
Intensidade de fraturamento	10 Joint/área	-	-

De maneira semelhante ao procedimento adotado na ruptura escalonada, a geometria gerada pela DFN foi ajustada com o objetivo de eliminar a formação de blocos de deslocamento livre, prevenindo grandes deslocamentos e, conseqüentemente, problemas na convergência do modelo antes da ocorrência do mecanismo em estudo. A geometria utilizada na análise, os modelos constitutivos e as condições de contorno são apresentados na Fig. 8.2.

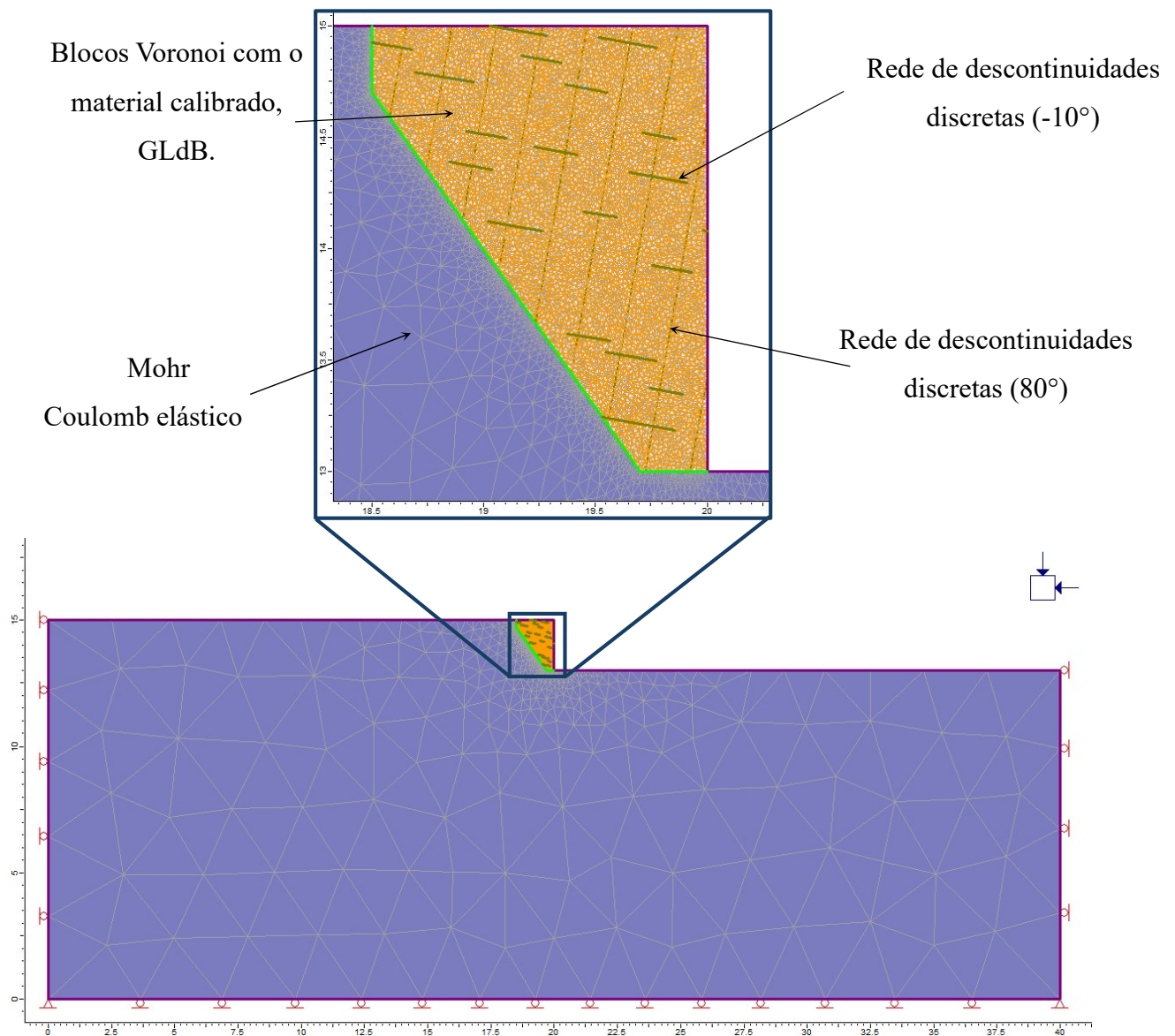


Figura 8.2 - Condições de contorno, geometria e modelos adotados – Modelo de ruptura por tombamento.

O modelo CVBM calibrado foi empregado nas regiões mais próximas a fase do talude, onde é mais esperável que aconteça a ruptura, visando reduzir o custo computacional, nas regiões consideradas suficientemente afastadas, foi empregado o modelo Mohr Coulomb elástico.

8.1.3 - COMPOSIÇÃO DO MODELO DE ANÁLISE DE RUPTURA POR ESPALHAMENTO

A geometria empregada, condições de contorno e modelos adotados são mostrados na Fig. 8.3.

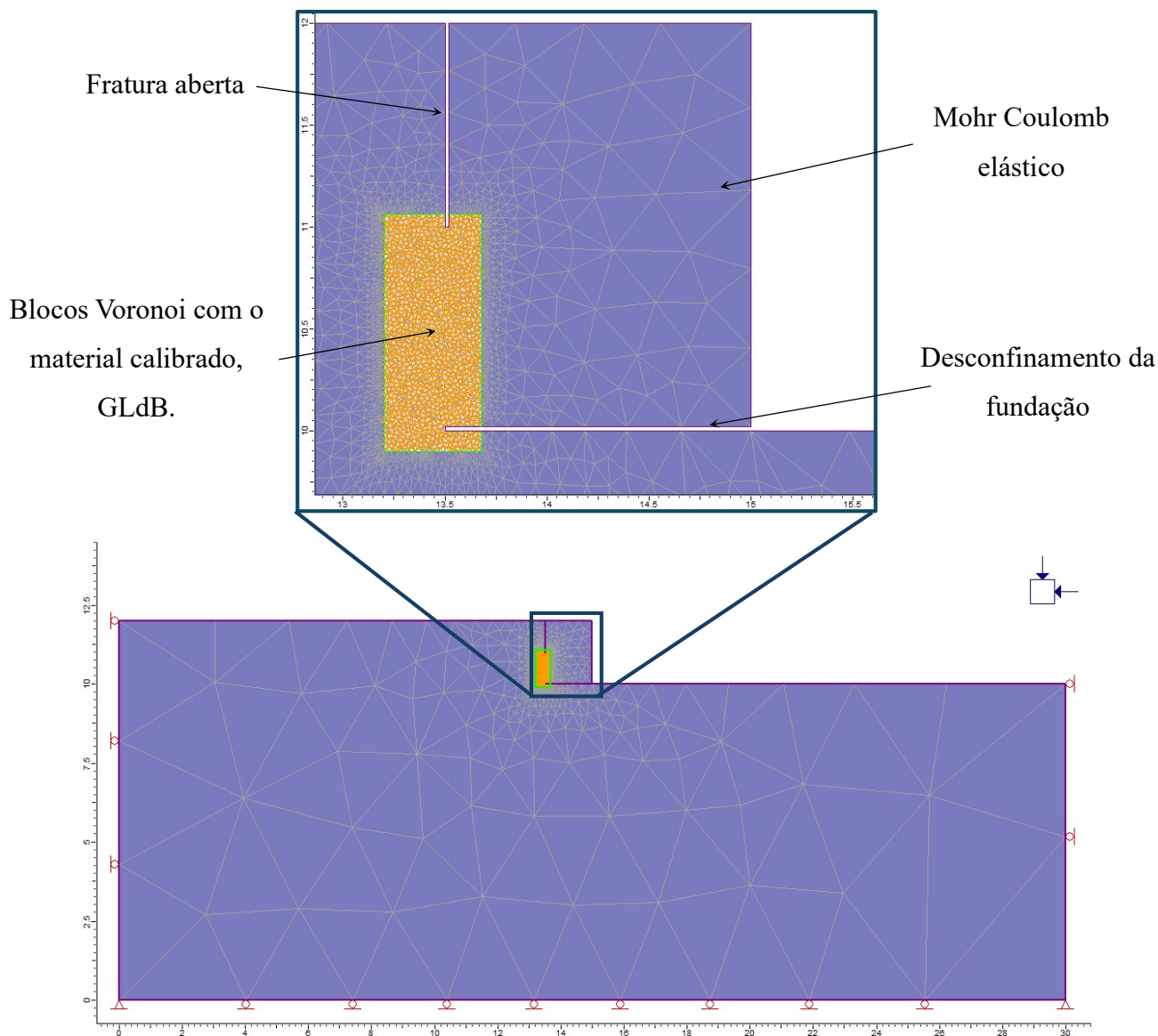


Figura 8.3 - Condições de contorno, geometria e modelos adotados – Modelo de ruptura por espalhamento.

No modelo, a trinca de tração foi considerada de maneira semelhante ao modelo do bloco deslizando sobre um plano inclinado na Seção 7.1, sendo parte da superfície do talude e apresentando uma persistência de 50% do total da superfície de ruptura. O desconfinamento na fundação foi tratado da mesma forma, desconsiderando as camadas moles subjacentes típicas do mecanismo; substituindo-as pelo material elástico por simplificação.

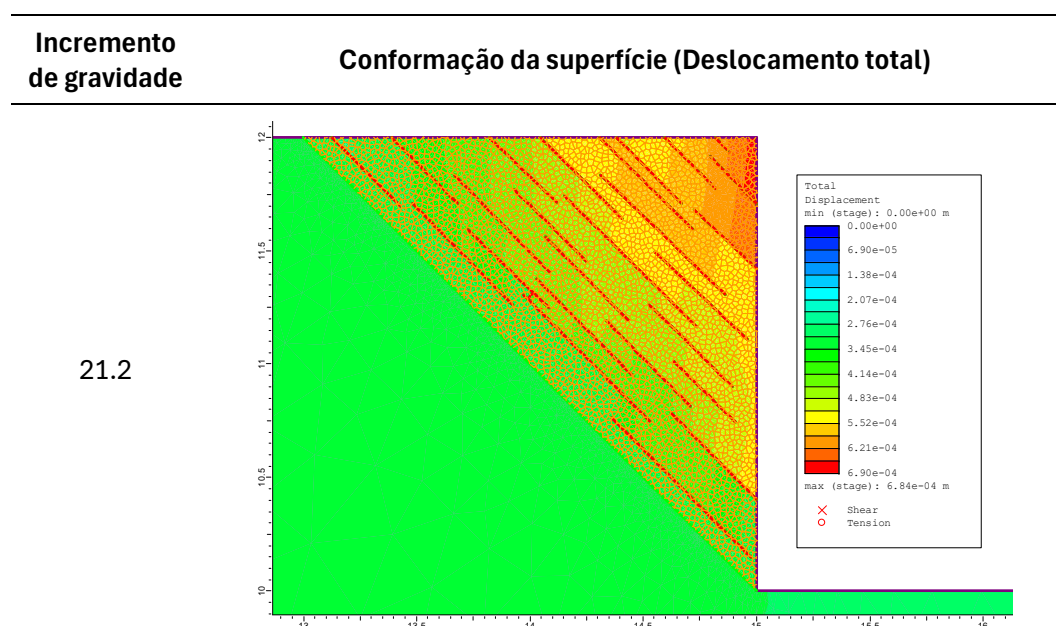
8.2 - RESULTADOS DOS DIFERENTES MECANISMOS DE RUPTURA

Os taludes foram analisados quanto à estabilidade, considerando os diversos mecanismos de ruptura previamente descritos, utilizando o método de incrementos de gravidade. Nesta seção, são apresentados os resultados da análise, no qual é considerada a ruptura do talude quando é conformada uma superfície de deslizamento ou queda contínua. Os incrementos foram realizados de forma gradual, com precisão na ruptura de $\pm 0,1$. São detalhadas as diferentes etapas do processo de fraturamento na condição deformada em escala, juntamente com o deslocamento total e os elementos de junta rompidos para cada mecanismo avaliado.

8.2.1 - RESULTADOS DE ESTABILIDADE DO MODELO DE RUPTURA ESCALONADA

Na Tab. 8.3, são mostrados os resultados da modelagem do talude com ruptura escalonada.

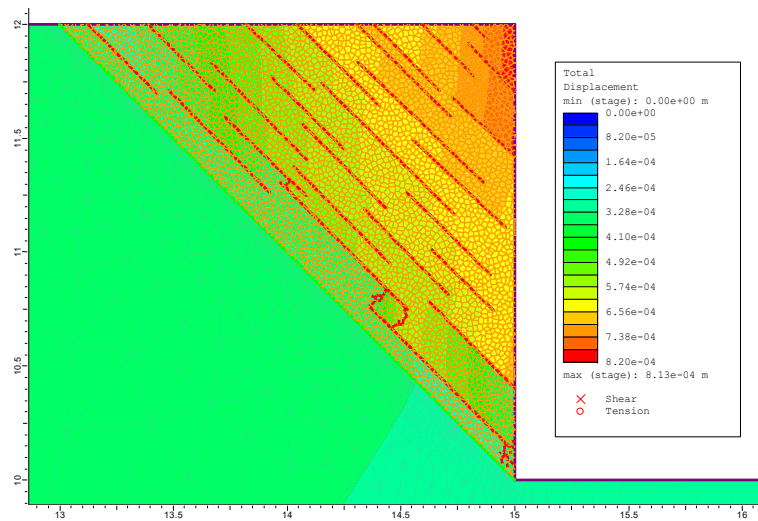
Tabela 8.3 - Resultados da análise de estabilidade do talude com suscetibilidade à ruptura escalonada.



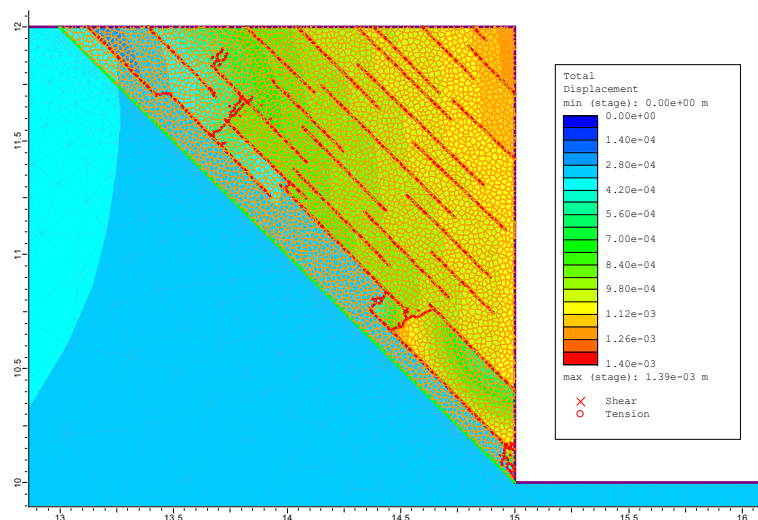
Incremento
de gravidade

Conformação da superfície (Deslocamento total)

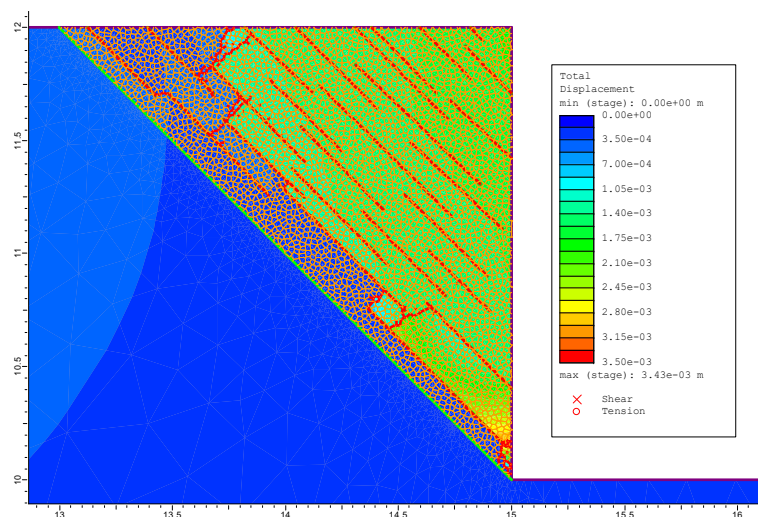
21.4



21.5



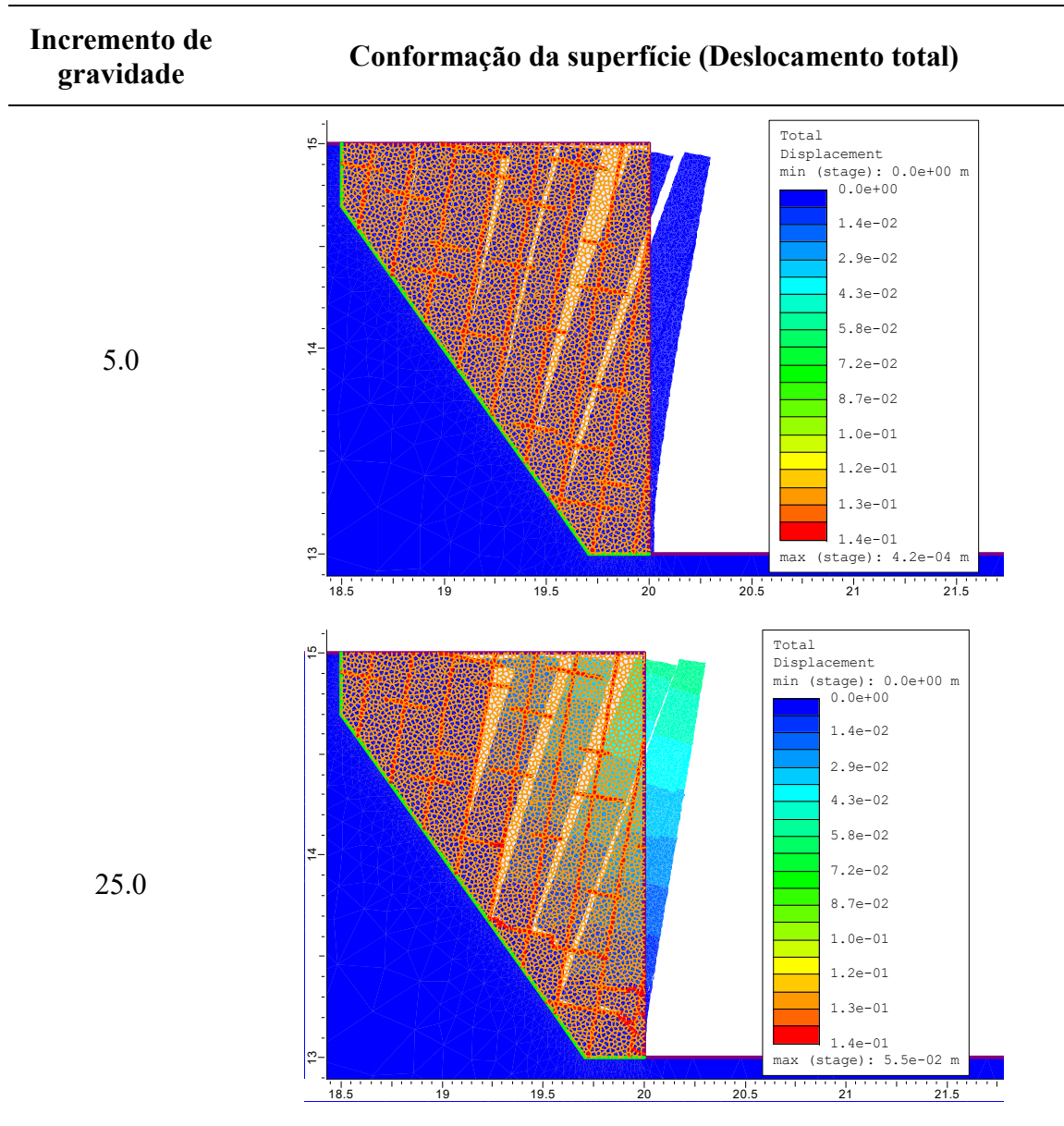
21.6



8.2.2 - RESULTADOS DE ESTABILIDADE DO MODELO DE RUPTURA POR TOMBAMENTO

Na Tab. 8.4, são apresentados os resultados da modelagem do talude com ruptura por tombamento.

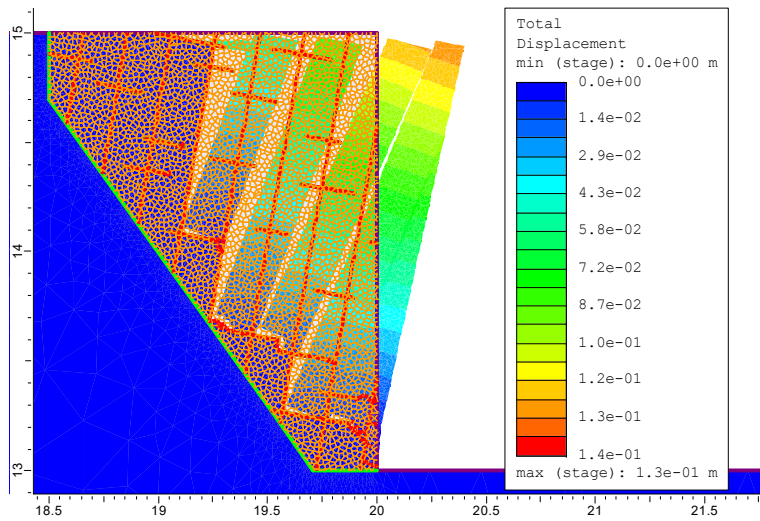
Tabela 8.4 - Resultados da análise de estabilidade do talude no mecanismo de tombamento.



**Incremento de
gravidade**

Conformação da superfície (Deslocamento total)

30.0



8.2.3 - RESULTADOS DE ESTABILIDADE DO MODELO DE RUPTURA POR ESPALHAMENTO

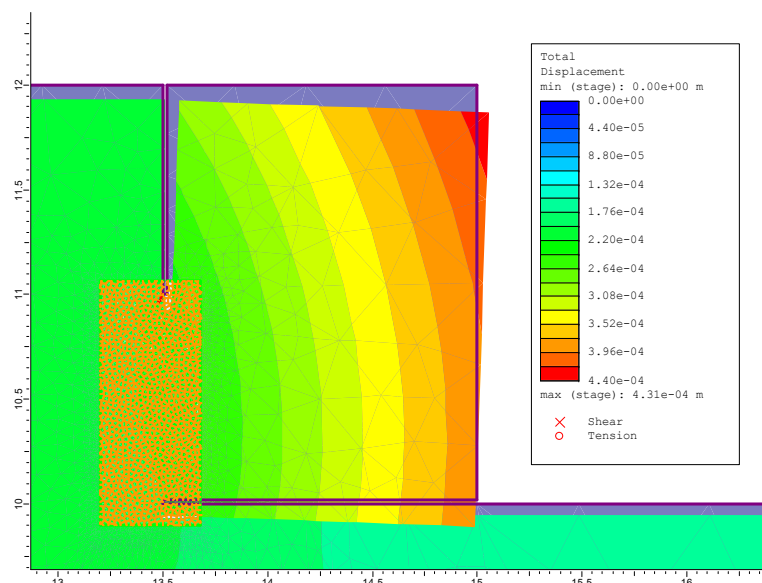
Na Tab. 8.5, são apresentados os resultados da modelagem do talude com ruptura por tombamento.

Tabela 8.5 - Resultados da análise de estabilidade do talude no mecanismo de ruptura por espalhamento.

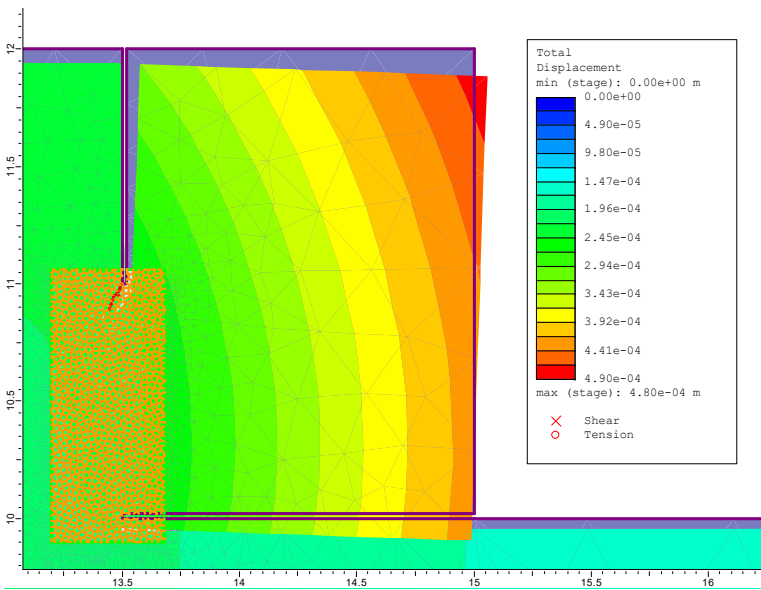
**Incremento de
gravidade**

Conformação da superfície (Deslocamento total)

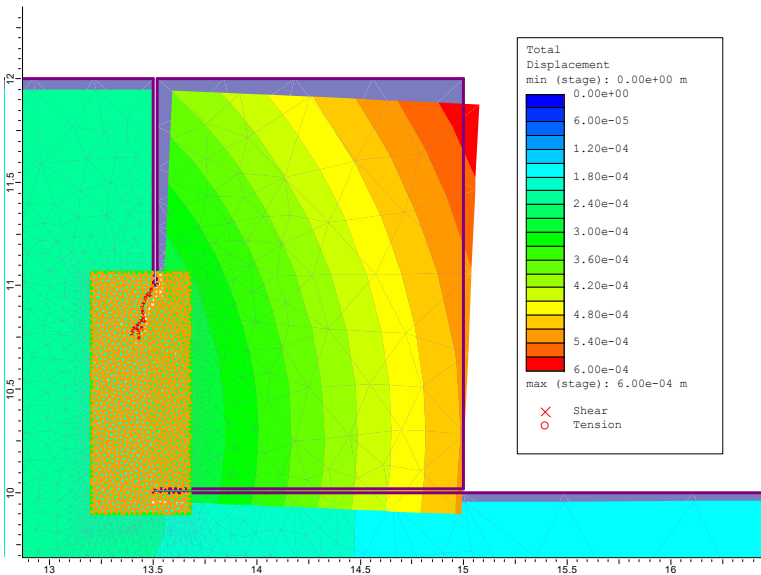
11.1



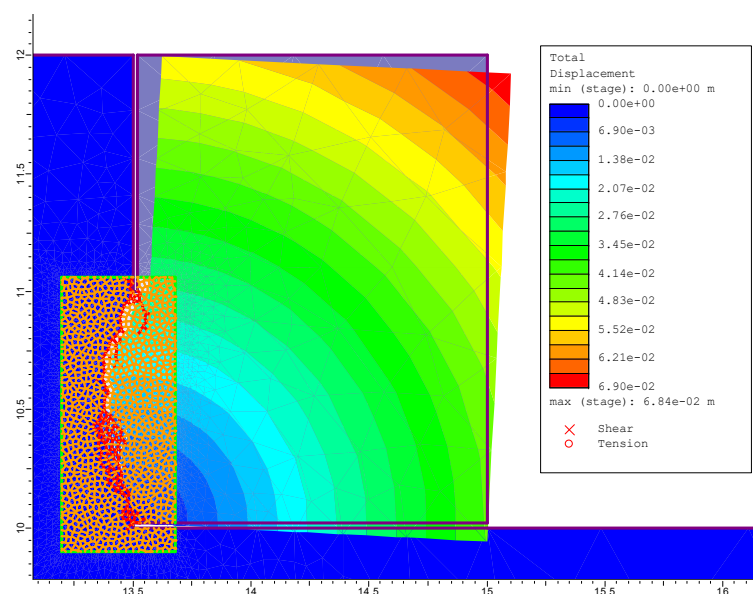
11.4



11.5



11.6



8.3 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM OUTRAS METODOLOGIAS

As geometrias dos taludes previamente analisados resultam em diferentes formas de propagação das fraturas, sendo identificadas fraturas por tração direta, tração induzida por flexão e tração combinada com cisalhamento. Nesta seção, examinou-se a condição de ruptura dos taludes em cada mecanismo, avaliaram-se as trajetórias obtidas e analisaram-se os modos de propagação de fratura que atuam em cada ponte de rocha intacta após ruptura.

Com o intuito de contrastar os resultados obtidos com o material calibrado, na Fig. 8.4 comparam-se com os obtidos empregando o modelo MCEP.

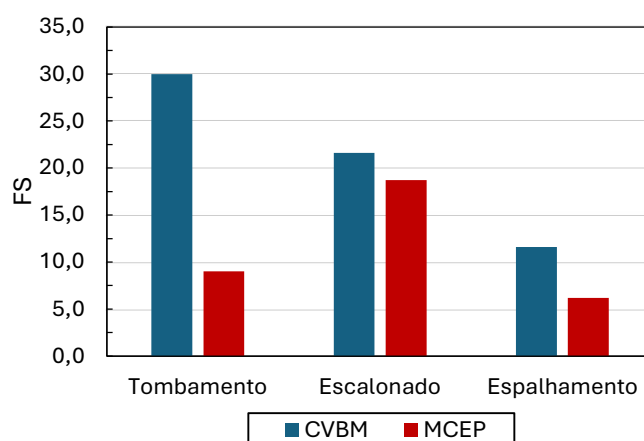


Figura 8.4 - Fatores de segurança obtidos com o modelo CVBM e o modelo MCEP nos diferentes mecanismos avaliados.

8.4 - CONCLUSÕES PARCIAIS

Os mecanismos de ruptura escalonada, tombamento e espalhamento lateral foram reproduzidos empregando o modelo proposto. Os resultados de estabilidade foram comparados com os obtidos com o modelo MCEP, mostrando uma diferença significativa. Considerando que os taludes analisados foram escolhidos por gerar mecanismos de ruptura que envolvem o modo I – parâmetro calibrado e verificado nesta dissertação –, considera-se que o método proposto é mais adequado do que o modelo MCEP, para representar esses mecanismos de ruptura.

A diferença observada entre os fatores de segurança obtidos pelas abordagens indica a necessidade de sofisticar as abordagens realizadas para o estudo dos meios fraturados. No entanto, o tempo de computação é uma barreira na implementação de metodologias mais sofisticadas. Neste sentido, propostas como o CVBM tornam-se alternativas atrativas, dada sua eficiência computacional permitindo aplicar o método em diversas escalas com tempos de computação razoáveis.

Os resultados de estabilidade dos modelos CVBM e MCEP apresentam comportamentos distintos em função da escala, da persistência e das condições de contorno, como evidenciado no Capítulo 7 - . A diferença observada nos casos analisados neste capítulo refere-se exclusivamente aos cenários estudados, podendo ser inversa e variar em maior ou menor grau, dependendo das condições de contorno.

9 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

O modelo CVBM incorporou com sucesso a tenacidade no modo I em seu algoritmo de calibração. A capacidade da metodologia de replicar o valor do parâmetro em diferentes condições de contorno, foi verificada em escala laboratorial por meio dos ensaios CCT, SCB e CSTBD. Conclui-se que a metodologia proposta para a calibração do modelo, assim como o próprio modelo, é adequada para representar o fenômeno em escala laboratorial.

Embora o processo de calibração do material não tenha considerado a tenacidade à fratura no modo II entre seus parâmetros objetivo, seu comportamento no modo misto foi analisado por meio dos ensaios SCB e CSTBD, com fratura inclinada, e das condições de contorno da PEI. Os resultados não permitem definir um comportamento padrão no modo misto, evidenciando variações significativas em função das condições de contorno.

Devido a essa variação, a envoltória de propagação proposta não é característica do material, sendo adotada nesta pesquisa exclusivamente para comparações com o caso do talude com uma fratura centrada, que possui condições de contorno similares. Assim, é conveniente incluir os valores negativos da tenacidade no modo I, diferentemente de outros critérios.

A aplicação do material calibrado em escala de campo com taludes de geometria simplificada permitiu comparar o desempenho do modelo com soluções teóricas de referência fundamentadas na MFLE, além de contrastar os resultados obtidos com os de outras metodologias. Dessa forma, as principais conclusões são:

No caso de um bloco que desliza em um plano inclinado, os resultados de estabilidade foram comparados com duas condições semelhantes. Observou-se que os fatores de segurança do modelo permaneceram dentro da faixa de valores estimados pelas soluções de referência, o que era esperado, dado que as condições de contorno do talude são intermediárias entre as das soluções de referência.

No talude com a fratura centrada, evidenciou-se grande aderência dos resultados de estabilidade à solução de referência, o que se relaciona com a semelhança entre as condições de contorno e a envoltória empregada. Esta envolve o modo misto, que, conforme concluído anteriormente, apresenta variações em função da condição de contorno. Portanto, caso sejam consideradas outras geometrias de ruptura que envolvam o modo misto de propagação, será difícil concluir se o critério de propagação continuará sendo representativo da condição limite do modelo.

Nos dois casos mencionados, observam-se diferenças entre a metodologia proposta e o modelo MCEP, que demonstraram dependência da persistência e da escala avaliada.

Para taludes de geometrias complexas, suscetíveis à ocorrência dos mecanismos de ruptura escalonada, tombamento e espalhamento lateral, a diferença também é observada. Considerando que esses mecanismos foram escolhidos pois sua ruptura ocorre com a propagação da fratura principalmente no modo I, sendo, portanto, interessantes para sua análise por meio da aplicação da metodologia proposta, e frente à diferença significativa obtida em cada modelo em relação ao modelo MCEP, conclui-se que o parâmetro de tenacidade à fratura deve ser uma variável a ser considerada ao tratar de meios fraturados. Nesse intuito, os GBM são uma ferramenta de modelagem com potencial para representar os diversos fenômenos envolvidos.

Como mostrado nas diferentes análises realizadas nos diferentes taludes, os fatores de segurança estão significativamente distantes de valores próximos à unidade, os quais poderiam ser considerados críticos. Essa característica decorre das geometrias adotadas para as análises, que favorecem a ocorrência de deslocamentos graduais a cada progressão dos incrementos de gravidade, resultando em uma ruptura controlada. Essa consideração é pertinente, pois facilita a convergência do método numérico, permitindo a avaliação de diferentes mecanismos com geometrias desafiadoras.

Observa-se que a eficiência computacional do método possibilitou a conclusão das análises de estabilidade de cada um dos mecanismos avaliados em tempos de computação próximos a 35 minutos nos modelos maiores. Para isso, utilizou-se um laptop Acer Nitro 5 com processador Intel(R) Core(TM) i5-8300H @2.30GHz 2.30 GHz, 20GB de memória RAM e Windows 10 com arquitetura de 64bit. Nesse contexto, o CVBM se destaca por sua eficiência computacional, permitindo a aplicação da MFLE em escala de campo, com um tempo de computação reduzido e utilizando equipamentos de menor capacidade em comparação a outras metodologias.

De forma geral, esta pesquisa enfatiza a incorporação de enfoques que considerem a tenacidade à propagação da fratura como uma variável de calibração fundamental na análise de meios fraturados, uma vez que, como discutido, essa propriedade exerce grande influência sobre a estabilidade. Embora a análise realizada nesta dissertação tenha sido conduzida para avaliar a propagação de fraturas em rocha intacta, reconhece-se que a presença de planos

preferenciais pode ter uma influência significativa no comportamento da fratura, significado uma limitação nas possíveis aplicações da metodologia proposta.

9.1 - RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Considerando que as abordagens adotadas nesta pesquisa para a aplicação do modo misto foram exploratórias, recomenda-se que futuras pesquisas se aprofundem no entendimento das variáveis envolvidas no modo II, procurando calibrar uma tenacidade no modo II estável em diferentes condições de contorno e que permita a aplicação do modelo com alta fidelidade fenomenológica.

Nesta dissertação, a condição dos blocos rígidos e elásticos foi uma simplificação útil, reduzindo a quantidade de variáveis envolvidas e a influência do tamanho de malha de elementos finitos. No entanto, recomenda-se a exploração do modo misto, modificando esta condição que, como discutido, simplifica, mas também parece limitar as possibilidades do modelo e o comportamento do material.

Considerando que a presença de planos preferenciais pode ter uma influência significativa no comportamento da fratura, recomenda-se que futuras pesquisas busquem aprimorar a metodologia proposta, procurando mecanismos para incorporar essa condição ao modelo, sendo a consideração de tenacidades à fratura anisotrópicas uma estratégia a ser explorada.

Os taludes avaliados com geometrias complexas correspondem a um único cenário, analisado exclusivamente para a representação do mecanismo. No entanto, na aplicação em campo, a geometria real das descontinuidades no interior do maciço é notoriamente difícil de ser determinada com precisão. As classificações usuais de maciços rochosos apresentam limitações significativas para a representação espacial detalhada dessas descontinuidades, uma vez que se baseiam em observações bidimensionais e descrições médias do maciço. Além disso, as traças visíveis nos afloramentos representam apenas a interseção entre os planos de descontinuidade e o plano do talude, fornecendo uma amostra incompleta da estrutura interna.

Portanto, recomenda-se que futuras pesquisas se concentrem no desenvolvimento de metodologias que permitam uma transição mais fiel entre o fenômeno estudado e os cenários aplicados, com o objetivo de estabelecer modelos geológicos que atendam à precisão requerida para análises confiáveis.

REFERÊNCIAS

- ACI Committee 446 (1992) Fracture Mechanics of Concrete Structures
- Åkesson U (2009) Svensk Kärnbränslehantering AB Characterisation of micro cracks caused by core-disking
- Amini M, Majdi A, Veshadi MA (2012) Stability analysis of rock slopes against block-flexure toppling failure. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 45:519–532. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0220-7>
- Amiri F, Bahrani N (2023) Continuum-Based Voronoi Tessellated Models for Capturing Unloading-Induced Brittle Damage in Hard Rocks. pp 137–145
- Atkinson C, Smelser. RE, and Sanchez J (1982). Combined mode fracture via the cracked Brazilian disk test. *Int J Fract.* 18 (4): 279–291
- Bahrani N, Li Y, Hamediazad F, et al (2023) Application of Continuum-Based Voronoi Tessellated Models for Simulating Brittle Damage and Failure in Hard Rocks. pp 711–719
- Bazant ZE, Planas J (1998) Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials. CRC Press, Boca Raton, Boston, London, New York, Washington, D.C.
- Bolander JE, Saito S (1998) Fracture analyses using spring networks with random geometry
- C Wyllie D, W Mah C (2005) Rock Slope Engineering: Civil and Mining, 4th Edition
- Cruden DM, Varnes DJ (1996) Landslide types and processes. In: Turner AK, Schuster RL (eds) Landslides: Investigation and Mitigation. Special Report 247, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington, D.C., pp 36–75.
- Deyab SM, Ahmadihosseini A, Rafezi H, et al (2023) Investigating Microwave Treatment of Rocks Based on Fracture Mechanics Analysis in Mode I Fracture Toughness Test. *Rock Mech Rock Eng* 56:5275–5291. <https://doi.org/10.1007/s00603-023-03327-x>
- Einstein HH, Veneziano D, Baecher GB, O'Reilly KJ (1983) The effect of discontinuity persistence on rock slope stability. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 20(5):227–236. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(83\)90003-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(83)90003-7)
- Fairhurst C (2013) Fractures and fracturing: Hydraulic fracturing in jointed rock. In: ISRM International Conference for Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing 2013. International Society for Rock Mechanics, pp 47–79
- Froude MJ, Petley DN (2018) Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 18:2161–2181. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018>
- Galone L, Feliziani F, Colica E, et al (2024) Evolution of Coastal Cliffs Characterized by Lateral Spreading in the Maltese Archipelago. *Remote Sens (Basel)* 16:. <https://doi.org/10.3390/rs16163072>
- Gao W, Dai S, Xiao T, He T (2017) Failure process of rock slopes with cracks based on the fracture mechanics method. *Eng Geol* 231:190–199. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.10.020>
- Ghazvinian E, Diederichs MS, Quey R (2014) 3D random Voronoi grain-based models for simulation of brittle rock damage and fabric-guided micro-fracturing. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 6:506–521. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.09.001>
- Goodman RE, Bray JW (1976) Toppling of rock slopes

- Griffith, A. A. (1921) "The phenomena of rupture and flow in solids." *Philos. T. Roy. Soc. A*, 221, 163-197.
- Griffith, A. A. (1924) 'The theory of rupture.' In *Proceedings of the First International Conference of Applied Mechanics*, pp. 55-63.
- Hamediazad F, Bahrani N (2022) Simulation of hard rock pillar failure using 2D continuum-based Voronoi tessellated models: The case of Quirke Mine, Canada. *Comput Geotech* 148:. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.104808>
- Huang J, Wang L, Zhou M, et al (2023) Investigation of the compression-shear fracture characteristics of flaw-filled sandstone under confining pressure. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 128:. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2023.104154>
- Inglis, C. E. (1913) "Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp comers." *T. Inst. Naval Architects*, 55, 219-241.
- Irwin, G. R. (1957) "Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate." *J. Appl. Mech.-T. ASME*, 24, 361-364.
- Ji D, Cheng H, Zhao H (2024) A Voronoi tessellated model considering damage evolution for modeling meso-mechanical mechanism of the sandstone. *Eng Anal Bound Elem* 158:446–467. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2023.11.013>
- Ke CC, Chen CS, Tu CH (2008) Determination of fracture toughness of anisotropic rocks by boundary element method. *Rock Mech Rock Eng* 41:509–538. <https://doi.org/10.1007/s00603-005-0089-9>
- Kou H, Shi Z, Lu G, et al (2024) Progressive failure and quantitative stability analysis of rock slope with cross-type discrete fracture network using spring-based smoothed particle hydrodynamics method. *Alexandria Engineering Journal* 105:25–43. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.06.054>
- Lan H, Martin CD, Hu B (2010) Effect of heterogeneity of brittle rock on micromechanical extensile behavior during compression loading. *J Geophys Res* 115:. <https://doi.org/10.1029/2009jb006496>
- Li Y, Bahrani N (2021) Strength and failure mechanism of highly interlocked jointed pillars: Insights from upscaled continuum grain-based models of a jointed rock mass analogue. *Comput Geotech* 137:. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104278>
- Lv Y, Li H, Zhu X, Liu W (2017) Discrete element method simulation of random Voronoi grain-based models. *Cluster Comput* 20:335–345. <https://doi.org/10.1007/s10586-016-0705-3>
- Martin CD (1994) *The strength of massive Lac du Bonnet granite around underground openings*. National Library of Canada = Bibliothèque nationale du Canada
- Mohanty M, Sarkar R, Das SK (2022) Probabilistic assessment of effects of heterogeneity on the stability of coal mine overburden dump slopes through discrete element framework. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 81:. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02720-0>
- Omidimanesh M, Sarfarazi V, Babanouri N, Rezaei A (2023) Investigation of Fracture Toughness of Shotcrete using Semi-Circular Bend Test and Notched Brazilian Disc test; Experimental Test and Numerical Approach. *Journal of Mining and Environment* 14:233–242. <https://doi.org/10.22044/jme.2022.12465.2263>
- Potyondy DO, Cundall PA (2004) A bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41:1329–1364. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.09.011>

- Rabiei M, Samea P, Shadi A, Ghoreishi-Madiseh SA (2023) A discrete element analysis for general failure behavior of basalt. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 167:.. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2023.105394>
- Rasmussen LL (2021) Hybrid lattice/discrete element method for bonded block modeling of rocks. *Comput Geotech* 130:.. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103907>
- Rasmussen LL, Min K-B (2024) Hybrid lattice/discrete element analysis of spalling failure in rock tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology* 153:106034. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.106034>
- Sanipour S, Bahrani N, Corkum A (2022) Simulation of Brittle Failure Around Canada's Mine-By Experiment Tunnel Using 2D Continuum-Based Voronoi Tessellated Models. *Rock Mech Rock Eng* 55:6387–6408. <https://doi.org/10.1007/s00603-022-02969-7>
- Satheesh P V., Shirole D, Sinha S (2024) Investigation of the Effect of Confinement on Intact Wombeyan Marble Using Continuum Grain-Based Model (CGBM). *The American Rock Mechanics Association*
- Sim K Ben, Lee ML, RemenytePrescott R, Wong SY (2023) Perception on landslide risk in Malaysia: A comparison between communities and experts' surveys. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 95:.. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103854>
- Soares ERS (2021) Modelagem de ruptura de obras subterrâneas em maciços rochosos com elevadas tensões de campo. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) —Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 122 f. <https://repositorio.unb.br/handle/10482/41239>
- Soares ERS, Farias MM de, Rasmussen LL (2022) The Continuum Voronoi Block Model for simulation of fracture process in hard rocks. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 46(1):89–112. <https://doi.org/10.1002/nag.3292>
- Soldati M, Pasuto A (1991) Some cases of deep-seated gravitational deformations in the area of Cortina d'Ampezzo (Dolomites). *Implications in environmental risk assessment*
- Spreafico MC, Cervi F, Francioni M, et al (2017) An investigation into the development of toppling at the edge of fractured rock plateaux using a numerical modelling approach. *Geomorphology* 288:83–98. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.03.023>
- Suo Y, Dong M, Wang Z, et al (2022) Characteristics of mixed-mode I-II fracture of bedding mud shale based on discrete element method. *J Pet Sci Eng* 219:.. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111135>
- Tada H-PPC-IGR (2000) *The Stress Analysis of Cracks Handbook*, 3rd edn. New York
- Tharp TM, Coffin DT (1985) Field application of fracture mechanics analysis to small rock slopes. In: Ashworth E (ed) *Proceedings of the 26th US Symposium on Rock Mechanics*, South Dakota School of Mines & Technology, Rapid City, SD, 26–28 June 1985. A.A. Balkema, Rotterdam, pp 667–674.
- Theocaris PS, Michopoulos JG (1983) A Closed-Form Solution Of A Slant Crack Under Biaxial Loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 17(2): 97-123. [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(83\)90163-7](https://doi.org/10.1016/0013-7944(83)90163-7)
- Ochoa Valderrama J (2023). Modelagem do comportamento de rochas na escala de laboratório empregando o CVBM heterogêneo (Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia). <https://www.repositorio.unb.br/handle/10482/48823?locale=fr>

- Wang C, Leng XL, Zhang ZR, et al (2023a) Numerical study on failure path of rock slope induced by multi-stage excavation unloading based on crack propagation. *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics* 44:1190–1203. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2022.0667>
- Wang R, Li Y, Guan F, et al (2023b) Mode I fracturing behavior of Malan loess and implications for the toppling failure of loess slopes. *Eng Geol* 319:. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107110>
- Zhao Y, Zheng K, and Wang C (2024). *Rock Fracture Mechanics and Fracture Criteria*. Springer Nature Singapore Pte Ltd., Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-97-5822-7>
- Zhou Z, Gao T, Sun J, et al (2024) An FDM-DEM coupling method based on REV for stability analysis of tunnel surrounding rock. *Tunnelling and Underground Space Technology* 152:. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105917>

APÊNDICES

Código empregado no cálculo dos FS no modo misto

O algoritmo empregado na obtenção dos resultados de estabilidade do talude com a fratura centrada, com fundamentos na envoltória no modo misto, os quais são mostrados na Seção 7.2.4, é apresentado a seguir.

```
import numpy as np
import math as mt
import matplotlib.pyplot as plt

#INPUT - Geometría del talud
print("Ingrese la altura del talud [m]: ")
H=float(input())#(m) Altura del talud
print("Ingrese el ángulo de la discontinuidad [°]: ")
beta=float(input())# angulo de la discontinuidad
print("Ingrese la persistencia de la discontinuidad [%]: ")
P=float(input())/100# Persistencia de la discontinuidad

b=1.0 #(m) Profundidad analizada
alfa=90 #(°) Inclinação de la cara del talud

#Material
PE=26.7 #(kN/m³) Peso específico del material
KIC=1.82 # Tenacidad a la fractura en el modo I
KIIC=0.85

#OUTPUT - Geometría del talud
teta=alfa-beta #(°)
betar=np.radians(beta) # radianes
```

```

tetar=np.radians(teta) # radianes
B=H/np.sin(betar) # Longitud de la superficie"
a=P*B # Longitud de la discontinuidad (100% de la longitud)
vol=((mt.tan((tetar))*H)*H)/2)*b #(m³) Volumen del bloque

#Carga
carga=PE*vol/1000 #(MN) Total
N=carga*np.cos(betar)/(B) #Normal
T=carga*np.sin(betar)/(B) #Cizallante

#SIF del estado natural
KI=-N*(np.pi*a/2)**0.5
KII=T*(np.pi*a/2)**0.5
K=[beta,KI,KII]

#Incrementos de gravedad (FS)
KIG=KI # SIF incrementado por la gravedad modo I
KIIG=KII #SIF incrementado por la gravedad modo II
inc=1 #Definición del contador de incrementos de gravedad
if np.abs(KI)>0.001:

    #Cálculo de valores de SIF acturante
    if KIG>KIC:
        FS="Falla por tracción"
    else:
        KIR=(1-(((KIIG/KIIC)**3)))*KIC #SIF actuante

#Incrementos
if KIG<KIC:

```

```

while KIG<KIR:
    inc=inc+0.01
    KIG=KI*inc
    KIIG=KII*inc
    #Criterio de falla
    KIR=(1-(((KIIG/KIIC)**3)))*KIC
    if KIR<KIG:
        FS=inc
    next
else:
    FS="Tiende al infinito"

#Resutados
print()
print("_____")
print("SIF actuantes: ", "KI = ", round(KI,3), " MPa.√m", "KII = ", round(KII,3), " MPa.√m")
print("SIF resistentes: KI = ", round(KIG,3), " MPa.√m", "KII = ", round(KIIG,3), " MPa.√m")
print("FS= ", round(FS,2))

#Gráfica
n=120
K=np.zeros([n,2])
for i in range (0,n):
    K[i]=[(1-(((i/100)/KIIC)**3))*KIC,i/100]
next

#Mostrar gráfica
print()
# Create the figure and axis

```

```

fig, aKII = plt.subplots()

# Plot the data
aKII.plot(K[:,1],K[:,0], label='Envoltoria de propagação', color='firebrick', linestyle='--',
linewidth=2)

# Customize the plot
label_text = f"FS do talude de: \nH= {H:.2f} m,  $\beta$ = {beta:.0f}° e Pers.= {P*100:.0f} %\n"
aKII.set_title(label_text,fontsize=14)
aKII.set_xlabel('KII [MPa. $\sqrt{m}$ ]',fontsize=13)
aKII.set_ylabel('KI [MPa. $\sqrt{m}$ ]',fontsize=13)
aKII.grid(False)

# Add legend to the plot
aKII.legend(loc='lower left')
label_text2=f"Fator de segurança= {FS:.2f}"
aKII.text(0.1, -1.5,label_text2, fontsize=13, bbox=dict(facecolor='white', alpha=0.5))

# Plot two points
aKII.scatter([KIIG, KII], [KIG, KI], color=['firebrick', 'darkblue'], label='Points', zorder=3)
aKII.text(KIIG+0.03, KIG, 'SIFs limites', color='black', fontsize=10,
verticalalignment='bottom')
aKII.text(KII+0.03, KI, 'SIFs atuantes', color='black', fontsize=10,
verticalalignment='bottom')

# Show the plot
plt.show()
print("_____")
print()

```