

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

**MODELAGEM DO COMPORTAMENTO E  
FRATURAMENTO DE ROCHAS EM COMPRESSÃO  
TRIAxIAL USANDO MODELO DE MECANISMO DE DANO**

**JAIR OCHOA VALDERRAMA**

**ORIENTADOR: ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD.**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.DM 314/2018**

**BRASÍLIA/DF: JULHO/2018**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**MODELAGEM DO COMPORTAMENTO E**  
**FRATURAMENTO DE ROCHAS EM COMPRESSÃO**  
**TRIAxIAL USANDO MODELO DE MECANISMO DE DANO**

**JAIR OCHOA VALDERRAMA**

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

**APROVADA POR:**

---

**ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD (ENC, UnB)**  
**(ORIENTADOR)**

---

**ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, DSc (ENC, UnB)**  
**(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**GABRIEL JAIME ZAPATA GUERRA, DSc (ENC, UCB)**  
**(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 30 do JULHO de 2018.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

VALDERRAMA, JAIR OCHOA

Modelagem do Comportamento e Fraturamento de Rochas em Compressão Triaxial usando Modelo de Mecanismo de Dano. [Distrito Federal] 2018

xxiii, 115p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2018)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

- |   |                            |
|---|----------------------------|
| 1. Ensaio de Compressão Triaxial em Rocha | 2. Mecanismo de Dano       |
| 3. Modelagem Numérica                     | 4. Curva Tensão-Deformação |
| I. ENC/FT/UNB                             | II. Mestre                 |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VALDERRAMA, J.O. (2018). Modelagem do Comportamento e Fraturamento de Rochas em Compressão Triaxial usando Modelo de Mecanismo de Dano. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM 314/2018, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 115p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Jair Ochoa Valderrama.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Modelagem do Comportamento e Fraturamento de Rochas em Compressão Triaxial usando Modelo de Mecanismo de Dano.

GRAU / ANO: Mestre / 2018.

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.



Jair Ochoa Valderrama

E-mail: jaircivil25@hotmail.com

# DEDICATÓRIA

*A mi familia y a  
mi abuelo Manuel,  
los llevo siempre en mi  
corazón*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pela saúde que tem me outorgado para aproveitar todas as oportunidades que têm-se me apresentado no meu caminho e por me acompanhar e proteger sempre.

Aos meus pais Marie e Edgar, por todos os seus ensinamentos para me virar na melhor versão que eu posso ser e pelo apoio incondicional em todas as minhas decisões. Aos meus irmãos Elizabeth, Jeider e Catalina, pelo seu acompanhamento desde a infância.

A minha namorada Andrea, pela paciência e ajuda durante esta etapa de mestrado, por compartilhar uma parte do seu coração comigo e por confiar em mim, admiro muito tua entrega e disposição. Obrigado amor.

Ao meu orientador, o professor André Assis, pela confiança depositada em mim, sua humildade e seu apoio constante, minha admiração e gratidão total.

Aos membros da banca examinadora, por seus apontamentos e sugestões construtivas.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, por me dar todo o conhecimento adquirido nestes dois anos, assim com também, aos professores que compartilharam parte da sua sabedoria conosco.

Ao CNPq pelo apoio econômico durante o desenvolvimento desta pesquisa.

E por último, agradeço a todos aqueles com os quais comparti diferentes momentos durante o meu mestrado e que enriqueceram, de alguma ou outra forma, esta experiência.

# **MODELAGEM DO COMPORTAMENTO E FRATURAMENTO DE ROCHAS EM COMPRESSÃO TRIAxIAL USANDO MODELO DE MECANISMO DE DANO**

## **RESUMO**

Um dos principais tópicos de pesquisa em mecânica de materiais tem que ver com o entendimento do processo de geração, crescimento e coalescência das fraturas no interior de um material submetido a diferentes perturbações externas, destacando-se o carregamento mecânico, as variações térmicas e as reações químicas. Com este objetivo em mente têm sido desenvolvidos vários modelos que tentam explicar o fenômeno de degradação e ruptura dos materiais a partir da teoria da Mecânica do Dano Contínuo (MDC), a qual permite representar a danificação do material a través de uma variável interna de dano, que pode ser de tipo escalar, vectorial ou tensorial. Com base nesta teoria foi formulado o modelo fenomenológico de Mecanismo de Dano desenvolvido por Hooputra *et al.* no 2004 para materiais metálicos, que usa uma variável escalar de dano, sendo a ideia principal deste trabalho aplicar-lhe à modelagem do processo de ruptura das rochas submetidas a estados de carregamento de compressão uniaxial e triaxial, usando o programa ABAQUS®. Com o objetivo de definir o alcance do modelo de dano, foram simulados vários ensaios tentando reproduzir o comportamento de dois tipos de rochas: um Arenito e um Granito, analisando duas incógnitas principais, a primeira é o nível de tensão a partir do qual inicia o dano, sendo avaliada a tensão de dano por fraturas e a tensão pico, e a segunda abrange o critério que permite conseguir o início do dano, tendo igualmente duas opções, o critério cisalhante ou o dúctil. Além disso, foram analisados os efeitos de vários parâmetros do modelo nas curvas tensão-deformação e nas superfícies de ruptura conseguidas. Os resultados obtidos mostram que ambos os critérios conseguem o mesmo desempenho no ajuste do comportamento das duas rochas analisadas, não obstante, o critério dúctil precisa de um parâmetro menos. Por outra parte o ponto de início do dano pode ser assumido em qualquer nível de tensão prévio à resistência máxima do material, o início da degradação na tensão de dano por fraturas é conceitualmente mais congruente com o comportamento das rochas submetidas a estados de compressão.

# **BEHAVIOR AND FRACTURE SIMULATION OF ROCKS IN TRIAXIAL COMPRESSION USING THE DAMAGE MECHANISM METHOD**

## **ABSTRACT**

One of the main research topics in material mechanics has to do with the understanding of the process of generation, growth and coalescence of fractures within a material subjected to different external perturbations, especially mechanical loading, thermal variations and chemical reactions. With this objective in mind, several models have been developed that attempt to explain the phenomenon of material degradation and rupture from the theory of Continuous Damage Mechanics (CDM), which allows to represent the damage of the material through an internal damage variable, which can be a scalar, a vectorial or a tensorial type. Based on this theory was formulated the phenomenological model of the Damage Mechanism developed by Hooputra *et al.* in 2004 for metallic materials, which uses a scalar damage variable; the main idea of this work is to apply this model to the representation of the process of rupture in rocks subjected to uniaxial and triaxial compression loading states, using the ABAQUS® program. In order to define the extent of the damage model, several tests were simulated to reproduce the behavior of two types of rocks: a Sandstone and a Granite, analyzing two main unknowns, the first is the tension level from which the damage begins, being the fracture damage stress or the peak stress, and the second one covers the criterion that allows to start the damage, also having two options, the shear criterion or the ductile criterion. In addition, the effects of various model parameters on stress-strain curves and rupture surfaces were analyzed. The results show that both criteria achieve the same performance in the adjustment of the behavior of the two rocks, nevertheless, the ductile criterion needs a less parameter. On the other hand, the starting point of the damage can be assumed at any stress level prior to the maximum strength of the material, the beginning of the degradation in the fracture damage stress is conceptually more congruent with the behavior of the rocks subjected to compression states.

# SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	x
LISTA DE FIGURAS .....	xii
LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES .....	xxi
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. APRESENTAÇÃO.....	1
1.2. MOTIVAÇÃO.....	3
1.3. JUSTIFICATIVA .....	3
1.4. OBJETIVOS .....	4
1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	4
2. COMPORTAMENTO DE ROCHAS E MODELO DE DANO .....	6
2.1. COMPORTAMENTO DAS ROCHAS EM COMPRESSÃO E CURVA TENSÃO- DEFORMAÇÃO .....	6
2.2. MECÂNICA DO DANO CONTÍNUO E O MODELO FENOMENOLÓGICO.....	9
2.3. MODELO CONSTITUTIVO DE DRUCKER-PRAGER ESTENDIDO.....	12
2.4. MODELO DE MECANISMO DE DANO DÚCTIL E CISALHANTE IMPLEMENTADO NO PROGRAMA ABAQUS® .....	16
2.5. ENERGIA DISSIPADA NA FRATURA E COMPRIMENTO CARACTERÍSTICO.....	23
3. METODOLOGIA DO TRABALHO.....	29
3.1. MODELAGEM DE ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES E TRIAXIAIS ...	29
3.2. DADOS EXPERIMENTAIS DAS ROCHAS ANALISADAS .....	31
3.2.1. ARENITO .....	31
3.2.2. GRANITO.....	38
4. MODELAGEM DE ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES .....	44
4.1. UCT ARENITO.....	44
4.1.1. Curvas tensão-deformação .....	45
4.1.2. Superfícies de fratura .....	57

4.1.3.	Considerações finais.....	67
4.2.	UCT GRANITO .....	71
4.2.1.	Curvas tensão-deformação .....	71
4.2.2.	Superfícies de fratura .....	80
4.2.3.	Considerações finais.....	90
5.	MODELAGEM DE ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL .....	94
5.1.	TRIAXIAL ARENITO .....	94
5.2.	TRIAXIAL GRANITO .....	105
6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	110
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	112

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Parâmetros das envoltórias de ruptura e de dano do Arenito para ambos os modelos M-C e D-P.....	33
Tabela 3.2. Propriedades gerais do Arenito. ....	34
Tabela 3.3. Evolução das deformações plásticas com a tensão de endurecimento obtida da curva de compressão não confinada do Arenito.....	35
Tabela 3.4. Valores típicos usados das variáveis necessárias para o Mecanismo de Dano, considerando o critério cisalhante e início do dano na $\sigma_{cd}$ para o Arenito. ....	36
Tabela 3.5. Valores típicos usados das variáveis necessárias para o Mecanismo de Dano, considerando o critério cisalhante e início do dano na $\sigma_{máx}$ para o Arenito. ....	36
Tabela 3.6. Valores típicos usados das variáveis necessárias para o Mecanismo de Dano, considerando o critério dúctil e início do dano na $\sigma_{cd}$ para o Arenito. ....	37
Tabela 3.7. Valores típicos usados das variáveis necessárias para o Mecanismo de Dano, considerando o critério dúctil e início do dano na $\sigma_{máx}$ para o Arenito.....	37
Tabela 3.8. Parâmetros das envoltórias de ruptura e de dano do Granito para ambos os modelos M-C e D-P .....	40
Tabela 3.9. Evolução das deformações plásticas com a tensão de endurecimento obtida da curva de compressão não confinada do Granito.....	41
Tabela 3.10. Propriedades gerais do Granito. ....	41
Tabela 3.11. Valores típicos usados das variáveis necessárias para o Mecanismo de Dano, considerando o critério cisalhante e início do dano na $\sigma_{cd}$ para o Granito. ....	42
Tabela 3.12. Valores típicos usados das variáveis necessárias para o Mecanismo de Dano, considerando o critério cisalhante e início do dano na $\sigma_{máx}$ para o Granito. ....	42
Tabela 3.13. Valores típicos usados das variáveis necessárias para o Mecanismo de Dano, considerando o critério dúctil e início do dano na $\sigma_{cd}$ para o Granito. ....	43
Tabela 3.14. Valores típicos usados das variáveis necessárias para o Mecanismo de Dano, considerando o critério dúctil e início do dano na $\sigma_{máx}$ para o Granito.....	43
Tabela 4.1. Valores dos parâmetros usados nos modelos que melhor ajustam a curva tensão-deformação para o Arenito. ....	69
Tabela 4.2. Valores dos parâmetros usados nos modelos que melhor ajustam a curva tensão-deformação para o Granito. ....	92

Tabela 5.1. Evolução das deformações plásticas com a tensão de endurecimento usada no ajuste da curva de compressão uniaxial para a envoltória de ruptura calculada do Arenito.  
..... 97

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Fotografia do rockburst acontecido em túneis: explosão-deformação, ejeção de lascas superficiais de rocha (esquerda), e colapso de arco, queda de grandes blocos desde o teto da escavação (direita). Tomadas de Kaiser & Cai (2012) e Ortlepp & Stacey (1994), respetivamente. ....	2
Figura 2.1. Esquema da curva tensão-deformação em condição de compressão com as regiões ou zonas com comportamento diferenciado. Modificado de Hoek & Martin (2014). ....	8
Figura 2.2. Aplicações do Modelo de Dano Continuo MDC na modelagem de: (a) dano em elemento de alumínio (Hooputra <i>et al.</i> , 2004), (b) geração de superfície de ruptura em uma encosta (Alelvan, 2017), (c) ensaio de tração em corpos de prova de aço (Ribeiro <i>et al.</i> , 2016), (d) dano em pórtico de concreto reforçado (Alfarah <i>et al.</i> , 2017), (e) arrancamento de placa embebida em solo reforçado com fibras (López Santacruz <i>et al.</i> , 2016), (f) processo de corte em rocha (Martinez, 2012).....	11
Figura 2.3. Superfície de plastificação para o modelo linear de D-P estendido no plano $p-t$ . Tomado de ABAQUS (2014). ....	12
Figura 2.4. Variação da superfície de plastificação com o parâmetro $K$ no plano octaédrico. Tomado de ABAQUS (2014). ....	14
Figura 2.5. Representação de um modelo plástico (a), um modelo de dano (b) e um modelo plástico de dano (c). Tomado de Alfarah <i>et al.</i> (2017). ....	16
Figura 2.6. Curva tensão-deformação para o caso unidimensional considerando o Mecanismo de Dano. Trecho elástico o-a, trecho elasto-plástico a-b, amolecimento b-d. Modificado de ABAQUS (2014). ....	17
Figura 2.7. Tipos de fraturas consideradas para o início do dano. Modificado de ABAQUS (2005). ....	18
Figura 2.8. Diferencias entre os elementos de primeira ordem (a) e de segunda ordem (b). Modificado de ABAQUS (2014). ....	20
Figura 2.9. Lei de evolução do dano permitido quando é especificado o deslocamento plástico equivalente na falha. Modificado de ABAQUS (2014). ....	21
Figura 2.10. Modos de distorção básicos para a propagação das fraturas. Modo I: abertura normal ao plano da fratura; Modo II: cisalhamento no plano; Modo III: cisalhamento fora do plano. Modificado de Paterson & Wong (2005). ....	24
Figura 2.11. Esquema do modo de fratura tipo I e definição da Zona do Processo de Fratura (ZPF). Modificado de Rasmussen <i>et al.</i> (2018). ....	25

Figura 2.12. Curva tensão-abertura da fratura e energia dissipada por unidade de área $G_{IC}$ ..	25
Figura 2.13. Curva tensão-deformação de fratura e energia dissipada por unidade de volume $g_f$ .....	26
Figura 2.14. Curvas tensão-deslocamento do ensaio de tração em placas de morteiro modelado com diferentes tamanhos de elementos, sem considerar (a) e considerando o comprimento característico (b). Modificado de Brekelmans & de Vree (1995). .....	28
Figura 2.15. Leis de evolução do dano obtidas durante a calibração do modelo em função do tamanho dos elementos $l$ . Modificado de Levanger (2012). .....	28
Figura 3.1. Diagrama resumo das variáveis analisadas nos modelos de ensaio de compressão simples.....	31
Figura 3.2. Curvas tensão-deformação obtidas dos ensaios triaxiais para o Arenito. Reproduzido de Gowd & Rummel (1980). .....	32
Figura 3.3. Envoltórias de ruptura e de dano do Arenito para o modelo M-C (a) e D-P (b). ..	33
Figura 3.4. Curvas tensão-deformação dos ensaios triaxiais para o Granito. Modificado de Jacobsson (2004a, 2004b, 2004c).....	38
Figura 3.5. Figura resumo das curvas tensão-deformação dos ensaios triaxiais considerados para a análise do Granito. Reproduzido de Jacobsson (2004a, 2004b, 2004c). .....	39
Figura 3.6. Fotografias dos corpos de prova do Granito depois de finalizado o ensaio triaxial para diferentes tensões de confinamento. Modificado de Jacobsson (2004a, 2004b, 2004c). .....	39
Figura 3.7. Envoltórias de ruptura e de dano do Granito para o modelo M-C (a) e D-P (b). ..	40
Figura 4.1. Geometria (a), condições do contorno e carregamento (b) do modelo de ensaio triaxial inserido em ABAQUS® para a rocha Arenito.....	44
Figura 4.2. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Arenito sem dano, variando o valor do ângulo de dilatância $\psi$ e do parâmetro $K$ .....	45
Figura 4.3. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Arenito com início do dano na $\sigma_{cd}$ e critério cisalhante, variando o valor do ângulo de dilatância $\psi$ e do parâmetro $K$ . .....	47
Figura 4.4. Lei de evolução do dano linear para diferentes valores do deslocamento plástico equivalente na falha $\bar{u}_f^{pl}$ .....	48

Figura 4.5. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Arenito com início do dano na $\sigma_{cd}$ e critério cisalhante, variando o valor do deslocamento plástico equivalente na falha $\bar{u}_f^{pl}$ .....	49
Figura 4.6. Lei de evolução do dano com $\bar{u}_f^{pl}=5,00E-05m$ para diferentes valores do parâmetro de forma $\alpha$ .....	50
Figura 4.7. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Arenito com início do dano na $\sigma_{cd}$ e critério cisalhante, variando o valor do parâmetro de forma da lei de evolução do dano $\alpha$ .....	51
Figura 4.8. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Arenito com início do dano na $\sigma_{máx}$ e critério cisalhante, variando o valor do deslocamento plástico equivalente na falha $\bar{u}_f^{pl}$ .....	52
Figura 4.9. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Arenito com início do dano na $\sigma_{máx}$ e critério cisalhante, variando o valor do parâmetro de forma da lei de evolução do dano $\alpha$ .....	53
Figura 4.10. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Arenito com início do dano na $\sigma_{cd}$ e critério dúctil, variando o valor do ângulo de dilatância $\psi$ e do parâmetro $K$ . .....	53
Figura 4.11. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Arenito com início do dano na $\sigma_{cd}$ e critério dúctil, variando o valor do deslocamento plástico equivalente na falha $\bar{u}_f^{pl}$ .....	54
Figura 4.12. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Arenito com início do dano na $\sigma_{cd}$ e critério dúctil, variando o valor do parâmetro de forma da lei de evolução do dano $\alpha$ . .....	55
Figura 4.13. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Arenito com início do dano na $\sigma_{máx}$ e critério dúctil, variando o valor do deslocamento plástico equivalente na falha $\bar{u}_f^{pl}$ .....	56
Figura 4.14. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Arenito com início do dano na $\sigma_{máx}$ e critério dúctil, variando o valor do parâmetro de forma da lei de evolução do dano $\alpha$ . .....	56

Figura 4.15. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Arenito. Critério cisalhante, início do dano na  $\sigma_{cd}$  e: (a)  $\psi=0, K=0,778$ ; (b)  $\psi=0, K=1$ ; (c)  $\psi=\varphi/8, K=0,778$ ; (d)  $\psi=\varphi/8, K=1$ ; (e)  $\psi=\beta, K=0,778$ ; (f)  $\psi=\beta, K=1$ . ..... 57

Figura 4.16. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Arenito. Critério dúctil, início do dano na  $\sigma_{cd}$  e: (a)  $\psi=0, K=0,778$ ; (b)  $\psi=0, K=1$ ; (c)  $\psi=\varphi/8, K=0,778$ ; (d)  $\psi=\varphi/8, K=1$ ; (e)  $\psi=\beta, K=0,778$ ; (f)  $\psi=\beta, K=1$ . ..... 58

Figura 4.17. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Arenito. Critério cisalhante, início do dano na  $\sigma_{cd}$  e  $\bar{u}_f^{pl}$  igual a: (a) 1,00E-06m; (b) 5,00E-06m; (c) 1,00E-05m; (d) 5,00E-05m; (e) 1,00E-04m; (f) 5,00E-04m. .... 59

Figura 4.18. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Arenito. Critério cisalhante, início do dano na  $\sigma_{m\acute{a}x}$  e  $\bar{u}_f^{pl}$  igual a: (a) 1,00E-06m; (b) 5,00E-06m; (c) 1,00E-05m; (d) 5,00E-05m; (e) 1,00E-04m; (f) 5,00E-04m. .... 60

Figura 4.19. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Arenito. Critério dúctil, início do dano na  $\sigma_{cd}$  e  $\bar{u}_f^{pl}$  igual a: (a) 1,00E-06m; (b) 5,00E-06m; (c) 1,00E-05m; (d) 5,00E-05m; (e) 1,00E-04m; (f) 5,00E-04m. .... 61

Figura 4.20. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Arenito. Critério dúctil, início do dano na  $\sigma_{m\acute{a}x}$  e  $\bar{u}_f^{pl}$  igual a: (a) 1,00E-06m; (b) 5,00E-06m; (c) 1,00E-05m; (d) 5,00E-05m; (e) 1,00E-04m; (f) 5,00E-04m. .... 62

Figura 4.21. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Arenito. Critério cisalhante, início do dano na  $\sigma_{cd}$  e  $\alpha$  igual a: (a) -5; (b) -3; (c) -1; (d) 0; (e) 1; (f) 3; (g) 5; (h) 10. .... 63

Figura 4.22. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Arenito. Critério cisalhante, início do dano na  $\sigma_{m\acute{a}x}$  e  $\alpha$  igual a: (a) -5; (b) -3; (c) -1; (d) 0; (e) 1; (f) 3; (g) 5; (h) 10. .... 64

Figura 4.23. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Arenito. Critério dúctil, início do dano na  $\sigma_{cd}$  e  $\alpha$  igual a: (a) -5; (b) -3; (c) -1; (d) 0; (e) 1; (f) 3; (g) 5; (h) 10. .... 66

Figura 4.24. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Arenito. Critério dúctil, início do dano na  $\sigma_{m\acute{a}x}$  e  $\alpha$  igual a: (a) -5; (b) -3; (c) -1; (d) 0; (e) 1; (f) 3; (g) 5; (h) 10. .... 67

Figura 4.25. Melhor ajuste obtido da curva tensão-deformação (direita) para o Arenito usando a lei de evolução do dano inserida de forma tabular (esquerda), para os diferentes critérios e pontos do início do dano.....	69
Figura 4.26. Corpos de prova do modelo que melhor ajusta a curva tensão-deformação do Arenito, um instante anterior (esquerda) e posterior (direita) do momento da ruptura total para os dois critérios e pontos de início do dano.....	70
Figura 4.27. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Arenito com início do dano na $\sigma_{cd}$ e critério cisalhante, variando a relação entre o tamanho máximo dos elementos da malha $l_{máx}$ e a altura do corpo de prova $h$ . ....	71
Figura 4.28. Geometria (a), condições do contorno e carregamento (b) do modelo de ensaio triaxial inserido em ABAQUS® para a rocha Granito.....	72
Figura 4.29. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Granito sem dano, variando o valor do ângulo de dilatância $\psi$ e do parâmetro $K$ .....	73
Figura 4.30. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Granito com início do dano na $\sigma_{cd}$ e critério cisalhante, variando o valor do ângulo de dilatância $\psi$ e do parâmetro $K$ . ....	73
Figura 4.31. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Granito com início do dano na $\sigma_{cd}$ e critério cisalhante, variando o valor do deslocamento plástico equivalente na falha $\bar{u}_f^{pl}$ .....	74
Figura 4.32. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Granito com início do dano na $\sigma_{cd}$ e critério cisalhante, variando o valor do parâmetro de forma da lei de evolução do dano $\alpha$ .....	75
Figura 4.33. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Granito com início do dano na $\sigma_{máx}$ e critério cisalhante, variando o valor do deslocamento plástico equivalente na falha $\bar{u}_f^{pl}$ .....	76
Figura 4.34. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Granito com início do dano na $\sigma_{máx}$ e critério cisalhante, variando o valor do parâmetro de forma da lei de evolução do dano $\alpha$ .....	76
Figura 4.35. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Granito com início do dano na $\sigma_{cd}$ e critério dúctil, variando o valor do ângulo de dilatância $\psi$ e do parâmetro $K$ . ....	77

Figura 4.36. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Granito com início do dano na $\sigma_{cd}$ e critério dúctil, variando o valor do deslocamento plástico equivalente na falha $\bar{u}_f^{pl}$ .....	78
Figura 4.37. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Granito com início do dano na $\sigma_{cd}$ e critério dúctil, variando o valor do parâmetro de forma da lei de evolução do dano $\alpha$ .....	79
Figura 4.38. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Granito com início do dano na $\sigma_{máx}$ e critério dúctil, variando o valor do deslocamento plástico equivalente na falha $\bar{u}_f^{pl}$ .....	79
Figura 4.39. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Granito com início do dano na $\sigma_{máx}$ e critério dúctil, variando o valor do parâmetro de forma da lei de evolução do dano $\alpha$ .....	80
Figura 4.40. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Granito. Critério cisalhante, início do dano na $\sigma_{cd}$ e: (a) $\psi=0, K=0,778$ ; (b) $\psi=0, K=1$ ; (c) $\psi=\varphi/4, K=0,778$ ; (d) $\psi=\varphi/4, K=1$ ; (e) $\psi=\beta, K=0,778$ ; (f) $\psi=\beta, K=1$ .....	81
Figura 4.41. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Granito. Critério dúctil, início do dano na $\sigma_{cd}$ e: (a) $\psi=0, K=0,778$ ; (b) $\psi=0, K=1$ ; (c) $\psi=\varphi/4, K=0,778$ ; (d) $\psi=\varphi/4, K=1$ ; (e) $\psi=\beta, K=0,778$ ; (f) $\psi=\beta, K=1$ .....	82
Figura 4.42. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Granito. Critério cisalhante, início do dano na $\sigma_{cd}$ e $\bar{u}_f^{pl}$ igual a: (a) 1,00E-06m; (b) 5,00E-06m; (c) 1,00E-05m; (d) 5,00E-05m; (e) 1,00E-04m; (f) 5,00E-04m.....	83
Figura 4.43. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Granito. Critério cisalhante, início do dano na $\sigma_{máx}$ e $\bar{u}_f^{pl}$ igual a: (a) 1,00E-06m; (b) 5,00E-06m; (c) 1,00E-05m; (d) 5,00E-05m; (e) 1,00E-04m; (f) 5,00E-04m. ....	84
Figura 4.44. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Granito. Critério dúctil, início do dano na $\sigma_{cd}$ e $\bar{u}_f^{pl}$ igual a: (a) 1,00E-06m; (b) 5,00E-06m; (c) 1,00E-05m; (d) 5,00E-05m; (e) 1,00E-04m; (f) 5,00E-04m.....	85
Figura 4.45. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Granito. Critério dúctil, início do dano na $\sigma_{máx}$ e $\bar{u}_f^{pl}$ igual a: (a) 1,00E-06m; (b) 5,00E-06m; (c) 1,00E-05m; (d) 5,00E-05m; (e) 1,00E-04m; (f) 5,00E-04m.....	86

Figura 4.46. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Granito. Critério cisalhante, início do dano na $\sigma_{cd}$ e $\alpha$ igual a: (a) -5; (b) -3; (c) -1; (d) 0; (e) 1; (f) 3; (g) 5; (h) 10. ....	87
Figura 4.47. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Granito. Critério cisalhante, início do dano na $\sigma_{m\acute{a}x}$ e $\alpha$ igual a: (a) -5; (b) -3; (c) -1; (d) 0; (e) 1; (f) 3; (g) 5; (h) 10. ....	88
Figura 4.48. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Granito. Critério dúctil, início do dano na $\sigma_{cd}$ e $\alpha$ igual a: (a) -5; (b) -3; (c) -1; (d) 0; (e) 1; (f) 3; (g) 5; (h) 10. ....	89
Figura 4.49. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Granito. Critério dúctil, início do dano na $\sigma_{m\acute{a}x}$ e $\alpha$ igual a: (a) -5; (b) -3; (c) -1; (d) 0; (e) 1; (f) 3; (g) 5; (h) 10. ....	90
Figura 4.50. Melhor ajuste obtido da curva tensão-deformação (direita) para o Granito usando a lei de evolução do dano inserida de forma tabular (esquerda), para os diferentes critérios e pontos do início do dano. ....	91
Figura 4.51. Corpos de prova do modelo que melhor ajusta a curva tensão-deformação do Granito, um instante anterior (esquerda) e posterior (direita) do momento da ruptura total para os dois critérios e pontos de início do dano. ....	92
Figura 5.1. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem dos ensaios triaxiais para o Arenito com início do dano na $\sigma_{cd}$ e critério cisalhante (E: Ensaio, M: Modelo). ....	94
Figura 5.2. Diferencia entre a envoltória de ruptura ajustada (preta) e a assumida pelo programa a partir do UCT (vermelha) para o Arenito. ....	95
Figura 5.3. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem dos ensaios triaxiais para o Arenito com início do dano na $\sigma_{cd}$ e critério cisalhante, com o modelo ajustado para a envoltória de ruptura calculada (E: Ensaio, M: Modelo). ....	96
Figura 5.4. Pontos obtidos logo do ajuste do modelo que mostram sua aproximação da envoltória de ruptura calculada. ....	97
Figura 5.5. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para os ensaios triaxiais do Arenito considerando o critério cisalhante, início do dano na $\sigma_{cd}$ e ambos os ajustes realizados. ....	98

Figura 5.6. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem dos ensaios triaxiais para o Arenito com início do dano na $\sigma_{m\acute{a}x}$ e critério cisalhante, com o ajuste do UCT (esquerda) e da envoltória de ruptura (direita) (E: Ensaio, M: Modelo).....	99
Figura 5.7. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para os ensaios triaxiais do Arenito considerando o critério cisalhante, início do dano na $\sigma_{m\acute{a}x}$ e ambos os ajustes realizados. ....	100
Figura 5.8. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem dos ensaios triaxiais para o Arenito com início do dano na $\sigma_{cd}$ e critério dúctil, com o ajuste do UCT (esquerda) e da envoltória de ruptura (direita) (E: Ensaio, M: Modelo).....	101
Figura 5.9. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem dos ensaios triaxiais para o Arenito com início do dano na $\sigma_{m\acute{a}x}$ e critério dúctil, com o ajuste do UCT (esquerda) e da envoltória de ruptura (direita) (E: Ensaio, M: Modelo).....	102
Figura 5.10. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para os ensaios triaxiais do Arenito considerando o critério dúctil, início do dano na $\sigma_{cd}$ e ambos os ajustes realizados. ....	103
Figura 5.11. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para os ensaios triaxiais do Arenito considerando o critério dúctil, início do dano na $\sigma_{m\acute{a}x}$ e ambos os ajustes realizados. ....	104
Figura 5.12. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem dos ensaios triaxiais para o Granito com critério cisalhante e início do dano na $\sigma_{cd}$ (esquerda) e na $\sigma_{m\acute{a}x}$ (direita) (E: Ensaio, M: Modelo).....	105
Figura 5.13. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem dos ensaios triaxiais para o Granito com critério dúctil e início do dano $\sigma_{cd}$ (esquerda) e na $\sigma_{m\acute{a}x}$ (direita) (E: Ensaio, M: Modelo).....	106
Figura 5.14. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para os ensaios triaxiais do Granito considerando o critério cisalhante e início do dano na $\sigma_{cd}$ .....	107
Figura 5.15. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para os ensaios triaxiais do Granito considerando o critério cisalhante e início do dano na $\sigma_{m\acute{a}x}$ .....	108

Figura 5.16. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para os ensaios triaxiais do Granito considerando o critério dúctil e início do dano na  $\sigma_{cd}$ .  
..... 108

Figura 5.17. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para os ensaios triaxiais do Granito considerando o critério dúctil e início do dano na  $\sigma_{m\acute{a}x}$ .  
..... 109

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

$a$	Coesão do material para o modelo de Drucker-Prager estendido.
$A$	Área total resultante da interseção de um plano de corte sobre um volume elementar representativo.
$\bar{A}$	Área efetiva.
$A_D$	Área das fraturas achada na interseção de um plano de corte sobre um volume elementar representativo.
$c$	Coesão do material para o modelo de Mohr-Coulomb.
$\mathbb{C}$	Tensor de quarta ordem das constantes elásticas do material.
$d$	Variável interna de dano no ponto de integração.
$d_j$	Variável interna de dano no ponto de integração avaliada de forma independente.
$d_k$	Variável interna de dano no ponto de integração avaliada de forma combinada.
$d_{mult}$	Variável interna de dano no ponto de integração que combina o efeito de vários critérios de dano.
$D$	Variável interna de dano na teoria da MDC, variável interna de dano no elemento.
$E$	Módulo de elasticidade ou módulo de Young.
$f_i$	Outras variáveis que podem ser consideradas no modelo.
$F$	Força atuante.
$F$	Função de plastificação.
$g_t$	Energia dissipada durante o processo de fraturamento por unidade de volume.
$G$	Função de potencial de fluxo plástico.
$G_C$	Taxa crítica de energia liberada, energia dissipada por unidade de área de fratura.
$G_{IC}, G_{IIC}$	Energia dissipada por unidade de área de fratura para os modos de fratura I e II.
$G_f$	Energia de fratura dissipada.
$H$	Função de endurecimento.
$k_s$	Parâmetro do material usado no critério de início do dano cisalhante.
$K$	Coefficiente de forma da superfície de plastificação no plano octaédrico.
$l$	Tamanho global aproximado dos elementos da malha de elementos finitos.
$l_{máx}$	Dimensão máxima dos elementos da malha de elementos finitos.
$L$	Comprimento característico.
$\vec{n}$	Vetor normal à área obtida da interseção de um plano de corte sobre um volume elementar representativo.
$N_{mult}, N_{máx}$	Número de variáveis de dano que intervierem de um modo multiplicativo e máximo, respetivamente.
$p$	Tensão octaédrica ou tensão de confinamento isotrópico.
$t$	Invariante de tensão de desvio.
$t$	Variável fictícia do tempo que permite controlar a evolução da deformação plástica.
$T_r$	Resistência ao cisalhamento residual da fratura.
$q$	Tensão de desvio do estado isotrópico ou tensão de Von Mises.
$r$	Terceiro invariante da tensão de desvio.

$s$	Intercepto do modelo M-C no eixo de tensão de desvio média.
$\bar{u}^{pl}$	Deslocamento plástico equivalente.
$\dot{\bar{u}}^{pl}$	Taxa de deslocamento plástico equivalente.
$\bar{u}_f^{pl}$	Deslocamento plástico equivalente na falha.
$w$	Abertura da fratura.
$w_{máx}$	Abertura máxima da fratura onde a tensão normal atinge um valor nulo.
$\alpha$	Parâmetro de forma da lei de evolução do dano exponencial.
$\beta$	Ângulo de atrito para o modelo de Drucker-Prager estendido.
$\dot{\gamma}^{pl}$	Taxa de deformação angular plástica.
$\delta$	Deslocamento ao longo do plano de fratura.
$\delta_{máx}$	Deslocamento máximo ao longo do plano de fratura onde a tensão cisalhante atinge o valor residual.
$\varepsilon$	Deformação total.
$\underline{\underline{\varepsilon}}$	Tensor de deformações totais.
$\varepsilon_a, \varepsilon_l$	Deformação axial medida no ensaio de compressão.
$\varepsilon_l$	Deformação lateral medida no ensaio de compressão.
$\varepsilon_{nom}$	Deformação de engenharia ou nominal.
$\varepsilon_{true}$	Deformação verdadeira.
$\varepsilon_v$	Deformação volumétrica total.
$\varepsilon_v^c$	Deformação volumétrica das fraturas.
$\varepsilon_t^{ck}$	Deformação de fratura por tração.
$\varepsilon^e$	Deformação elástica.
$\varepsilon_v^e$	Deformação volumétrica elástica.
$\varepsilon^{pl}$	Deformação plástica.
$\underline{\underline{\varepsilon}}^{pl}$	Tensor de deformações plásticas.
$\bar{\varepsilon}^{pl}$	Deformação plástica equivalente.
$\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}$	Taxa de deformação plástica equivalente.
$\bar{\varepsilon}_0^{pl}$	Deformação plástica equivalente no início do dano.
$\dot{\varepsilon}_{11}^{pl}$	Taxa de deformação plástica na direção de carregamento.
$\bar{\varepsilon}_f^{pl}$	Deformação plástica equivalente na falha.
$\varepsilon_{true}^{pl}$	Deformação plástica verdadeira.
$\eta$	Triaxialidade de tensões.
$\theta$	Ângulo do modelo M-C no gráfico de tensão de desvio média-tensão média
$\theta_s$	Taxa de tensão cisalhante.
$\nu$	Coefficiente de Poisson.
$\rho$	Massa específica ou densidade.
$\sigma$	Tensão atuante ou verdadeira, tensão normal atuante nas faces da fratura.
$\bar{\sigma}$	Tensão efetiva.
$\underline{\underline{\sigma}}$	Tensor de tensões atuantes.
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Tensões principais maior, intermediária e menor, respectivamente.

$\sigma_c$	Tensão de endurecimento por compressão.
$\sigma_{cd}$	Tensão de dano por fraturas.
$\sigma_{ci}$	Tensão de início de fraturas.
$\sigma_d$	Tensão de desvio.
$\sigma_s$	Tensão média.
$\sigma_t$	Tensão de endurecimento por tração, resistência à tração.
$\sigma_{y0}$	Tensão atuante no início do dano.
$\sigma_{ynom}$	Tensão de endurecimento de engenharia ou nominal.
$\sigma_{ytrue}$	Tensão de endurecimento verdadeira.
$\tau_{m\acute{a}x}$	Tensão cisalhante máxima no início do dano.
$\tau_s$	Tensão cisalhante atuante na fratura.
$\phi$	Ângulo de atrito para o modelo de Mohr-Coulomb.
$\psi$	Ângulo de dilatação no plano $p$ - $q$ .
$\omega_D$	Variável de estado que avalia o início do dano dúctil.
$\omega_S$	Variável de estado que avalia o início do dano cisalhante.
D-P	Modelo de Drucker-Prager.
EA	Emissões acústicas.
M-C	Modelo de Mohr-Coulomb.
MDC	Mecânica do Dano Contínuo.
MED	Método de Elementos Discretos.
MEF	Método de Elementos Finitos.
UCS	Resistência à compressão não confinada da rocha.
UCT	Ensaio de compressão não confinada por suas siglas em inglês.
ZPF	Zona do Processo de Fratura.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. APRESENTAÇÃO

Com o desenvolvimento das teorias e critérios de ruptura para diferentes tipos de materiais, tem acrescentada a necessidade do entendimento do processo de geração, crescimento e coalescência das fraturas no interior de um elemento submetido a diferentes fatores, como por exemplo, o carregamento mecânico, as variações térmicas, as reações químicas, as vibrações, o intemperismo, dentre outros. Além disso, a descrição do processo de dano tem sido importante principalmente na análise da degradação das propriedades mecânicas, para tentar reproduzir a mudança do comportamento com os diferentes estados impostos sobre o material.

No estudo do processo de fraturamento e de dano, têm sido usados dois tipos de enfoques diferentes: a mecânica do dano ou macromecânica e a mecânica da fratura ou micromecânica, a diferencia entre eles é que o primeiro considera as fraturas distribuídas dentro do material de modo que podem ser descritas mediante uma variável interna de dano, aplicando conceitos da mecânica dos meios contínuos, e pelo contrario, o segundo considera as fraturas como descontinuidades propriamente ditas, onde a concentração de tensões ao redor das extremidades da fratura leva a uma redução da resistência do material nestas zonas, refletindo no comportamento geral dele. Dentro dos exemplos mais relevantes da macromecânica está a teoria do dano contínuo, e da micromecânica, a teoria de Griffith, usada inicialmente para a ruptura de materiais frágeis, a partir da qual foi formulada a teoria da mecânica das fraturas (Paterson & Wong, 2005; Zhang & Cai, 2010).

A aplicação destas teorias à mecânica das rochas tem permitido estudar diferentes fenômenos como a sismologia causada por movimentos de massa, o comportamento geral da ruptura das rochas, a deformação causada por carregamento constante, fluência ou *creep*, a falha subcrítica gerada por corrosão, o fraturamento induzido pelo processo de escavação de túneis, e outros tópicos onde se tenta identificar a tendência ou orientação das fraturas acontecidas e a massa de material rompido.

Um dos fenômenos mais relevantes no estudo do processo de fraturamento das rochas é o *rockburst*, que consiste na explosão violenta e repentina de blocos de diferentes tamanhos desde as paredes do túnel, sendo catalogado com frequência de acordo com a severidade do dano causado, podendo ocasionar numerosas perdas de equipamentos e de vidas humanas,

além de atraso na obra e inclusive o fechamento completo da mesma (de la Vergne, 2008). Na Figura 1.1 se mostram alguns exemplos deste fenômeno, sendo evidente a magnitude dos danos que pode provocar.

Os primeiros casos registrados de *rockburst* datam de final do século XX, acontecidos principalmente em minas de grande profundidade (Blake & Hedley, 2009). Ao ser um fenômeno que pode acontecer em qualquer lugar do mundo, consideráveis esforços de pesquisa tem sido dedicados ao entendimento do *rockburst*, enfocados principalmente na determinação da velocidade de ejeção, da massa de rocha que vai ser expulsada, da direção de atuação da força e da magnitude e localização do evento sísmico potencial que pode desencadear o evento (Kaiser & Cai, 2012; Stacey, 2012), o que permite estabelecer a energia liberada e por fim a solicitação à que vai ser submetida o sistema de suporte.

Na maioria dos casos a energia liberada é calculada mediante retro análise, identificando no campo a massa de rocha expulsada e supondo a velocidade de ejeção por meio de correlações empíricas ou por avaliação dos lugares de impacto dos blocos. Nestas análises são feitas, ocasionalmente, modelagem numérica visando reproduzir o *rockburst*, resultando em energias liberadas menores às reais devido a diversos fatores ainda não compreendidos totalmente, como é a interferência do sistema de suporte instalado ou a amplificação do dano por causa da frequência das ondas sísmicas incidentes.

Enquanto à previsão do *rockburst*, diversos índices ou relações têm sido desenvolvidos com base nas tensões atuantes e nas propriedades da rocha intacta para definir se o evento pode ou



Figura 1.1. Fotografia do *rockburst* acontecido em túneis: explosão-deformação, ejeção de lascas superficiais de rocha (esquerda), e colapso de arco, queda de grandes blocos desde o teto da escavação (direita). Tomadas de Kaiser & Cai (2012) e Ortlepp & Stacey (1994), respectivamente.

não acontecer, servindo apenas a modo qualitativo (Wang, 2018). Outros autores pelo contrario tem usado ferramentas computacionais para definir a zona rompida e para estimar a velocidade de ejeção, usando modelos muito complexos que precisam de calibração com ensaios pouco convencionais e custosos, além de programas mais sofisticados que integram, por exemplo, o Método de Elementos Discretos (MED).

## **1.2. MOTIVAÇÃO**

Pelo apresentado anteriormente, a motivação deste trabalho nasce da necessidade de simular o processo de degradação e fraturamento das rochas, usando programas mais acessíveis que integrem modelos mais simples, obtendo uma representação aceitável do comportamento destes materiais para diferentes condições de carregamento.

A proposta aqui desenvolvida se baseia no uso do programa ABAQUS® que integra o Método de Elementos Finitos (MEF), aplicando o modelo de Drucker-Prager estendido junto com o modelo de Mecanismo de Dano, desenvolvido por Hooputra *et al.* (2004), para simular o processo de fraturamento das rochas e a resposta mecânica obtida de acordo ao estado de tensões aplicado (modelagem de ensaios de compressão triaxial convencional), podendo em um futuro, empregar estes modelos na simulação dos fenômenos de *rockburst* em túneis ou de flambagem em taludes de grande altura.

## **1.3. JUSTIFICATIVA**

A maioria dos modelos macromecânicos usados para avaliar o processo do dano estão baseados na Mecânica do Dano Contínuo (MDC), os quais têm sido empregados na modelagem do processo de ruptura de diferentes tipos de materiais, entre os que se encontram o aço, o alumínio, e as rochas, logrando representar a danificação devido aos carregamentos externos. O Mecanismo de Dano tem sua base na MDC sendo facilmente integrado em programas de elementos finitos, o qual já tem sido usado na modelagem de problemas geotécnicos obtendo resultados aceitáveis na modelagem do comportamento e das superfícies de fratura respeito aos resultados experimentais.

Não obstante, não tem sido feitas análises da influência e relevância dos parâmetros usados pelo Mecanismo de Dano sobre a modelagem do comportamento e ruptura de vários tipos de rochas para diferentes condições de carregamento, dando pé os objetivos propostos para esta dissertação, tal e como se apresenta na seguinte secção.

## **1.4. OBJETIVOS**

O objetivo geral desta pesquisa é analisar o modelo de Mecanismo de Dano usado na modelagem do comportamento e fraturamento de vários tipos de rochas submetidas a estados de compressão simples e triaxial convencional.

Os objetivos específicos são:

- Validar o Mecanismo de Dano isotrópico como modelo simples aplicável na representação do comportamento na ruptura de diferentes tipos de rochas.
- Definir os parâmetros mais relevantes que afetam a reação da rocha quando submetida a um estado de carregamento de compressão uniaxial e triaxial convencional.
- Estabelecer os valores dos parâmetros que permitam ajustar as curvas tensão-deformação e que por sua vez consigam induzir uma superfície de ruptura similar à obtida experimentalmente.
- Definir o critério e o ponto do início do dano que permite a melhor aproximação do comportamento das rochas para os estados de carregamentos avaliados.

## **1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

A dissertação está estruturada em sete capítulos. O Capítulo 1 faz a introdução ao trabalho, dando uma breve apresentação ao tema, a descrição do problema, a justificativa e os objetivos. Além disso, é apresentado o resumo da estrutura geral e do conteúdo de cada capítulo.

No Capítulo 2 é feita a revisão da bibliografia, na qual são descritos alguns conceitos do comportamento das rochas em compressão, da curva tensão-deformação e da Mecânica do Dano Continuo, sendo citados os trabalhos já realizados relacionados com o tema desta dissertação. Também é apresentada a formulação dos modelos de Drucker-Prager e de Mecanismo de Dano implementados no programa ABAQUS®, além de alguns conceitos da mecânica das fraturas e algumas recomendações na modelagem do dano.

No Capítulo 3 se explica a metodologia usada neste trabalho e a descrição das rochas usadas nas simulações seguintes, definindo os dados de entrada necessários no programa.

No Capítulo 4 são mostrados os resultados dos ensaios simulados de compressão não confinada para a análise do mecanismo de dano mais adequado na modelagem das rochas, estabelecendo os parâmetros mais relevantes que afetam a resposta e o fraturamento destes

materiais. Além disso, é feito o melhor ajuste possível das curvas de tensão-deformação modificando os valores dos diferentes parâmetros, analisando as vantagens e desvantagens dos critérios e pontos de início do dano avaliados.

No Capítulo 5 são apresentadas as modelagens dos ensaios triaxiais levadas a cabo usando os mesmos valores dos parâmetros que permitiram o melhor ajuste, fazendo a análise pertinente respeito à aplicabilidade do modelo de Mecanismo de Dano.

E por último no Capítulo 6 são expostas as conclusões e as propostas para futuros trabalhos científicos.

## 2. COMPORTAMENTO DE ROCHAS E MODELO DE DANO

### 2.1. COMPORTAMENTO DAS ROCHAS EM COMPRESSÃO E CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO

A curva tensão-deformação obtida dos ensaios de compressão, seja uniaxial ou triaxial, pode ser dividida em varias regiões ou zonas, como tem sido discutido por diferentes autores (Bieniawski, 1967a, 1967b, 1967c; Kemeny, 1991; Martin, 1993; Martin & Chandler, 1994; Aubertin & Simon, 1997; Li, 1999; Paterson & Wong, 2005; Basu *et al.*, 2009; Hoek & Martin, 2014), onde o comportamento da rocha vai mudando com as deformações axiais.

A **zona I** da curva pode-se identificar mais claramente dos resultados de compressão uniaxial, estando caracterizada por uma concavidade positiva causada pelo fechamento das fraturas pré-existentes na rocha (Figura 2.1, trecho 0-a). O fenômeno é pouco notório nos ensaios triaxiais devido a que a tensão de confinamento pode gerar o fechamento das fraturas, pelo que não seria registrado na etapa de carregamento axial. Nesta zona a deformação é considerada como não linear elástica, embora existam indícios de deterioro localizado do material e esmagamento do mesmo (Aubertin & Simon, 1997).

A **zona II** é considerada como a etapa de deformação elástica linear (Figura 2.1, trecho a-b). O intervalo que ela pode alcançar depende do tipo e rocha analisada, da tensão de confinamento e da sensibilidade na obtenção dos resultados (uma baixa sensibilidade não consegue captar rapidamente a mudança do comportamento para não linear e consequentemente estica-se a faixa da zona elástica). Existem alguns sinais de processos irreversíveis que acontecem nesta etapa devido a evidencia de histerese no comportamento do material. Também é notória a carência, quase completamente, de emissões acústicas (EA) nas duas primeiras zonas.

Na **zona III** nota-se um afastamento progressivo do comportamento linear (Figura 2.1, trecho b-c), já que o material começa a se dilatar, aumentando levemente as EA, reduzindo-se a velocidade das ondas elásticas, aumentando o coeficiente de Poisson aparente, entre outros sinais (Aubertin & Simon, 1997; Paterson & Wong, 2005). O inicio desta etapa, ponto b na Figura 2.1, geralmente acontece entre o 30% e o 70% da tensão máxima resistida, esta tensão é comumente conhecida como tensão do inicio das fraturas ( $\sigma_{ci}$ ) e é associada à geração estável de fraturas por tração. A  $\sigma_{ci}$  pode ser identificada melhor plotando a curva de

deformação volumétrica das fraturas ( $\varepsilon_v^c$ ) versus a deformação axial, sendo a primeira calculada como:

$$\varepsilon_v^c = \varepsilon_v - \varepsilon_v^e \quad (1)$$

Onde:

$\varepsilon_v$  é a deformação volumétrica total, que pode ser aproximada para o caso do ensaio triaxial assim:

$$\varepsilon_v \approx \varepsilon_a + 2\varepsilon_l \quad (2)$$

$\varepsilon_v^e$  é a deformação volumétrica elástica dada por:

$$\varepsilon_v^e = \frac{1-2\nu}{E}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (3)$$

$\varepsilon_a$  e  $\varepsilon_l$  são as deformações axial e lateral medidas diretamente do ensaio;

$\nu$  e  $E$  são o coeficiente de Poisson e o módulo de Young da parte elástica;

$\sigma_1$  e  $\sigma_3$  são as tensões principais aplicadas para cada valor de deformação axial.

O ponto onde a deformação volumétrica das fraturas começa a dilatar é considerado como o início da zona três. Nesta zona acontece a propagação das fraturas pré-existente predominantemente na direção da tensão principal maior (Kemeny, 1991) e a nucleação de novas, devido ao cisalhamento entre suas faces e à concentração de tensões ao redor de vazios, ao longo das superfícies dos grãos e no contato entre eles, por isto, esta zona também é denominada de propagação estável, já que as fraturas crescem uma quantidade limitada como resposta ao aumento da tensão aplicada, sem chegar a gerar fraturas macroscópicas. As evidências indicam que as emissões acústicas provierem principalmente de eventos cisalhantes, sugerindo uma predominância na geração de fraturas deste tipo.

Na **zona IV** acontece a localização das micro-fraturas em uma região concreta ou banda, qualquer incremento de tensão levará a uma degeneração permanente do material e posteriormente à geração de fraturas macroscópicas (Figura 2.1, trecho c-d). O início desta zona, ponto c na Figura 2.1, é conhecida como tensão de dano por fraturas ( $\sigma_{cd}$ ) (ou simplesmente tensão de dano), cujo valor está entre o 70% e o 90% da tensão pico, sendo associada geralmente ao ponto de inversão das deformações volumétricas. O valor da  $\sigma_{cd}$

depende da tensão de confinamento e está relacionada com o deslizamento ao longo das faces das fraturas. Também cabe ressaltar que para tensões maiores a  $\sigma_{cd}$  e menores que a tensão pico, pode acontecer a falha do material ao longo do tempo, pelo que a tensão de dano por fraturas é considerada como um parâmetro do material e como a tensão máxima para condições de longo prazo.

As fraturas nesta zona seguem estando predominantemente na direção axial, mas se apresenta também grande número de fraturas inclinadas ou cisalhantes, que com um aumento na tensão aplicada, começam a se comunicar gerando finalmente fraturas macroscópicas. Devido à deformação não homogênea do material, o comportamento registrado é uma mistura entre a deformação da zona localizada e parte da recuperação elástica de outras regiões não

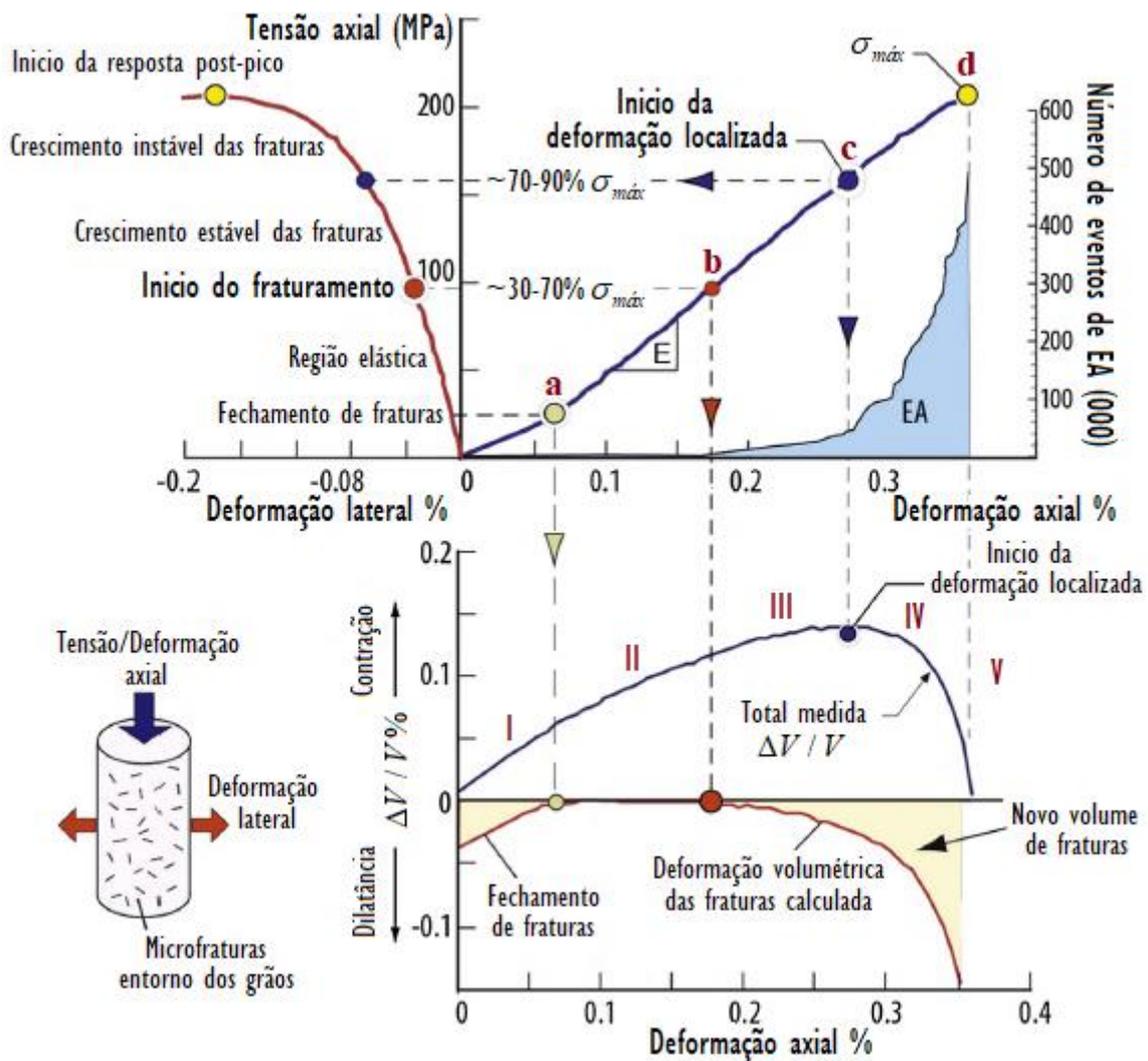


Figura 2.1. Esquema da curva tensão-deformação em condição de compressão com as regiões ou zonas com comportamento diferenciado. Modificado de Hoek & Martin (2014).

danificadas, acontecendo também um maior afastamento da linearidade, uma maior taxa das deformações laterais e um incremento considerável das EA, até que o material experimenta a tensão máxima, ponto d na Figura 2.1.

Para terminar, a **zona V** tem que ver com o comportamento post-pico sendo, ao igual que na zona IV, uma representação geral do comportamento do material, principalmente pela presença de zonas falhadas (macro-fraturas) e a descontinuidade do corpo de prova, pelo que a resposta depende das propriedades do sistema de carregamento. O início desta etapa está definida pela tensão pico, a qual não é considerada como um parâmetro do material devido a sua dependência do tamanho do corpo de prova, da taxa de carregamento e do tempo de aplicação da carga. Por último, os registros acústicos indicam um maior desenvolvimento de fraturas inclinadas por cisalhamento.

Por outra parte, no ensaio de tração, o comportamento da rocha é bem mais simples, já que as fraturas pré-existentes estão abertas, pelo que não existe atrito entre suas faces. Usualmente é considerado que o início e a propagação de algumas fraturas leva rapidamente à falha, sendo a tensão do início das fraturas, neste caso, aproximadamente igual à tensão de ruptura ou tensão máxima de tração (Bieniawski, 1967c; Aubertin & Simon, 1997).

## **2.2. MECÂNICA DO DANO CONTÍNUO E O MODELO FENOMENOLÓGICO**

A Mecânica do Dano Contínuo (MDC) foi desenvolvida a partir dos conceitos introduzidos por L.M. Kachanov em 1958 e a posterior definição da variável de dano integrada nos modelos constitutivos para metais, sendo inicialmente utilizada para modelar os fenômenos de *creep* e ruptura destes materiais, assim como também, reproduzir a degradação na modelagem da fadiga devido a carregamentos cíclicos (Lemaitre, 1985).

A teoria da MDC permite representar o comportamento e danificação do material na macro-escala, supondo que o dano interno acontece a partir das micro-fraturas, relacionando isto com uma variável interna conhecida como variável de dano, que pode ser de tipo escalar, vetorial ou tensorial, representando a degradação local do material (Lemaitre, 1985; Costin, 1987). A variável de dano descreve a densidade de fraturas presentes na área obtida da interseção de um plano sobre o volume elementar representativo, podendo ser introduzida nos modelos constitutivos fazendo uso do conceito de tensão efetiva (força por unidade de área intacta); a variável de dano também apresenta uma evolução que está relacionada com algumas variáveis de estado, estas equações definem um valor máximo a partir do qual o material não consegue

suportar o carregamento, atingindo neste ponto a falha total (Lemaitre, 1985; Zhang & Cai, 2010; Malcher, 2011), uma melhor explicação destas ideias será apresentada mais adiante (Seção 2.4).

Como a MDC segue os conceitos da mecânica dos meios contínuos, os modelos desenvolvidos a partir dela podem ser implementados facilmente em ferramentas computacionais que usem Métodos de Elementos Finitos (MEF), já que representa um estado virtual de degradação do material sem inserir descontinuidades na malha de cálculo.

A MDC a servido de base para o desenvolvimento de vários modelos como é o caso do modelo de dano dúctil e cisalhante apresentado por Hooputra *et al.* (2004), o modelo de dano de Johnson & Cook (1985), o modelo de dano em concreto, sendo uma das versões mais recentes a apresentada por Alfarah *et al.* (2017), dentre outras. Com a aplicação desta teoria na modelagem de diferentes materiais, tem-se identificado vários fatores importantes para o início das fraturas e a propagação do dano, destacando-se a triaxialidade de tensões e a deformação plástica (Ribeiro *et al.*, 2016).

A MDC tem suas aplicações em vários campos da engenharia, podendo citar por exemplo, a modelagem do processo de dano em elementos de alumínio usados na indústria automotriz (Hooputra *et al.*, 2004), a ruptura de chapas de aço quando submetidas ao processo de estampagem profunda (Khelifa *et al.*, 2007), a simulação de ensaios de tração em corpos de prova de aço considerando o modelo de dano dúctil (Levanger, 2012; Ribeiro *et al.*, 2016), a modelagem do processo de fraturamento de pórticos de concreto reforçado submetidos a carregamento lateral monotônico (Alfarah *et al.*, 2017), e em temas relacionados com a geotecnia como são a simulação do ensaio de arrancamento de uma placa embebida em um solo reforçado com fibra (López Santacruz *et al.*, 2016) e a aplicação do modelo de dano por cisalhamento para a análise na geração da possível superfície de ruptura em encostas (Alelvan, 2017).

Na parte da mecânica das rochas também tem visto sua aplicação na modelagem do corte do material durante o processo de perfuração de poços petrolíferos (Martinez, 2012) ou na integração com vários modelos constitutivos para simular diferentes fenômenos que envolvem a degradação da rocha, tendo como exemplo o modelo proposto por Sgaoula *et al.* (1995) para representar o comportamento semi-frágil da Halita quando o carregamento depende do tempo, a integração com a teoria de degradação das micro-fraturas por corrosão química apresentada por Costin (1987) e o modelo desenvolvido por Homand-Etienne *et al.*

(1998) para descrever o crescimento das fraturas dentro da rocha devido à variação da tensão aplicada. Na Figura 2.2 são apresentadas algumas imagens dos trabalhos mencionados, para maiores detalhes consultar cada uma das publicações.

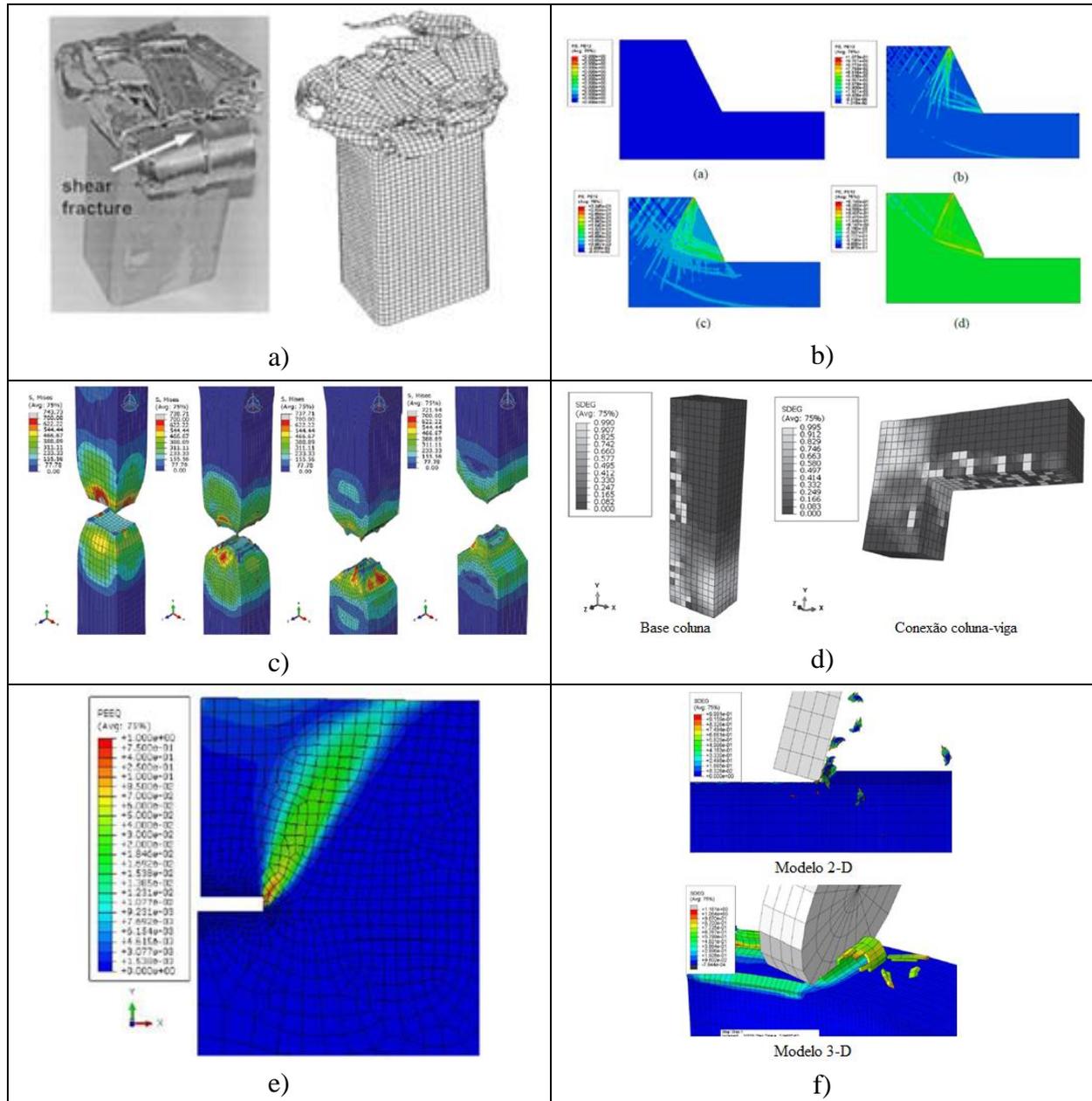


Figura 2.2. Aplicações do Modelo de Dano Contínuo MDC na modelagem de: (a) dano em elemento de alumínio (Hooputra *et al.*, 2004), (b) geração de superfície de ruptura em uma encosta (Alelvan, 2017), (c) ensaio de tração em corpos de prova de aço (Ribeiro *et al.*, 2016), (d) dano em pórtico de concreto reforçado (Alfarah *et al.*, 2017), (e) arrancamento de placa embecida em solo reforçado com fibras (López Santacruz *et al.*, 2016), (f) processo de corte em rocha (Martinez, 2012).

Por outra parte, os modelos fenomenológicos são aqueles que relacionam as observações empíricas com a base teórica de um modo consistente e sem apresentar uma derivação direta. Estes modelos visam estudar eventos complexos que envolvem uma elevada quantidade de parâmetros, estabelecendo mediante a dedução, uma tendência ou relação quantificável entre as variáveis e seus efeitos. Todo isto leva a uma descrição aproximada do fenômeno mediante formulações físicas e matemáticas que podem ou não ter um sentido real.

Alguns dos modelos desenvolvidos a partir da MDC podem ser considerados modelos fenomenológicos, onde uma parte deles leva em conta a micromecânica do dano, conhecidos como aproximações micromecânicas, e a outra é chamada de modelos empíricos, que simplesmente tentam reproduzir o comportamento do material sem um significado físico real do que acontece; ambos os tipos de modelos relacionam diferentes parâmetros com a variável interna de dano, sendo calibrados mediante a realização de diversas classes de ensaios (Ruzicka *et al.*, 2012).

### 2.3. MODELO CONSTITUTIVO DE DRUCKER-PRAGER ESTENDIDO

O modelo de Drucker-Prager (D-P) estendido é um modelo elasto-plástico, que a diferencia do modelo convencional, permite o endurecimento do material e, portanto, o crescimento da superfície de plastificação (Alelvan, 2017) (Figura 2.3). O modelo está definido por três conceitos básicos: plastificação, fluxo plástico e endurecimento, descritos mediante as funções de plastificação  $F$ , de potencial de fluxo plástico  $G$  e de endurecimento  $H$ , respectivamente.

A função de plastificação descreve uma superfície côncava a qual serve de limite entre as deformações elásticas e o início das deformações plásticas; para estados de tensões dentro da

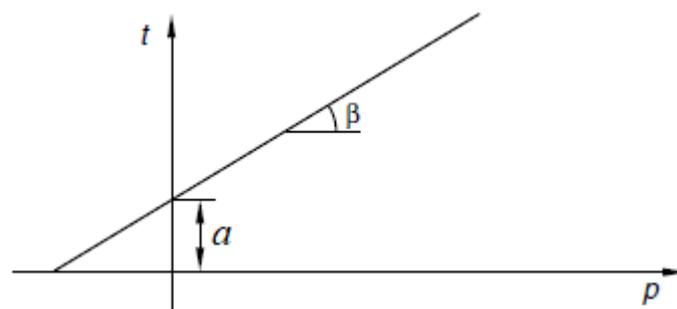


Figura 2.3. Superfície de plastificação para o modelo linear de D-P estendido no plano  $p-t$ .

Tomado de ABAQUS (2014).

superfície as deformações são recuperáveis, quando as tensões ficam sobre a superfície indicam o início das deformações plásticas, sempre e quando segue acontecendo o carregamento, e estados de tensões fora da superfície não são permitidos. A função linear  $F$  para o modelo D-P estendido está dada por:

$$F = t - a - p \tan \beta \quad (4)$$

Onde:

$a$  a coesão do material;

$\beta$  o ângulo de atrito;

$p$  é a tensão octaédrica ou tensão de confinamento isotrópico, definida como:

$$p = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (5)$$

$t$  é um invariante da tensão de desvio, dado por:

$$t = \frac{1}{2}q \left[ 1 + \frac{1}{K} - \left( 1 - \frac{1}{K} \right) \left( \frac{r}{q} \right)^3 \right] \quad (6)$$

$q$  é a tensão de desvio do estado isotrópico ou tensão de Von Mises, dada por:

$$q = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \right]} \quad (7)$$

$r$  é o terceiro invariante da tensão de desvio, definido como:

$$r = \left( \frac{(2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3)(2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3)(2\sigma_3 - \sigma_1 - \sigma_2)}{2} \right)^{1/3} \quad (8)$$

$\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$  são as tensões principais maior, intermediária e menor respectivamente;

$K$  é a relação entre a tensão máxima de tração e de compressão triaxial, cujo valor está compreendido entre 0,778 e 1, garantindo que a superfície de plastificação seja côncava (Figura 2.4).

Cabe ressaltar que no programa ABAQUS® as tensões de compressão são negativas, de modo que todas as equações serão definidas a partir de esta convenção de sinais.

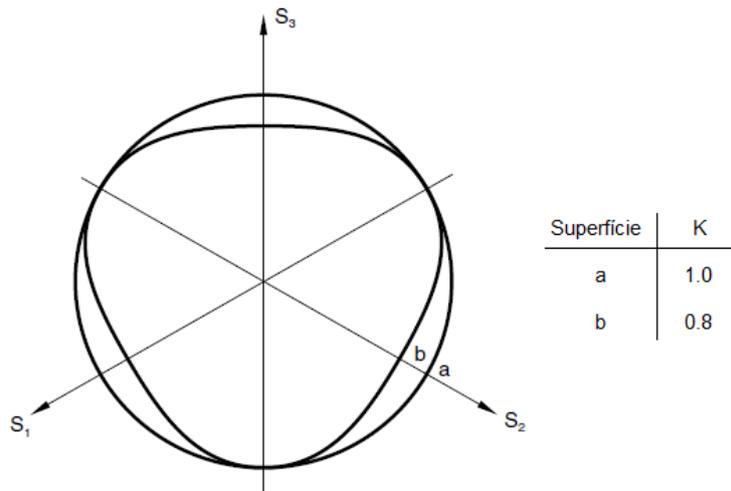


Figura 2.4. Variação da superfície de plastificação com o parâmetro  $K$  no plano octaédrico.

Tomado de ABAQUS (2014).

Para o caso de compressão triaxial convencional (com  $\sigma_1 = \sigma_2$ ), as Equações 7 e 8 se reduzem de tal forma que o invariante de tensão de desvio não depende do valor do parâmetro  $K$ , sendo portanto igual à tensão de Mises.

A função de potencial de fluxo plástico indica a direção das deformações plásticas quando o estado de tensões atinge a superfície de plastificação. O fluxo plástico pode ser de tipo associado, quando as funções  $F$  e  $G$  são iguais, ou fluxo não associado, para o caso contrário. No modelo D-P estendido a função  $G$  esta dada por:

$$G = t - p \tan \psi \quad (9)$$

Onde:

$\psi$  é o ângulo de dilatância do material;

$t$  e  $p$  são o invariante de tensão de desvio e a tensão octaédrica definidos anteriormente.

O fluxo associado se consegue quando o ângulo de dilatância é igual ao ângulo de atrito, de outro modo o fluxo será não associado. Também pode acontecer que  $\psi = 0$ , descrevendo um material não dilatante.

Já a função de endurecimento define a magnitude das deformações plásticas e, portanto, o crescimento da superfície de plastificação. O endurecimento usado no modelo de D-P estendido é de tipo isotrópico, ou seja, a superfície cresce igualmente em todas as direções no espaço de tensões. A evolução da superfície de plastificação está descrita em termos da tensão

efetiva  $\bar{\sigma}$ , sendo definida com base na tensão de endurecimento por compressão uniaxial, por tração uniaxial ou por cisalhamento puro, considerando a coesão do material (ABAQUS, 2014), tal e como se mostra nas seguintes equações:

$$\bar{\sigma} = \sigma_c \left( \bar{\varepsilon}^{pl}, \dot{\varepsilon}^{pl}, f_i \right) \quad \text{para endurecimento definido por compressão uniaxial} \quad (10)$$

$$= \sigma_t \left( \bar{\varepsilon}^{pl}, \dot{\varepsilon}^{pl}, f_i \right) \quad \text{para endurecimento definido por tração uniaxial} \quad (11)$$

$$= a \left( \bar{\varepsilon}^{pl}, \dot{\varepsilon}^{pl}, f_i \right) \quad \text{para endurecimento definido por cisalhamento puro} \quad (12)$$

Sendo:

$\bar{\varepsilon}^{pl}$  a deformação plástica equivalente dada por:

$$\bar{\varepsilon}^{pl} = \int_0^t \dot{\varepsilon}^{pl} dt \quad (13)$$

$\dot{\varepsilon}^{pl}$  a taxa de deformação plástica equivalente definida para o modelo linear de D-P estendido como:

$$\dot{\varepsilon}^{pl} = \left| \dot{\varepsilon}_{11}^{pl} \right| \quad \text{para endurecimento definido por compressão uniaxial} \quad (14)$$

$$= \dot{\varepsilon}_{11}^{pl} \quad \text{para endurecimento definido por tração uniaxial} \quad (15)$$

$$= \dot{\gamma}^{pl} / \sqrt{3} \quad \text{para endurecimento definido por cisalhamento puro} \quad (16)$$

$\dot{\varepsilon}_{11}^{pl}$  a taxa de deformação plástica na direção de carregamento;

$\dot{\gamma}^{pl}$  a taxa de deformação angular plástica;

$f_i$  outras variáveis de campo, como por exemplo a temperatura;

$t$  a variável fictícia do tempo que permite controlar a evolução da deformação plástica.

Os parâmetros do modelo D-P podem ser relacionados com aqueles correspondentes ao modelo de Mohr-Coulomb (M-C) para o caso de compressão triaxial convencional mediante as seguintes expressões (Zhang & Cai, 2010):

$$\tan \beta = \frac{6 \text{Sen} \phi}{3 - \text{Sen} \phi} \quad (17)$$

$$a = \frac{6c \text{Cos} \phi}{3 - \text{Sen} \phi} \quad (18)$$

Onde  $\phi$  e  $c$  são o ângulo de atrito e a coesão para o modelo de M-C.

O uso do modelo de D-P neste trabalho se deve a que é um modelo constitutivo que pode ser usado para representar o comportamento das rochas, e a que o ABAQUS® permite sua integração com o Mecanismo de Dano descrito na seguinte secção.

#### 2.4. MODELO DE MECANISMO DE DANO DÚCTIL E CISALHANTE IMPLEMENTADO NO PROGRAMA ABAQUS®

O Mecanismo de Dano dúctil e cisalhante é um modelo fenomenológico derivado da MDC e desenvolvido para simular o processo de degradação e ruptura de materiais metálicos, como é o caso do aço ou o alumínio. O modelo foi proposto por Hooputra *et al.* no 2004, procurando representar a danificação do material mediante a introdução de uma variável interna de dano (variável escalar), considerando diferentes mecanismos de fratura, a anisotropia do meio e as trajetórias de tensão não lineares.

Este modelo tem sido implementado em alguns programas de elementos finitos, onde as deformações e tensões locais permitem prever a falha dos elementos da malha à medida que o corpo vai-se deformando; quando algum dos elementos atinge a deformação máxima de dano, o elemento falha, podendo ser eliminado do modelo e conformando assim a zona de fratura. No entanto, o autor especifica que, se bem o modelo permite prever a região do início das fraturas, a eliminação dos elementos danados serve só como uma estimacção inicial do processo de propagação.

O modelo de dano se comporta inicialmente como um modelo plástico (Figura 2.5a) até o ponto de início do dano, ponto b na Figura 2.6, a partir daí combina os modelos plástico e de dano (Figura 2.5a e b), dando como resultado um modelo plástico de dano (Figura 2.5c), sendo considerado então como um modelo acoplado nesta zona (Ruzicka *et al.*, 2012).

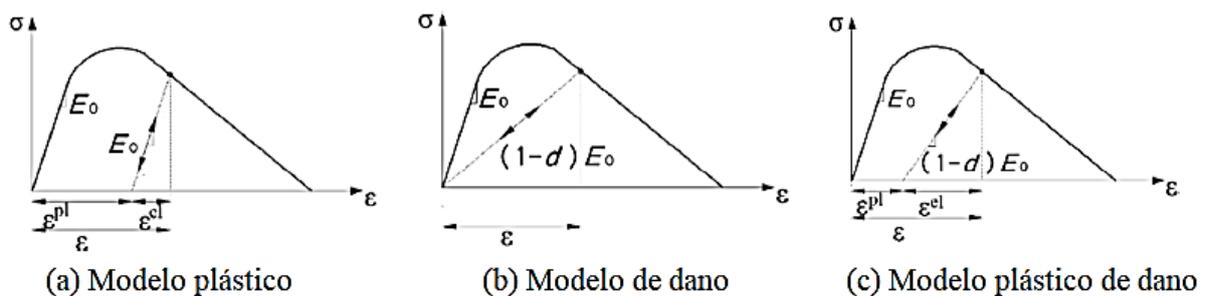


Figura 2.5. Representação de um modelo plástico (a), um modelo de dano (b) e um modelo plástico de dano (c). Tomado de Alfarah *et al.* (2017).

O modelo de dano dúctil e cisalhante está disponível no programa ABAQUS® usado nesta pesquisa, o qual tem sido discutido por vários autores (como Hooputra *et al.*, 2004; Malcher, 2011; Levanger, 2012; Martinez, 2012), sendo explicado melhor para uma condição unidimensional ao definir a variável interna de dano  $D$  como:

$$D = \frac{A_d}{A} \quad (19)$$

Onde:

$A$  é a área total resultante da interseção de um plano de corte sobre um volume elementar representativo;

$A_d$  é a área das fraturas na mesma interseção do plano de corte.

A variável de dano representa a densidade de defeitos por unidade de superfície dentro do material que origina dois efeitos principais no comportamento do mesmo, o primeiro é o amolecimento, que provoca a queda na tensão suportada, e o segundo é a degradação do módulo de elasticidade, gerando uma redução na rigidez, como pode ser observado na Figura 2.6.

O valor de  $D$  depende do ponto do material onde está sendo avaliado e da orientação do plano de corte, cuja normal é  $\vec{n}$ . Esta variável considera o efeito de todos os mecanismos de dano ativos, podendo ser eles de tipo dúctil ou de tipo cisalhante, tendo um valor entre 0

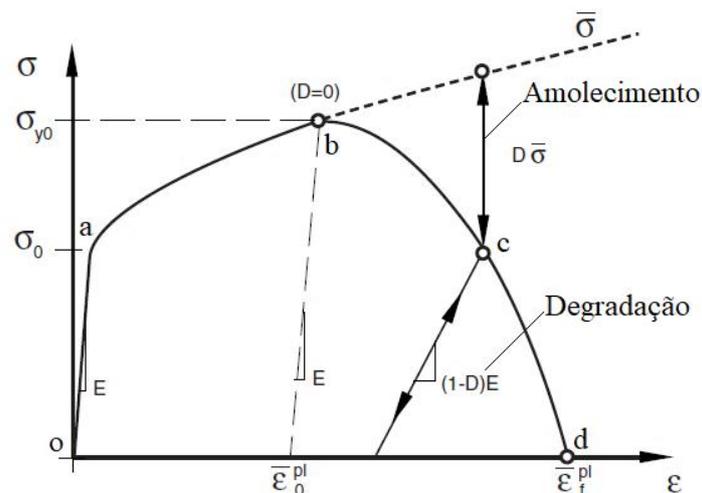


Figura 2.6. Curva tensão-deformação para o caso unidimensional considerando o Mecanismo de Dano. Trecho elástico o-a, trecho elasto-plástico a-b, amolecimento b-d. Modificado de ABAQUS (2014).

(material intato) e 1 (material completamente danificado) (Hooputra *et al.*, 2004; ABAQUS, 2014).

O ponto do início do dano marca a tensão máxima resistida pelo material cuja deformação plástica é considerada como a deformação plástica equivalente no início do dano  $\bar{\varepsilon}_0^{pl}$ , a qual pode ser definida a través do critério dúctil ou do critério cisalhante (Figura 2.7).

No critério dúctil é considerado que a fratura acontece pela nucleação, crescimento e união de vazios, conformando assim as macro-fraturas. Neste caso se estabelece que a  $\bar{\varepsilon}_0^{pl}$  é uma função da taxa de deformação plástica equivalente  $\dot{\varepsilon}^{pl}$  e da triaxialidade de tensões  $\eta$ , esta última definida como:

$$\eta = \frac{-p}{q} \quad (20)$$

Sendo  $p$  e  $q$  a tensão octaédrica e a tensão de Mises, respectivamente.

Já no critério cisalhante se considera que a fratura acontece principalmente em uma região de cisalhamento localizada e que a  $\bar{\varepsilon}_0^{pl}$  depende igualmente da taxa de deformação plástica equivalente e da taxa de tensão cisalhante  $\theta_s$ , calculada como:

$$\theta_s = \frac{q + k_s p}{\tau_{máx}} \quad (21)$$

Onde:

$k_s$  é um parâmetro do material;

$\tau_{máx}$  é a tensão cisalhante máxima no início do dano dada por:

$$\tau_{máx} = \frac{\sigma_d}{2} \quad (22)$$

$\sigma_d$  é a tensão de desvio.

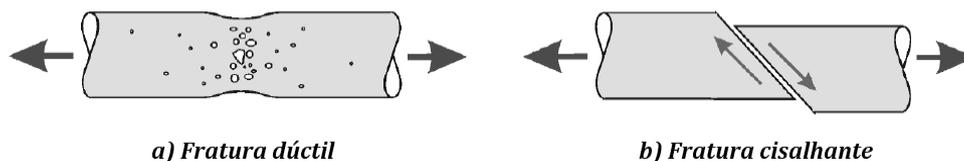


Figura 2.7. Tipos de fraturas consideradas para o início do dano. Modificado de ABAQUS (2005).

Como foi visto na Secção 2.1, no processo de fraturamento das rochas acontecem simultaneamente os dois tipos de fenômenos que representam o início do dano, já que à medida que o material é submetido a cargas maiores, começa o cisalhamento das fraturas existentes e a partir delas são geradas novas fraturas no redor por causa das tensões de tração induzidas. Como resultados ambos os critérios contribuem no acontecimento da ruptura total da rocha, sendo difícil determinar quantitativamente o aporte de cada um deles, por este motivo, será avaliado cada critério por separado assumindo que só um é o predominante na geração do início do dano, a fim de estabelecer qual dos dois é mais acertado na modelagem do comportamento deste material.

Uma vez definido a  $\bar{\varepsilon}_0^{pl}$  seja para o critério dúctil ou para o cisalhante, é calculada a variável de estado em cada ponto de integração do elemento, a qual determina se o ponto avaliado começa ou não a sofrer o dano. Esta variável está definida como:

$$\omega_D / \omega_S = \int \frac{d\bar{\varepsilon}^{pl}}{\bar{\varepsilon}_0^{pl}} \quad (23)$$

Sendo  $\omega_D$  ou  $\omega_S$  para o critério dúctil ou o cisalhante respectivamente, iniciando o dano quando alcançar o valor de um. Fazendo uso da integral permite levar em conta trajetórias de tensão não lineares (Hooputra et al., 2004).

Uma vez iniciado o dano no ponto, se estabelece a evolução dele através da avaliação da variável de dano no ponto de integração  $d$ . A relação entre o  $D$  do elemento e os  $d$  dos pontos de integração está dada pela seguinte expressão:

$$D = \text{máx}\{d_{mult}, \text{máx}_{j \in N_{máx}}(d_j)\} \quad (24)$$

Esta equação define o  $D$  como o valor máximo obtido entre os valores de  $d$  daqueles critérios considerados de uma forma multiplicativa, ou seja, que geram um efeito combinado na degradação do material  $d_{mult}$ , e o máximo valor obtidos daquelas variáveis de dano que são avaliadas por separado  $d_j$ . A variável de dano para o caso multiplicativo está descrita como:

$$d_{mult} = 1 - \prod_{k \in N_{mult}} (1 - d_k) \quad (25)$$

Os valores de  $N_{mult}$  e  $N_{máx}$  definem a quantidade de variáveis que intervierem de um modo multiplicativo ou máximo, respetivamente.

Por outra parte, a lei de evolução do dano no ponto de integração pode ser expressada em termos de dissipação de energia de fratura  $G_f$  ou, diretamente, em termos do deslocamento plástico equivalente  $\bar{u}^{pl}$ . A  $G_f$ , também chamada de taxa de dissipação de energia, é a energia dissipada por unidade de área no processo de fraturamento do material, podendo ser calculada como:

$$G_f = \int_{\bar{\varepsilon}_0^{pl}}^{\bar{\varepsilon}_f^{pl}} L \sigma_y d\bar{\varepsilon}^{pl} = \int_0^{\bar{u}_f^{pl}} \sigma_y d\bar{u}^{pl} \quad (26)$$

Onde:

$\sigma_y$  é o nível de tensão atuante no ponto de integração para certa deformação plástica equivalente;

$\bar{u}_f^{pl}$  e  $\bar{u}^{pl}$  são os deslocamentos plásticos equivalentes na falha e no ponto avaliado;

$\bar{\varepsilon}_0^{pl}$ ,  $\bar{\varepsilon}_f^{pl}$  e  $\bar{\varepsilon}^{pl}$  são as deformações plásticas equivalentes no início do dano, no ponto de falha e no ponto de interesse;

$L$  é o comprimento característico do elemento, que depende de sua geometria e formulação.

O conceito desta energia será explicado mais extensamente na Seção 2.5. No manual do ABAQUS®, o valor do  $L$  está definido para elementos tridimensionais como o comprimento típico de uma linha que atravessa um elemento de primeira ordem (Figura 2.8a), ou a metade desse comprimento se o elemento é de segunda ordem (Figura 2.8b), sem embargo, na prática são usadas outras definições para determinar o valor de  $L$ , como são: a raiz cúbica do volume do elemento ou o cociente entre o volume e a área da cara maior. Por outra parte, o cálculo do  $L$  é mais complicado quando os elementos são irregulares e possuem diferentes tamanhos em um mesmo modelo, sendo necessária uma divisão em zonas, a fim de obter uma malha mais regular.

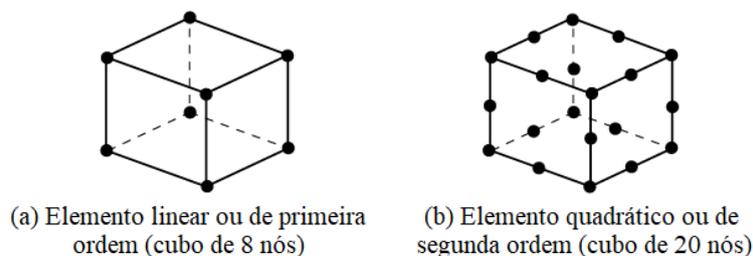


Figura 2.8. Diferencias entre os elementos de primeira ordem (a) e de segunda ordem (b).

Modificado de ABAQUS (2014).

O valor  $G_f$  permite então estabelecer a evolução do dano, calculando o  $\bar{u}_f^{pl}$  para a lei de tipo linear ou a relação entre a  $d$  e o  $\bar{u}^{pl}$  para a lei de tipo exponencial da seguinte forma:

$$\bar{u}_f^{pl} = \frac{2G_f}{\sigma_{y0}} \quad (27)$$

$$d = 1 - \exp\left(-\int_0^{\bar{u}^{pl}} \frac{\sigma_y \dot{\bar{u}}^{pl}}{G_f}\right) \quad (28)$$

Sendo:

$\sigma_{y0}$  a tensão atuante no início do dano;

$\dot{\bar{u}}^{pl}$  a taxa de deslocamento plástico equivalente.

O modelo de dano é muito sensível à geometria dos elementos devido a que não se conhece a direção do fraturamento, por isto é recomendado o uso de elementos que sejam o mais uniformes possíveis (relação entre dimensões próxima a um). Na Seção 2.5 será discutida esta dependência da malha do modelo de dano.

No programa, também pode ser especificada diretamente a relação entre a  $d$  e o  $\bar{u}^{pl}$ , e ao igual que com a energia de fratura, leva-se em consideração o comprimento característico. A relação que descreve a lei de evolução do dano pode ser de tipo linear, exponencial ou definida de forma tabular, tal e como se apresenta na Figura 2.9, partindo de um valor de  $\bar{u}^{pl}$  igual a 0 até o valor de  $\bar{u}_f^{pl}$ , que representa o deslocamento plástico equivalente na falha.

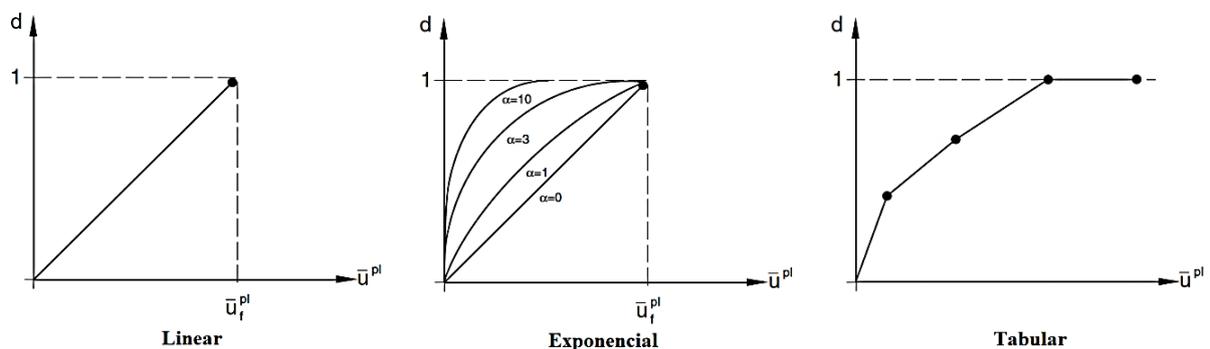


Figura 2.9. Lei de evolução do dano permitido quando é especificado o deslocamento plástico equivalente na falha. Modificado de ABAQUS (2014).

A lei de tipo exponencial está dada pela seguinte equação:

$$d = \frac{1 - e^{-\alpha(\bar{u}^{p_l}/u_f^{p_l})}}{1 - e^{-\alpha}} \quad (29)$$

Onde  $\alpha$  é o parâmetro que define a forma da evolução do dano. Quando em algum dos pontos de integração, a variável de dano  $d$  atinge o valor de 1, então também o faz a variável  $D$ , sendo então removido o elemento do cálculo.

Agora, para calcular a tensão atuante considerando o dano do material, defina-se a tensão efetiva (sem dano)  $\bar{\sigma}$  como:

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{\bar{A}} \quad (30)$$

Sendo:

$\bar{A}$  a área efetiva, dada por:

$$\bar{A} = A - A_D \quad (31)$$

$A$  e  $A_D$  as áreas total e de fraturas definidas anteriormente;

$F$  a força atuante na área total, definida como:

$$F = \sigma \cdot A \quad (32)$$

$\sigma$  a tensão atuante ou verdadeira.

Substituindo as Equações 31 e 32 na 30 se obteve que a tensão efetiva é:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - D} \quad (33)$$

Assumindo uma relação elástico-linear com dano, pode-se escrever a deformação elástica  $\varepsilon^e$ , considerando a Equação 33, como:

$$\varepsilon^e = \frac{\bar{\sigma}}{E} = \frac{\sigma}{E(1 - D)} \quad (34)$$

Sendo  $E$  o módulo de Young. Por último, reordenando a Equação 34 obteve-se a relação entre a tensão atuante e a deformação elástica, dada por (Alfarah *et al.*, 2017):

$$\sigma = (1-D)E\varepsilon^e = E_D(\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \quad (35)$$

Onde:

$E_D = (1-D)E$  pode ser definido como o módulo de elasticidade degradado;

$\varepsilon$  e  $\varepsilon^{pl}$  são a deformações total e plástica, respectivamente.

Este mesmo conceito pode ser estendido a uma condição 3D, obtendo:

$$\underline{\underline{\underline{\underline{\sigma}}}}} = (1-D)\underline{\underline{\underline{\underline{C}}}} : (\underline{\underline{\underline{\underline{\varepsilon}}}}} - \underline{\underline{\underline{\underline{\varepsilon}}}}}^{pl}) \quad (36)$$

Sendo:

$\underline{\underline{\underline{\underline{\sigma}}}}$  o tensor de tensões atuantes;

$\underline{\underline{\underline{\underline{\varepsilon}}}}$  e  $\underline{\underline{\underline{\underline{\varepsilon}}}}}^{pl}$  os tensores de deformações totais e plásticas;

$\underline{\underline{\underline{\underline{C}}}}$  o tensor e quarta ordem das constantes elásticas do material.

Nota-se que a variável  $D$  é considerada neste modelo de tipo escalar, pelo que representa uma condição de dano isotrópico descrita geometricamente como a geração de cavidades esféricas dentro do material (Cieřlik, 2013).

## 2.5. ENERGIA DISSIPADA NA FRATURA E COMPRIMENTO CARACTERÍSTICO

De acordo com o trabalho desenvolvido por Hillerborg *et al.* (1976), desde o ponto de vista da aproximação de balance de energia, durante a formação de uma unidade de área de fratura, acontece nos extremos da descontinuidade à absorção ou armazenamento de uma quantidade de energia ( $G_c$ ) como resultado da resistência do material a se fraturar, logo, esta energia vai-se liberando ou dissipando mediante a propagação da fratura quando o material não consegue resistir mais as tensões atuantes nesses pontos. Assumindo um modo de fratura I (abertura), pode-se obter uma estimacão da energia dissipada no processo como:

$$G_{IC} = \int_0^{w_{m\acute{a}x}} \sigma(w)dw \quad (37)$$

Onde:

$G_{IC}$  é a energia dissipada por unidade de área de fratura tipo I;

$\sigma(w)$  é a tensão normal atuante nas faces da fratura, que depende sua abertura  $w$ ;

$w_{m\acute{a}x}$  é a abertura na qual a tensão normal é igual a 0.

Relações semelhantes são conseguidas ao assumir os modos II (cisalhamento no plano) e III (cisalhamento fora do plano). A Figura 2.10 mostra os três modos de fratura básicos que descrevem a propagação das descontinuidades.

Como pode ser observado na Figura 2.11, no extremo da fratura tem-se uma tensão normal às faces equivalente à resistência a tração do material  $\sigma_t$ , que vai diminuindo à medida que a abertura da fratura aumenta, até atingir o valor de 0 para a abertura crítica  $w_{m\acute{a}x}$ . A região entre  $w=0$  e  $w=w_{m\acute{a}x}$  é chamada de Zona do Processo de Fratura (ZPF), a qual corresponde realmente a uma região micro-fraturada onde existem ainda algumas ligações que permitem a transferência de tensão.

Este modelo pode ser usado para explicar tanto a geração como o crescimento das fraturas, já que inicialmente a geração acontece quando em algum ponto se atinge a resistência à tração, criando um vazio no material, e se produzindo a propagação quando a tensão no extremo do vazio atinge igualmente a  $\sigma_t$ , liberando gradualmente a energia armazenada.

A  $G_{IC}$  concorda com a área embaixo da curva da tensão normal versus abertura da fratura, a qual pode ser aproximada a uma linha reta (Figura 2.12), de modo que a abertura máxima pode ser calculada como:

$$w_{m\acute{a}x} = \frac{2G_{IC}}{\sigma_t} \quad (38)$$

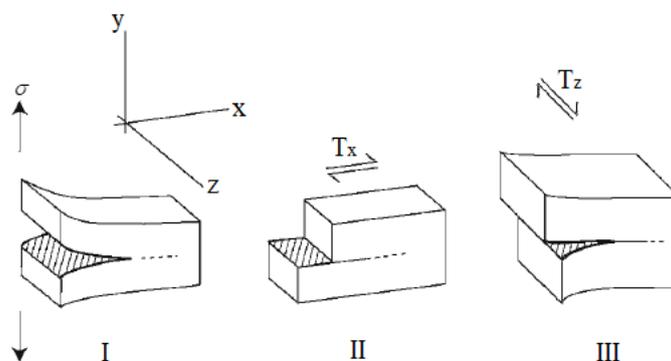


Figura 2.10. Modos de distorção básicos para a propagação das fraturas. Modo I: abertura normal ao plano da fratura; Modo II: cisalhamento no plano; Modo III: cisalhamento fora do plano. Modificado de Paterson & Wong (2005).

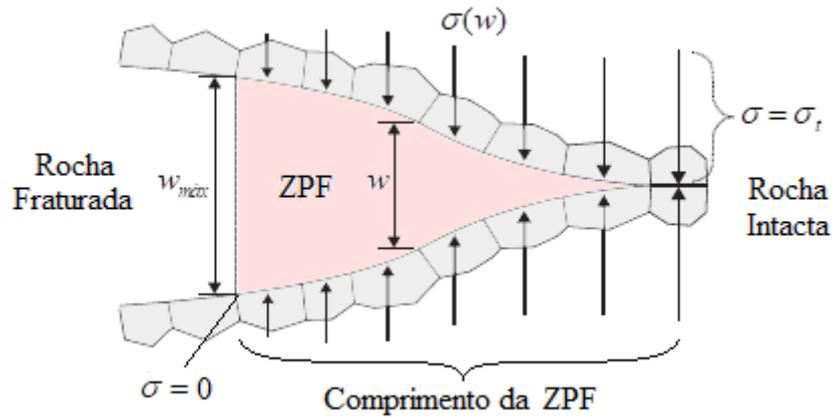


Figura 2.11. Esquema do modo de fratura tipo I e definição da Zona do Processo de Fratura (ZPF). Modificado de Rasmussen *et al.* (2018).

A Equação 38 é a mesma utilizada na estimação do  $\bar{u}_f^{pl}$  empregada no ABAQUS® para indicar a lei de evolução linear do dano (Equação 27). Note-se também que a Equação 37 é equivalente à Equação 26 apresentada por ABAQUS (2014), sendo  $w_{máx} = \bar{u}_f^{pl}$ ,  $w = \bar{u}^{pl}$  e  $G_{IC} = G_f$ , esta última chamada também de taxa crítica de energia liberada.

Outro jeito de obter a  $G_{IC}$  é mediante sua relação com a energia dissipada durante o processo de fraturamento por unidade de volume  $g_t$ , que corresponde à área embaixo da curva tensão-deformação de fratura  $\varepsilon_i^{ck}$  e pode ser considerada ela um parâmetro do material (Figura 2.13) (Levanger, 2012; ABAQUS, 2014; Alfarah *et al.*, 2017).

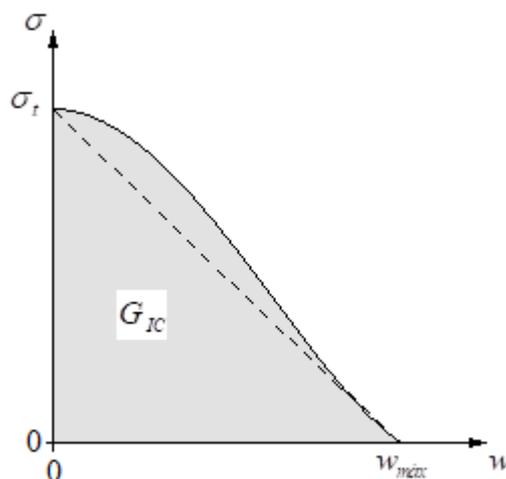


Figura 2.12. Curva tensão-abertura da fratura e energia dissipada por unidade de área  $G_{IC}$ .

A equação da  $G_{IC}$  em função de  $g_t$  é:

$$G_{IC} = g_t L \quad (39)$$

Sendo  $L$  é o comprimento característico. Note-se que  $\varepsilon_t^{ck} = \bar{\varepsilon}^{pl} = w/L$  de acordo com as Equações 26 e 37. Para o modo de fratura tipo II, a energia dissipada por unidade de área  $G_{IIC}$  está dada por:

$$G_{IIC} = \int_0^{\delta_{máx}} \left( \tau_s - \frac{T_r}{2} \right) d\delta \quad (40)$$

Onde:

$\tau_s$  é a tensão cisalhante atuante na fratura no ponto avaliado;

$T_r$  é a resistência residual cisalhante;

$\delta_{máx}$  é o deslocamento máximo ao longo do plano;

$\delta$  é o deslocamento acontecido no ponto avaliado.

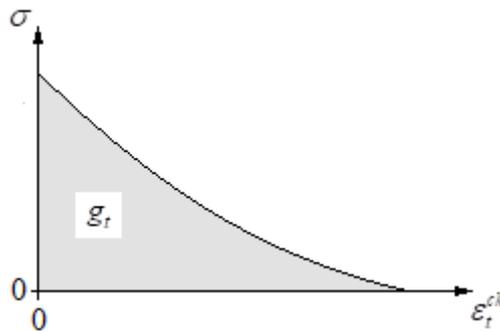


Figura 2.13. Curva tensão-deformação de fratura e energia dissipada por unidade de volume

$g_t$ .

A determinação destas energias é difícil quando o carregamento é de compressão, devido a que nesta condição podem acontecer os três tipos de fraturas simultaneamente, pelo que não é conhecido o aporte feito por cada uma delas no processo de falha total do material.

Na integração do modelo com o método de elementos finitos, o comprimento crítico ou comprimento característico também é usado na geração da malha como limite do tamanho máximo que os elementos podem alcançar, de modo que consigam representar

satisfatoriamente o processo de fraturamento e a ZPF do material. O  $L$  pode ser calculado, de acordo com Rasmussen *et al.* (2018), como:

$$L = \frac{EG_{IC}}{\sigma_t^2} \quad (41)$$

Não obstante, a integração do  $L$  nas equações se deve principalmente ao intento de reduzir a dependência da malha, causada pela formulação local do modelo que está dada em termos de tensão e deformação. A introdução do comprimento característico permite representar o comportamento mais global do material em função de tensão e deslocamento, estando relacionado com a geometria dos elementos e sua formulação (Brekelmans & de Vree, 1995; ABAQUS, 2014).

Tem sido demonstrado que depois de iniciado o dano, malhas com elementos pequenos dissipam uma quantidade de energia menor que com elementos maiores, isto se deve à localização das deformações em uma banda chamada de zona instável, cuja espessura depende do tamanho dos elementos. Um refinamento da malha leva a uma redução da espessura da banda, causando a localização do dano em um volume de material muito pequeno, o que leva a uma menor dissipação global de energia e a que o comportamento geral dependa principalmente do comportamento desta zona, induzindo deformações só nesta região além de uma recuperação elástica no resto do material; por isto, ao introduzir o  $L$  no modelo se limita a espessura mínima da zona instável, reduzindo assim a dependência da malha (Brekelmans & de Vree, 1995; Levanger, 2012; ABAQUS, 2014; Ribeiro *et al.*, 2016; Alfarah *et al.*, 2017).

O trabalho feito por Brekelmans & de Vree (1995) mostra um exemplo do efeito da incorporação do comprimento característico na modelagem de um material; estes autores simularam o ensaio de tração sobre uma placa furada de morteiro obtendo os resultados da Figura 2.14, sendo evidente a redução da dependência da malha quando é considerado o  $L$ .

Outro trabalho que expõe a dependência da malha é o apresentado por Levanger (2012), o qual utilizou o modelo de dano dúctil para simular o ensaio de tração em uma proveta metálica. Durante a calibração do modelo, o autor conseguiu estabelecer uma lei de dano diferente para cada tamanho analisado dos elementos localizados na seção central do corpo de prova, dada em termos de  $\bar{u}^{pl}$ , tal e como se apresenta na Figura 2.15. Nota-se que quando o tamanho dos elementos aumenta, se obtiveram maiores valores de  $\bar{u}^{pl}$ , aumentando a energia

dissipada por cada elemento e conseguindo reproduzir o mesmo comportamento geral da proveta.

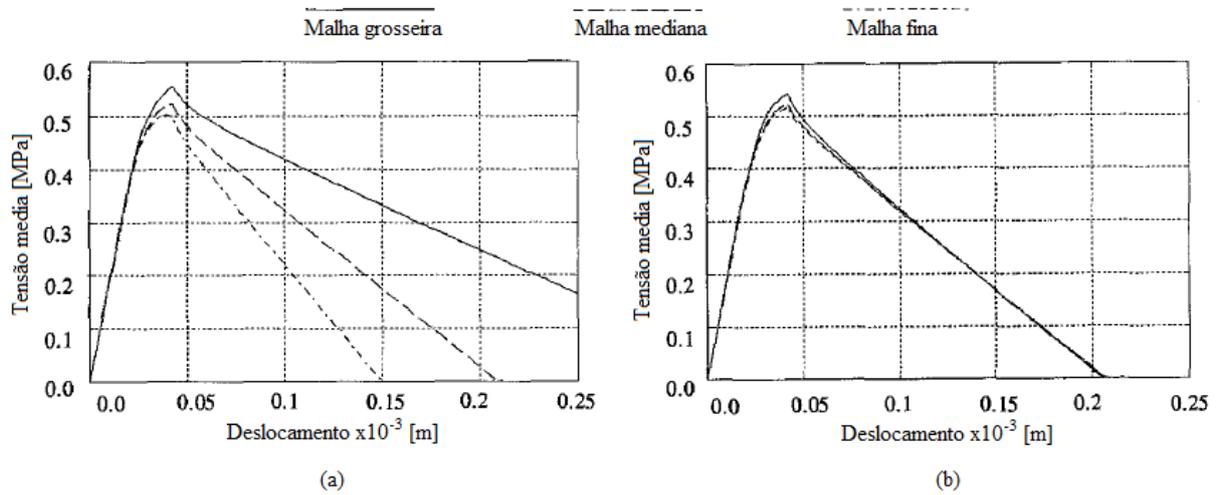


Figura 2.14. Curvas tensão-deslocamento do ensaio de tração em placas de morteiro modelado com diferentes tamanhos de elementos, sem considerar (a) e considerando o comprimento característico (b). Modificado de Brekelmans & de Vree (1995).

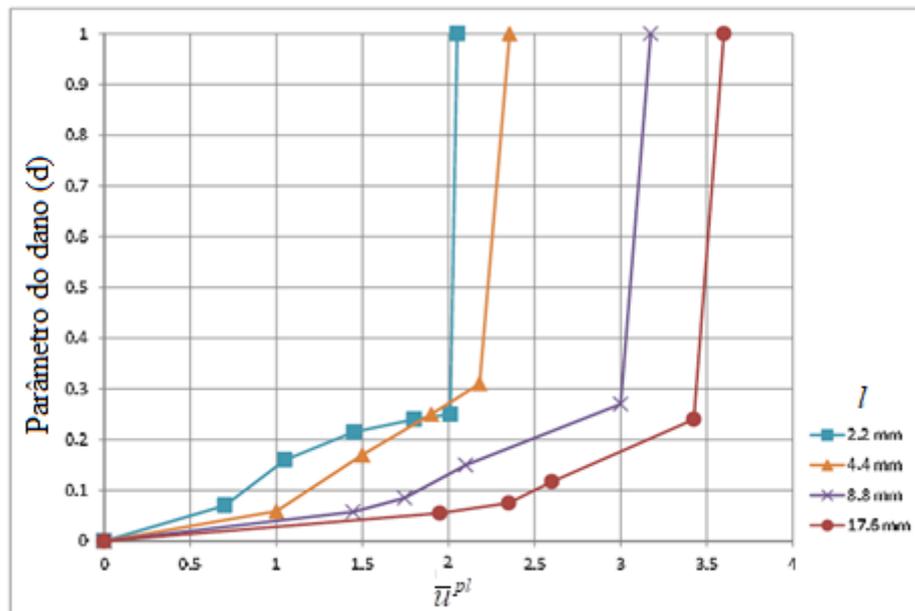


Figura 2.15. Leis de evolução do dano obtidas durante a calibração do modelo em função do tamanho dos elementos  $l$ . Modificado de Levanger (2012).

### 3. METODOLOGIA DO TRABALHO

#### 3.1. MODELAGEM DE ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLES E TRIAXIAIS

Com o objetivo de definir o alcance do modelo de dano, foram simulados no programa ABAQUS® alguns ensaios de compressão simples e triaxial, empregando o modelo de Mecanismo de Dano e o modelo de Drucker-Prager estendido, sobre dois tipos de rochas que apresentam comportamentos diferentes na zona post-pico da curva tensão-deformação, de acordo com os resultados dos ensaios experimentais levados a cabo por outros autores; a primeira consiste em um Arenito, caracterizada por uma baixa resistência com presença de amolecimento, e a segunda corresponde a um Granito, rocha mais resistente que manifesta um comportamento frágil na ruptura.

Para poder introduzir o modelo nas simulações foi necessário definir o início do dano na curva tensão-deformação. Segundo diferentes autores (Sgaoula et al., 1995; Aubertin & Simon, 1997; Levanger, 2012; Martinez, 2012; Ruzicka *et al.*, 2012) e a explicação fornecida por ABAQUS (2014), o início do dano pode ser assumido em três níveis de tensões diferentes: na tensão de início de fraturas  $\sigma_{ci}$ , na tensão de dano por fraturas  $\sigma_{cd}$  ou na tensão máxima, sendo avaliadas neste trabalho as duas últimas, já que descreve a maior mudança no comportamento do material e respeita a concepção inicial do modelo de dano, respectivamente.

Como foi dito anteriormente, a geração e propagação das fraturas no interior da rocha pode-se dever à ação conjugada de tração e cisalhamento, sendo difícil definir qual dos dois mecanismos é predominante nas diferentes zonas da curva, por isto foi considerado cada um dos fenômenos por separado, analisando ambos os critérios de início do dano (dúctil e cisalhante).

Também, foi avaliada a influência de vários dos parâmetros na curva tensão-deformação para cada rocha na condição de confinamento nula; inicialmente foram realizadas algumas modelagens sem considerar o Mecanismo de Dano, procurando confirmar a boa representação do comportamento geral do material no regime elástico e elasto-plástico, avaliando a influência de: o ângulo de dilatância  $\psi$ , o coeficiente de forma da superfície de plastificação no plano octaédrico  $K$  e a velocidade de carregamento; posteriormente foi introduzido o Mecanismo de Dano com o critério selecionado, sendo analisado o efeito de: o ângulo de

dilatância  $\psi$ , o coeficiente de forma da superfície de plastificação  $K$ , a velocidade de carregamento, o parâmetro do material  $k_s$  (só para o critério cisalhante), a taxa de deformação plástica equivalente  $\dot{\varepsilon}^{pl}$ , o deslocamento plástico equivalente na falha  $\bar{u}_f^{pl}$  e o coeficiente de forma  $\alpha$  da lei de evolução do dano (sendo usados os três tipos permitidos pelo programa). No final foi feito o melhor ajuste possível das curvas usando a lei de evolução inserida de forma tabular, como tem sido realizado por vários autores (Levanger, 2012; Malcher, 2011; Ruzicka et al., 2012) para calibrar o modelo de dano.

Dos resultados obtidos, foi avaliada tanto a proximidade de cada curva ao resultado experimental como a forma das fraturas macroscópicas, já que as duas representações são importantes para simular do processo de falha total das rochas. Ao final são escolhidos os valores dos parâmetros que melhor reproduzem o comportamento de cada material e são feitos alguns modelos aplicando confinamento (10MPa, 30MPa e 70MPa para o Arenito e 5MPa, 10MPa e 20MPa para o Granito); da mesma forma, é avaliada a proximidade da curva e o tipo de fraturas apresentadas para cada caso.

Em resumo, com a simulação dos ensaios procura-se determinar:

- O ponto de início do dano que permite representar, desde o ponto de vista fenomenológico, o comportamento dos dois tipos de rocha analisados.
- O critério de início do dano e sua evolução, procurando aproximar não só a curva tensão-deformação, senão também a forma da superfície de ruptura.
- Os parâmetros mais relevantes na calibração e os valores que possibilitam ajustar o modelo aos resultados experimentais.

A Figura 3.1 apresenta um diagrama com o resumo das variáveis analisadas na modelagem dos ensaios de compressão simples.

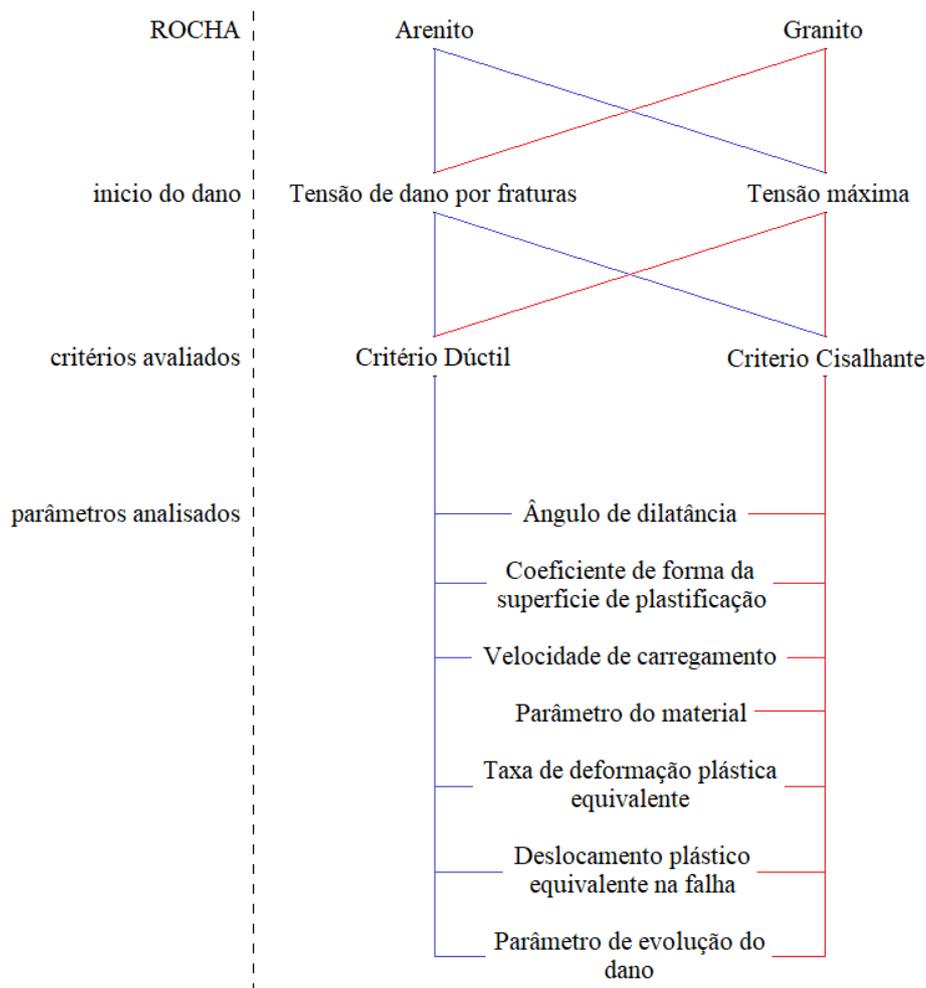


Figura 3.1. Diagrama resumo das variáveis analisadas nos modelos de ensaio de compressão simples.

## 3.2. DADOS EXPERIMENTAIS DAS ROCHAS ANALISADAS

### 3.2.1. ARENITO

Os resultados dos ensaios triaxiais convencionais levados a cabo experimentalmente sobre amostras cilíndricas do Arenito, com um diâmetro de 3cm e uma altura de 6cm, são apresentados na Figura 3.2, os dados foram tomados do trabalho feito por Gowd & Rummel (1980) sendo considerado só aqueles ensaios com níveis de confinamento menor a 100MPa devido a que para tensões maiores não é possível definir a tensão pico. Foram registrados modos de falha por cisalhamento, sendo uma única superfície de fratura para tensões baixas de confinamento ( $\sigma_3 < 40\text{MPa}$ ) e numerosas superfícies para tensões maiores. Cabe ressaltar que os dados foram reproduzidos dos resultados publicados pelos autores e que as curvas obtidas são aproximadas.

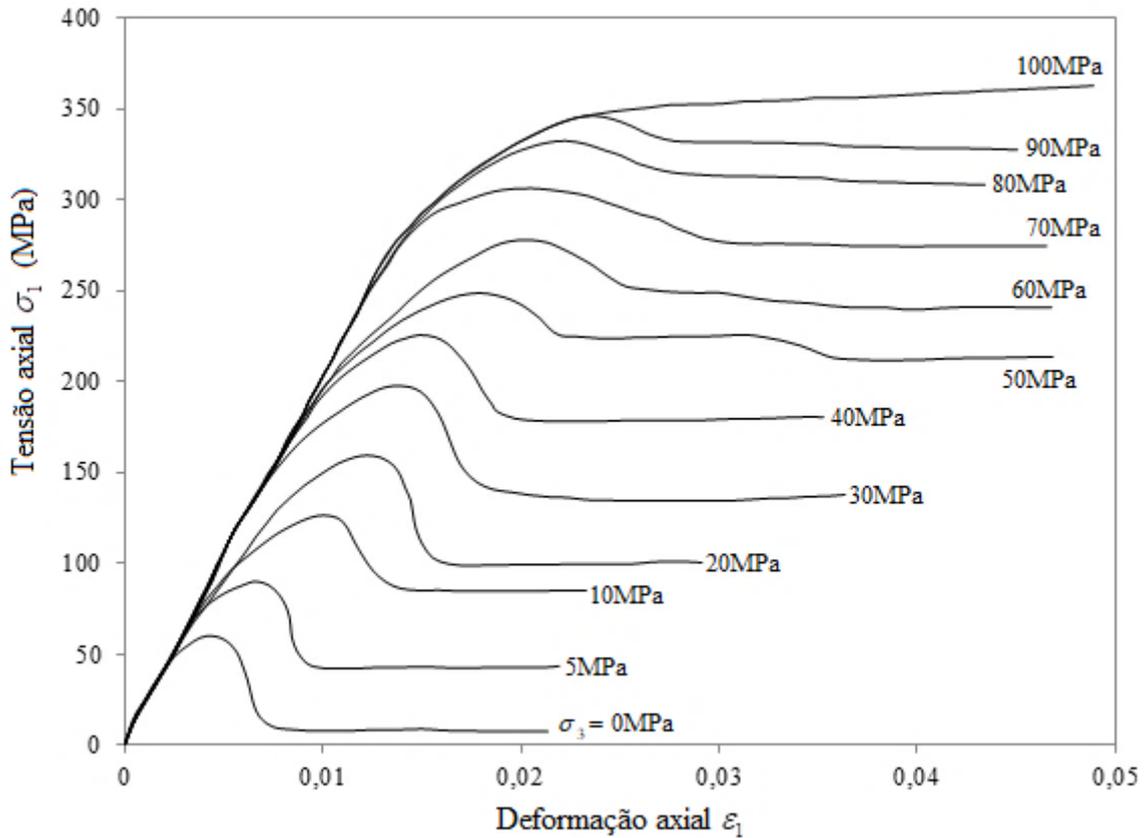


Figura 3.2. Curvas tensão-deformação obtidas dos ensaios triaxiais para o Arenito.

Reproduzido de Gowd & Rummel (1980).

Estes dados permitem definir a envoltória de ruptura e de dano considerando o modelo de M-C, plotando os resultados no gráfico de tensão de desvio média  $\sigma_d / 2$  versus tensão média  $\sigma_s$ , sendo calculadas como:

$$\sigma_d = -(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (42)$$

$$\sigma_s = \frac{-(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} \quad (43)$$

O ângulo de atrito e a coesão do material podem ser obtidos a partir das expressões:

$$\text{Sen}\phi = \text{Tan}\theta \quad (44)$$

$$s = c\text{Cos}\phi \quad (45)$$

Sendo  $s$  o intercepto da linha no eixo de tensão de desvio média e  $\theta$  sua inclinação. Por último, com as Equações 17 e 18 é possível definir os parâmetros do modelo de D-P. Na Tabela 3.1 são resumidos os parâmetros para os dois modelos e para as condições de ruptura

(tensão máxima) e dano (tensão de dano por fraturas), sendo representadas as envoltórias na Figura 3.3.

Tabela 3.1. Parâmetros das envoltórias de ruptura e de dano do Arenito para ambos os modelos M-C e D-P.

Modelo	Parâmetro	Ruptura	Dano
M-C	$c$ (MPa)	25,46	23,54
	$\phi$ (°)	30,10	28,19
D-P	$a$ (MPa)	52,90	49,24
	$\beta$ (°)	50,30	48,27

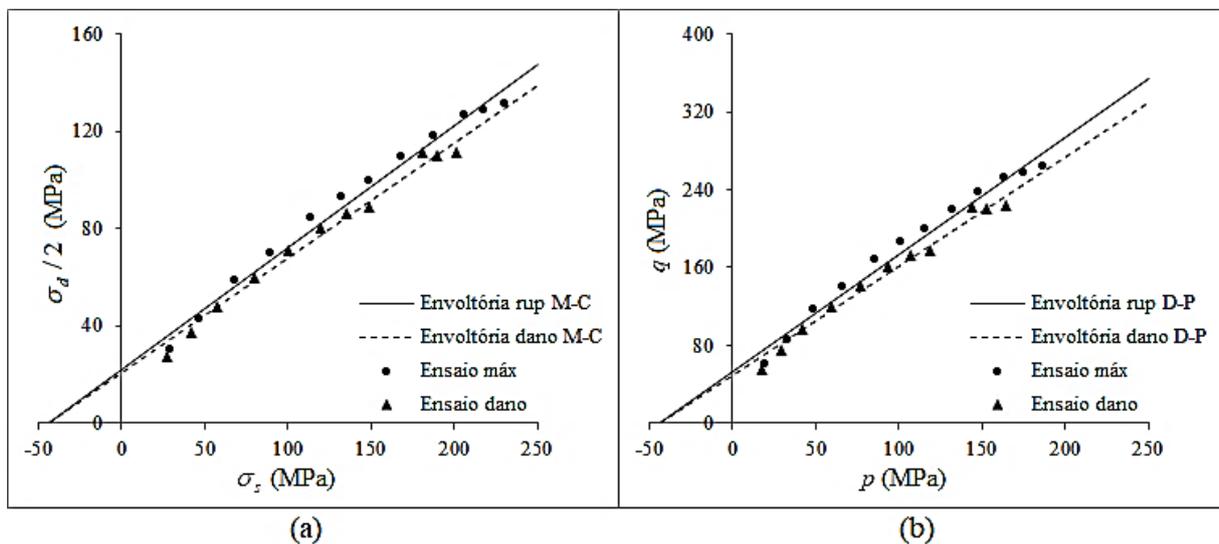


Figura 3.3. Envoltórias de ruptura e de dano do Arenito para o modelo M-C (a) e D-P (b).

As propriedades gerais da rocha que foram usadas em todas as modelagens são apresentadas na Tabela 3.2. O comportamento plástico do material foi obtido da curva de compressão não confinada (Tabela 3.3), transformando a tensão e deformação de engenharia em tensão e deformação verdadeira, já que o ABAQUS® utiliza estas variáveis na sua formulação. A diferença entre a tensão de engenharia e a verdadeira consiste em que a primeira está definida como a força aplicada sobre a área inicial do corpo de prova, enquanto a segunda está descrita como a mesma força aplicada na área atualizada, a qual vai mudando durante o processo de deformação como consequência da suposição de que o elemento conserva um volume constante. Para a deformação de engenharia e a verdadeira aplica um conceito similar, onde para o primeiro caso, a deformação se define com base no comprimento inicial do corpo de

prova, e para o segundo, a deformação se mede respeito ao comprimento atualizado à medida que é aplicado o carregamento. As equações que permitem calcular as variáveis verdadeiras respeito às de engenharia são:

$$\sigma_{ytrue} = \sigma_{ynom}(\varepsilon_{nom} + 1) \quad (46)$$

$$\varepsilon_{true} = Ln(\varepsilon_{nom} + 1) \quad (47)$$

Sendo:

$\sigma_{ynom}$  a tensão de endurecimento nominal ou de engenharia;

$\varepsilon_{nom}$  a deformação nominal ou de engenharia;

$\sigma_{ytrue}$  a tensão de endurecimento verdadeira;

$\varepsilon_{true}$  a deformação verdadeira.

Já a deformação plástica verdadeira  $\varepsilon_{true}^{pl}$  pode ser calculada como:

$$\varepsilon_{true}^{pl} = \varepsilon_{true} - \frac{\sigma_{ytrue}}{E} \quad (48)$$

O último valor de  $\sigma_{ytrue}$  na Tabela 3.3 corresponde à tensão pico, que em termos de tensão de engenharia equivale a 60MPa, sendo então o valor da resistência à compressão não confinada (UCS). Ao inserir o Mecanismo de Dano no modelo, se espera representar a zona de amolecimento do Arenito e a ruptura total do material.

Os dados necessários do modelo de Mecanismo de Dano para cada um dos critérios e pontos do início do dano selecionados são apresentados a continuação; a taxa de deformação plástica equivalente  $\dot{\varepsilon}^{pl}$  foi assumida para todos os casos igual à taxa de deformação axial utilizada nos ensaios, tendo um valor aproximado de 5,00E-05/s.

Tabela 3.2. Propriedades gerais do Arenito.

<b>Propriedades da rocha</b>	
<b>Densidade <math>\rho</math> (Kg/m3)</b>	2400
<b>Módulo de elasticidade <math>E</math> (GPa)</b>	20,074
<b>Coefficiente de Poisson <math>\nu</math></b>	0,23

Tabela 3.3. Evolução das deformações plásticas com a tensão de endurecimento obtida da curva de compressão não confinada do Arenito.

$\sigma_{ytrue}$ (MPa)	$\varepsilon_{true}^{pl}$
45,11	0
50,13	1,298E-04
51,95	2,488E-04
53,45	3,555E-04
55,16	4,642E-04
56,61	5,852E-04
58,28	7,309E-04
59,21	8,430E-04
59,64	9,534E-04
59,93	1,042E-03
60,12	1,166E-03
60,26	1,403E-03

Para o critério cisalhante e o início do dano na tensão de dano por fraturas  $\sigma_{cd}$ , os dados inseridos se mostram na Tabela 3.4. O valor de referência do  $k_s$  será tomado igual à unidade de modo que o comportamento do material dependa da triaxialidade de tensões, já que esta varia de acordo com o ponto avaliado, sendo mais alta no centro do corpo de prova (Levanger, 2012).

Para o mesmo critério e com o início do dano na tensão pico da curva tensão-deformação, os dados necessários se exibem na Tabela 3.5. Também foi usado um valor típico de  $k_s = 1$  para os modelos onde é avaliado o efeito dos outros parâmetros.

Já para o critério dúctil e início do dano na  $\sigma_{cd}$  e na  $\sigma_{m\acute{a}x}$ , os dados inseridos no programa se mostram na Tabela 3.6 e na Tabela 3.7, respectivamente.

Tabela 3.4. Valores típicos usados das variáveis necessárias para o Mecanismo de Dano, considerando o critério cisalhante e início do dano na  $\sigma_{cd}$  para o Arenito.

$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_{y0}$ (MPa)	$\bar{\varepsilon}_0^{pl}$	$p$ (MPa)	$t = q$ (MPa)	$\tau_{máx}$ (MPa)	$\theta_s$ com $k_s = 1$
0	-54,98	4,642E-04	18,33	54,98	27,49	2,6667
-5	-79,00	4,386E-04	29,67	74,00	37,00	2,8018
-10	-106,00	1,114E-03	42,00	96,00	48,00	2,8750
-20	-139,50	1,674E-03	59,83	119,50	59,75	3,0014
-30	-171,50	7,000E-04	77,17	141,50	70,75	3,0907
-40	-200,50	6,070E-04	93,50	160,50	80,25	3,1651
-50	-221,50	1,260E-03	107,17	171,50	85,75	3,2498
-60	-237,50	1,614E-03	119,17	177,50	88,75	3,3427
-70	-292,00	7,065E-04	144,00	222,00	111,00	3,2973
-80	-300,00	6,411E-04	153,33	220,00	110,00	3,3939
-90	-313,00	1,232E-03	164,33	223,00	111,50	3,4738

Tabela 3.5. Valores típicos usados das variáveis necessárias para o Mecanismo de Dano, considerando o critério cisalhante e início do dano na  $\sigma_{máx}$  para o Arenito.

$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_{y0}$ (MPa)	$\bar{\varepsilon}_0^{pl}$	$p$ (MPa)	$t = q$ (MPa)	$\tau_{máx}$ (MPa)	$\theta_s$ com $k_s = 1$
0	-60,00	1,403E-03	20,00	60,00	30,00	2,6667
-5	-90,00	2,081E-03	33,33	85,00	42,50	2,7843
-10	-126,40	3,620E-03	48,80	116,40	58,20	2,8385
-20	-159,30	4,143E-03	66,43	139,30	69,65	2,9538
-30	-197,70	3,663E-03	85,90	167,70	83,85	3,0244
-40	-225,50	3,380E-03	101,83	185,50	92,75	3,0979
-50	-248,60	5,097E-03	116,20	198,60	99,30	3,1702
-60	-277,90	5,991E-03	132,63	217,90	108,95	3,2174
-70	-306,20	4,755E-03	148,73	236,20	118,10	3,2594
-80	-332,30	5,103E-03	164,10	252,30	126,15	3,3008
-90	-346,10	5,783E-03	175,37	256,10	128,05	3,3695

Tabela 3.6. Valores típicos usados das variáveis necessárias para o Mecanismo de Dano, considerando o critério dúctil e início do dano na  $\sigma_{cd}$  para o Arenito.

$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_{y0}$ (MPa)	$\bar{\varepsilon}_0^{pl}$	$p$ (MPa)	$t = q$ (MPa)	$\eta$
0	-54,98	4,642E-04	18,33	54,98	-0,3333
-5	-79,00	4,386E-04	29,67	74,00	-0,4009
-10	-106,00	1,114E-03	42,00	96,00	-0,4375
-20	-139,50	1,674E-03	59,83	119,50	-0,5007
-30	-171,50	7,000E-04	77,17	141,50	-0,5453
-40	-200,50	6,070E-04	93,50	160,50	-0,5826
-50	-221,50	1,260E-03	107,17	171,50	-0,6249
-60	-237,50	1,614E-03	119,17	177,50	-0,6714
-70	-292,00	7,065E-04	144,00	222,00	-0,6486
-80	-300,00	6,411E-04	153,33	220,00	-0,6970
-90	-313,00	1,232E-03	164,33	223,00	-0,7369

Tabela 3.7. Valores típicos usados das variáveis necessárias para o Mecanismo de Dano, considerando o critério dúctil e início do dano na  $\sigma_{máx}$  para o Arenito.

$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_{y0}$ (MPa)	$\bar{\varepsilon}_0^{pl}$	$p$ (MPa)	$t = q$ (MPa)	$\eta$
0	-60,00	1,403E-03	20,00	60,00	-0,3333
-5	-90,00	2,081E-03	33,33	85,00	-0,3922
-10	-126,40	3,620E-03	48,80	116,40	-0,4192
-20	-159,30	4,143E-03	66,43	139,30	-0,4769
-30	-197,70	3,663E-03	85,90	167,70	-0,5122
-40	-225,50	3,380E-03	101,83	185,50	-0,5490
-50	-248,60	5,097E-03	116,20	198,60	-0,5851
-60	-277,90	5,991E-03	132,63	217,90	-0,6087
-70	-306,20	4,755E-03	148,73	236,20	-0,6297
-80	-332,30	5,103E-03	164,10	252,30	-0,6504
-90	-346,10	5,783E-03	175,37	256,10	-0,6848

### 3.2.2. GRANITO

Os resultados dos ensaios triaxiais efetuados sobre amostras do Granito, com um diâmetro meio de 5cm e uma altura de 12,5cm, são apresentados na Figura 3.4, os dados foram tomados dos informes apresentados por Jacobsson (2004a, 2004b, 2004c) e da análise resumo feito por Lanaro & Fredriksson (2005).

Para uma melhor manipulação dos resultados, foram reproduzidas cada uma das curvas até o ponto de tensão máxima, dando como resultado a Figura 3.5, isto se deve a que o material apresenta um comportamento frágil na zona post-pico, pelo que se assume uma queda súbita da resistência para efeitos deste trabalho.

Na Figura 3.6 se mostram algumas das fotografias dos corpos de prova depois de finalizado o ensaio, evidenciando uma superfície de ruptura com presença de lascas (*spalling*) para uma tensão de confinamento nula, numerosas fraturas cisalhantes para tensões maiores e finalmente uma única fratura cisalhante para a tensão maior aplicada.

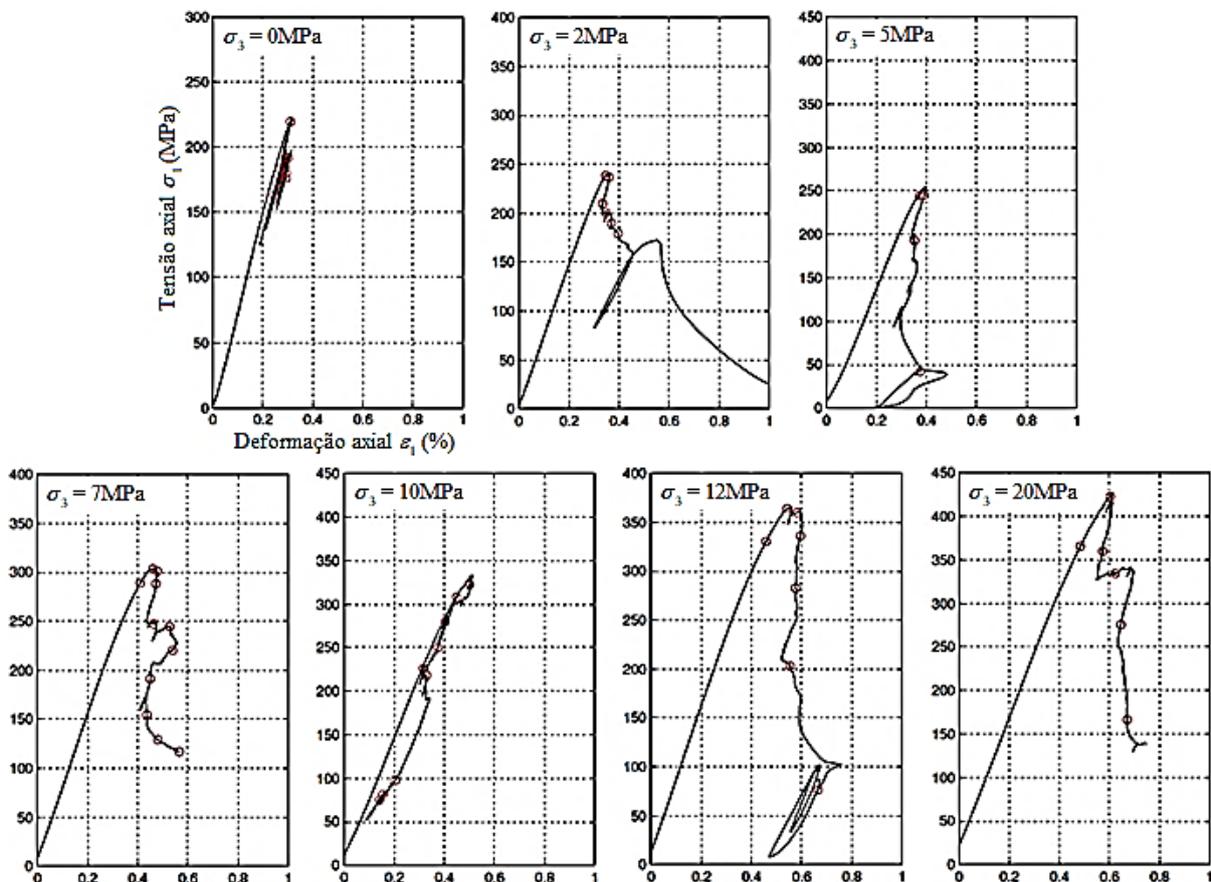


Figura 3.4. Curvas tensão-deformação dos ensaios triaxiais para o Granito. Modificado de Jacobsson (2004a, 2004b, 2004c).

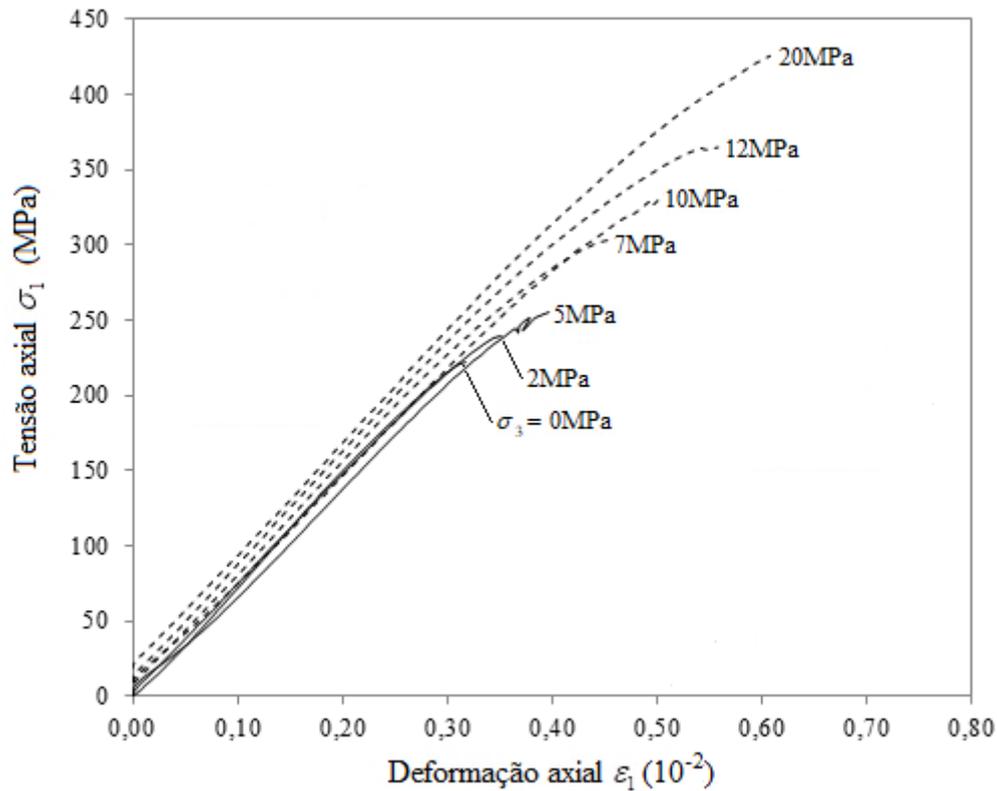


Figura 3.5. Figura resumo das curvas tensão-deformação dos ensaios triaxiais considerados para a análise do Granito. Reproduzido de Jacobsson (2004a, 2004b, 2004c).

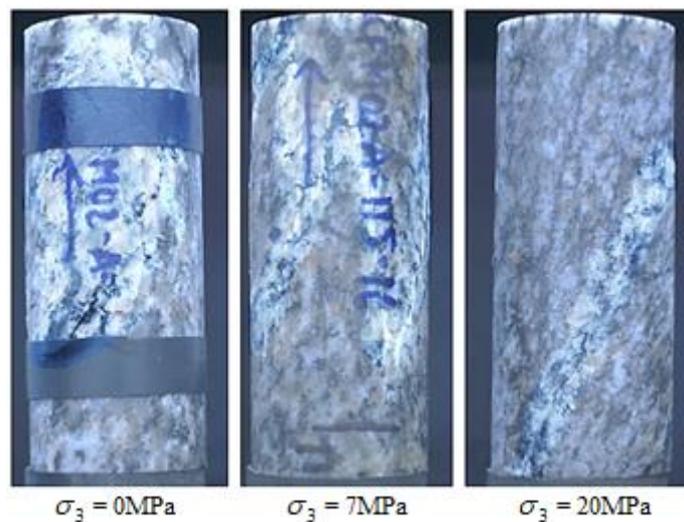


Figura 3.6. Fotografias dos corpos de prova do Granito depois de finalizado o ensaio triaxial para diferentes tensões de confinamento. Modificado de Jacobsson (2004a, 2004b, 2004c).

Da mesma forma que foi feita para o Arenito, foram determinados os parâmetros dos modelos de M-C e D-P para o Granito (Tabela 3.8), sendo representadas as envoltórias de ruptura e dano na Figura 3.7.

Tabela 3.8. Parâmetros das envoltórias de ruptura e de dano do Granito para ambos os modelos M-C e D-P .

Modelo	Parâmetro	Ruptura	Dano
M-C	$c$ (MPa)	32,86	29,94
	$\phi$ (°)	56,48	53,98
D-P	$a$ (MPa)	50,27	48,21
	$\beta$ (°)	66,58	65,70

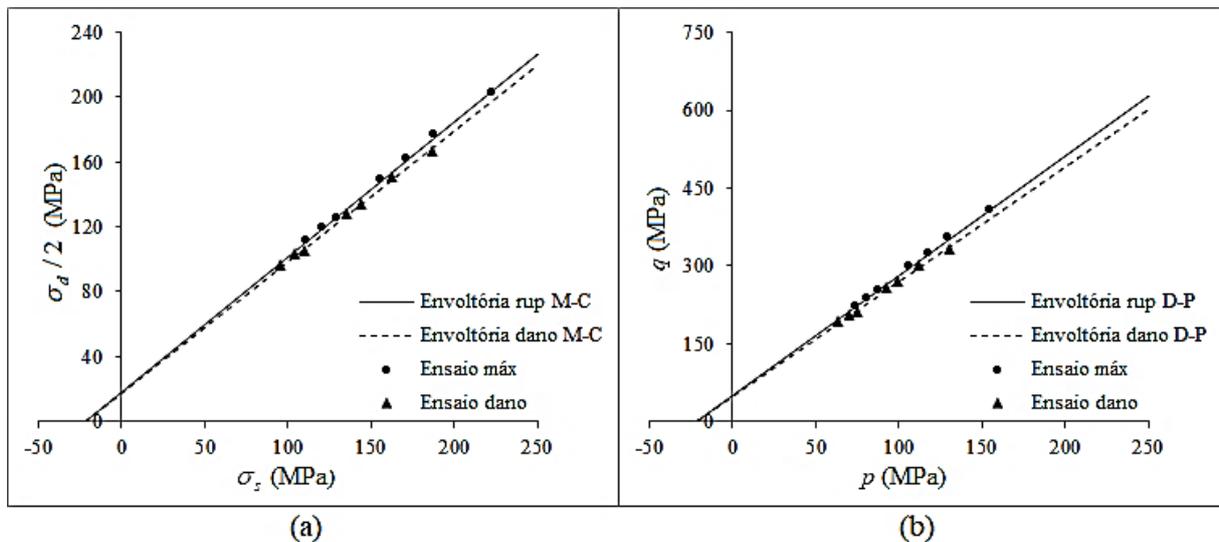


Figura 3.7. Envoltórias de ruptura e de dano do Granito para o modelo M-C (a) e D-P (b).

O comportamento plástico e as propriedades gerais da rocha para a condição sem confinamento são apresentadas na Tabela 3.9 e na Tabela 3.10, respectivamente. Da mesma forma, o último valor de  $\sigma_{ytrue}$  corresponde à tensão de engenharia máxima de 222MPa, sendo então o valor da resistência à compressão não confinada (UCS). Ao inserir o Mecanismo de Dano no modelo, se espera representar a falha frágil do Granito.

Para todos os modelos, foi assumida a mesma taxa de deformação plástica equivalente usada no Arenito (5,00E-05/s); apresentando a continuação os dados necessários do modelo de Mecanismo de Dano para cada condição analisada.

Tabela 3.9. Evolução das deformações plásticas com a tensão de endurecimento obtida da curva de compressão não confinada do Granito.

$\sigma_{ytrue}$ (MPa)	$\varepsilon_{true}^{pl}$
182,04	0
186,37	4,921E-06
189,18	1,305E-05
192,60	1,808E-05
195,62	2,351E-05
198,43	3,063E-05
201,35	3,739E-05
204,67	4,374E-05
207,79	5,376E-05
210,71	6,548E-05
213,53	7,356E-05
216,45	9,023E-05
219,27	1,063E-04
221,18	1,224E-04
222,70	1,669E-04

Tabela 3.10. Propriedades gerais do Granito.

<b>Propriedades da rocha</b>	
<b>Densidade <math>\rho</math> (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	2660
<b>Módulo de elasticidade <math>E</math> (GPa)</b>	74,578
<b>Coefficiente de Poisson <math>\nu</math></b>	0,194

Considerando o critério cisalhante e o início do dano na tensão de dano por fraturas, os dados que foram inseridos se apresentam na Tabela 3.11, com o valor de referência de  $k_s = 1$ . Para o mesmo critério e o início do dano na tensão máxima, os dados são os mostrados na Tabela 3.12.

Já para o critério dúctil e o início do dano na  $\sigma_{cd}$  e na  $\sigma_{máx}$ , os dados usados nos modelos se apresentam na Tabela 3.13 e Tabela 3.14, respectivamente.

Tabela 3.11. Valores típicos usados das variáveis necessárias para o Mecanismo de Dano, considerando o critério cisalhante e início do dano na  $\sigma_{cd}$  para o Granito.

$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_{y0}$ (MPa)	$\bar{\varepsilon}_0^{pl}$	$p$ (MPa)	$t=q$ (MPa)	$\tau_{máx}$ (MPa)	$\theta_s$ com $k_s = 1$
0	-192,10	1,808E-05	64,03	192,10	96,05	2,6667
-2	-207,90	1,124E-04	70,63	205,90	102,95	2,6861
-5	-214,80	2,707E-04	74,93	209,80	104,90	2,7143
-7	-264,00	1,138E-04	92,67	257,00	128,50	2,7211
-10	-278,70	2,669E-04	99,57	268,70	134,35	2,7411
-12	-313,10	1,136E-04	112,37	301,10	150,55	2,7464
-20	-353,40	2,426E-05	131,13	333,40	166,70	2,7866

Tabela 3.12. Valores típicos usados das variáveis necessárias para o Mecanismo de Dano, considerando o critério cisalhante e início do dano na  $\sigma_{máx}$  para o Granito.

$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_{y0}$ (MPa)	$\bar{\varepsilon}_0^{pl}$	$p$ (MPa)	$t=q$ (MPa)	$\tau_{máx}$ (MPa)	$\theta_s$ com $k_s = 1$
0	-222,00	1,669E-04	74,00	222,00	111,00	2,6667
-2	-239,40	3,098E-04	81,13	237,40	118,70	2,6835
-5	-255,30	5,720E-04	88,43	250,30	125,15	2,7066
-7	-304,20	5,913E-04	106,07	297,20	148,60	2,7138
-10	-333,20	6,450E-04	117,73	323,20	161,60	2,7285
-12	-365,00	7,533E-04	129,67	353,00	176,50	2,7347
-20	-425,70	4,879E-04	155,23	405,70	202,85	2,7653

Tabela 3.13. Valores típicos usados das variáveis necessárias para o Mecanismo de Dano, considerando o critério dúctil e início do dano na  $\sigma_{cd}$  para o Granito.

$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_{y0}$ (MPa)	$\bar{\varepsilon}_0^{pl}$	$p$ (MPa)	$t = q$ (MPa)	$\eta$
0	-192,10	1,808E-05	64,03	192,10	-0,3333
-2	-207,90	1,124E-04	70,63	205,90	-0,3430
-5	-214,80	2,707E-04	74,93	209,80	-0,3572
-7	-264,00	1,138E-04	92,67	257,00	-0,3606
-10	-278,70	2,669E-04	99,57	268,70	-0,3705
-12	-313,10	1,136E-04	112,37	301,10	-0,3732
-20	-353,40	2,426E-05	131,13	333,40	-0,3933

Tabela 3.14. Valores típicos usados das variáveis necessárias para o Mecanismo de Dano, considerando o critério dúctil e início do dano na  $\sigma_{máx}$  para o Granito.

$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_{y0}$ (MPa)	$\bar{\varepsilon}_0^{pl}$	$p$ (MPa)	$t = q$ (MPa)	$\eta$
0	-222,00	1,669E-04	74,00	222,00	-0,3333
-2	-239,40	3,098E-04	81,13	237,40	-0,3418
-5	-255,30	5,720E-04	88,43	250,30	-0,3533
-7	-304,20	5,913E-04	106,07	297,20	-0,3569
-10	-333,20	6,450E-04	117,73	323,20	-0,3643
-12	-365,00	7,533E-04	129,67	353,00	-0,3673
-20	-425,70	4,879E-04	155,23	405,70	-0,3826

## 4. MODELAGEM DE ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES

### 4.1. UCT ARENITO

A geometria do modelo de ensaio de compressão simples e triaxial é apresentada na Figura 4.1a. O corpo de prova tem um diâmetro de 0,03m e uma altura de 0,06m, composto por 3200 elementos tridimensionais de primeira ordem, de tipo linear com integração reduzida e controle do efeito de relógio de areia (*hourglass control*), foram usados dois tipos de elementos: o elemento de oito nós C3D8R (2560 elementos) e o de 6 nós C3D6R (640 elementos), com uma dimensão máxima de 3mm. As placas que comprimem o corpo de prova foram inseridas como partes rígidas analíticas, pelo que não precisam de uma malha, modelando o contato entre elas e o corpo de prova como contato geral sem atrito entre os materiais.

As condições de contorno (Figura 4.1b) foram aplicadas às placas de carregamento assim: na placa base foi restrito qualquer movimento, enquanto na placa de carga foi imposta inicialmente uma velocidade constante de 0,3mm/s na direção vertical para comprimir o corpo de prova (que equivale a uma taxa de deformação axial de  $5,00E-03/s$ ), sendo restrito também dos outros possíveis movimentos.

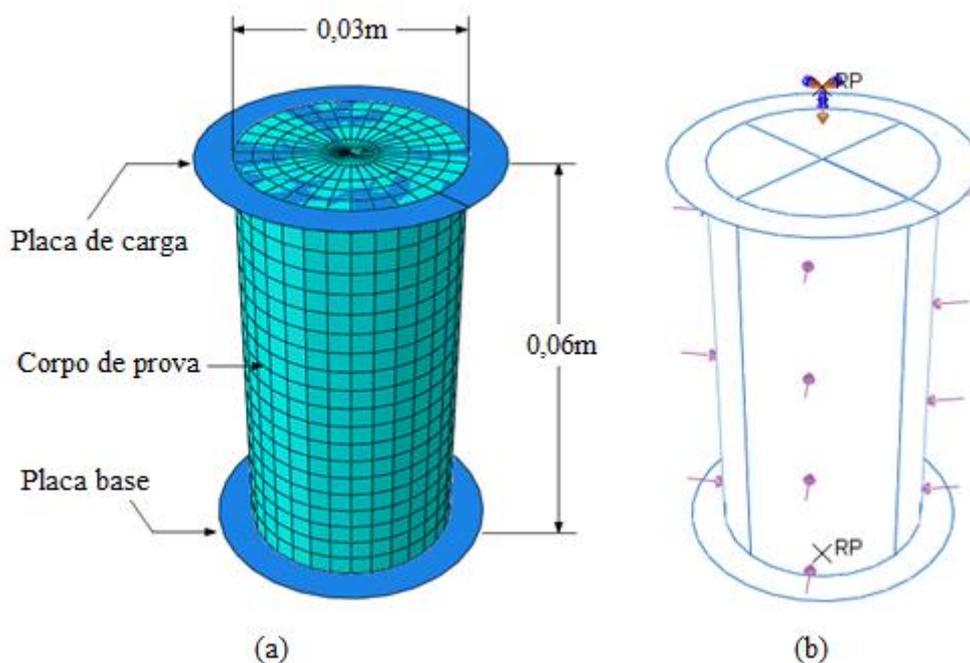


Figura 4.1. Geometria (a), condições do contorno e carregamento (b) do modelo de ensaio triaxial inserido em ABAQUS® para a rocha Arenito.

Foi escolhida esta velocidade de carregamento procurando que fora prática nos tempos de modelagem, garantindo uma aplicação o suficientemente lenta para que não induzisse efeitos indesejados no modelo e pudesse ser considerada como uma condição de carregamento quase-estática, sabendo que velocidades maiores de até 5cm/s tem sido empregadas por outros autores em análises de sucesso (Rasmussen *et al.*, 2018).

Para os ensaios triaxiais, a tensão de confinamento foi aplicada a uma taxa de 10MPa/s até atingir a magnitude considerada em cada caso, sendo definida como uma tensão de compressão no lateral do corpo de prova e como uma força equivalente aplicada no ponto de referência da placa de carga.

#### 4.1.1. Curvas tensão-deformação

Como foi dito na Secção 3.1, inicialmente foi avaliado a condição sem o modelo de dano para corroborar a boa representação do comportamento elasto-plástico do material. Foi analisado o efeito do ângulo de dilatância, quando toma os valores de  $0^\circ$  (sem dilatância) e  $\beta$  (fluxo associado), e da variável  $K$ , com valores de 0,778 e 1, para uma velocidade de compressão de  $3,00E-04$ m/s. As curvas tensão-deformação se mostram na Figura 4.2, onde se evidencia uma pequena variação no comportamento com o valor do ângulo de dilatância, enquanto que uma alteração no parâmetro  $K$  não gera nenhum efeito importante.

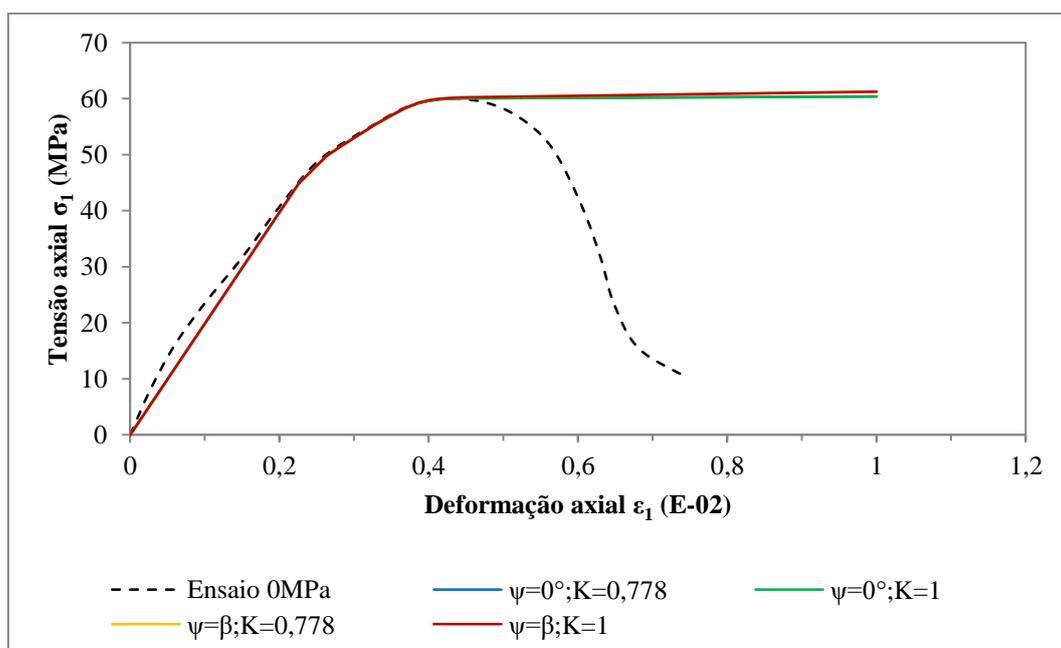


Figura 4.2. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Arenito sem dano, variando o valor do ângulo de dilatância  $\psi$  e do parâmetro  $K$ .

Também foi avaliado o impacto da velocidade de carregamento, assumindo os valores de  $3,00E-03\text{m/s}$ ,  $3,00E-04\text{m/s}$  e  $1,50E-4\text{m/s}$ , considerando um valor de  $\psi = 0^\circ$  e  $K = 0,778$ , sem se manifestar alguma mudança significativa nas curvas devido a que nenhum dos parâmetros depende do tempo.

A seguir foi introduzido o modelo de Mecanismo de Dano considerando o critério cisalhante e o início do dano na tensão de dano por fraturas  $\sigma_{cd}$ . Novamente foi determinada a influência do ângulo de dilatância, tomando os valores de  $0^\circ$ ,  $\phi/8$  e  $\beta$ . O  $\phi/8$  faz referencia ao ângulo de atrito do modelo de M-C dividido por oito, que logo foi transformado para o modelo de D-P usando as mesmas equações empregadas anteriormente (Equação 17), dando como resultado um valor de  $7,64^\circ$ .

A escolha destes valores se deve a que, tradicionalmente na modelagem em rocha, tem sido assumido os modelos com fluxo associado  $\psi = \beta$  (que teoricamente é considerado incorreto já que involucra deformação plástica sem dissipação de energia), ou pelo contrario, fluxo não associado e não dilatante  $\psi = 0^\circ$ ; por outra parte, tem sido demonstrado que o ângulo de dilatância depende da tensão de confinamento, do tamanho do corpo de prova e das deformações plásticas, e em consequência não deveria ser considerado um valor constante (Yuan & Harrison, 2004; Alejano & Alonso, 2005).

Contudo, neste trabalho não foi assumida esta dependência devido à complexidade na determinação da variabilidade do  $\psi$ , e pelo contrario, foi usada a recomendação dada por Hoek & Brown (1997) para definir um valor constante em função da qualidade do maciço rochoso assim:  $\psi = \phi/4$  se o maciço rochoso e de excelente a boa qualidade (comportamento post-pico frágil),  $\psi = \phi/8$  para meia qualidade (presença de amolecimento), e  $\psi = 0^\circ$  para baixa qualidade (material perfeitamente plástico). Esta hipótese é corroborada por Alejano & Alonso (2005), que indicam uma aproximação aceitável para a aplicação na modelagem de túneis. Por esta razão, e devido a que o arenito apresenta amolecimento, foi analisado o valor de  $\psi = \phi/8$ .

Ao igual que no modelo sem dano, também foi avaliado o efeito do parâmetro  $K$  para os diferentes valores do ângulo de dilatância, aplicando a mesma velocidade de carregamento de  $3,00E-04\text{m/s}$ , definindo uma evolução do dano linear, o  $\bar{u}_f^{pl} = 5,00E-05\text{m}$ , o  $k_s = 1$ , e a  $\dot{\epsilon}^{pl} = 5,00E-05/\text{s}$ . Como se mostra na Figura 4.3, um aumento na dilatância do material gera um

acréscimo na tensão resistida na zona post-pico e o impacto do  $K$  em todos os casos é desprezível, isto último se deve a que o coeficiente de forma só modifica a superfície de plastificação quando a condição de carregamento se afasta da compressão. Cabe destacar que o dano acontece progressivamente, permitindo a representação de certo nível de amolecimento da rocha logo de atingida a tensão máxima.

Também foram mudados os seguintes parâmetros: a velocidade de carregamento, usando os mesmos valores empregados nos modelos sem dano; o parâmetro do material  $k_s$ , sendo igual a 0,001, 0,5, 1, 5 e 10; e a taxa de deformação plástica equivalente  $\dot{\varepsilon}^{pl}$ , com valores de 1,00E-05/s, 5,00E-05/s, 1,00E-04/s, 5,00E-04/s, 5,00E-02/s, 5,00/s; usando em todas as modelagens um  $\psi = \phi / 8$ ,  $K = 0,778$ ,  $\bar{u}_f^{pl} = 5,00E-05m$  e a lei de evolução linear. Os valores especificados para cada parâmetro resultam da análise da faixa provável de variabilidade de cada um deles e pela realização de vários modelos prévios nos que foi usado o método de ensaio-e-erro. Chegou-se à conclusão que o efeito destas quantidades é irrelevante tanto na curva tensão-deformação como na superfície de ruptura, pelo que se continuou usando os valores de velocidade igual a 3,00E-04m/s,  $k_s = 1$  e  $\dot{\varepsilon}^{pl} = 5,00E-05/s$  nas simulações seguintes, ao igual que o  $\psi = \phi / 8$  e o  $K = 0,778$ .

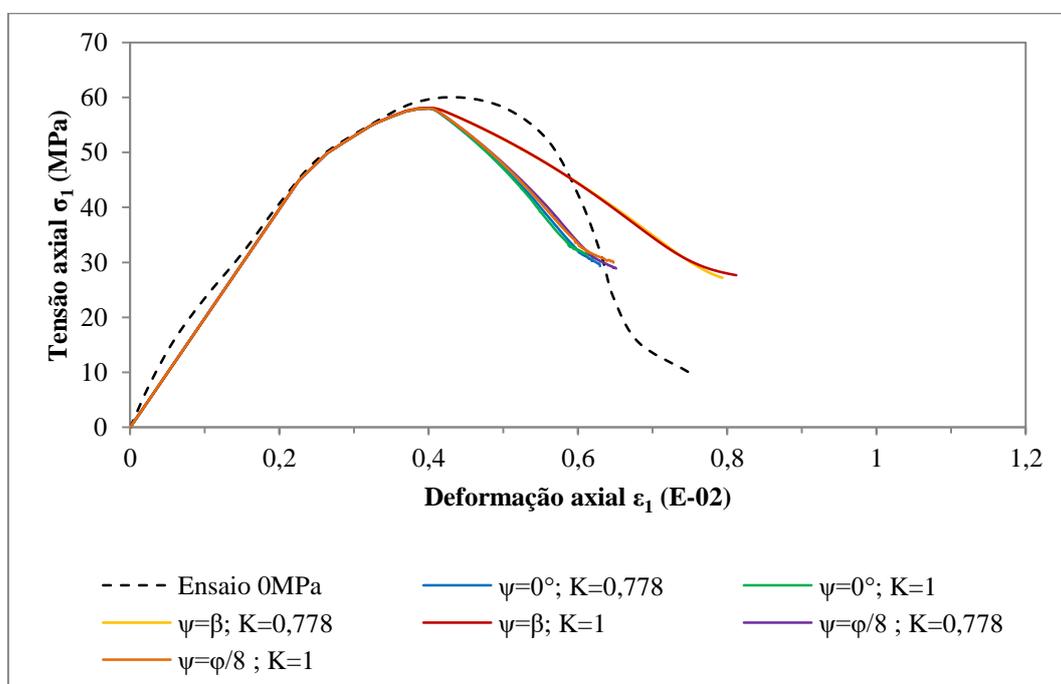


Figura 4.3. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Arenito com início do dano na  $\sigma_{cd}$  e critério cisalhante, variando o valor do ângulo de dilatância  $\psi$  e do parâmetro

$K$ .

A seguir, foi analisado o impacto da mudança do deslocamento plástico equivalente na falha  $\bar{u}_f^{pl}$ , que está relacionado com a deformação na qual acontece a ruptura total do corpo de prova e o comprimento característico dos elementos. Os valores adotados foram 1,00E-06m, 5,00E-06m, 1,00E-05m, 5,00E-05m, 1,00E-04m e 5,00E-04m, empregando para todos os casos uma evolução linear do dano tal e como se apresenta na Figura 4.4.

Os resultados das modelagens se mostram na Figura 4.5, notando-se, como era de esperar, o efeito considerável deste parâmetro na degradação post-pico, na deformação na ruptura total e, portanto, na tensão máxima resistida. Para os menores valores avaliados de  $\bar{u}_f^{pl}$  a ruptura acontece no mesmo ponto do início do dano, atingindo uma tensão máxima igual à tensão de dano por fraturas e evidenciando um comportamento meramente frágil causado pela evolução muito rápida do dano; já com um aumento no deslocamento plástico equivalente na falha, a tensão pico atingida é maior e pode-se desenvolver a degradação progressiva da rocha, permitindo representar parte do amolecimento e acontecendo a falha total perto da considerada no ensaio experimental.

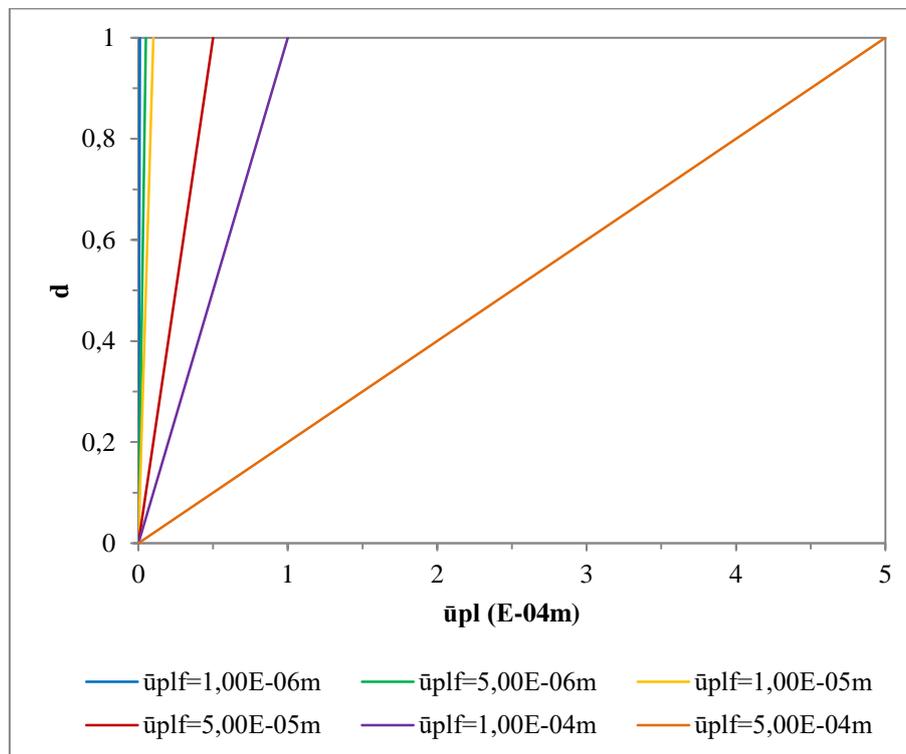


Figura 4.4. Lei de evolução do dano linear para diferentes valores do deslocamento plástico equivalente na falha  $\bar{u}_f^{pl}$ .

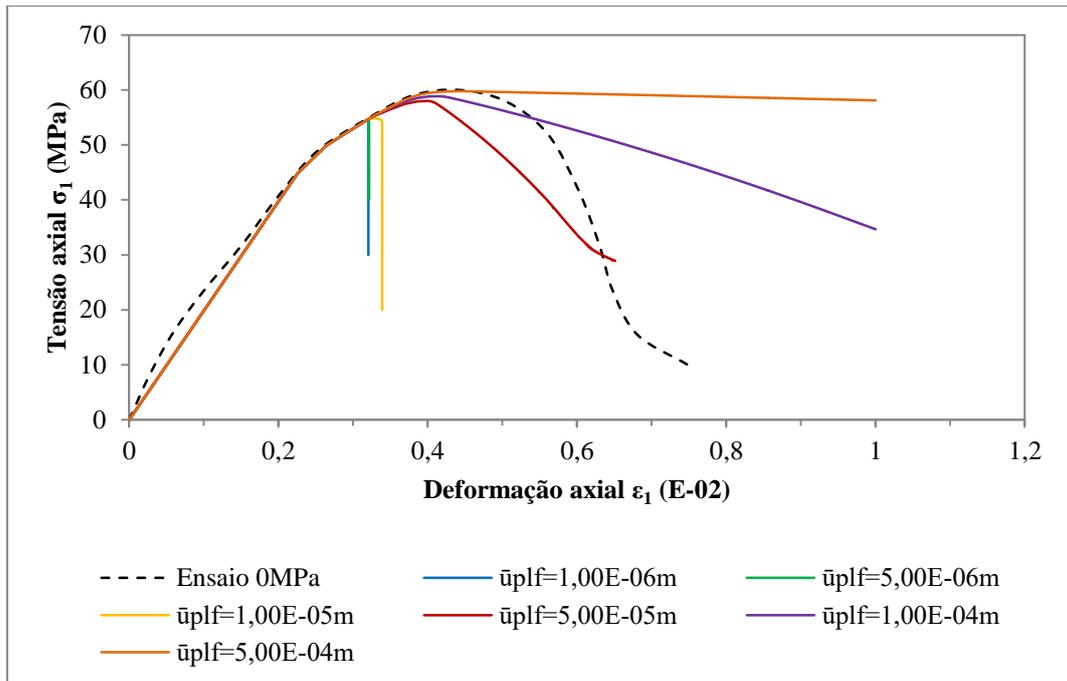


Figura 4.5. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Arenito com início do dano na  $\sigma_{cd}$  e critério cisalhante, variando o valor do deslocamento plástico equivalente na

$$\text{falha } \bar{u}_f^{pl}.$$

Os maiores valores de  $\bar{u}_f^{pl}$  levam a uma degradação lenta do material já que o limite definido para que a variável de dano atinja o valor de um é maior, dando como resultado que a resposta da rocha seja de tipo dúctil e conseguindo uma tensão máxima muito similar à registrada no ensaio.

Para efeitos da análise de parâmetros, o  $\bar{u}_f^{pl} = 5,00E-05m$  foi empregado nos modelos seguintes por fornecer a melhor proximidade da curva, por conseguir uma tensão pico igual ao 97% da UCS, por apresentar a deformação na ruptura total mais perto da experimental suposta e para continuar servindo de ponto de referência para as seguintes modelagens.

A continuação, foi analisado o efeito do coeficiente de forma  $\alpha$  da lei de evolução do dano, tomando os valores de -5, -3, -1, 0 (Linear), 1, 3, 5 e 10 (Figura 4.6). Como o programa não permite inserir quantidades de  $\alpha$  negativas na definição da evolução exponencial, a degradação foi expressada de forma tabular fazendo uso da mesma equação (Equação 29).

As curvas obtidas se mostram na Figura 4.7, onde se nota que este parâmetro afeta a deformação atingida na ruptura total e a tensão máxima experimentada pelo corpo de prova,

obtendo uma tensão pico menor e um comportamento mais frágil quando é usado valores de  $\alpha$  mais altos, que corresponde a uma degradação acelerada do material nos primeiros momentos da evolução de dano (ver Figura 4.6). Já para os valores mais negativos, o material se comporta de maneira dúctil como produto da lenta deterioração inicial, impedindo a ruptura do material na deformação total esperada. O  $\alpha$  que permite o melhor ajuste da curva é o -1, devido a que a tensão máxima alcançada corresponde ao 98% da resistência à compressão simples do Arenito e a que a deformação na falha total está mais próxima da considerada.

Agora, foi mudado o ponto do início do dano para a tensão pico, mantendo o critério cisalhante e avaliando só o efeito do  $\bar{u}_f^{pl}$  e do  $\alpha$ , já que os outros parâmetros não geraram mudanças no comportamento da rocha ou foram fixados pelas razões já expostas. Foram usados os valores de  $\psi = \phi / 8$ ,  $K = 0,778$ ,  $k_s = 1$ ,  $\dot{\varepsilon}^{pl} = 5,00E-05/s$  e uma velocidade de carregamento igual a  $3,00E-04m/s$ .

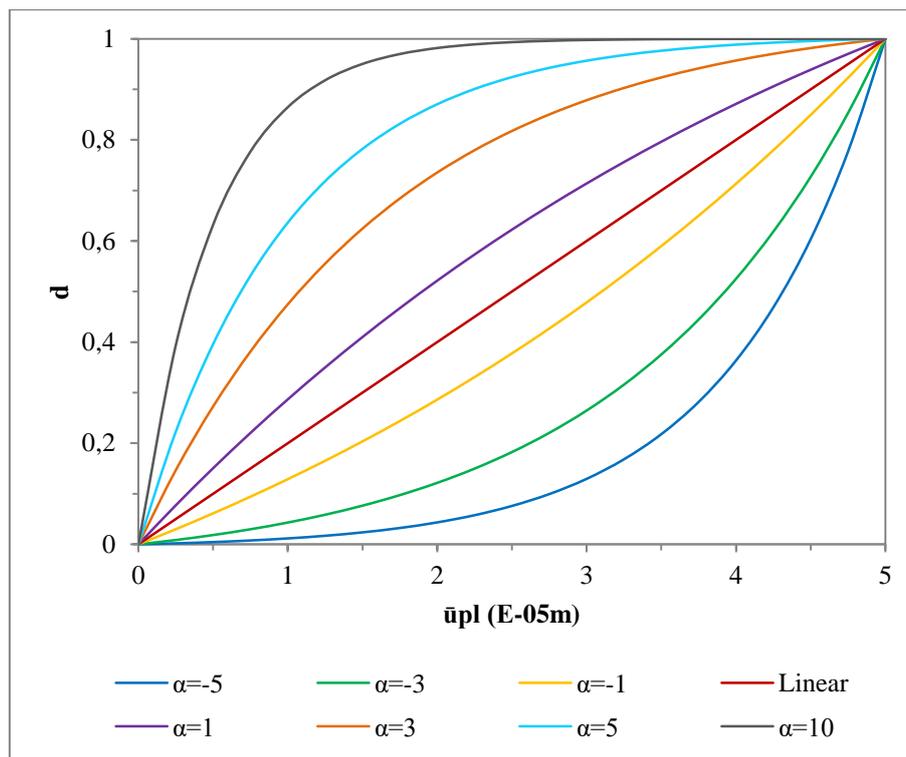


Figura 4.6. Lei de evolução do dano com  $\bar{u}_f^{pl} = 5,00E-05m$  para diferentes valores do parâmetro de forma  $\alpha$ .

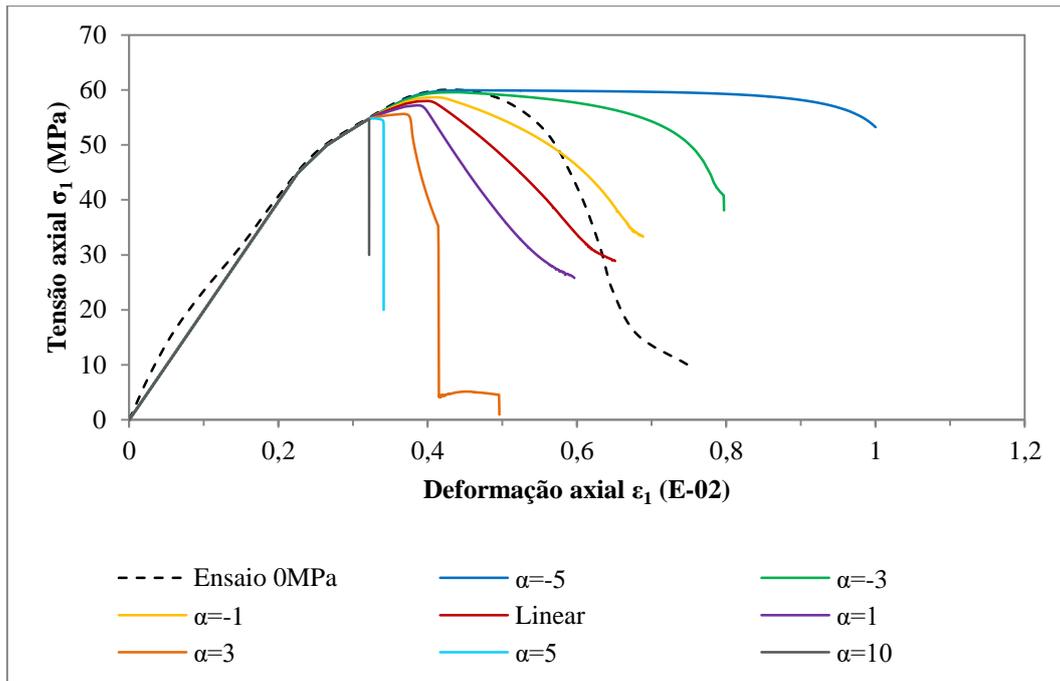


Figura 4.7. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Arenito com início do dano na  $\sigma_{cd}$  e critério cisalhante, variando o valor do parâmetro de forma da lei de evolução do dano  $\alpha$ .

Para este caso, a influência do deslocamento plástico equivalente na falha é similar à apresentada quando o dano inicia na tensão de dano por fraturas, afetando a deformação onde acontece a falha total e o comportamento post-pico do material. Contudo, a tensão máxima atingida sempre vai corresponder à tensão pico obtida do ensaio, já que está-se assumindo que o material começa a se deteriorar a partir deste ponto (Figura 4.8). Os valores avaliados foram os mesmos que os analisados anteriormente, adotando também uma evolução do dano linear como se mostrou na Figura 4.4.

Igualmente, os valores mais baixos do  $\bar{u}_f^{pl}$  levaram a uma resposta do Arenito de tipo frágil, enquanto os valores altos geraram um comportamento dúctil sem ocorrência de fratura total. Para o valor de  $\bar{u}_f^{pl} = 5,00E-05$  também aconteceu a melhor aproximação da curva experimental, permitindo certo nível de queda de resistência logo de ser alcançada a tensão máxima e rompendo em uma deformação muito perto dos resultados de laboratório.

Respeito ao parâmetro  $\alpha$ , foram avaliados os mesmos valores considerados anteriormente, dando como resultado as curvas da Figura 4.9, afetando também a deformação na falha total e a evolução do dano a partir da tensão pico. Nota-se igualmente que à medida que o valor do

parâmetro diminui, a tensão no ponto de falha total vai aumentando, não sendo possível representar a grande queda de resistência da rocha. Também se evidencia um comportamento frágil do Arenito para os valores de  $\alpha$  de 10, 5 e 3, e uma resposta cada vez mais dúctil à medida que o valor dele é menor, isto como resultado da mudança na forma da lei de evolução do dano, que para os valores negativos leva a um deterioro mais lento nos primeiros momentos da degradação. Neste caso, o  $\alpha = -1$  leva a uma deformação na ruptura total quase igual à mostrada no ensaio, no entanto, o ajuste da curva é mais grosseiro na parte do amolecimento.

Depois, foi trocado o critério de início do dano para o dúctil considerando a  $\sigma_{cd}$  como o ponto de início da degradação da rocha. Neste caso foram feitos os mesmos modelos avaliando o efeito do ângulo de dilatância e do coeficiente  $K$ , servindo como referência para analisar o impacto do cambio de critério na resposta do material. Como se pode observar na Figura 4.10 os resultados são quase idênticos aos obtidos com o critério cisalhante, a diferença de que neste caso a falha total em todos os modelos acontece a uma deformação levemente menor.

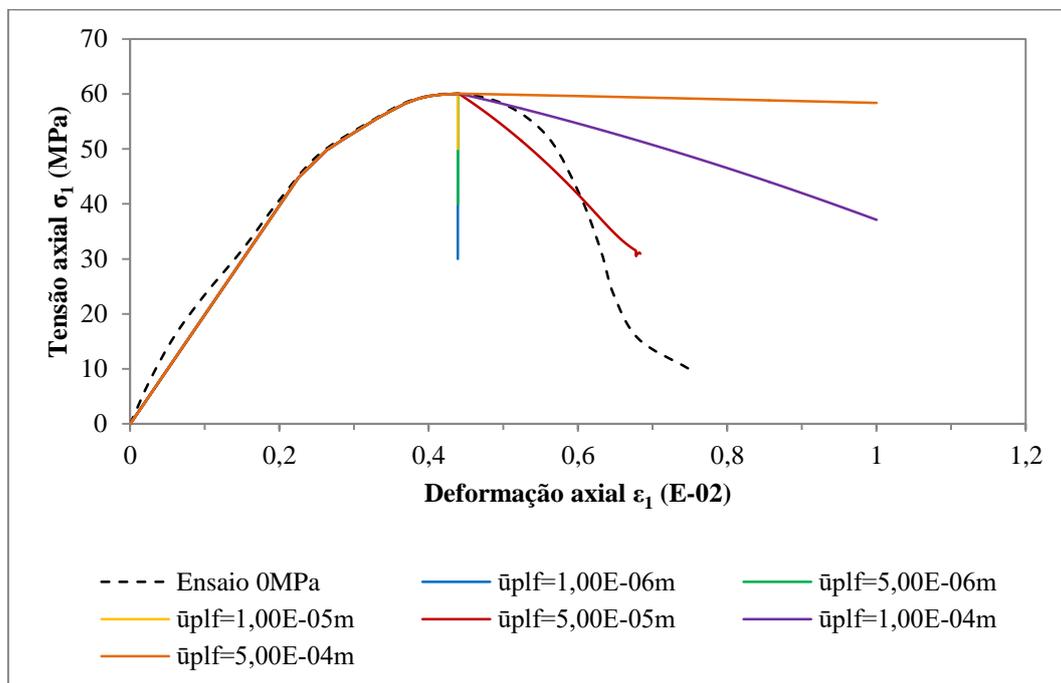


Figura 4.8. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Arenito com início do dano na  $\sigma_{m\acute{a}x}$  e critério cisalhante, variando o valor do deslocamento plástico equivalente na

falha  $\bar{u}_f^{pl}$ .

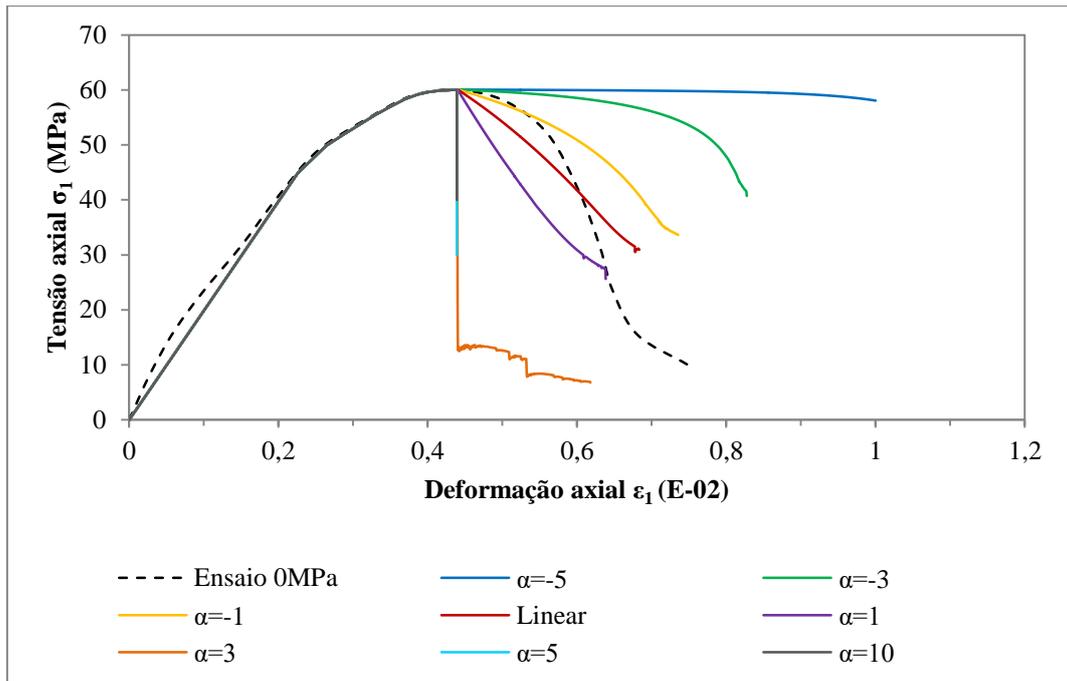


Figura 4.9. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Arenito com início do dano na  $\sigma_{m\acute{a}x}$  e critério cisalhante, variando o valor do parâmetro de forma da lei de evolução do dano  $\alpha$ .

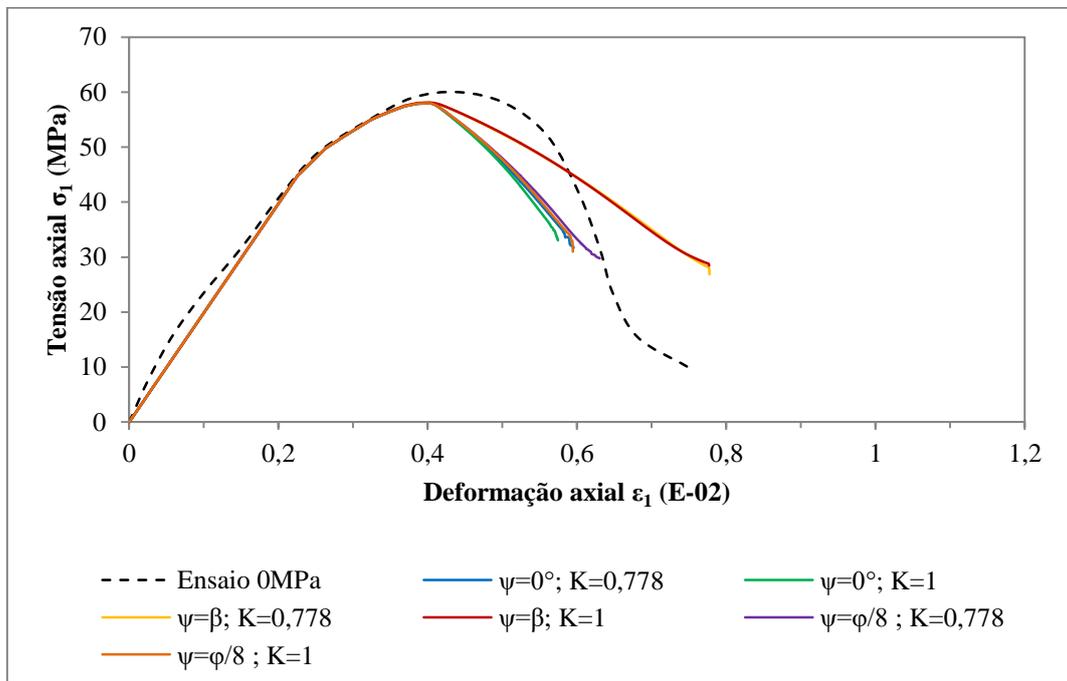


Figura 4.10. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Arenito com início do dano na  $\sigma_{cd}$  e critério dúctil, variando o valor do ângulo de dilatância  $\psi$  e do parâmetro  $K$ .

Também foram avaliados os efeitos do  $\bar{u}_f^{pl}$  e do  $\alpha$ , adotando os mesmos valores dos outros parâmetros usados nos modelos com critério cisalhante (velocidade de carregamento igual a  $3,00E-04\text{m/s}$ ,  $\dot{\varepsilon}^{pl} = 5,00E-05/\text{s}$ ,  $\psi = \phi / 8$  e  $K = 0,778$ ). Os resultados da variação do  $\bar{u}_f^{pl}$  se apresenta na Figura 4.11, assumindo igualmente uma lei de evolução linear. Nota-se que as curvas obtidas são idênticas a aquelas conseguidas aplicando o critério cisalhante, pelo que o uso de um ou outro critério não influencia na resposta geral do material. Igualmente, o modelo com deslocamento na falha de  $5,00E-05\text{m}$  representa o comportamento do Arenito da melhor forma, obtendo uma tensão máxima equivalente ao 97% da UCS.

Assim mesmo, as curvas tensão-deformação resultantes de variar a constante  $\alpha$  se mostram na Figura 4.12, e ao igual que com o parâmetro anterior, os resultados são praticamente equivalentes aos conseguidos com o critério cisalhante e início do dano na tensão de dano por fraturas. A tendência da resposta do material é a mesma ao variar o valor do  $\alpha$ , podendo ser representado um comportamento mais dúctil ou frágil, assumindo cifras menores ou maiores que zero respectivamente. O  $\alpha = -1$  também consegue o melhor ajuste da curva entre os valores avaliados, obtendo uma tensão máxima de 98% da resistência à compressão uniaxial.

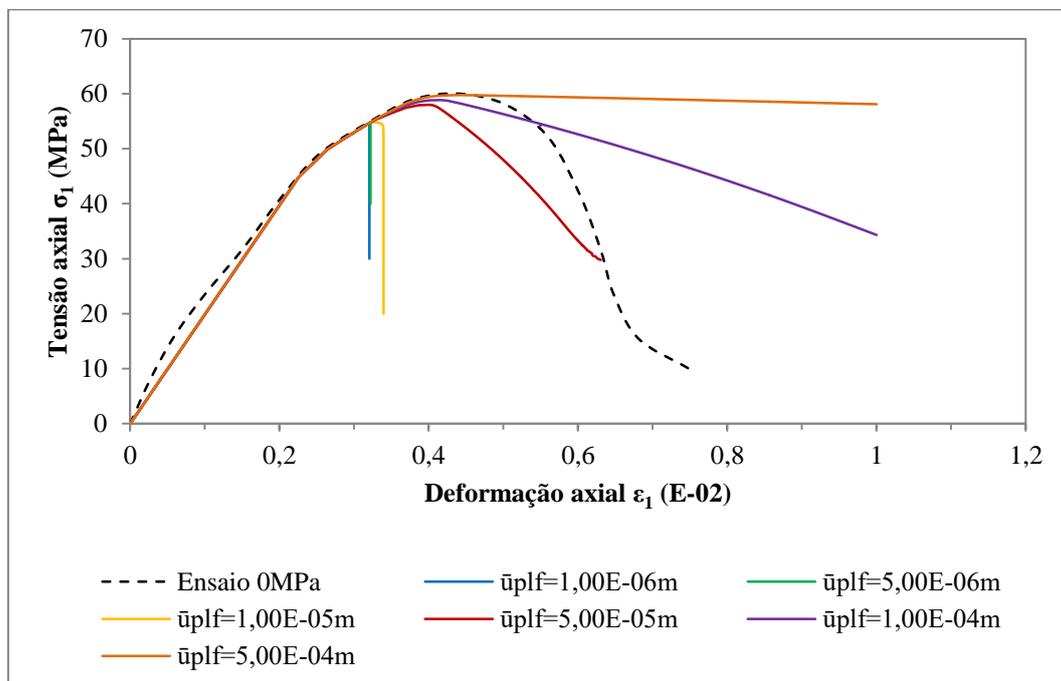


Figura 4.11. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Arenito com início do dano na  $\sigma_{cd}$  e critério dúctil, variando o valor do deslocamento plástico equivalente na falha

$$\bar{u}_f^{pl}.$$

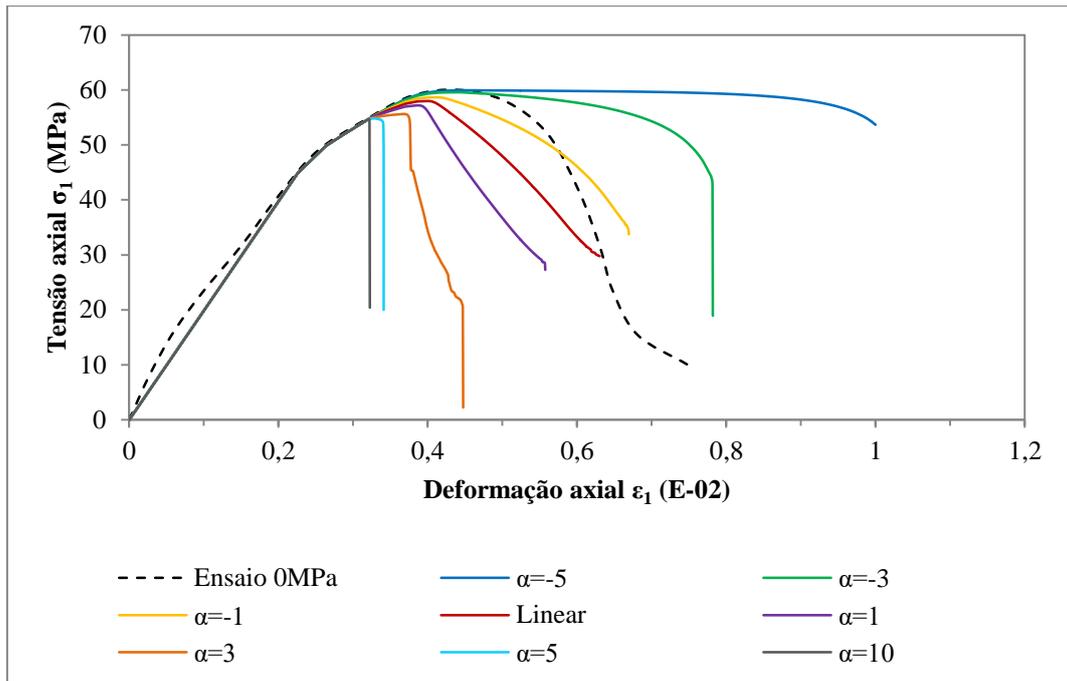


Figura 4.12. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Arenito com início do dano na  $\sigma_{cd}$  e critério dúctil, variando o valor do parâmetro de forma da lei de evolução do dano  $\alpha$ .

Da mesma forma, foi modificado o ponto do início do dano para a tensão pico, mantendo o critério dúctil considerado no caso anterior. Foi avaliado o impacto da mudança do  $\bar{u}_f^{pl}$  e do  $\alpha$  na curva tensão-deformação, respeitando os mesmo valores dos outros parâmetros usados nos modelos anteriores, obtendo os resultados que se mostram nas Figuras 4.13 e 4.14, respectivamente.

As curvas resultantes apenas diferem das apresentadas para o critério cisalhante, mostrando uma leve variação na parte final de cada uma delas prévio ao ponto de ruptura total. Ambos os parâmetros seguem definindo a evolução da curva na zona post-pico e a deformação na fratura final do corpo de prova, pelo que as duas variáveis devem ser calibradas simultaneamente para conseguir o melhor ajuste possível da curva experimental.

Também cabe destacar da análise das curvas que o ponto do início do dano pode ser assumido em qualquer nível de tensão menor ou igual à tensão pico, já que a lei de evolução do dano inserida de forma tabular permite ajustar o comportamento da rocha a partir do começo da degradação, de modo que se atinja a tensão máxima resistida e se logre simular grande parte do amolecimento apresentado pelo Arenito.

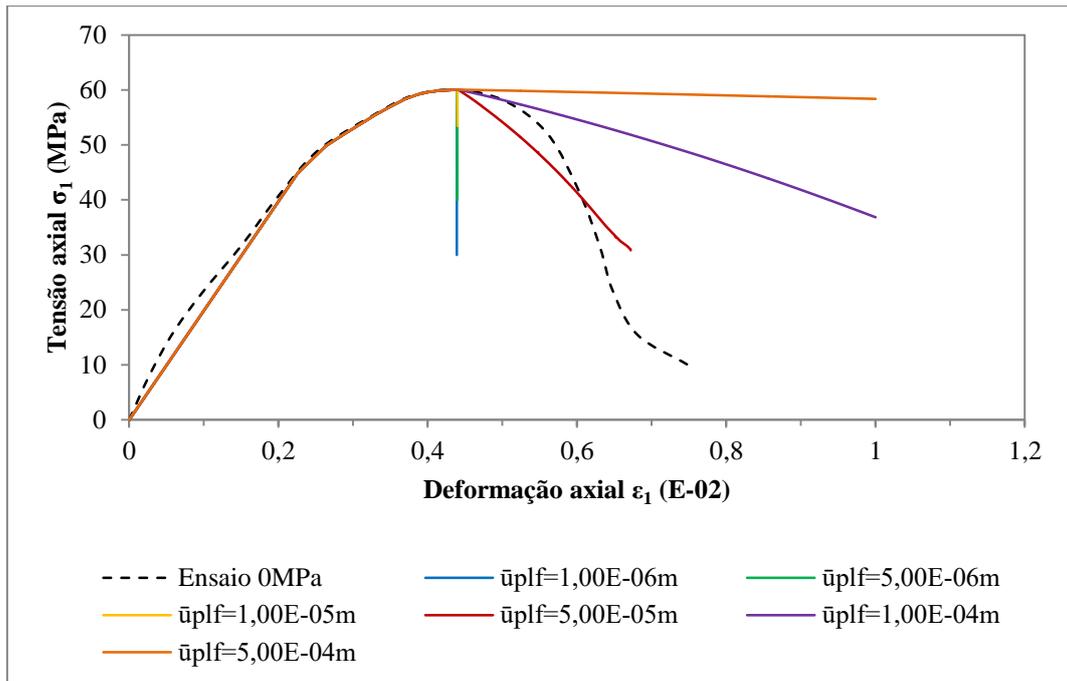


Figura 4.13. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Arenito com início do dano na  $\sigma_{m\acute{a}x}$  e critério dúctil, variando o valor do deslocamento plástico equivalente na falha

$$\bar{u}_f^{pl}.$$

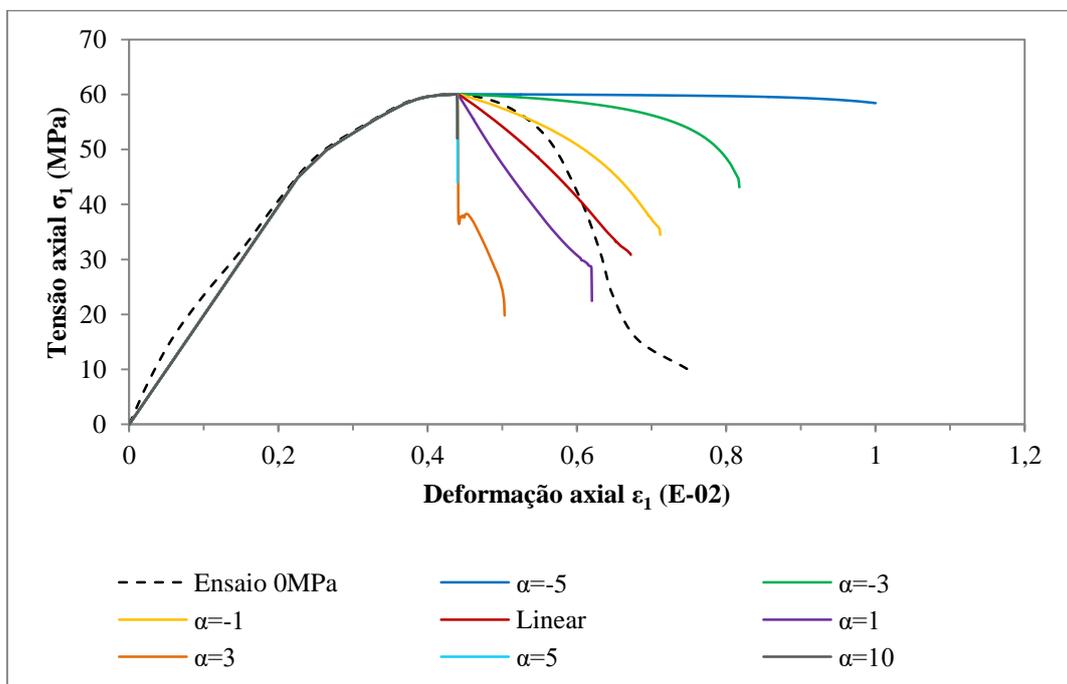


Figura 4.14. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Arenito com início do dano na  $\sigma_{m\acute{a}x}$  e critério dúctil, variando o valor do parâmetro de forma da lei de evolução do

dano  $\alpha$ .

#### 4.1.2. Superfícies de fratura

Nesta secção são apresentadas as superfícies de ruptura geradas para os casos analisados, procurando determinar o efeito dos parâmetros na modelagem do fraturamento do Arenito. Nas seguintes figuras cada quadro mostra o corpo de prova no momento anterior e posterior à falha total, apresentando o valor da variável de dano  $d$  (SDEG) e permitindo definir as zonas danificadas no momento da ruptura.

Nas Figuras 4.15 e 4.16 se apresentam os corpos de prova obtidos da avaliação do efeito do  $\psi$  e do  $K$ , usando os critérios cisalhante e dúctil respectivamente, com o início da degradação na tensão de dano por fraturas. Observa-se como em todos os modelos acontece

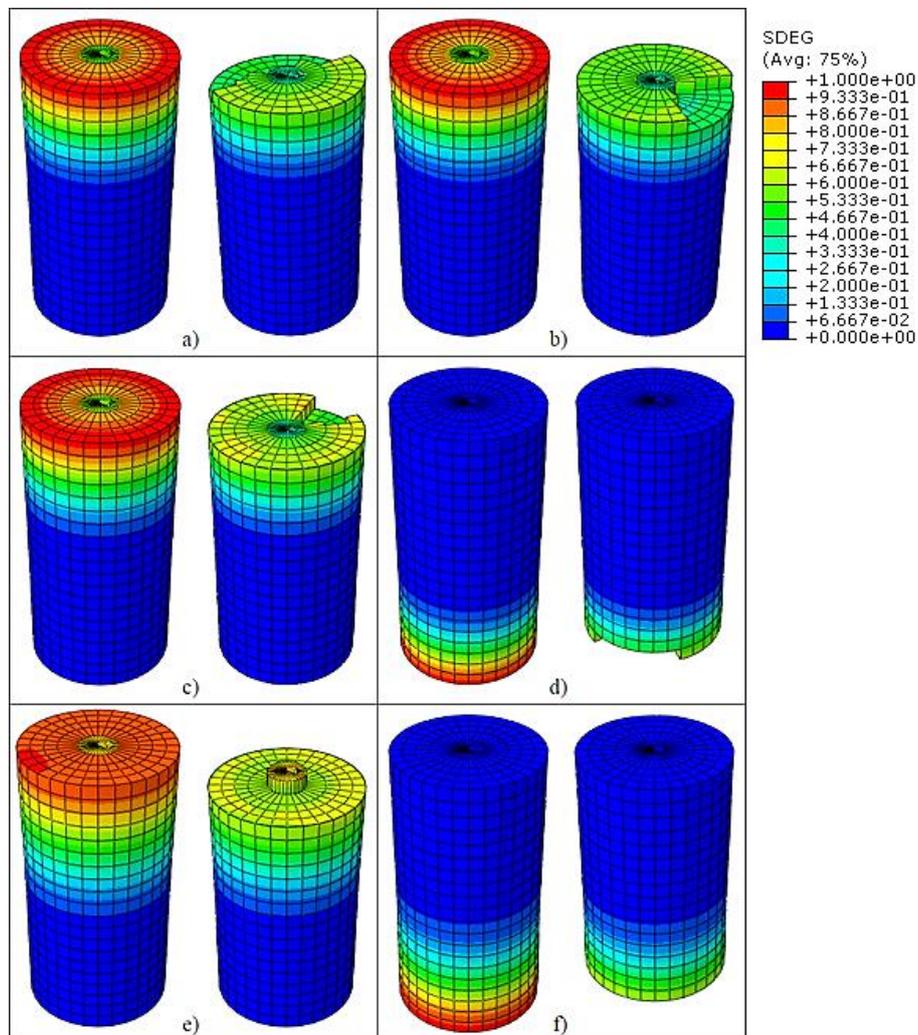


Figura 4.15. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Arenito. Critério cisalhante, início do dano na  $\sigma_{cd}$  e: (a)  $\psi=0$ ,  $K=0,778$ ; (b)  $\psi=0$ ,  $K=1$ ; (c)  $\psi=\varphi/8$ ,  $K=0,778$ ; (d)  $\psi=\varphi/8$ ,  $K=1$ ; (e)  $\psi=\beta$ ,  $K=0,778$ ; (f)  $\psi=\beta$ ,  $K=1$ .

um esmagamento do material no contato com a placa superior ou inferior sem exibir uma relação clara com os valores dos parâmetros avaliados ou o critério utilizado.

Agora, na Figura 4.17 se apresentam os corpos de prova correspondentes aos modelos nos que foi avaliado a influencia do  $\bar{u}_f^{pl}$ , para o critério de dano cisalhante e início da degradação na tensão de dano por fraturas. Como se pode observar, os menores valores de  $\bar{u}_f^{pl}$  permitem uma representação mais aproximada da superfície de ruptura registrada pelos autores nos ensaios experimentais, que corresponde a uma fratura de tipo cisalhante para os literais **a**, **b** e **c**, ao mesmo tempo em que o comportamento do material é de tipo frágil como foi visto na secção anterior; já para os maiores valores do deslocamento, apesar de não se apresentar a

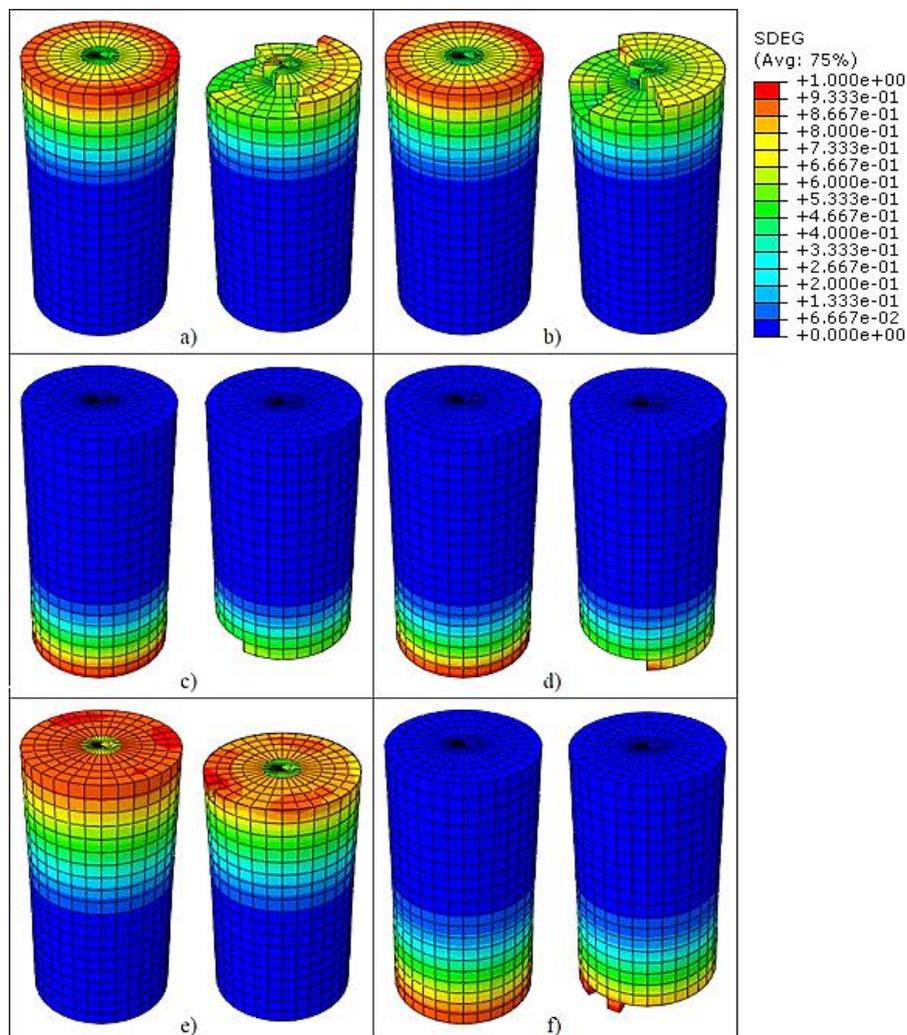


Figura 4.16. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Arenito. Critério dúctil, início do dano na  $\sigma_{cd}$  e: (a)  $\psi=0$ ,  $K=0,778$ ; (b)  $\psi=0$ ,  $K=1$ ; (c)  $\psi=\varphi/8$ ,  $K=0,778$ ; (d)  $\psi=\varphi/8$ ,  $K=1$ ; (e)  $\psi=\beta$ ,  $K=0,778$ ; (f)  $\psi=\beta$ ,  $K=1$ .

falha do cilindro, o dano se localiza no contato com a placa de carga (literais **d**, **e** e **f**), acontecendo o esmagamento do material. Também cabe destacar que a maior degradação da rocha se apresenta em zonas de cisalhamento que posteriormente conformam as superfícies de ruptura, ficando o resto do material quase intacto, tal e como se percebe na imagem do literal **b**.

Igualmente, na Figura 4.18 se mostram os cilindros no momento da fratura total quando foi avaliado o mesmo parâmetro de deslocamento na falha, para o critério cisalhante e o início do dano na tensão pico. A superfície de fratura desenvolvida em cada condição apresenta a mesma tendência achada para os modelos com início do dano na  $\sigma_{cd}$ , com o desenvolvimento de fraturas por cisalhamento para os valores de  $\bar{u}_f^{pl}$  que geram um comportamento frágil

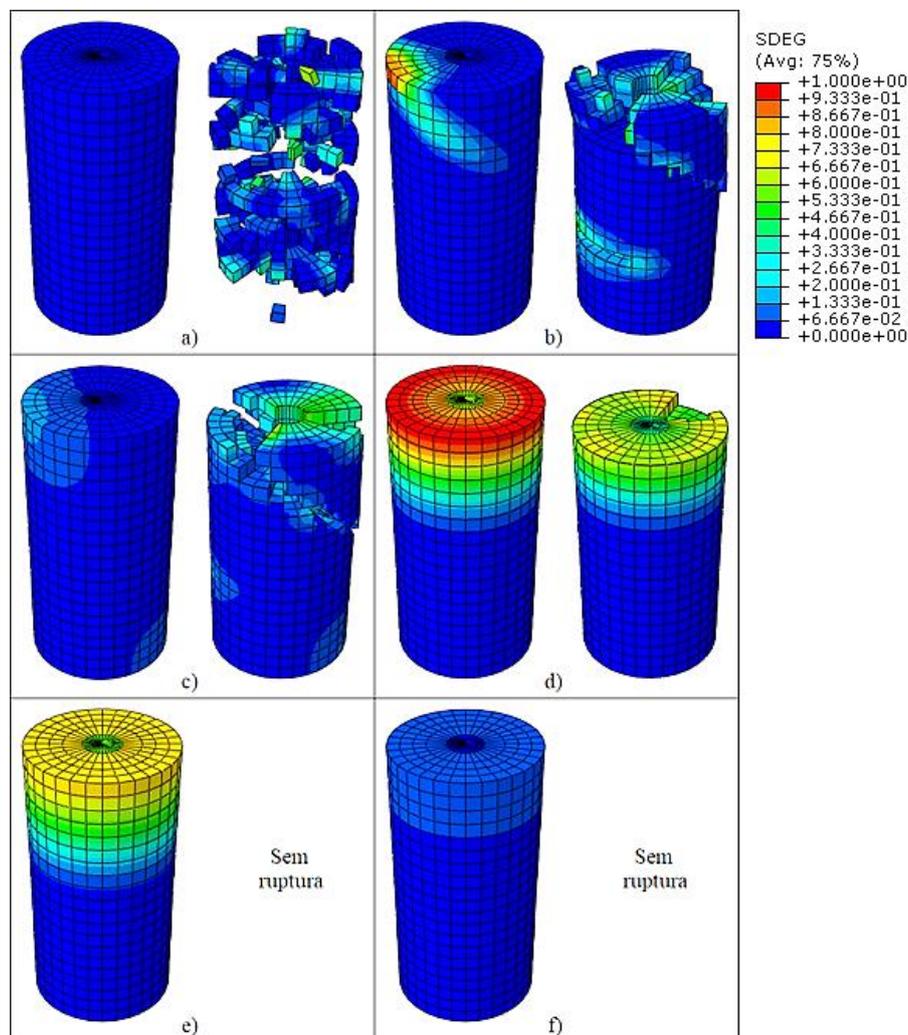


Figura 4.17. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Arenito. Critério cisalhante, início do dano na  $\sigma_{cd}$  e  $\bar{u}_f^{pl}$  igual a: (a) 1,00E-06m; (b) 5,00E-06m; (c) 1,00E-05m; (d) 5,00E-05m; (e) 1,00E-04m; (f) 5,00E-04m.

(literais **a**, **b** e **c**). Da mesma forma, os maiores valores do deslocamento na falha não permitem a criação de fraturas por cisalhamento, acontecendo pelo contrario o esmagamento visto anteriormente como consequência do estado dúctil conseguido (literais **e** e **f**). Por último, se pode concluir que com ambos os pontos do inicio do dano é possível conseguir uma boa representação da superfície de ruptura experimental, modificando o valor do deslocamento na falha.

Já na Figura 4.19 se mostram os corpos de prova correspondentes aos modelos onde foi avaliado o  $\bar{u}_f^{pl}$ , nos que foi usado o critério dúctil e o inicio do dano na tensão de dano por fraturas. Do mesmo modo, a Figura 4.20 representa os cilindros no momento da falha total para os modelos com o mesmo critério e inicio do dano na tensão pico.

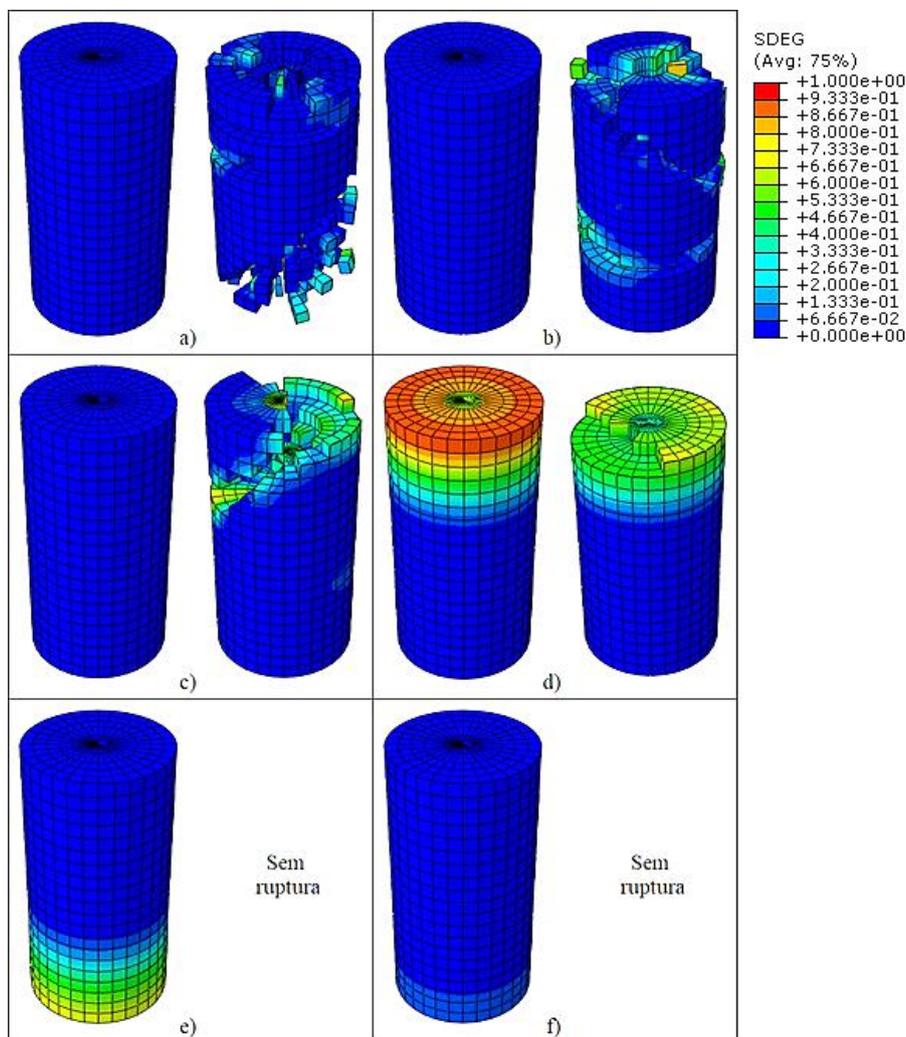


Figura 4.18. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Arenito. Critério cisalhante, início do dano na  $\sigma_{m\acute{a}x}$  e  $\bar{u}_f^{pl}$  igual a: (a) 1,00E-06m; (b) 5,00E-06m; (c) 1,00E-05m; (d) 5,00E-05m; (e) 1,00E-04m; (f) 5,00E-04m.

Ao igual que nos outros casos onde foi avaliado o deslocamento na falha, a superfície de ruptura desenvolvida foi de cisalhamento para os valores que levaram a um estado frágil do Arenito (literais **a**, **b** e **c** em ambas as figuras). Assim mesmo, nota-se que a mudança do ponto de início do dano não influencia no tipo de ruptura gerada e que o uso do critério dúctil no modelo também permite representar uma superfície de fratura aproximada à obtida nos ensaios de laboratório.

Cabe destacar que quando o valor do  $\bar{u}_f^{pl}$  é de 1,00E-06m (literal **a** das Figuras 4.17 a 4.20) grande parte do material é apagado devido a que muitos dos elementos da malha conseguem atingir a deslocamento na falha rapidamente, dando uma aparência de numerosas fraturas por cisalhamento acontecidas ao longo da maior parte do corpo de prova. Um refinamento da

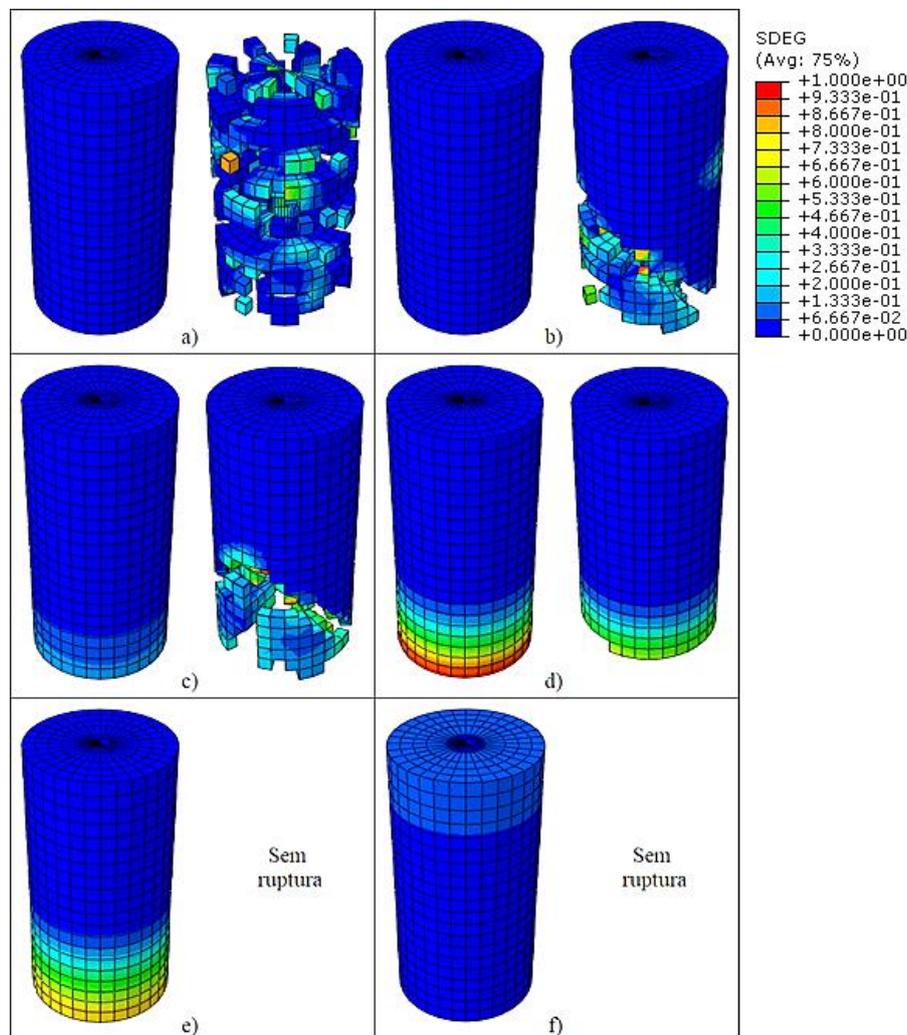


Figura 4.19. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Arenito. Critério dúctil, início do dano na  $\sigma_{cd}$  e  $\bar{u}_f^{pl}$  igual a: (a) 1,00E-06m; (b) 5,00E-06m; (c) 1,00E-05m; (d) 5,00E-05m; (e) 1,00E-04m; (f) 5,00E-04m.

malha de elementos finitos permitiria uma melhor representação das superfícies de ruptura, evitando a eliminação de regiões de material muito grande que dificulta a identificação das zonas de fratura.

Observa-se também que para os modelos com critério dúctil a zona danificada se localiza na parte inferior do corpo de prova, seja que aconteça a fratura cisalhante ou o esmagamento do material, enquanto nos modelos com critério cisalhante o dano se centra na parte superior do cilindro.

Agora, nas Figuras 4.21 e 4.22 se exibem os corpos de prova correspondentes à avaliação do parâmetro de forma da lei de evolução do dano  $\alpha$  para os modelos com critério cisalhante e início do dano na tensão de dano por fraturas e na tensão pico, respectivamente.

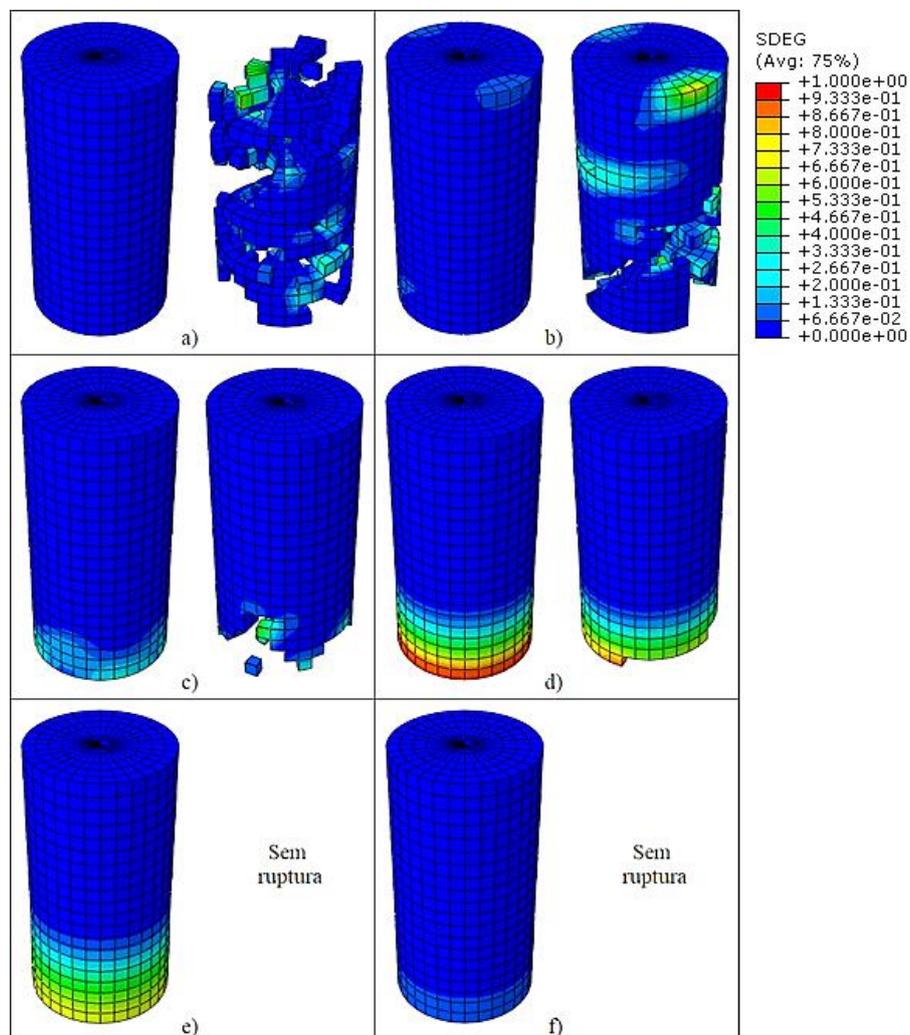


Figura 4.20. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Arenito. Critério dúctil, início do dano na  $\sigma_{m\acute{a}x}$  e  $\bar{u}_f^{pl}$  igual a: (a) 1,00E-06m; (b) 5,00E-06m; (c) 1,00E-05m; (d) 5,00E-05m; (e) 1,00E-04m; (f) 5,00E-04m.

Como foi percebido da análise das curvas tensão-deformação, os maiores valores do  $\alpha$  levam a um comportamento frágil da rocha, obtendo uma zona de cisalhamento localizada na que se desenvolve uma única superfície de fratura, a qual vai ficando melhor definida quando o valor do parâmetro aumenta, tal e como se observa nos literais **f**, **g** e **h** de ambas as figuras, ficando

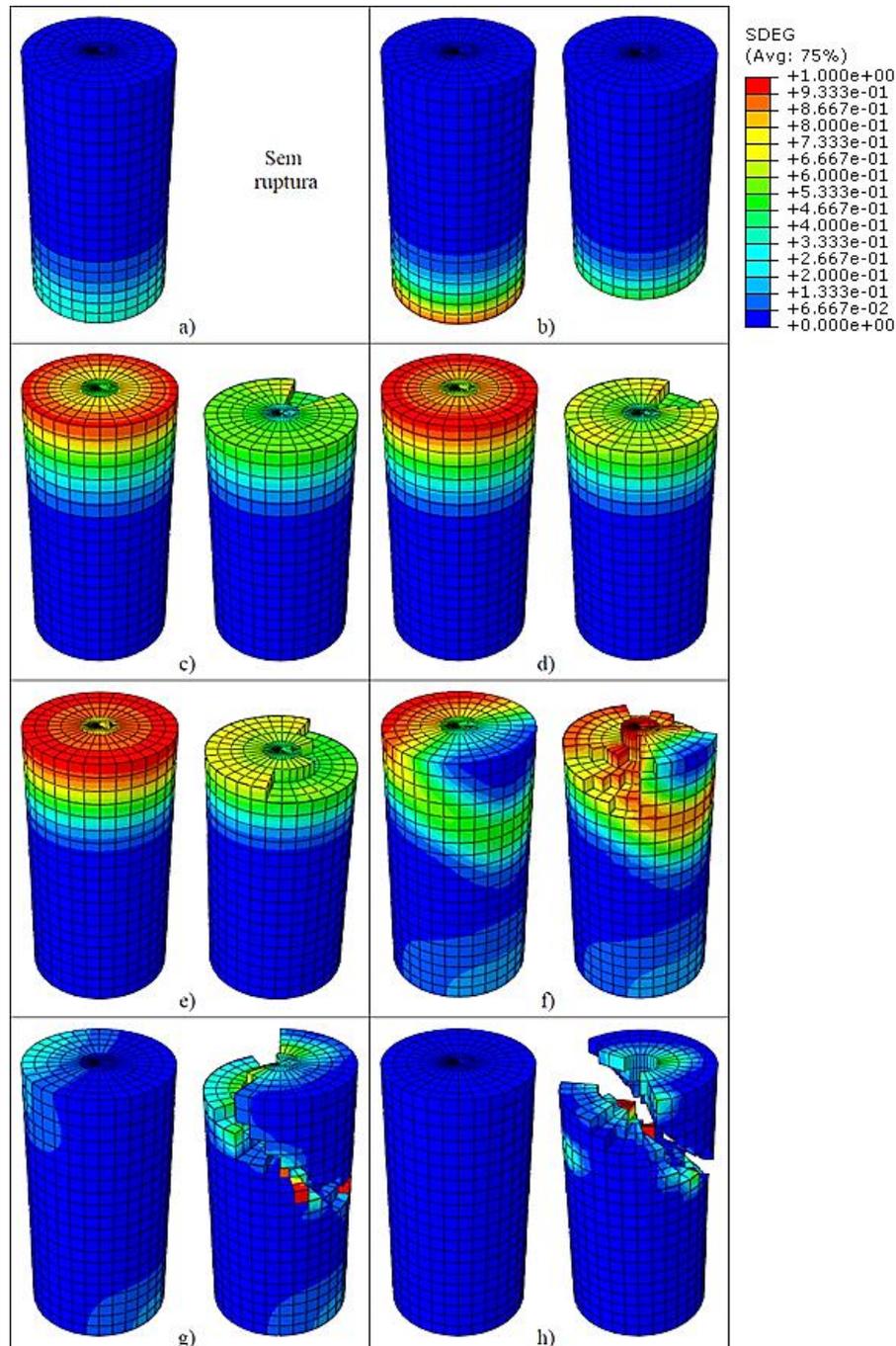


Figura 4.21. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Arenito. Critério cisalhante, início do dano na  $\sigma_{cd}$  e  $\alpha$  igual a: (a) -5; (b) -3; (c) -1; (d) 0; (e) 1; (f) 3; (g) 5; (h) 10.

a maior parte do material em uma condição quase intacta. Nos outros casos (literais **a** até **e**), continua-se manifestando uma degradação perto dos extremos do corpo de prova e o esmagamento do material que está em contato com alguma das placas, como foi visto comumente nas figuras anteriores.

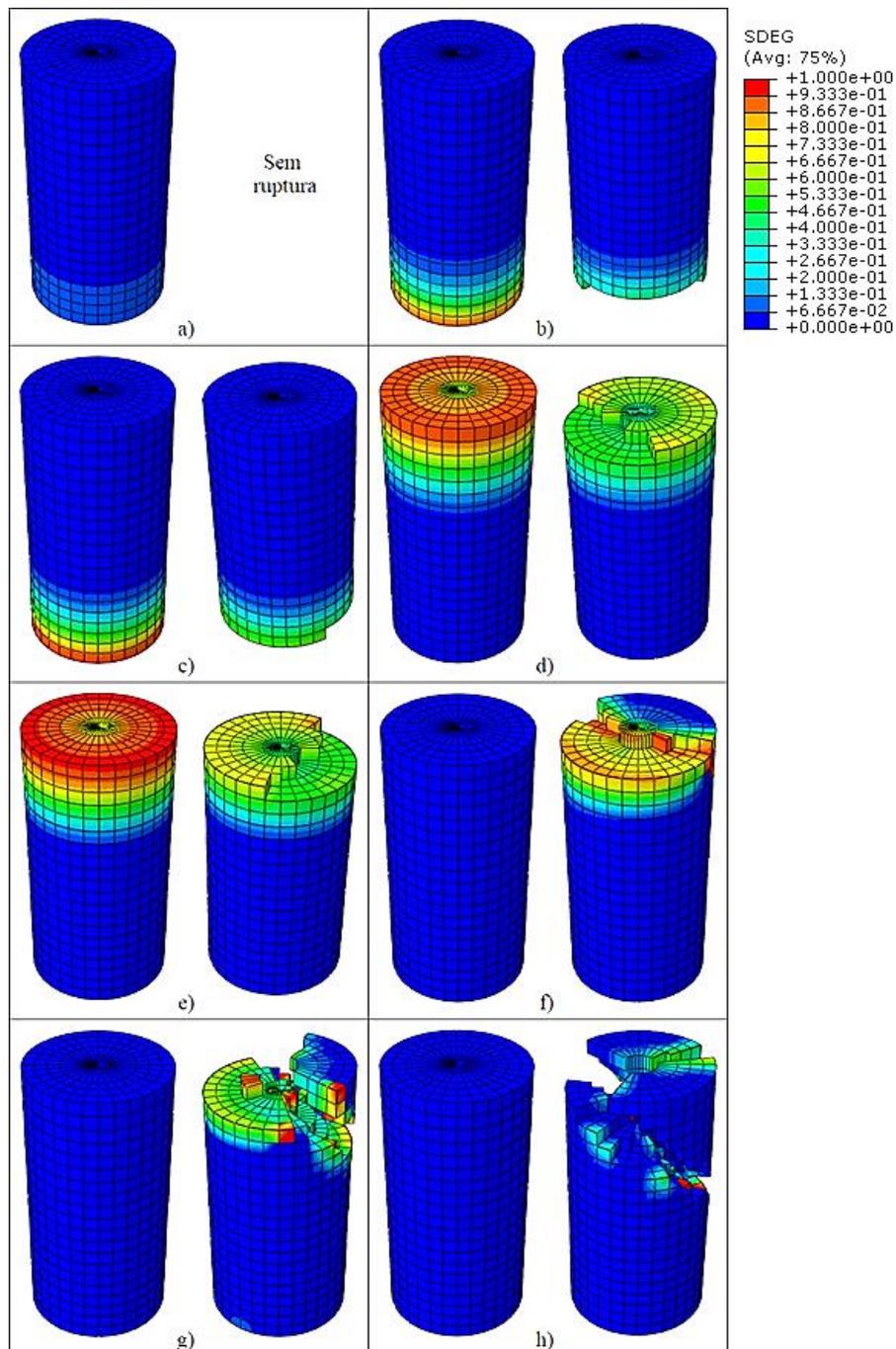


Figura 4.22. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Arenito. Critério cisalhante, início do dano na  $\sigma_{m\acute{a}x}$  e  $\alpha$  igual a: (a) -5; (b) -3; (c) -1; (d) 0; (e) 1; (f) 3; (g) 5; (h) 10.

Análogo ao acontecido com o  $\bar{u}_f^{pl}$ , não existe um indício da mudança na tendência das superfícies de ruptura geradas quando foi trocado o ponto de início do dano na avaliação do efeito do  $\alpha$ , dando a entender que a zona de ruptura pode ser conseguida independentemente do nível de tensão considerado como início da degradação da rocha, simplesmente ajustando a lei de evolução do dano.

Na Figura 4.23 se apresentam os cilindros nos que foi usado o critério dúctil e início do dano na  $\sigma_{cd}$ , os quais seguem o mesmo comportamento visto nas duas figuras prévias. Nota-se a dificuldade destes modelos de desenvolver uma superfície de ruptura clara, já que para os maiores valores de  $\alpha$  existe uma combinação entre o esmagamento e a fratura por cisalhamento (literais **g** e **h**). O mesmo acontece na Figura 4.24, que apresenta os corpos de prova onde foi usado o mesmo critério e o início do dano na tensão pico.

No final, destas últimas figuras se pode deduzir que, adotando a lei de evolução do dano exponencial, é possível reproduzir a zona de fratura real do corpo de prova assumindo valores elevados do parâmetro  $\alpha$ , que representam uma degradação acelerada do material no início do dano, o que leva a um comportamento frágil do Arenito contrário aos resultados dos ensaios experimentais obtidos para este tipo de rocha.

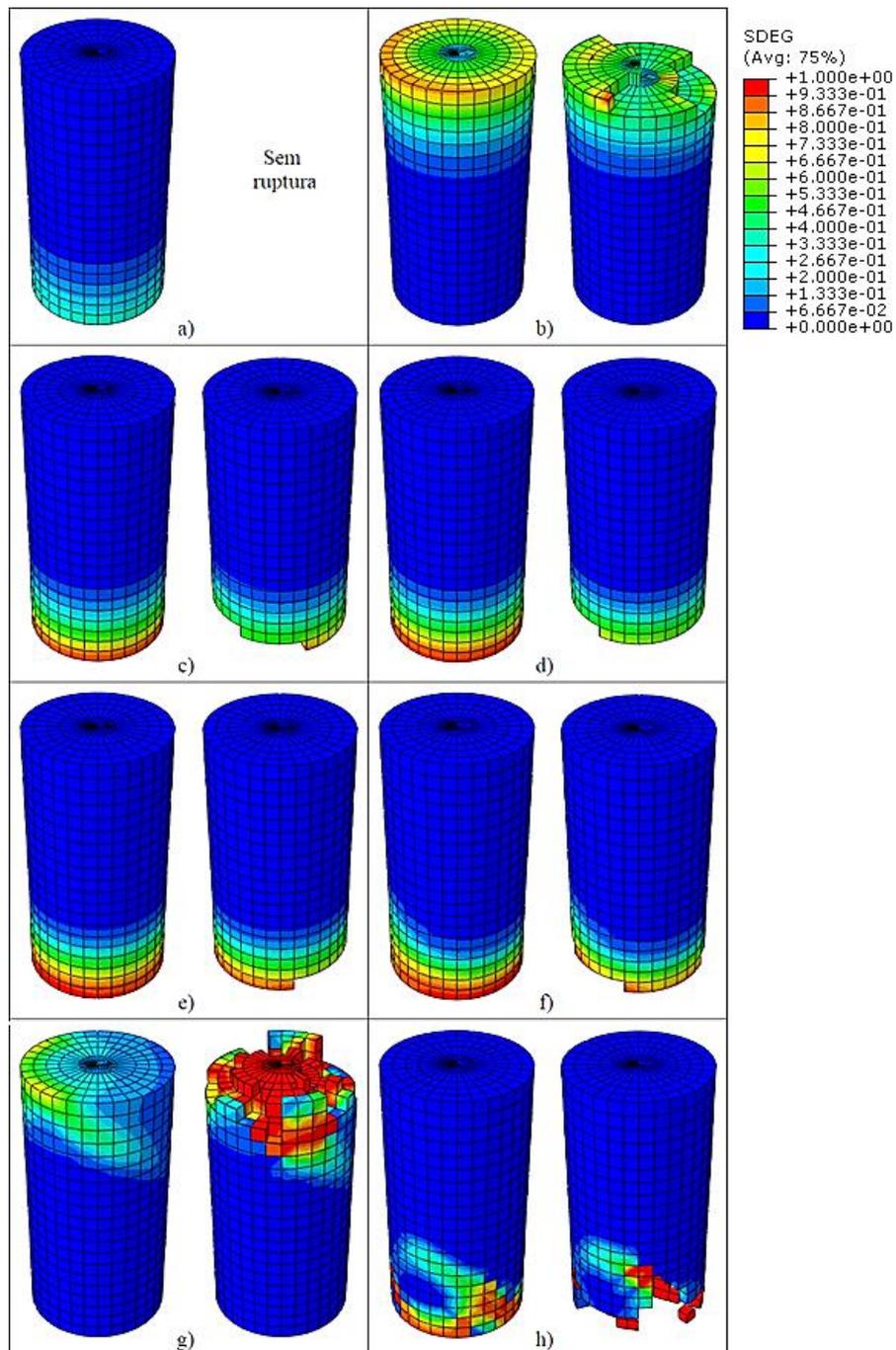


Figura 4.23. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Arenito. Critério dúctil, início do dano na  $\sigma_{cd}$  e  $\alpha$  igual a: (a) -5; (b) -3; (c) -1; (d) 0; (e) 1; (f) 3; (g) 5; (h) 10.

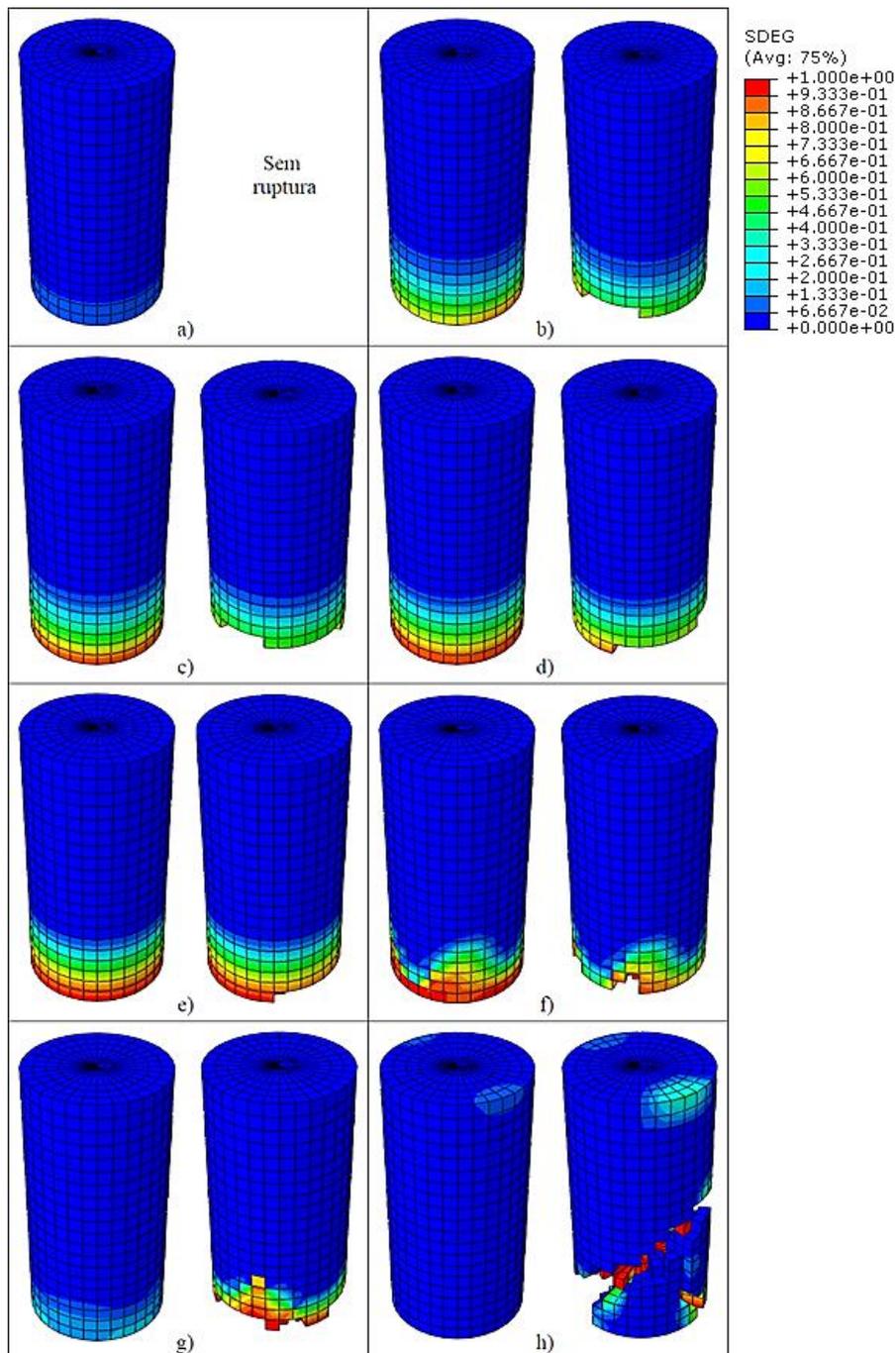


Figura 4.24. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Arenito. Critério dúctil, início do dano na  $\sigma_{máx}$  e  $\alpha$  igual a: (a) -5; (b) -3; (c) -1; (d) 0; (e) 1; (f) 3; (g) 5; (h) 10.

#### 4.1.3. Considerações finais

Em resumo, os parâmetros que geram maiores efeitos no comportamento do Arenito são o deslocamento plástico equivalente na falha  $\bar{u}_f^{pl}$  e o coeficiente de forma  $\alpha$  da lei de evolução

do dano, tanto no ajuste da curva tensão-deformação, como na forma da superfície de ruptura. Ambos os parâmetros controlam a deformação na falha total, a tensão máxima resistida, a evolução do dano e o tipo de fratura conseguida, podendo ajustar a resposta do material para um estado dúctil ou frágil, pelo que a calibração deles deve ser feita simultaneamente. Menores valores de  $\bar{u}_f^{pl}$  e maiores de  $\alpha$  levam a um estado frágil da rocha, onde a superfície de ruptura é similar à apresentada nos ensaios experimentais. Pelo contrario, aqueles valores que permitem uma melhor aproximação da resposta em compressão não conseguem representar uma área de ruptura clara, resultando simplesmente em um esmagamento da região que está em contato com as placas de carregamento.

Outro parâmetro importante é o ângulo de dilatância, já que um aumento do  $\psi$  provoca um deslocamento para direita da zona post-pico da curva, acrescentando o valor da deformação na que acontece a falha total, sem incidir significativamente na forma da superfície de fratura. Por último, o coeficiente de forma  $K$ , a velocidade de carregamento, o parâmetro do material  $k_s$  (para os modelos com critério cisalhante) e a taxa de deformação plástica equivalente  $\dot{\epsilon}^{pl}$ , não geram um efeito apreciável no comportamento geral do Arenito em compressão uniaxial.

Tendo em conta o exposto anteriormente e com o objetivo de definir os valores dos parâmetros que permitem calibrar o modelo, foram feitas simulações considerando ambos os critérios e pontos de inicio do dano, priorizando a melhor representação da curva tensão-deformação e deixando em segundo plano a superfície de ruptura gerada, já que se considera mais importante que o modelo consiga reproduzir a capacidade de armazenamento de energia do material. Para lograr isto, foi mudando-se a lei de evolução do dano inserida de forma tabular, procurando que a densidade de energia de deformação (área embaixo da curva) fora a mais aproximada possível à obtida da curva experimental, empregando os valores dos outros parâmetros apresentados na Tabela 4.1.

As leis de evolução do dano obtidas para o ponto do inicio na  $\sigma_{cd}$  são muito similares para os dois critérios avaliados, acontecendo o mesmo fenômeno para o inicio do dano  $\sigma_{máx}$  (Figura 4.25), concluindo, por conseguinte, que os dois critérios podem ser usados na modelagem do comportamento do Arenito em compressão uniaxial. O ajuste conseguido para cada modelo se apresenta na Figura 4.25, notando-se que todos eles permitem uma excelente descrição da curva até o nível de deformação de 6,30E-03, logrando representar apenas uma parte do amolecimento da rocha. Como foi previsto pelas análises anteriores, não se desenvolve uma

superfície de fratura evidente, e pelo contrario, acontece um esmagamento na parte inferior do cilindro para todos os casos avaliados (Figura 4.26).

Em síntese, qualquer dos dois critérios de inicio do dano permite conseguir uma boa representação da resposta do material em compressão simples, independentemente do ponto de inicio da degradação, não obstante, a superfície de ruptura não cumpre com as descrições dadas pelos autores e o amolecimento acontecido não chega até o nível esperado, pelo que

Tabela 4.1. Valores dos parâmetros usados nos modelos que melhor ajustam a curva tensão-deformação para o Arenito.

$\psi$	7,64°
$K$	0,778
$k_s^*$	1
$\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$	5,00E-05/s
Velocidade de carregamento	3,00E-04m/s

\* Para os modelos com critério cisalhante

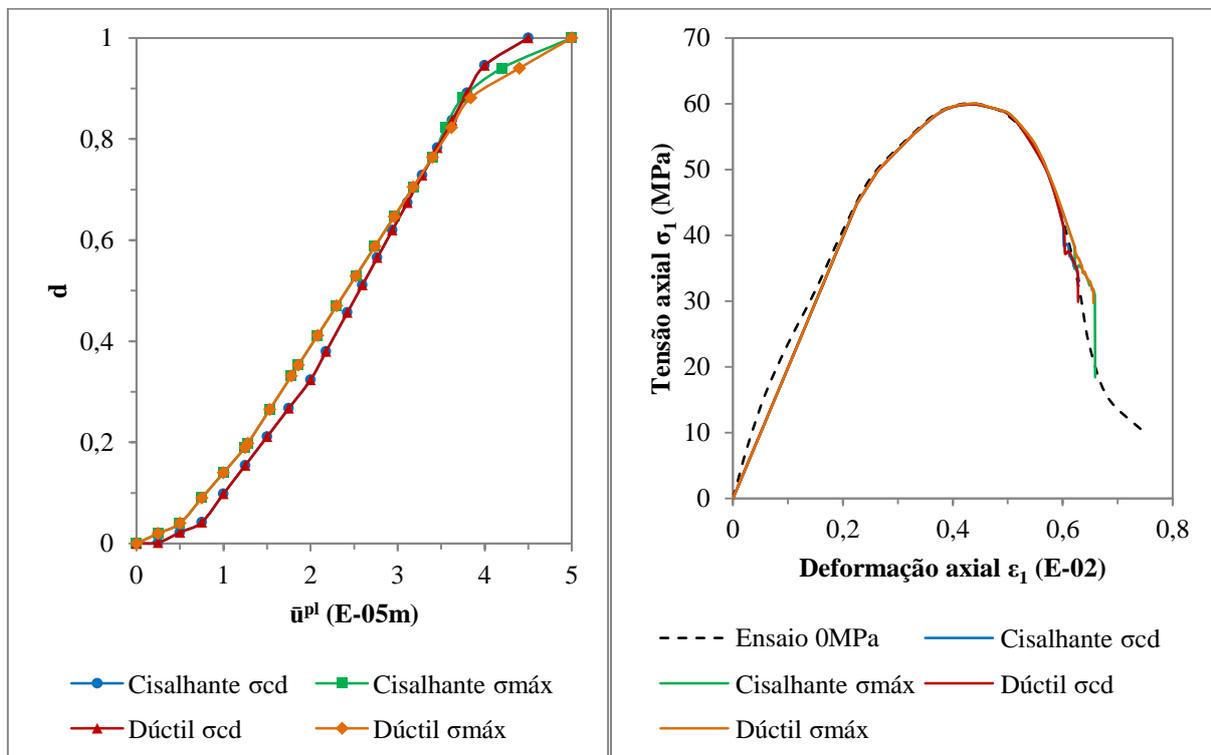


Figura 4.25. Melhor ajuste obtido da curva tensão-deformação (direita) para o Arenito usando a lei de evolução do dano inserida de forma tabular (esquerda), para os diferentes critérios e pontos do inicio do dano.

não é possível reproduzir todas as características do comportamento do Arenito simultaneamente. Cabe destacar que as leis de evolução obtidas só são válidas para o tamanho dos elementos utilizado, sendo a dimensão máxima de 3mm (5% da altura do corpo de prova), pelo que ao adotar um malhado diferente, deve-se calibrar novamente o modelo de dano como se indicou na Secção 2.5. Por exemplo, mudando o tamanho máximo dos elementos da malha  $l_{máx}$  para 2, 4 e 5mm (3,33%, 6,67% e 8,33% da altura do cilindro, respectivamente), no modelo com critério cisalhante e início do dano na  $\sigma_{cd}$ , aplicando a mesma lei de evolução que permitiu o melhor ajuste da curva, obteve-se respostas diferente do material modelado, tal e como se apresenta na Figura 4.27.

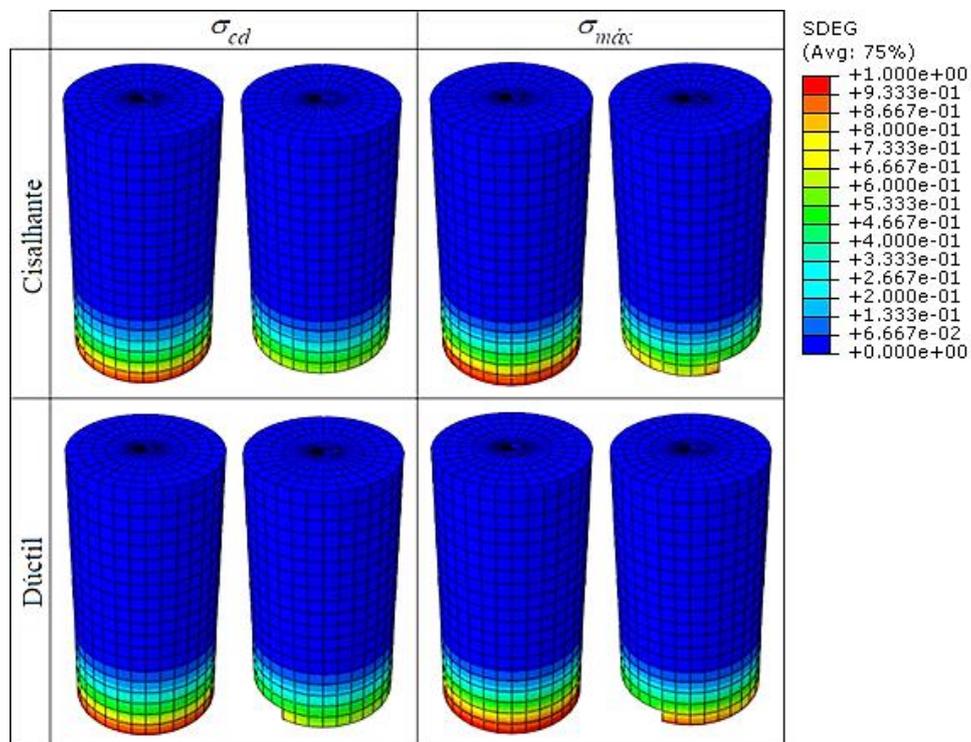


Figura 4.26. Corpos de prova do modelo que melhor ajusta a curva tensão-deformação do Arenito, um instante anterior (esquerda) e posterior (direita) do momento da ruptura total para os dois critérios e pontos de início do dano.

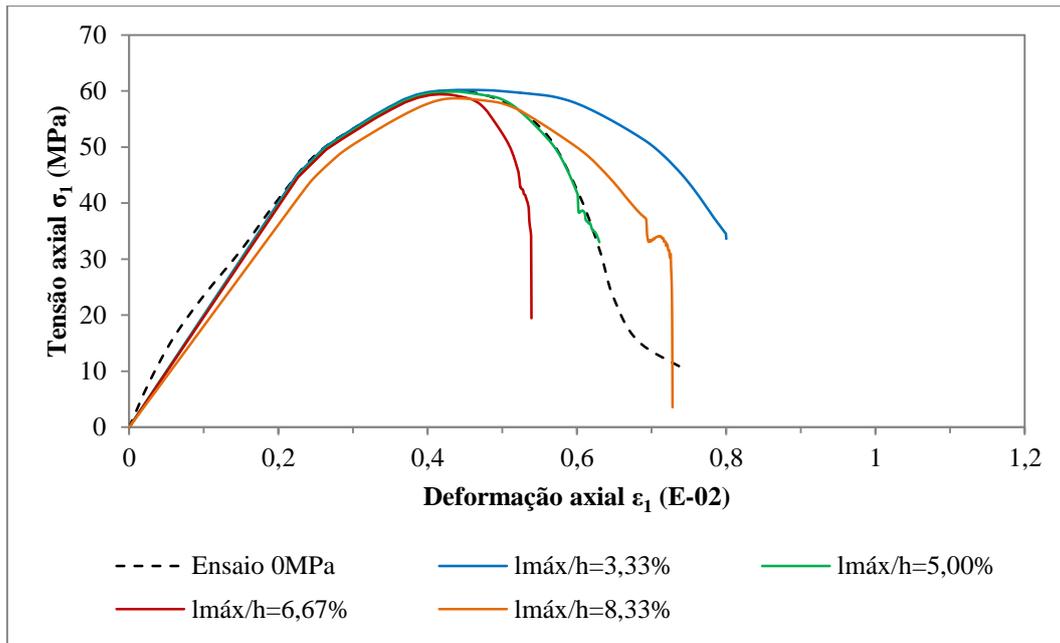


Figura 4.27. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Arenito com início do dano na  $\sigma_{cd}$  e critério cisalhante, variando a relação entre o tamanho máximo dos elementos da malha  $l_{m\acute{a}x}$  e a altura do corpo de prova  $h$ .

## 4.2. UCT GRANITO

A geometria do modelo de ensaio uniaxial e triaxial para o Granito é apresentada na Figura 4.28a, onde o corpo de prova cilíndrico tem um diâmetro de 0,05m e uma altura de 0,125m, composto por 4000 elementos do mesmo tipo que os empregados para o Arenito: C3D8R (3200 elementos) e C3D6R (800 elementos), com uma dimensão máxima de 5mm.

As placas também foram simuladas como partes rígidas analíticas, aplicando as mesmas condições de contorno (Figura 4.28b) à diferença da velocidade de carregamento, que foi de 0,625mm/s para manter a mesma razão de deformação axial usada nos modelos do Arenito. Agora, para os ensaios triaxiais foi aplicada a tensão de confinamento a uma taxa de 10MPa/s, definida como uma pressão no lateral do corpo de prova e uma força equivalente na placa de carga.

### 4.2.1. Curvas tensão-deformação

Ao igual que com o Arenito, inicialmente foi simulado o ensaio de compressão uniaxial sem introduzir o modelo de Mecanismo de Dano, servindo como condição de controle para confirmar a correta incorporação dos parâmetros gerais do material, tal e como se mostra na

Figura 4.29. Foram avaliados os valores de ângulo de dilatância correspondentes a um modelo com fluxo associado e não dilatante, a sua vez que o parâmetro  $K$  tomava os valores de 0,778 e 1. Neste caso, também acontece uma leve diferença na resposta da rocha com a variação do  $\psi$ , entretanto o parâmetro de forma da superfície de plastificação não gera efeito nenhum.

Logo foi inserido o modelo de dano com início na tensão de dano por fraturas e critério cisalhante, avaliando novamente o impacto do  $\psi$  e do  $K$ . Os valores adotados pelo ângulo de dilatância foram  $0^\circ$ ,  $\beta$  e  $\phi/4$ , este último de acordo ao exposto por Hoek & Brown (1997) para as rochas com comportamento frágil, dando como resultado um valor de  $27,97^\circ$ . Os valores de  $K$  foram os empregado nos modelos sem dano, usando um  $k_s = 1$ , o  $\bar{u}_f^{pl} = 1,00E-05m$ ,  $\alpha = 0$  e a  $\dot{\bar{\epsilon}}^{pl} = 5,00E-05/s$ . Nota-se uma maior deformação na ruptura total quando é assumido o fluxo associado (Figura 4.30), acontecendo a queda súbita de resistência a uma deformação muito semelhante da obtida nos ensaios de laboratório; também se consegue uma tensão pico levemente maior que a atingida para os outros valores de  $\psi$  e um pequeno amolecimento antes de que ocorra a fratura total do corpo de prova, exibindo um comportamento de tipo frágil para todas as condições avaliadas.

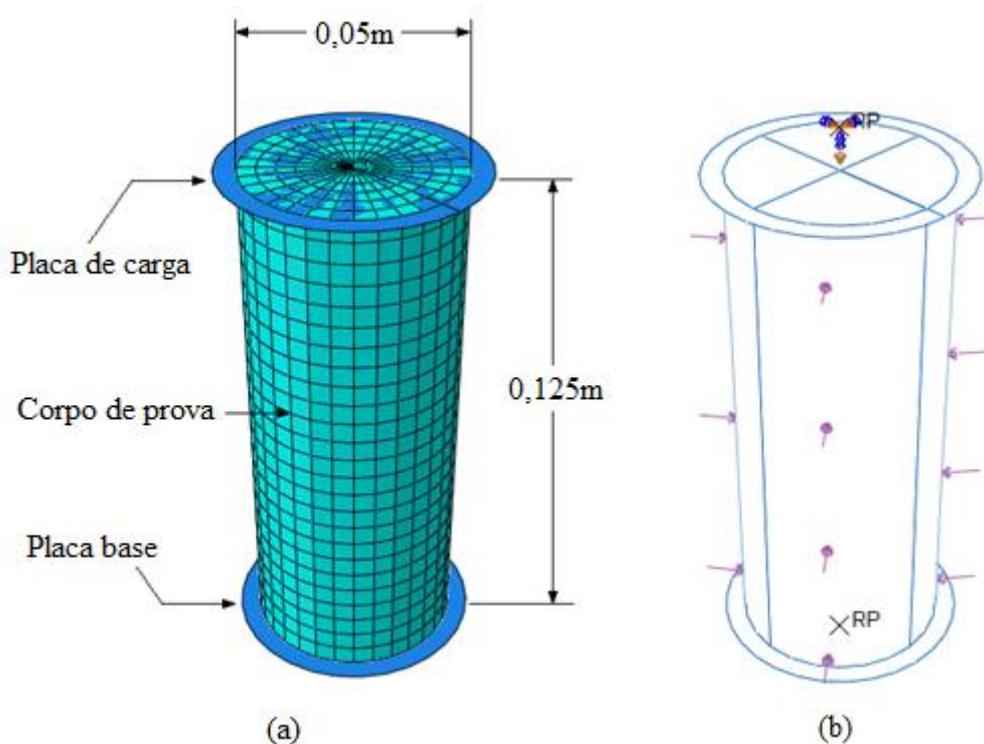


Figura 4.28. Geometria (a), condições do contorno e carregamento (b) do modelo de ensaio triaxial inserido em ABAQUS® para a rocha Granito.

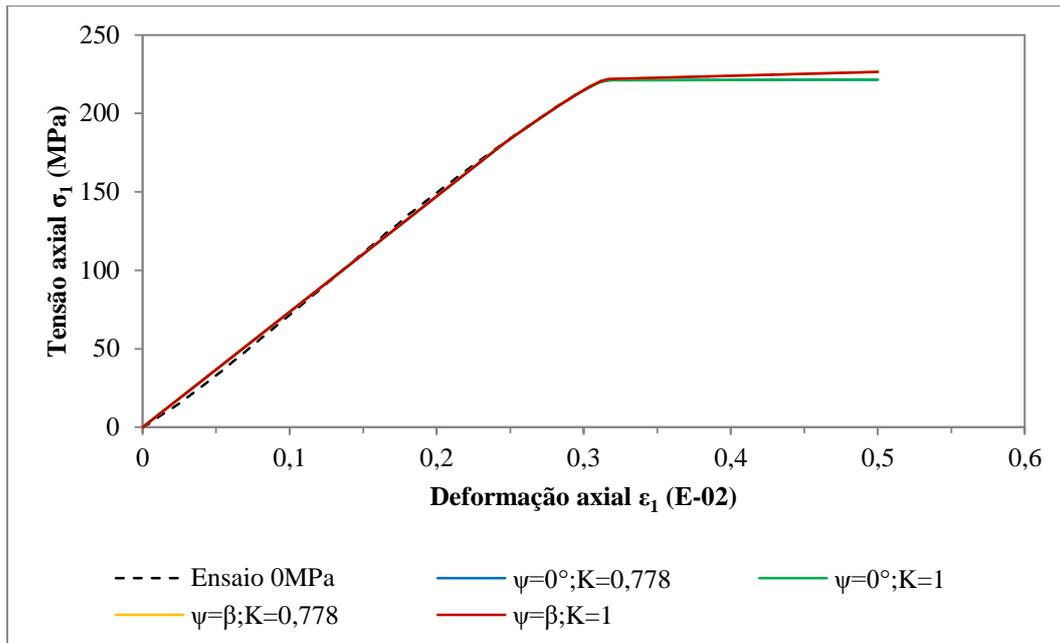


Figura 4.29. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Granito sem dano, variando o valor do ângulo de dilatância  $\psi$  e do parâmetro  $K$ .

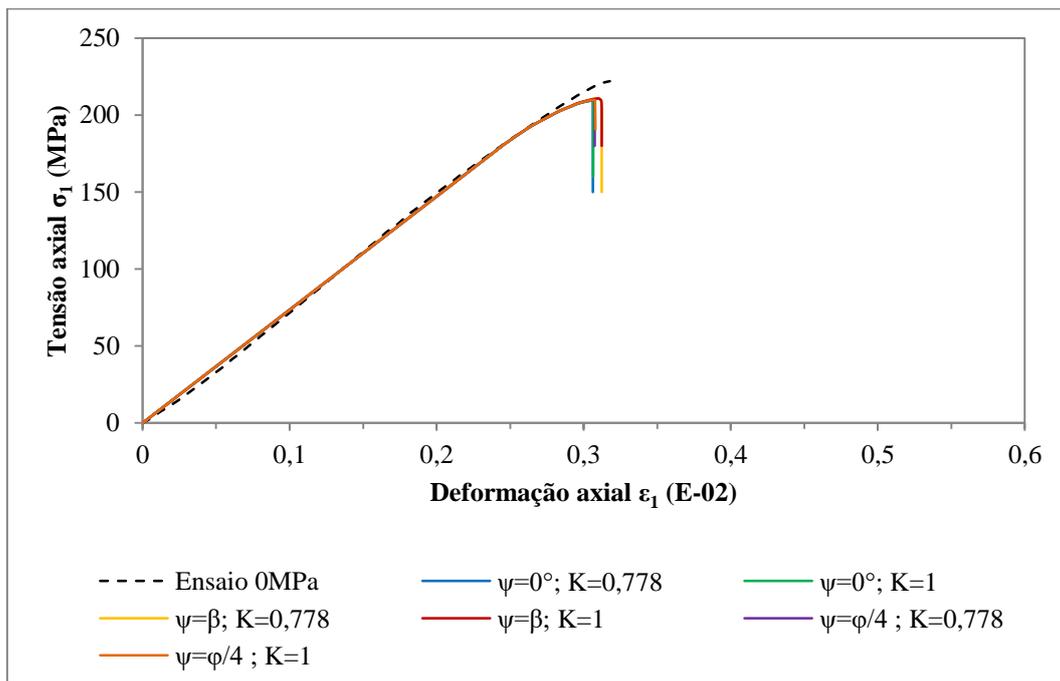


Figura 4.30. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Granito com início do dano na  $\sigma_{cd}$  e critério cisalhante, variando o valor do ângulo de dilatância  $\psi$  e do parâmetro

$K$ .

Como já foi comprovado para o caso do Arenito, não será analisada a influência da velocidade de carregamento, do  $k_s$  nem da  $\dot{\varepsilon}^{pl}$ . A continuação foi avaliada o efeito do  $\bar{u}_f^{pl}$ , aplicando as mesmas leis de evolução do dano apresentadas na Figura 4.4, considerando o  $\psi = \phi / 4$  e o  $K = 0,778$ , além dos valores já dispostos para os outros parâmetros, obtendo as curvas mostradas na Figura 4.31. Observa-se uma mudança do comportamento frágil para o dúctil à medida que o valor do deslocamento na falha aumenta, acontecendo o mesmo fenômeno de degradação lenta devido a que os elementos da malha precisam de um deslocamento maior para atingir o dano total. Quando o valor do  $\bar{u}_f^{pl}$  é de  $1,00E-06m$ , a tensão máxima conseguida é equivalente à  $\sigma_{cd}$  como consequência da rápida degradação que provoca uma ruptura prematura do corpo de prova, já para o valor do parâmetro de  $1,00E-05m$ , o modelo consegue a melhor aproximação da deformação na ruptura total e uma tensão pico equivalente ao 94% da tensão máxima do ensaio.

Na Figura 4.32 se apresentam as curvas obtidas da avaliação do efeito do parâmetro  $\alpha$  usando um deslocamento na falha de  $1,00E-05m$ , evidenciando-se uma melhor previsão da resistência à compressão uniaxial quando o valor do parâmetro vai diminuindo, como é o caso

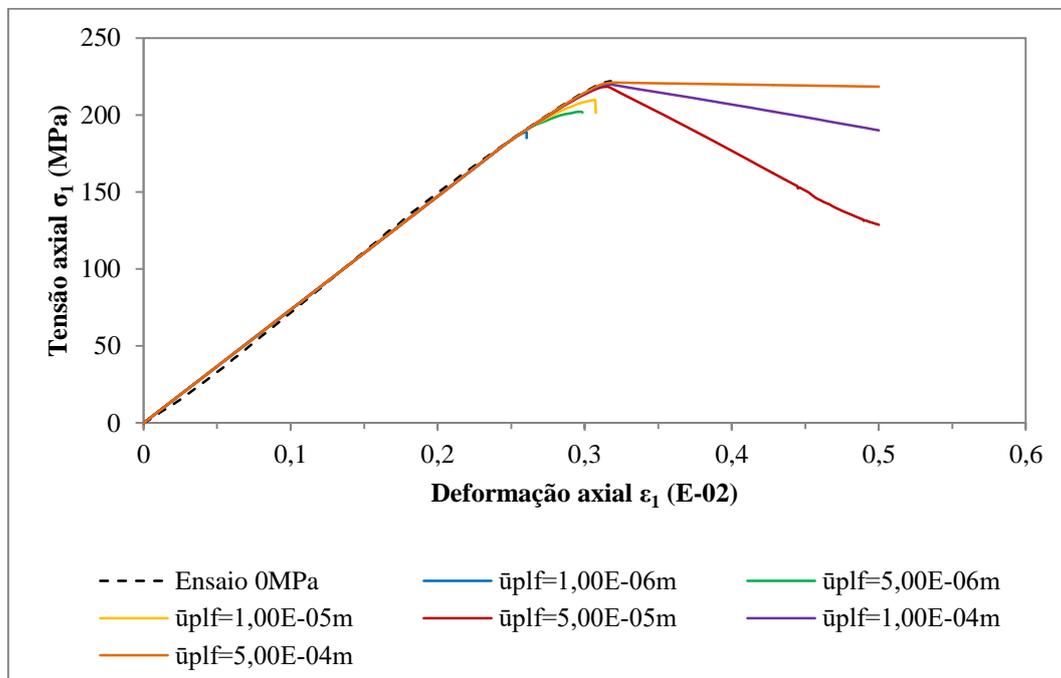


Figura 4.31. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Granito com início do dano na  $\sigma_{cd}$  e critério cisalhante, variando o valor do deslocamento plástico equivalente na

falha  $\bar{u}_f^{pl}$ .

dos modelos com  $\alpha$  igual a -5 e -3, contudo, o material começa a desenvolver uma zona de amolecimento prévia a ruptura total contrária ao comportamento frágil do Granito, concluindo no final que o valor de  $\alpha$  igual a -1 permite a maior aproximação da tensão pico (97% da UCS) e da deformação na fratura total, além de manter o comportamento frágil do material.

Agora, foi modificado o ponto do início do dano para a tensão máxima resistida e foi avaliando novamente o deslocamento na falha, mantendo o critério cisalhante e os mesmos valores dos outros parâmetros do caso anterior. Os resultados se mostram na Figura 4.33, acontecendo igualmente uma evolução da resposta da rocha de frágil para dúctil à medida que o  $\bar{u}_f^{pl}$  aumenta. Neste caso a tensão máxima atingida por todos os modelos alcança o 99% da resistência à compressão uniaxial, obtendo o melhor ajuste da curva para o deslocamento na falha igual a 1,00E-05m.

Da mesma forma, foi analisado o impacto da mudança do  $\alpha$  no comportamento do material dando como resultado a Figura 4.34, sendo notória a similitude com as curvas dos modelos com início do dano na  $\sigma_{cd}$  por causa da aparição da zona de amolecimento cada vez mais extensa quando o valor do parâmetro de forma vai diminuindo, contudo, a tensão pico

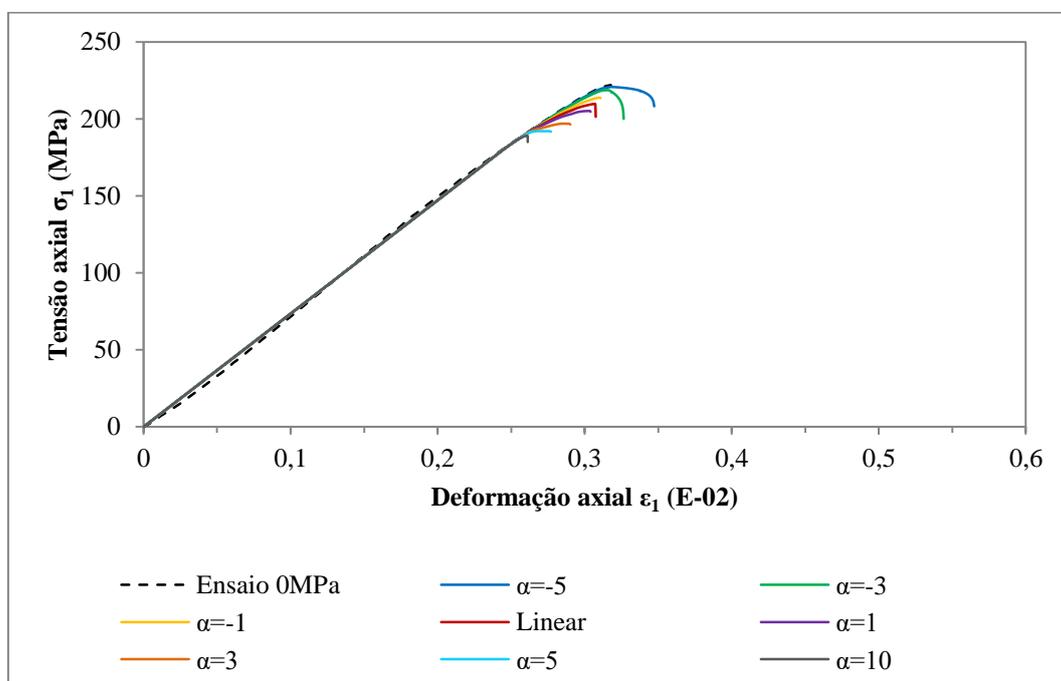


Figura 4.32. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Granito com início do dano na  $\sigma_{cd}$  e critério cisalhante, variando o valor do parâmetro de forma da lei de evolução do dano  $\alpha$ .

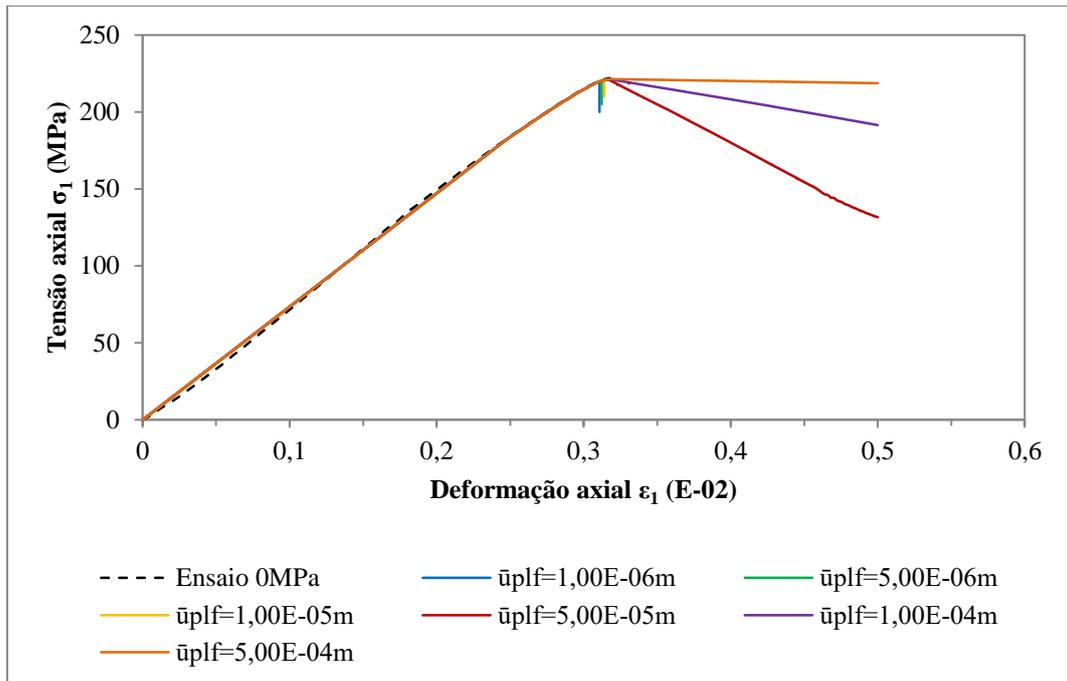


Figura 4.33. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Granito com início do dano na  $\sigma_{m\acute{a}x}$  e critério cisalhante, variando o valor do deslocamento plástico equivalente na

falha  $\bar{u}_f^{pl}$ .

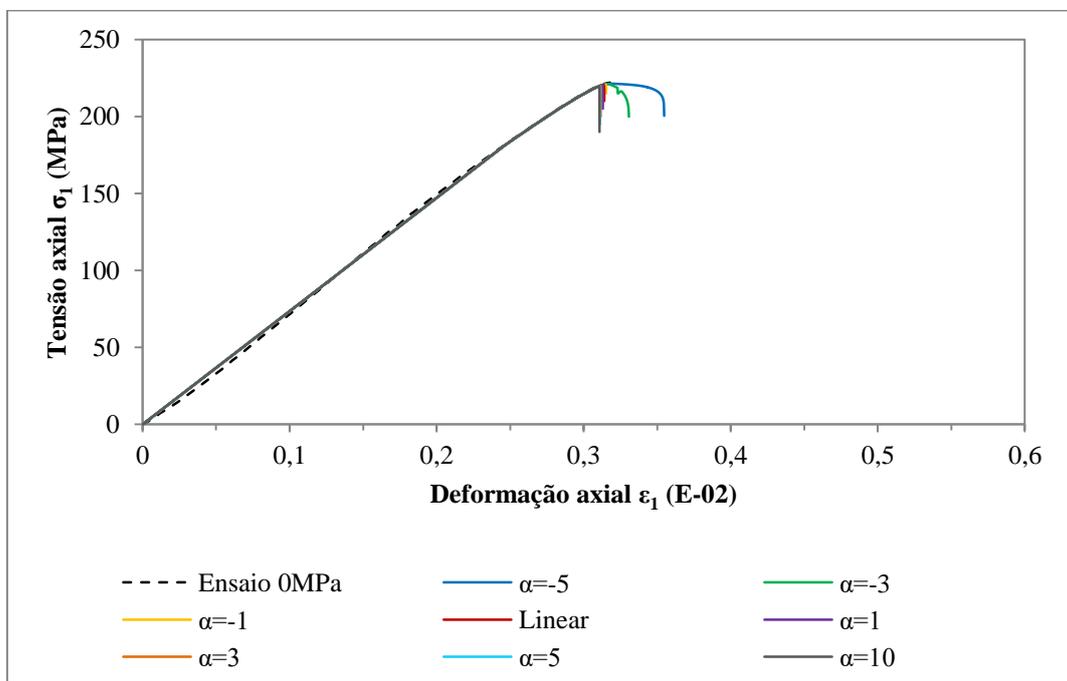


Figura 4.34. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Granito com início do dano na  $\sigma_{m\acute{a}x}$  e critério cisalhante, variando o valor do parâmetro de forma da lei de evolução

do dano  $\alpha$ .

conseguida é praticamente a mesma para todos os casos, resultando o melhor ajuste para os modelos com o  $\alpha$  entre -1 e 1.

Agora, considerando o critério dúctil e supondo o início da degradação na tensão de dano por fraturas, foi avaliado mais uma vez o impacto do ângulo de dilatância e do parâmetro de forma da superfície de plastificação, obtendo-se as curvas da Figura 4.35. Em comparação com os resultados da Figura 4.30, pode-se concluir que a mudança de critério não afeta a resposta do material obtida pelo modelo, dado que foi conseguida a mesma tensão pico e a mesma deformação na fratura total para cada conjunto dos parâmetros analisados.

Assumindo igualmente um valor de  $\psi = \phi / 4$ ,  $K = 0,778$  e uma evolução do dano linear, foi examinado o impacto do deslocamento na falha adotando os mesmos valores empregados nos casos anteriores, dando como resultado a Figura 4.36. Nota-se que não existe uma diferença entre as curvas conseguidas para o critério dúctil e cisalhante, obtendo também o melhor ajuste para o modelo com um  $\bar{u}_f^{pl}$  de 1,00E-05m.

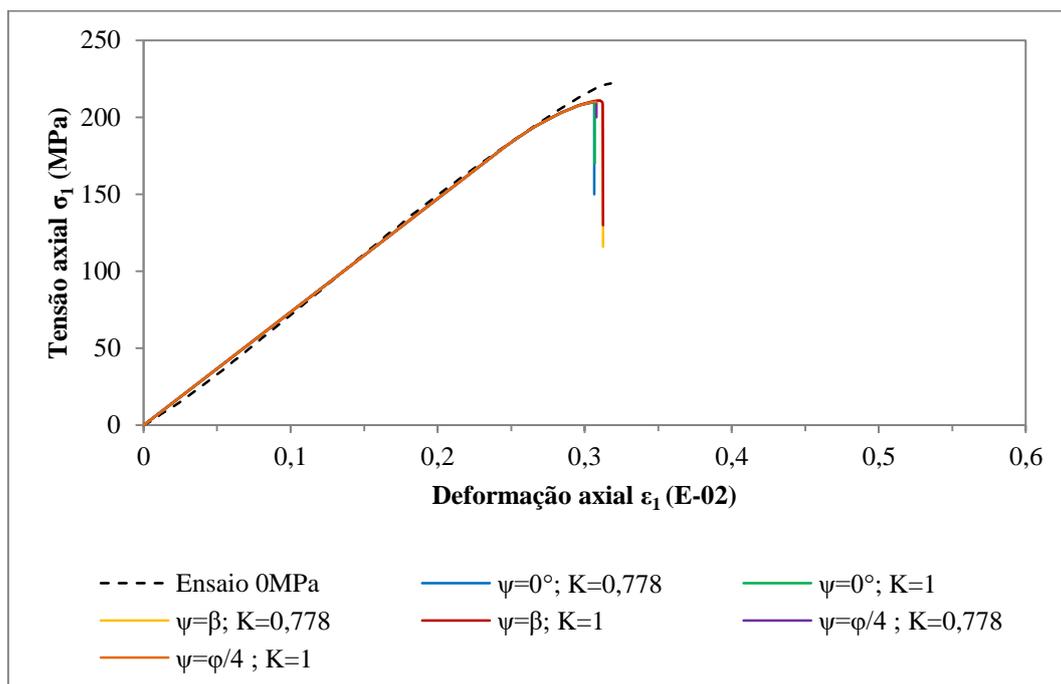


Figura 4.35. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Granito com início do dano na  $\sigma_{cd}$  e critério dúctil, variando o valor do ângulo de dilatância  $\psi$  e do parâmetro  $K$ .

Logo, foi analisado o efeito do parâmetro  $\alpha$  assumindo o valor do  $\bar{u}_f^{pl}$  mencionado, evidenciando uma resposta similar à conseguida para os modelos com critério cisalhante (Figura 4.37), desenvolvendo uma zona de amolecimento quando são usados valores negativos do parâmetro e uma ruptura muito rápida quando os valores dele são muito altos, dando como resultado uma tensão pico menor à experimental. O melhor ajuste é conseguido para o modelo com  $\alpha = -1$ , o qual se aproxima da tensão pico e da deformação na falha total, além de conservar a resposta frágil do Granito.

Novamente foi mudado o ponto de início do dano para a tensão máxima, analisando o efeito do  $\bar{u}_f^{pl}$  na resposta do modelo, mantendo o critério dúctil e um valor do  $\alpha = 0$  (Figura 4.38). Ao igual que aconteceu com o critério cisalhante, a tensão pico atingida por todos os modelos corresponde à UCS da rocha, mudando de uma resposta frágil para dúctil com o aumento do valor do  $\bar{u}_f^{pl}$ . Já, na Figura 4.39 se mostram os resultados da variação do  $\alpha$ , considerando um valor de  $\bar{u}_f^{pl} = 1,00E-05m$ , conseguindo uma resposta idêntica a aquela dos modelos com critério cisalhante, podendo-se concluir, que para o ajuste da curva tensão-deformação, ambos os critérios de início do dano são válidos.

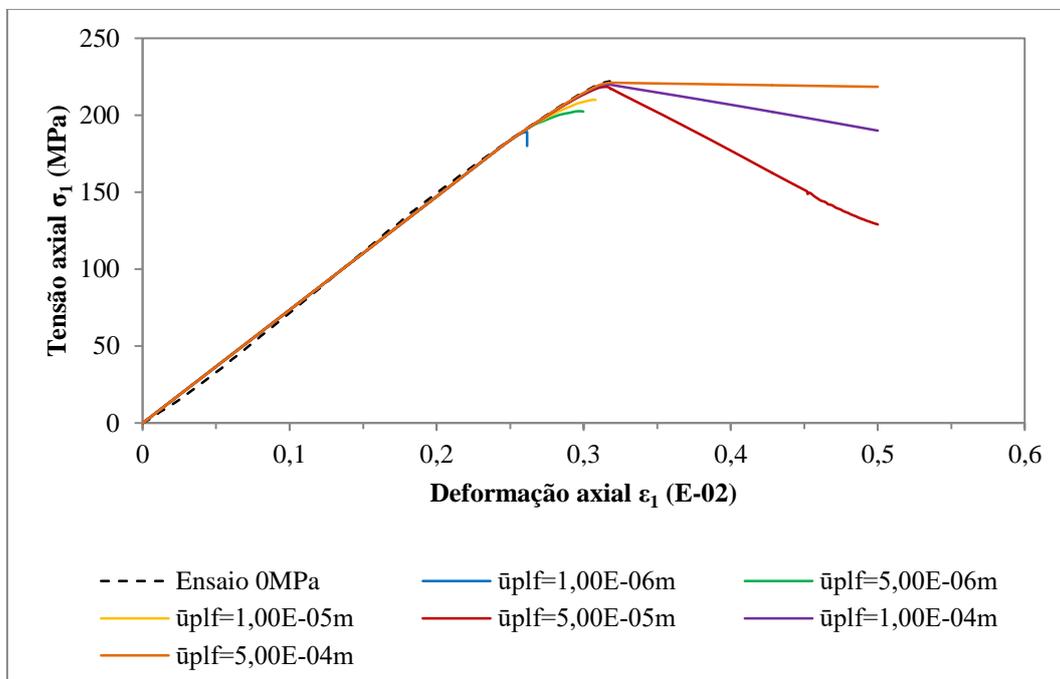


Figura 4.36. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Granito com início do dano na  $\sigma_{cd}$  e critério dúctil, variando o valor do deslocamento plástico equivalente na falha

$$\bar{u}_f^{pl}.$$

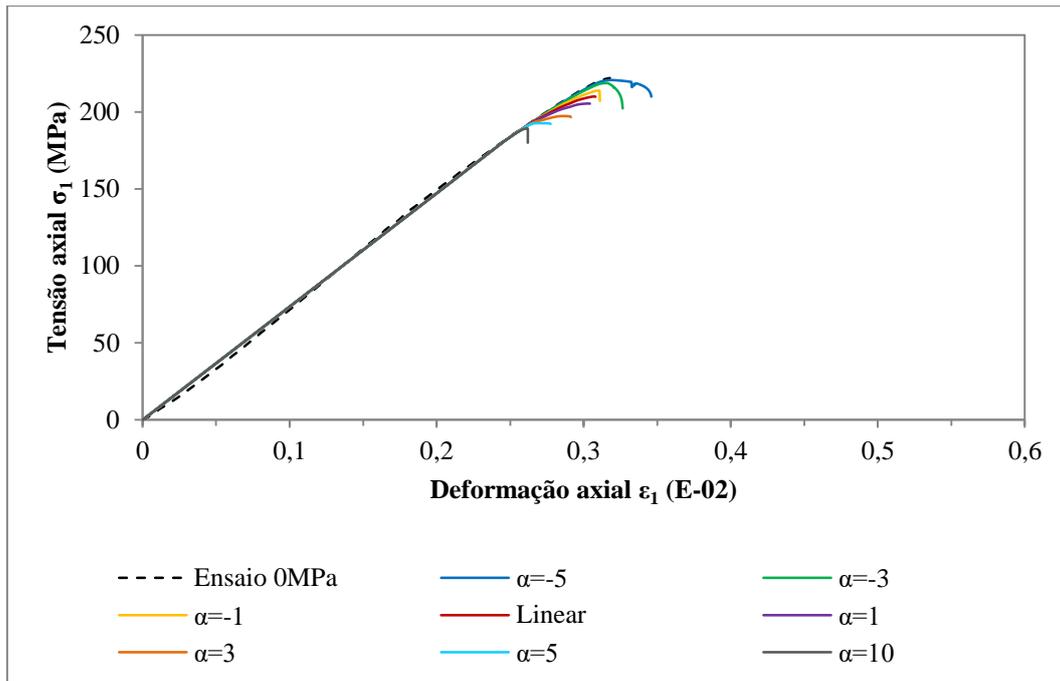


Figura 4.37. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Granito com início do dano na  $\sigma_{cd}$  e critério dúctil, variando o valor do parâmetro de forma da lei de evolução do dano  $\alpha$ .

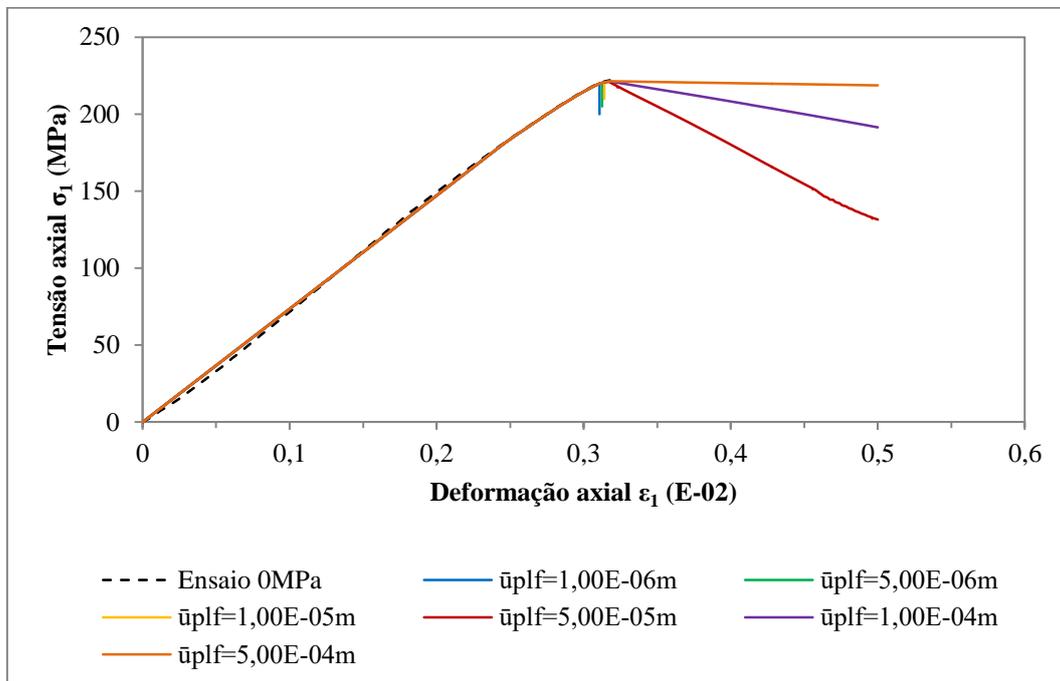


Figura 4.38. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Granito com início do dano na  $\sigma_{máx}$  e critério dúctil, variando o valor do deslocamento plástico equivalente na falha

$$\bar{u}_f^{pl}.$$

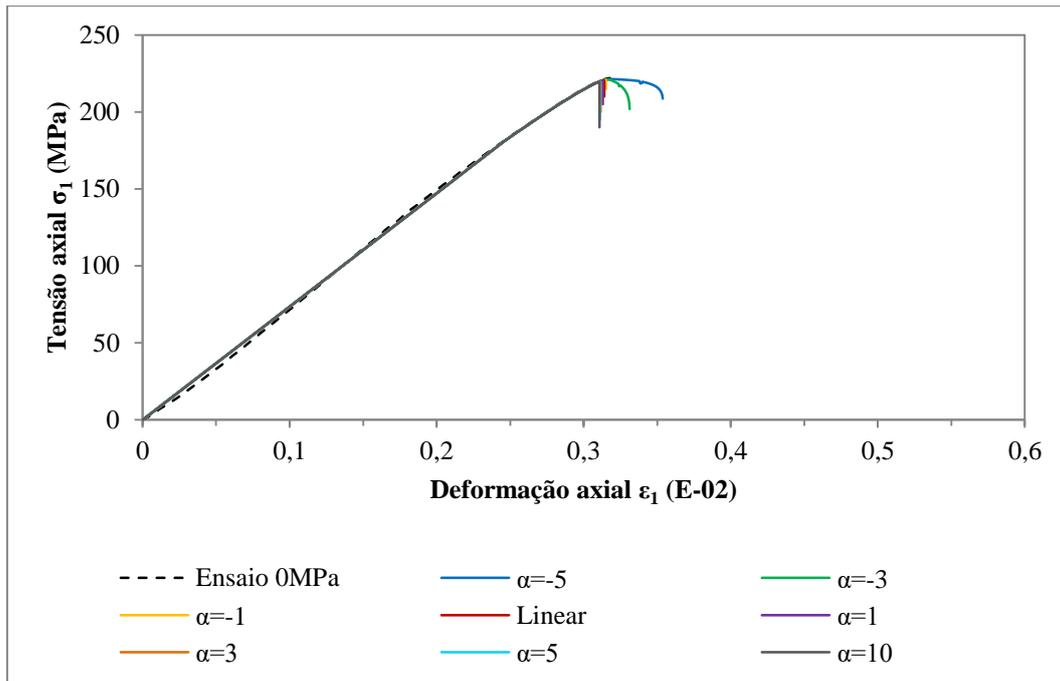


Figura 4.39. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem para o Granito com início do dano na  $\sigma_{máx}$  e critério dúctil, variando o valor do parâmetro de forma da lei de evolução do dano  $\alpha$ .

#### 4.2.2. Superfícies de fratura

A mesma análise feita para o Arenito respeito às superfícies de ruptura desenvolvidas durante o processo de falha do corpo de prova é apresentada a continuação para o Granito, lembrando que em cada quadro se mostra o cilindro no momento da fratura total exibindo a variável interna de dano  $d$  (SDEG).

Nas Figuras 4.40 e 4.41 são expostos os corpos de prova onde foi avaliado o impacto da mudança dos parâmetros  $\psi$  e  $K$  considerando o critério de início do dano cisalhante e dúctil respectivamente, com início da degradação na tensão de dano por fraturas. Percebe-se que para este caso, onde se tenta modelar o comportamento frágil do Granito, ambos os parâmetros mostram um efeito no tipo de fratura conseguida independente do critério utilizado, de modo que quando se assume um material com fluxo associado acontece um esmagamento da parte superior do corpo de prova que está em contato com a placa de carga, sem importar o valor do coeficiente  $K$  (literais **e** e **f** em ambas as figuras), para os outros valores avaliados do ângulo de dilatação se apresenta uma fratura de tipo cone e fenda (literais **b** e **d** da Figura 4.40 e **b**, **c** e **d** da Figura 4.41) ou cone e cisalhamento (literais **a** e **c**

da Figura 4.40 e **a** da Figura 4.41) onde o valor de  $K$  afeta a forma da superfície de falha conseguida.

Nos literais **c** e **d** da Figura 4.40, observa-se claramente o desenvolvimento das superfícies de cisalhamento prévio a falha total do cilindro, sendo consequente com o critério do início do dano considerado. Por outra parte, os tipos de fraturas desenvolvidas não coincidem com o acontecido no corpo de prova real para o ensaio de compressão uniaxial (Figura 3.6), isto se deve a que o tamanho dos elementos não permite obter superfícies de falha muito definidas, apagando grandes blocos de material e fazendo que a propagação das fraturas dependa da malha selecionada.

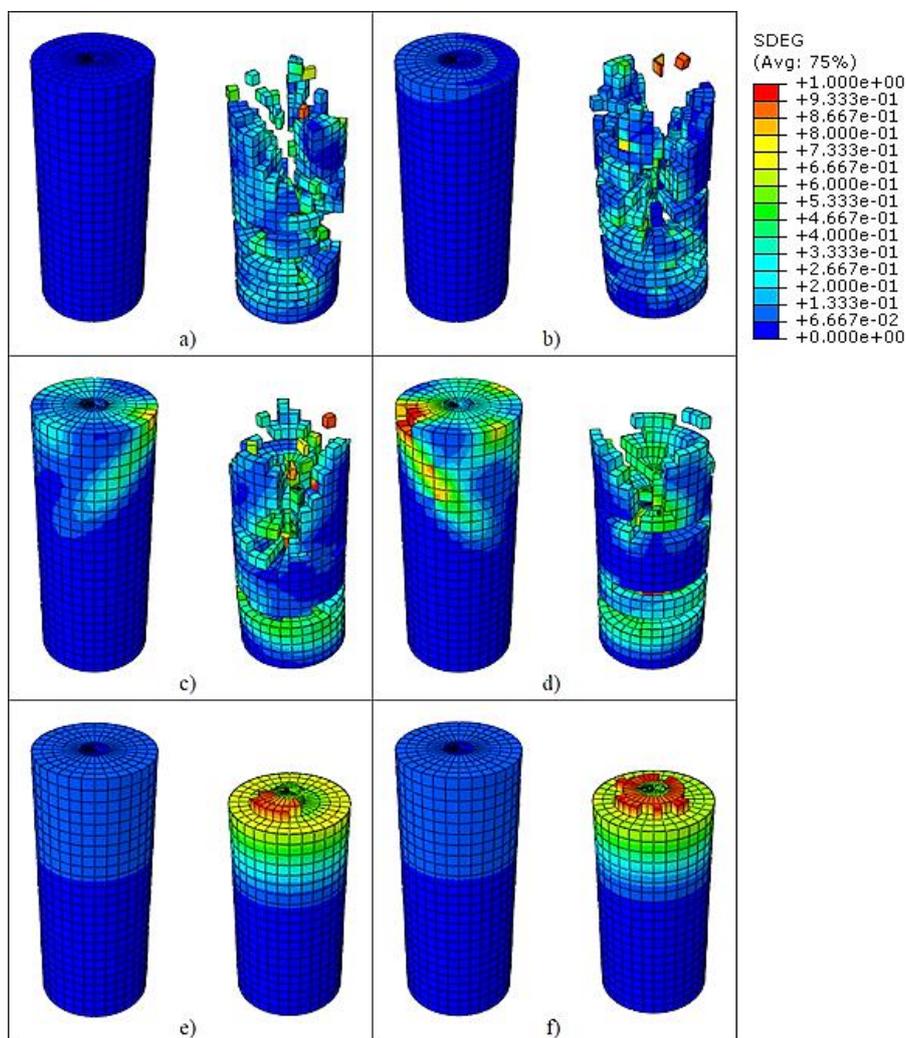


Figura 4.40. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Granito. Critério cisalhante, início do dano na  $\sigma_{cd}$  e: (a)  $\psi=0$ ,  $K=0,778$ ; (b)  $\psi=0$ ,  $K=1$ ; (c)  $\psi=\varphi/4$ ,  $K=0,778$ ; (d)  $\psi=\varphi/4$ ,  $K=1$ ; (e)  $\psi=\beta$ ,  $K=0,778$ ; (f)  $\psi=\beta$ ,  $K=1$ .

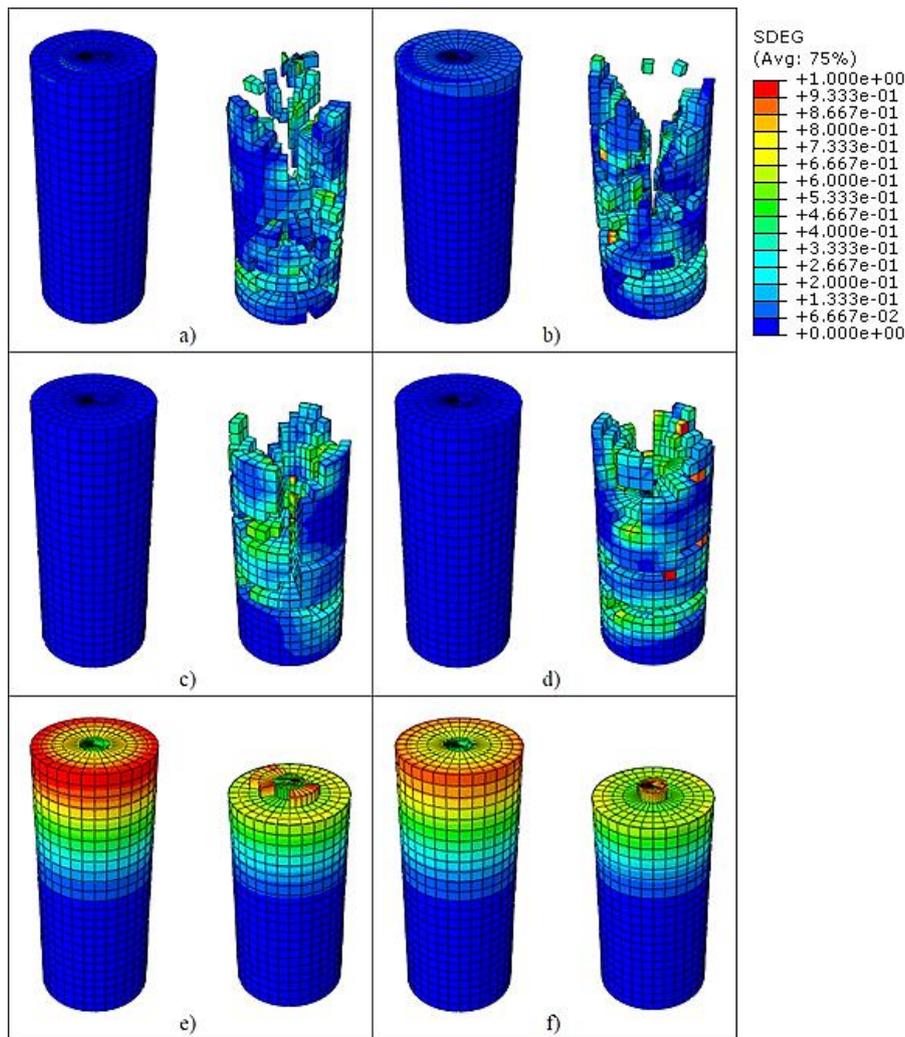


Figura 4.41. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Granito. Critério dúctil, início do dano na  $\sigma_{cd}$  e: (a)  $\psi=0$ ,  $K=0,778$ ; (b)  $\psi=0$ ,  $K=1$ ; (c)  $\psi=\varphi/4$ ,  $K=0,778$ ; (d)  $\psi=\varphi/4$ ,  $K=1$ ; (e)  $\psi=\beta$ ,  $K=0,778$ ; (f)  $\psi=\beta$ ,  $K=1$ .

A continuação, os corpos de prova correspondentes à avaliação do efeito do deslocamento na falha para os modelos com critério cisalhante e início do dano na  $\sigma_{cd}$  e na  $\sigma_{máx}$ , são exibidos nas Figuras 4.42 e 4.43 respectivamente, podendo-se identificar superfícies de fratura verticais e de cisalhamento para todos os cilindros que romperam. Também cabe ressaltar que para o valor de  $\bar{u}_f^{pl}$  igual a 1,00E-06m, grande parte do corpo de prova foi apagada devido a que os elementos atingem facilmente a degradação máxima (literal **a** em ambas as figuras), sendo difícil a identificação das fraturas desenvolvidas no momento da falha total. Assim mesmo, nota-se como se apresentam varias franjas ou zonas de rupturas ao longo dos cilindros falhados para as condições **b** e **c**, concluindo que a degradação ocorre rápida e simultaneamente em várias regiões do material sem importar o ponto de início do dano

utilizado; por outra parte, para aqueles modelos que não conseguiram a ruptura total, aconteceu uma degradação da rocha na parte superior do corpo de prova, similar aos resultados obtidos para os modelos do Arenito.

Do mesmo modo, nas Figuras 4.44 e 4.45 são apresentadas as imagens associadas aos modelos com critério dúctil e início do dano na tensão de dano por fraturas e na tensão máxima, respectivamente, obtendo também superfícies de ruptura axiais e por cisalhamento para os três primeiros valores do deslocamento na falha. Pelo visto nas figuras, o valor de  $\bar{u}_f^{pl} = 1,00E-05m$  representa a melhor aproximação respeito ao tipo de ruptura desenvolvida, dado que as fraturas axiais mais evidentes neste modelo podem provocar o desprendimento de lascas como as vistas nos ensaios de laboratório para o carregamento uniaxial.

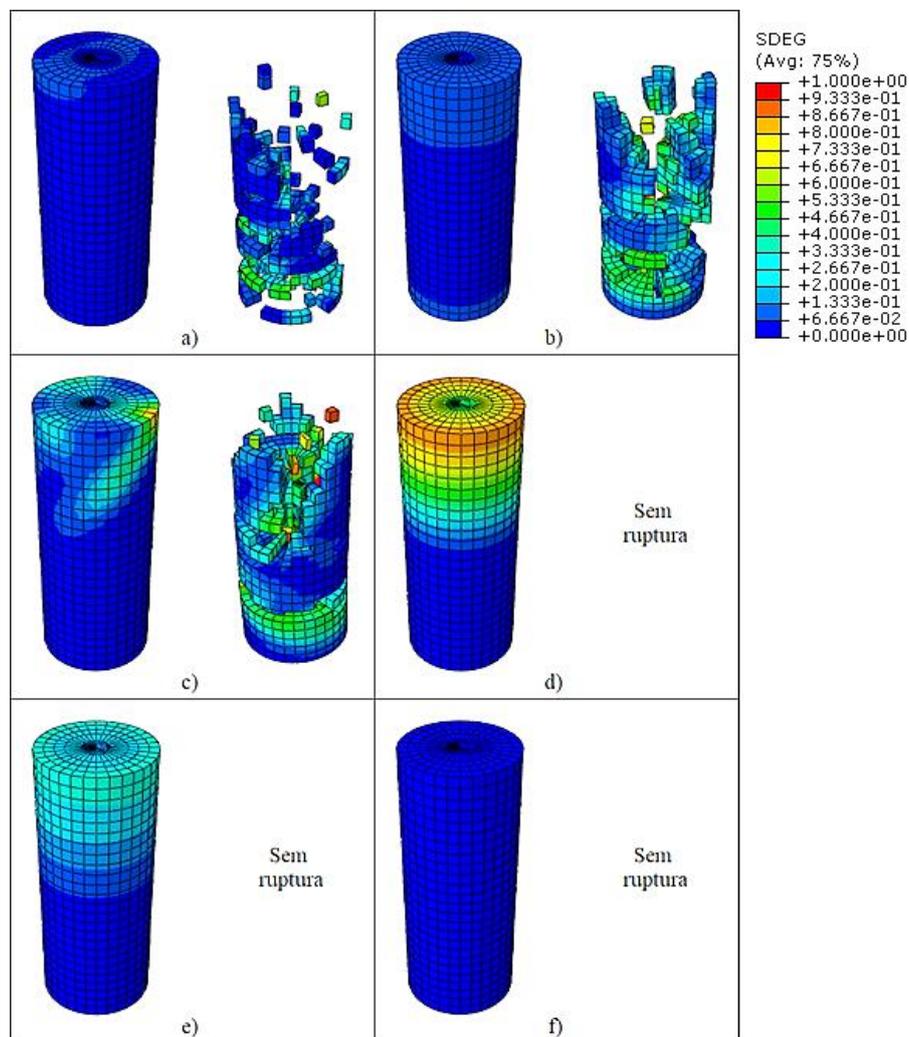


Figura 4.42. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Granito. Critério cisalhante, início do dano na  $\sigma_{cd}$  e  $\bar{u}_f^{pl}$  igual a: (a) 1,00E-06m; (b) 5,00E-06m; (c) 1,00E-05m; (d) 5,00E-05m; (e) 1,00E-04m; (f) 5,00E-04m.

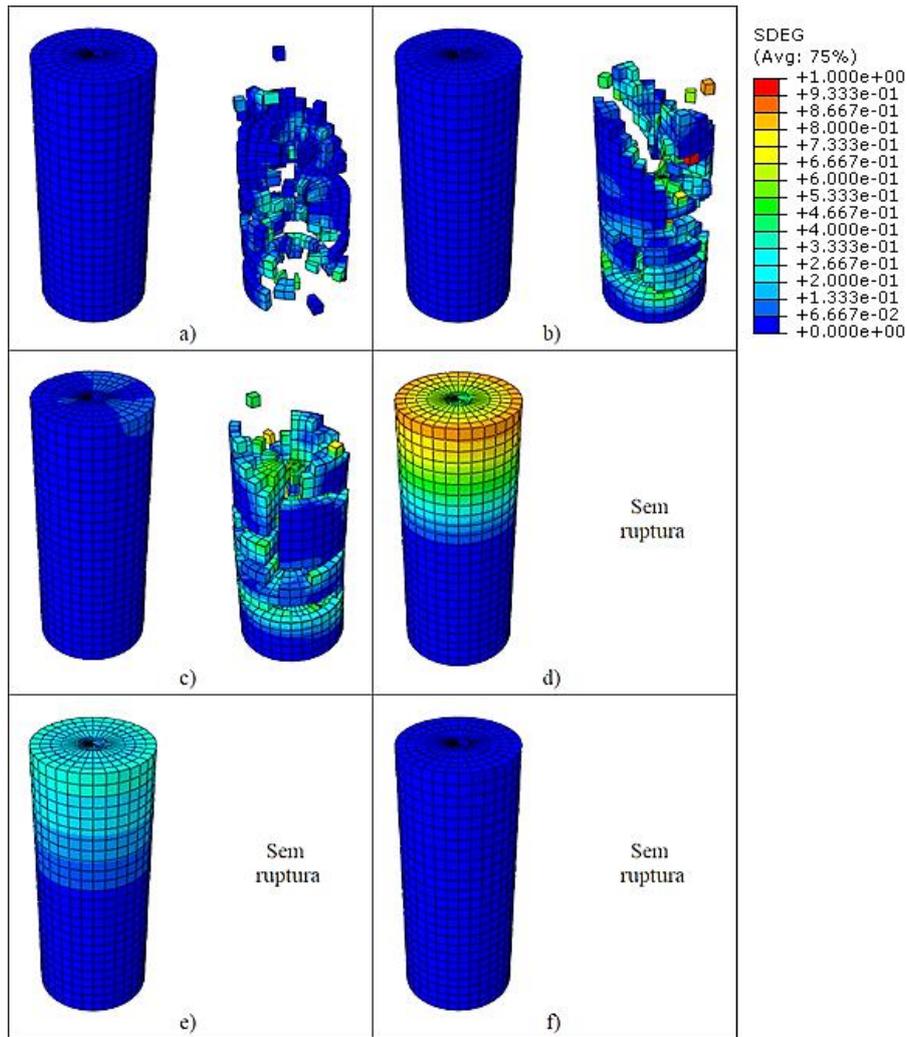


Figura 4.43. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Granito. Critério cisalhante, início do dano na  $\sigma_{m\acute{a}x}$  e  $\bar{u}_f^{pl}$  igual a: (a) 1,00E-06m; (b) 5,00E-06m; (c) 1,00E-05m; (d) 5,00E-05m; (e) 1,00E-04m; (f) 5,00E-04m.

No final, são apresentadas as imagens correspondentes à avaliação do impacto do parâmetro  $\alpha$  no desenvolvimento das zonas de ruptura para ambos os critério e pontos de início do dano, considerando o valor de  $\bar{u}_f^{pl}$  igual a 1,00E-05m. As Figuras 4.46 e 4.47 mostram os corpos de prova para os modelos com critério cisalhante e início da degradação na tensão de dano por fraturas e na tensão máxima, respectivamente, já as Figuras 4.48 e 4.49 apresentam, na mesma ordem, os cilindros correspondentes aos modelos com critério dúctil e os pontos de início do dano mencionados anteriormente.

Nas quatro imagens se pode observar que à medida que o valor do parâmetro vai aumentando, as fraturas passam de estar localizadas na parte superior do corpo de prova a se propagarem

por todo ele, sendo as fraturas inicialmente de tipo cisalhante, para os valores de  $\alpha$  menores que zero, e uma combinação entre cisalhantes e axiais para os valores positivos.

Também acontece que com o aumento do  $\alpha$ , uma maior quantidade de material é apagado como consequência da mudança na forma da função da lei de evolução que indica uma rápida degradação do material nos primeiros momentos logo de iniciado o dano, pelo que uma maior quantidade de elementos fica mais propensa a conseguir a degradação total uma vez se iniciem as fraturas.

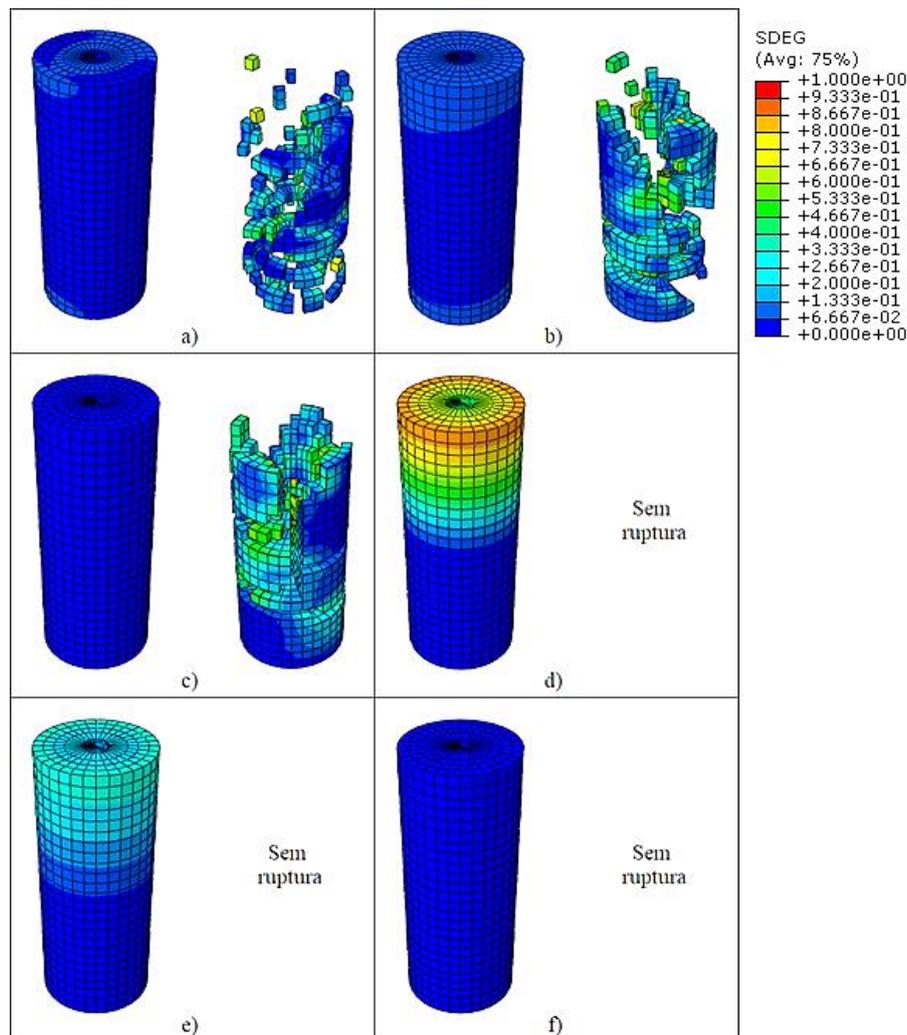


Figura 4.44. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Granito. Critério dúctil, início do dano na  $\sigma_{cd}$  e  $\bar{u}_f^{pl}$  igual a: (a) 1,00E-06m; (b) 5,00E-06m; (c) 1,00E-05m; (d) 5,00E-05m; (e) 1,00E-04m; (f) 5,00E-04m.

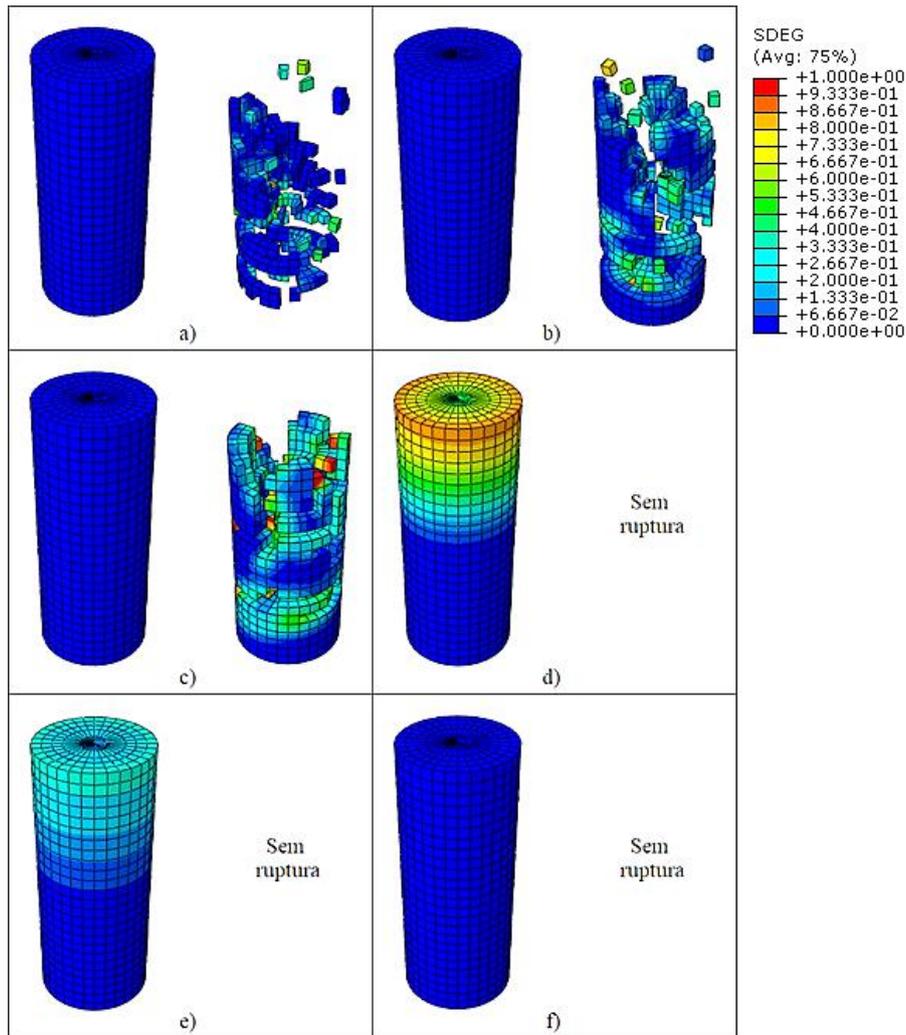


Figura 4.45. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Granito. Critério dúctil, início do dano na  $\sigma_{m\acute{a}x}$  e  $\bar{u}_f^{pl}$  igual a: (a) 1,00E-06m; (b) 5,00E-06m; (c) 1,00E-05m; (d) 5,00E-05m; (e) 1,00E-04m; (f) 5,00E-04m.

Cabe ressaltar, que para os modelos com início do dano na  $\sigma_{m\acute{a}x}$ , o ponto de falha total e a tensão pico conseguida são praticamente iguais quando o valor do  $\alpha$  é igual ou maior que -1, ainda assim, o tipo e o número das superfícies de fratura geradas mostraram ser dependentes do valor do coeficiente de forma. Em conclusão, as zonas de fratura obtidas dependem do parâmetro  $\alpha$ , onde as grandes superfícies desenvolvidas se devem ao apagado dos blocos de material que levam a uma propagação das fraturas diferentes às conseguidas nos ensaios de laboratório. Ambos os critérios de início do dano são capazes de gerar zonas de falha muito similares, ao igual que o ponto de início da degradação não representa um condicionante para que o modelo de Mecanismo de Dano consiga reproduzir o processo de degradação do Granito, incluindo a criação e propagação das fraturas acontecidas.

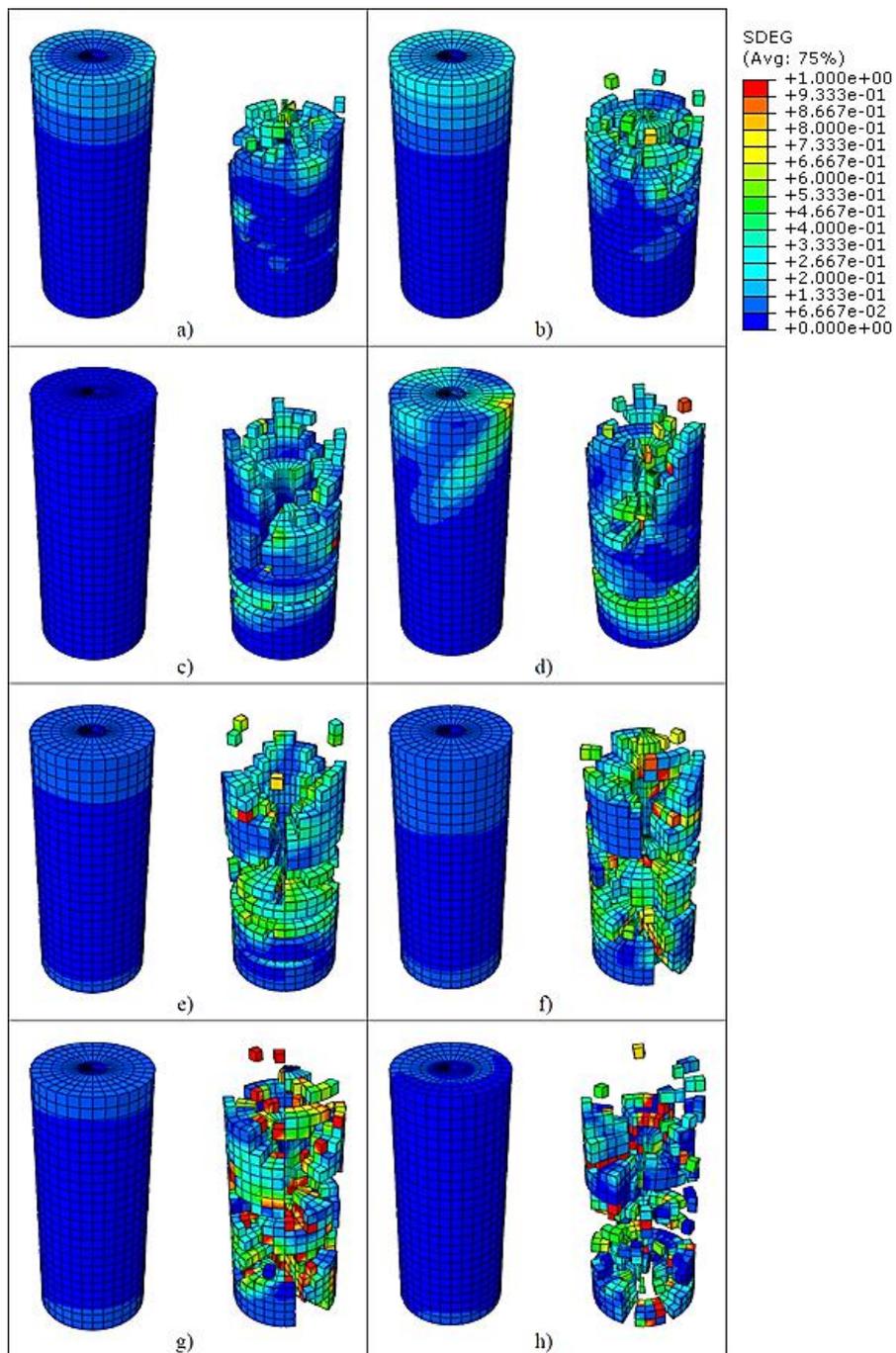


Figura 4.46. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Granito. Critério cisalhante, início do dano na  $\sigma_{cd}$  e  $\alpha$  igual a: (a) -5; (b) -3; (c) -1; (d) 0; (e) 1; (f) 3; (g) 5; (h) 10.

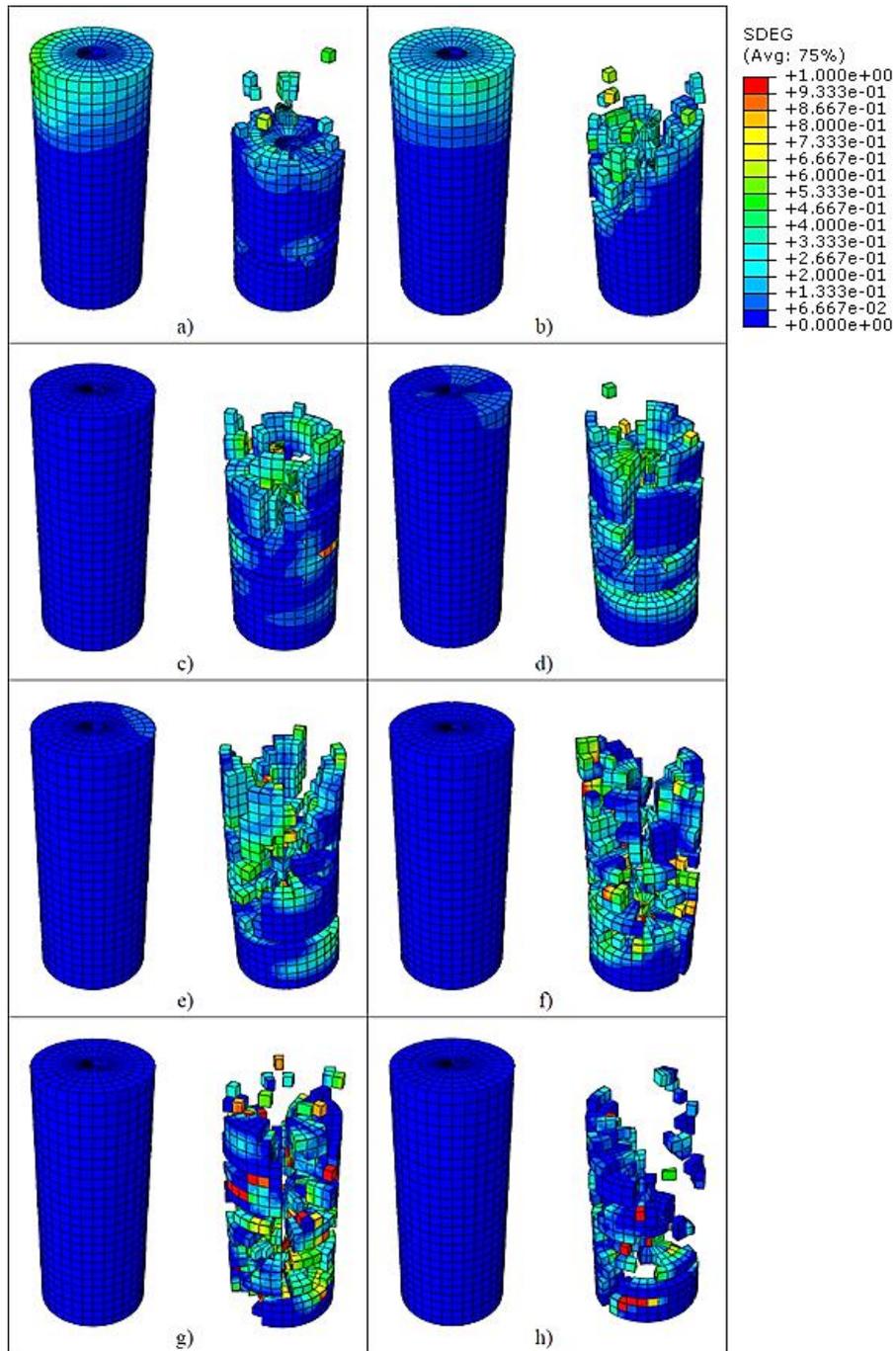


Figura 4.47. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Granito. Critério cisalhante, início do dano na  $\sigma_{m\acute{a}x}$  e  $\alpha$  igual a: (a) -5; (b) -3; (c) -1; (d) 0; (e) 1; (f) 3; (g) 5; (h) 10.

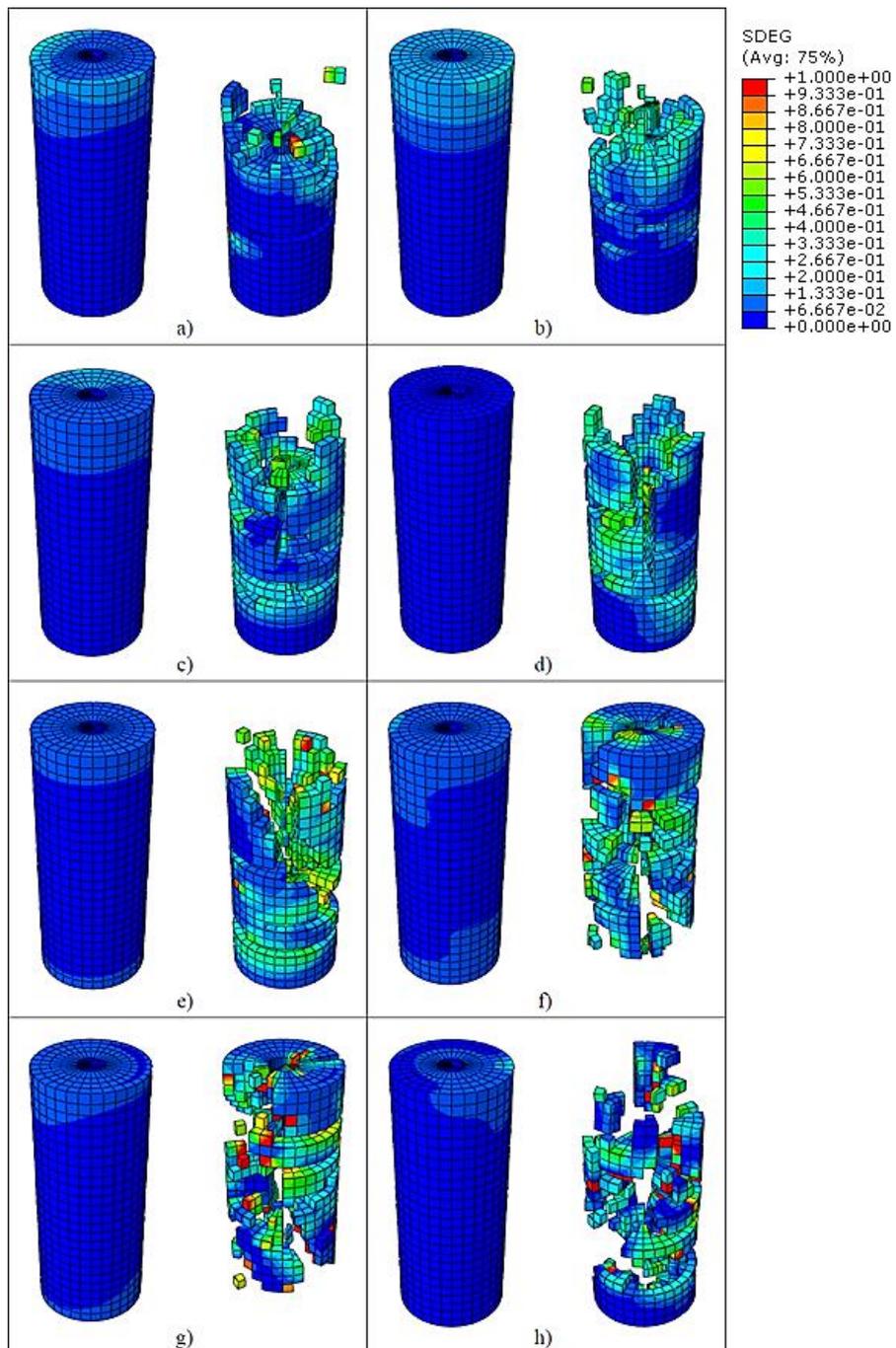


Figura 4.48. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Granito. Critério dúctil, início do dano na  $\sigma_{cd}$  e  $\alpha$  igual a: (a) -5; (b) -3; (c) -1; (d) 0; (e) 1; (f) 3; (g) 5; (h) 10.

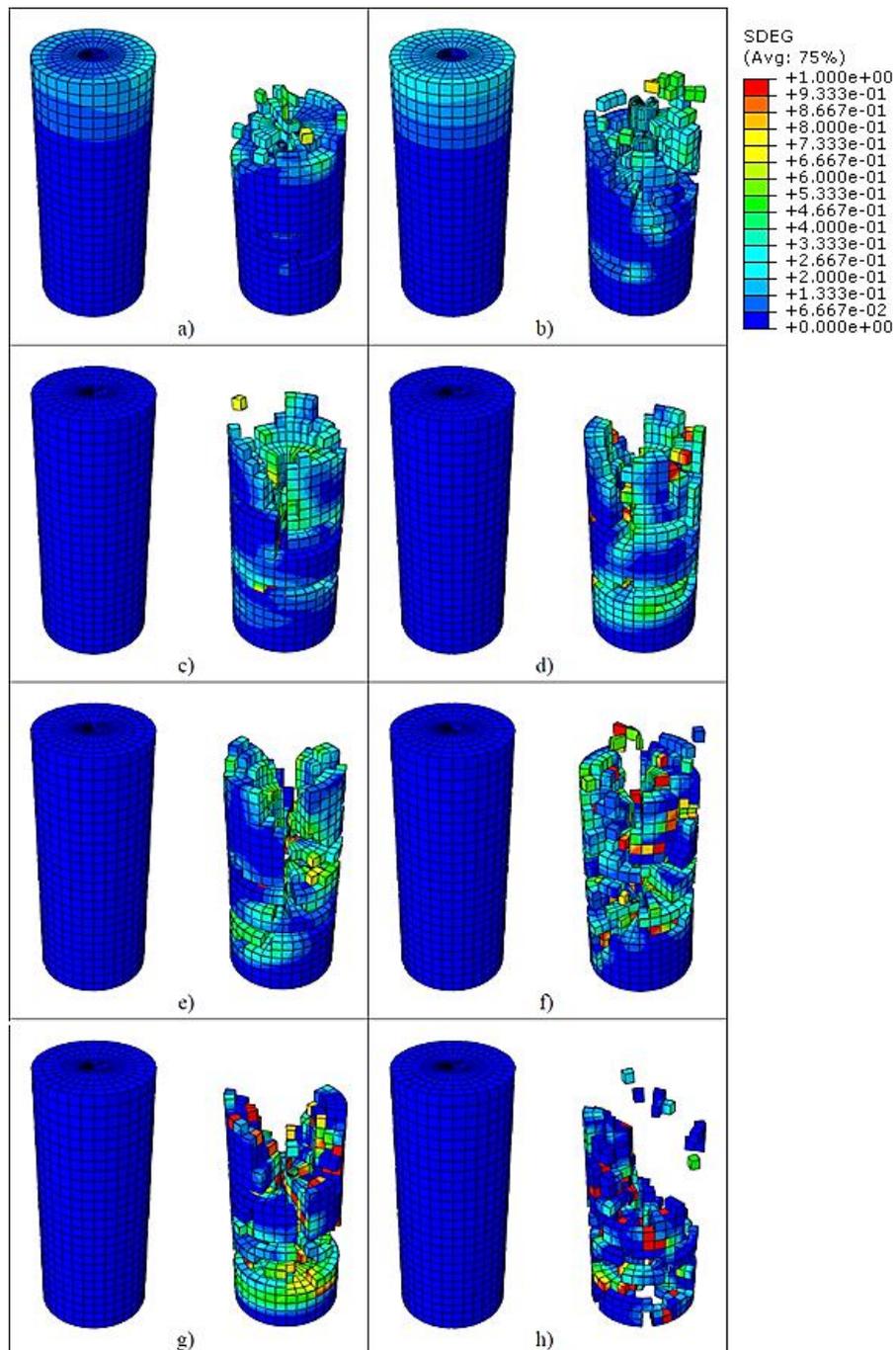


Figura 4.49. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para o material Granito. Critério dúctil, início do dano na  $\sigma_{máx}$  e  $\alpha$  igual a: (a) -5; (b) -3; (c) -1; (d) 0; (e) 1; (f) 3; (g) 5; (h) 10.

#### 4.2.3. Considerações finais

Na representação do comportamento frágil do Granito pode-se concluir que os parâmetros de deslocamento na falha e de forma da lei de evolução do dano seguem sendo os mais

relevantes em quanto ao ajuste da curva tensão-deformação como na representação da superfície de fratura. Igualmente o valor do ângulo de dilatância também afeta a forma da zona rompida e para este caso o parâmetro  $K$  também gera uma mudança nas superfícies de fratura desenvolvidas.

Ao igual que aconteceu com o Arenito, os dois critérios avaliados podem ser usados na modelagem efetiva do Granito, sem importar o ponto do início da degradação visto que pode ser calibrada a função de evolução do dano de modo que a curva tensão-deformação do modelo se aproxime dos resultados do ensaio de compressão uniaxial. Na Figura 4.50 se apresentam as leis de evolução do dano que permitem o melhor ajuste das curvas para os dois critérios e pontos de início do dano considerados, priorizando a aproximação da densidade de energia de deformação e obtendo as respostas apresentadas na mesma figura, empregando o valor dos outros parâmetros mostrados na Tabela 4.2.

Como se pode observar, para os modelos com início do dano na tensão máxima foi empregada uma lei de tipo linear sem importar o critério utilizado, já que se conseguiram superfícies de ruptura de tipo axial que são mais aproximadas ao que acontece com rochas de

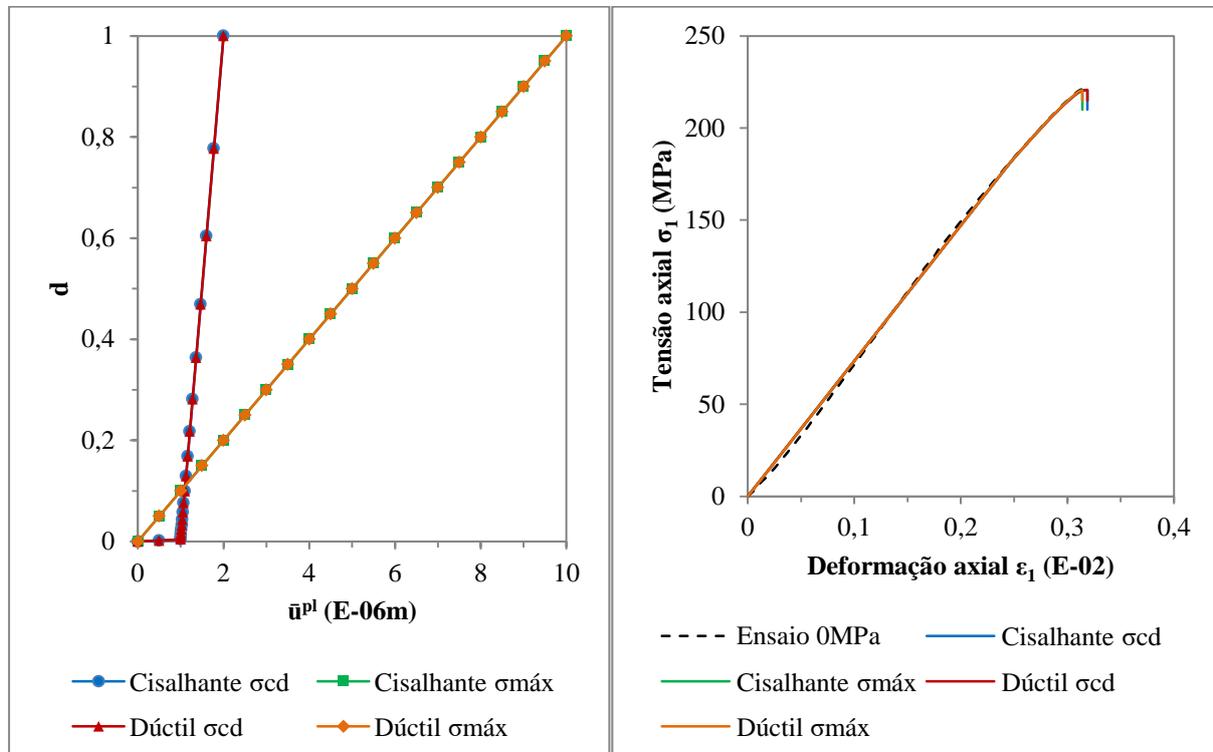


Figura 4.50. Melhor ajuste obtido da curva tensão-deformação (direita) para o Granito usando a lei de evolução do dano inserida de forma tabular (esquerda), para os diferentes critérios e pontos do início do dano.

alta resistência neste tipo de condição de carregamento, ainda que diferentes às lascas obtidas no ensaio de laboratório para o Granito, como se observa na Figura 4.51. Para os casos com início do dano na  $\sigma_{cd}$  foi necessária uma pequena degradação inicial da rocha, de modo que a curva tensão-deformação atingisse a tensão pico esperada, logo o dano cresceu rapidamente para lograr uma ruptura frágil do material, ocasionando um tipo de falha mais parecido a fraturas por cisalhamento com uma grande quantidade do material completamente degradado, tanto para o critério cisalhante como para o dúctil.

Tabela 4.2. Valores dos parâmetros usados nos modelos que melhor ajustam a curva tensão-deformação para o Granito.

$\psi$	27,97°
$K$	0,778
$k_s$ *	1
$\dot{\epsilon}^{pl}$	5,00E-05/s
Velocidade de carregamento	6,25E-04m/s

\* Para os modelos com critério cisalhante

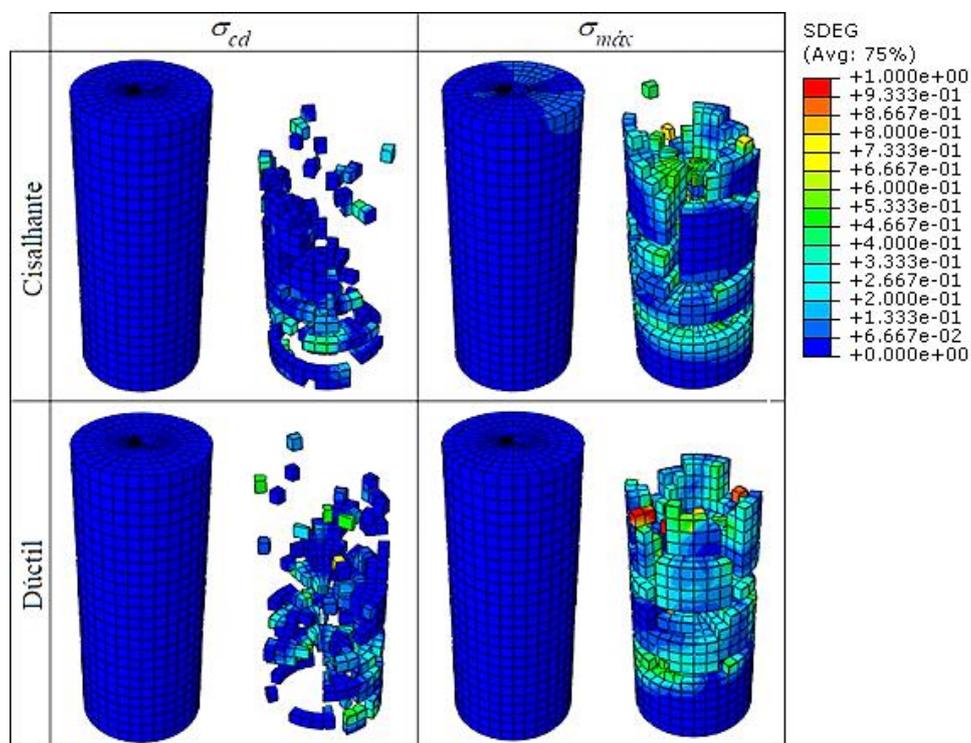


Figura 4.51. Corpos de prova do modelo que melhor ajusta a curva tensão-deformação do Granito, um instante anterior (esquerda) e posterior (direita) do momento da ruptura total para os dois critérios e pontos de início do dano.

Se bem ambos os critérios apresentam um bom desempenho para simular a resposta do Granito em compressão simples, as superfícies obtidas não são satisfatórias, devido a que o tamanho da malha considerada afeta a propagação das fraturas e, por conseguinte, o tipo de falha apresentada. Adicionalmente, o apagado dos elementos cria um espaço vazio que possibilita o deslocamento dos blocos de material rompido, ignorando a interação entre as novas superfícies geradas e seu impacto na resposta do modelo.

## 5. MODELAGEM DE ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL

### 5.1. TRIAXIAL ARENITO

Usando a mesma geometria do modelo empregado para simular o ensaio de compressão uniaxial, foi aplicada uma tensão de confinamento de 10MPa, 30MPa e 70MPa a fim de modelar o comportamento do Arenito em compressão triaxial convencional. Igualmente foram avaliados os dois pontos e critérios do início do dano, usando os valores dos parâmetros que permitiram o melhor ajuste das curvas em compressão não confinada, para definir no final quais deles são os mais convenientes para aproximar o comportamento da rocha, tendo em conta a resposta e as fraturas desenvolvidas.

Iniciando com o critério cisalhante e o início do dano na  $\sigma_{cd}$  os resultados obtidos se mostram na Figura 5.1, notando-se como o modelo não consegue prever o comportamento da rocha submetida a confinamento lateral, já que os valores de tensão pico e da deformação na qual acontece a ruptura total são muito menores aos conseguidos nos ensaios de laboratório. A inexatidão do modelo se deve a que o programa utilizado não pede o valor de coesão  $a$

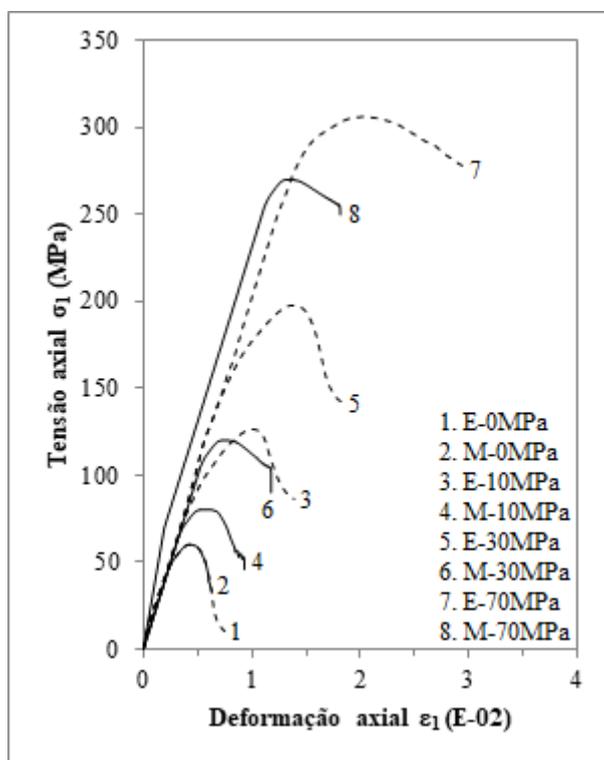


Figura 5.1. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem dos ensaios triaxiais para o Arenito com início do dano na  $\sigma_{cd}$  e critério cisalhante (E: Ensaio, M: Modelo).

obtida do ajuste dos dados para a envoltória de Drucker-Prager, e pelo contrario vai sendo calculada à medida que o material vai se endurecendo graças aos dados subministrados de tensão de endurecimento versus deformação plástica, além disso, o ponto que representa o ensaio de compressão uniaxial na Figura 3.3 fica embaixo da envoltória de ruptura calculada, pelo que a envoltória gerada no programa fica igualmente debaixo dela, dando como resultado curvas com uma tensão máxima menor à esperada. Na Figura 5.2 se mostra uma representação do que está acontecendo com o modelo, observa-se o deslocamento da envoltória de ruptura para baixo como produto da estimação feita pelo programa a partir dos dados de compressão uniaxial, passando justo pelo ponto que representa a falha para esta condição de carregamento. Os outros pontos correspondentes às simulações com confinamento não ficam exatamente na linha deslocada por causa do modelo de dano utilizado.

Em um intento para que o modelo consiga representar o comportamento triaxial da rocha, foram modificados os dados de tensão de endurecimento de modo que o ponto no plano  $p - q$  para a condição de compressão uniaxial ficara sobre a envoltória de ruptura ajustada inicialmente, obtendo as curvas apresentadas na Figura 5.3. A alteração do modelo consistiu simplesmente na prolongação da zona elástica mantendo a forma original da parte elasto-plástica da curva tensão-deformação para compressão não confinada, dando como resultado

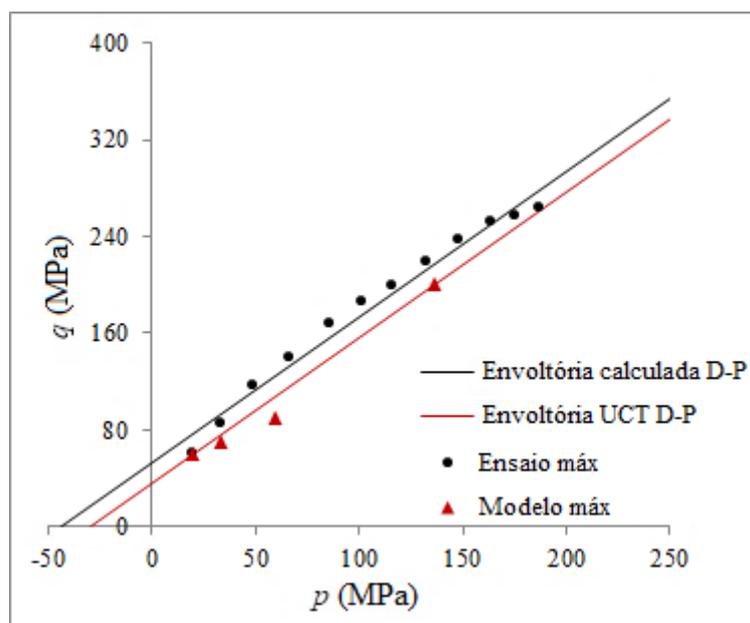


Figura 5.2. Diferencia entre a envoltória de ruptura ajustada (preta) e a assumida pelo programa a partir do UCT (vermelha) para o Arenito.

os valores mostrados na Tabela 5.1. Já na Figura 5.4 se demonstra que com o modelo modificado, os resultados de compressão triaxial ficam em linha com a envoltória de ruptura calculada e, junto com as curvas obtidas, se pode concluir que a aproximação é muito boa enquanto à tensão máxima resistida e a representação do amolecimento.

A modificação feita ao modelo nasce da pobre aproximação que se obteve ao utilizar uma envoltória de ruptura de tipo linear para os dados de compressão triaxial de rochas, sendo necessária a definição da faixa aceitável do ajuste para que o modelo consiga representar acertadamente o comportamento do material, o qual deve conter o intervalo de tensões de confinamento que se esperam achar na realidade (intervalo de trabalho). Em caso tal que o ajuste linear não dê resultados admissíveis, deve ser mudado para outras aproximações como, por exemplo, as de tipo exponencial ou hiperbólica, ou considerar outros modelos constitutivos mais complexos.

Na Figura 5.5 se exibem os corpos de prova no momento da ruptura total para as diferentes tensões de confinamento avaliadas e os dois ajustes realizados, o primeiro considerando a melhor aproximação do ensaio de compressão uniaxial e o segundo quando foi mudada a

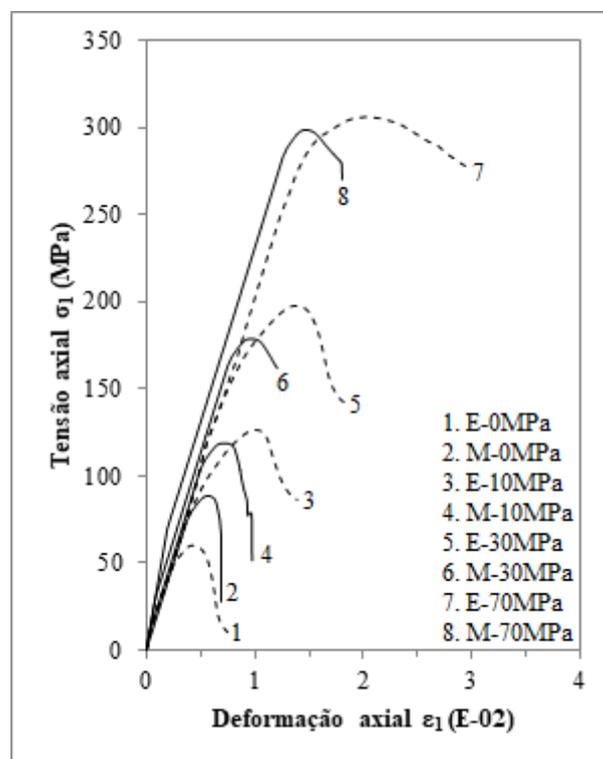


Figura 5.3. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem dos ensaios triaxiais para o Arenito com início do dano na  $\sigma_{cd}$  e critério cisalhante, com o modelo ajustado para a envoltória de ruptura calculada (E: Ensaio, M: Modelo).

plastificação do material para que alcançasse a envoltória de ruptura calculada. Desta imagem se pode inferir que as superfícies de ruptura desenvolvidas não coincidem com as relatadas pelos autores dos ensaios, já que para as tensões de confinamento menores a 40MPa se obteve

Tabela 5.1. Evolução das deformações plásticas com a tensão de endurecimento usada no ajuste da curva de compressão uniaxial para a envoltória de ruptura calculada do Arenito.

$\sigma_{ytrue}$ (MPa)	$\varepsilon_{true}^{pl}$
73,67	0
78,70	1,159E-04
80,54	2,342E-04
82,04	3,403E-04
83,76	4,482E-04
85,22	5,686E-04
86,90	7,135E-04
87,84	8,251E-04
88,27	9,351E-04
88,56	1,023E-03
88,75	1,147E-03
88,91	1,383E-03

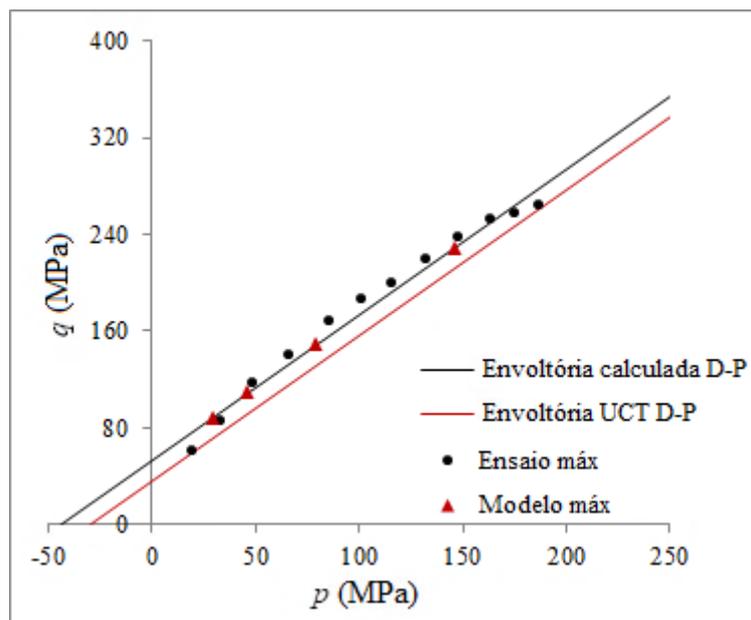


Figura 5.4. Pontos obtidos logo do ajuste do modelo que mostram sua aproximação da envoltória de ruptura calculada.

um esmagamento do material nas zonas em contato com as placas de carga, enquanto que para tensões maiores se registra um apagado de grandes blocos de material sem se evidenciar regiões de cisalhamento claras.

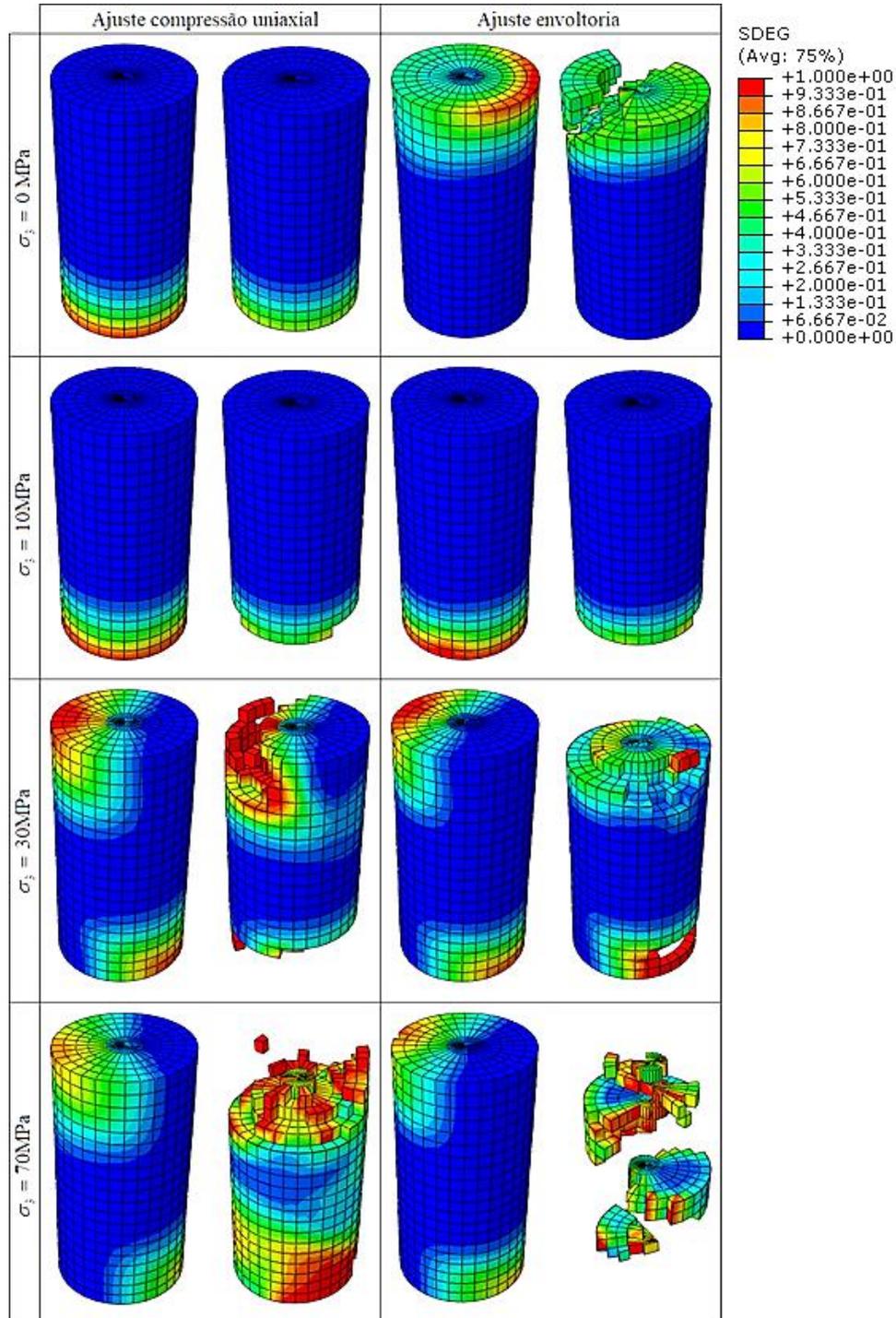


Figura 5.5. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para os ensaios triaxiais do Arenito considerando o critério cisalhante, início do dano na  $\sigma_{cd}$  e ambos os ajustes realizados.

Um procedimento similar foi feito para os modelos com critério cisalhante e início do dano na tensão máxima, aplicando a mesma modificação na plastificação do material do caso anterior e obtendo as curvas mostradas na Figura 5.6. Nota-se como o ajuste realizado do ensaio de compressão uniaxial provoca uma pobre aproximação das curvas para os modelos com confinamento, enquanto o ajuste feito da envoltória de ruptura permite um melhor acercamento dos resultados triaxiais experimentais. Por outra parte, para ambos os ajustes se observa a geração de um tramo reto justo quando se atinge a tensão pico, devido aos dados inseridos da deformação na qual acontece o início do dano; em outras palavras, quando é introduzido o modelo de Mecanismo de Dano, são definidas as deformações plásticas no início da degradação do material para diferentes tensões de confinamento; como o modelo atinge rapidamente a tensão pico, o nível de deformação plástica é menor ao especificado, portanto, o material se comporta perfeitamente plástico até esse ponto a partir o qual a rocha começa a se degradar, significando que o modelo não consegue reproduzir a variação da forma das curvas de tensão-deformação para diferentes estados de confinamento.

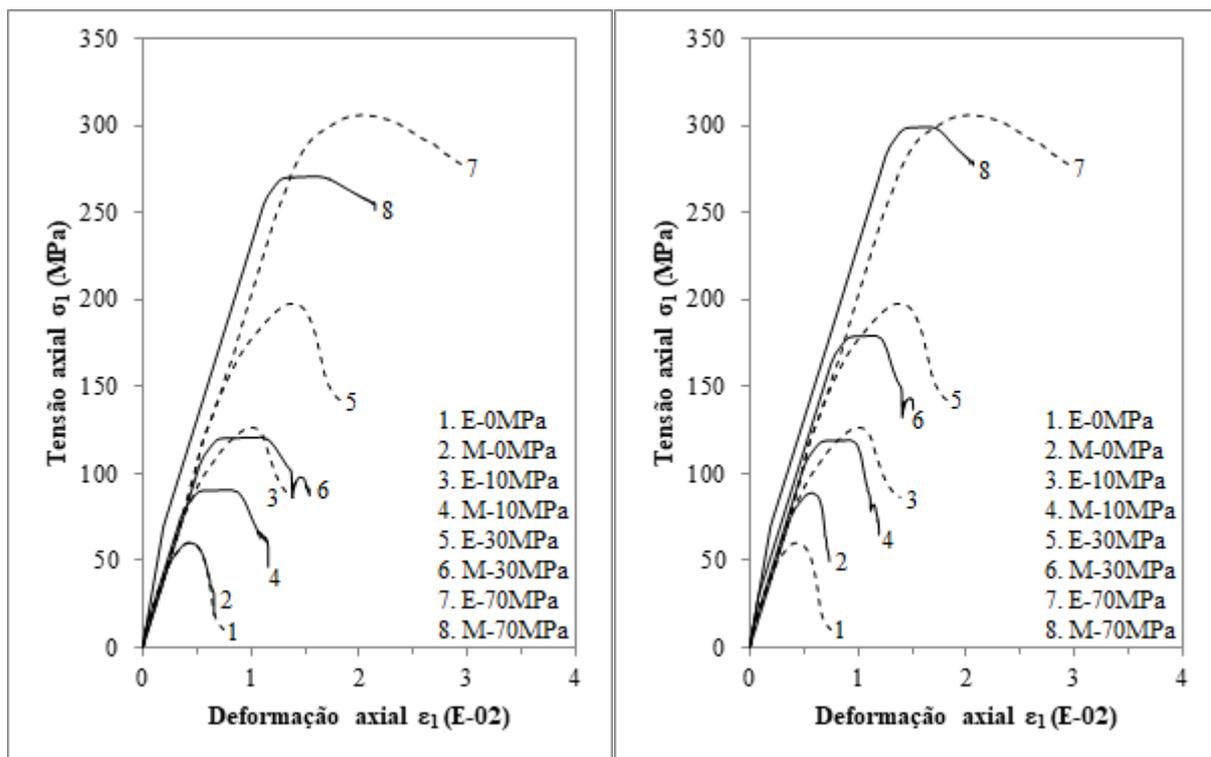


Figura 5.6. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem dos ensaios triaxiais para o Arenito com início do dano na  $\sigma_{max}$  e critério cisalhante, com o ajuste do UCT (esquerda) e da envoltória de ruptura (direita) (E: Ensaio, M: Modelo).

As imagens dos corpos de prova se mostram na Figura 5.7 evidenciando igualmente uma discordância das superfícies de fratura geradas, acontecendo um esmagamento similar do material nas zonas próximas às placas para todas as tensões de confinamento analisadas.

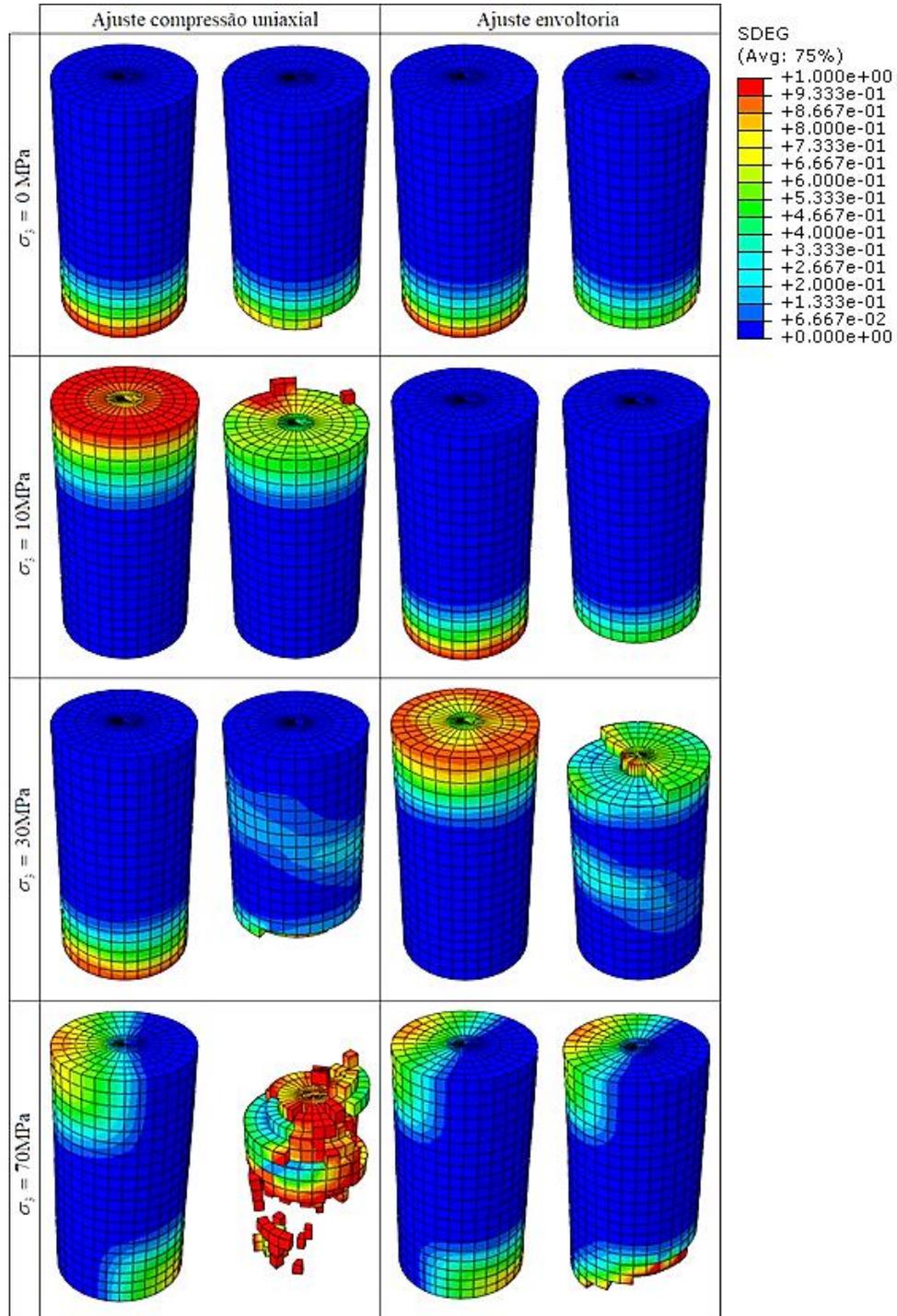


Figura 5.7. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para os ensaios triaxiais do Arenito considerando o critério cisalhante, início do dano na  $\sigma_{m\acute{a}x}$  e ambos os ajustes realizados.

Aplicando a mesma metodologia, foram modelados os mesmos ensaios triaxiais mudando o critério do início do dano para o dúctil, obtendo os resultados apresentados na Figura 5.8, quando o início da degradação foi localizado na tensão de dano por fraturas, e na Figura 5.9 para o início na tensão máxima.

Da mesma forma que aconteceu com os modelos com critério cisalhante, a aproximação lograda considerando os dados que permitiram o melhor ajuste do ensaio de compressão uniaxial foi inferior que aquela conseguida para os modelos onde foi modificado o comportamento plástico do material, obtendo curvas praticamente idênticas para os dois critérios e os respectivos pontos de início do dano. Nota-se também que quando a degradação começa na tensão máxima, se apresenta o mesmo tramo horizontal uma vez atingida a tensão pico, tal e como foi explicado anteriormente, concluindo-se que a adoção do início do dano na tensão de dano por fraturas leva a um comportamento mais racional do modelo e permite uma melhor representação da resposta da rocha.

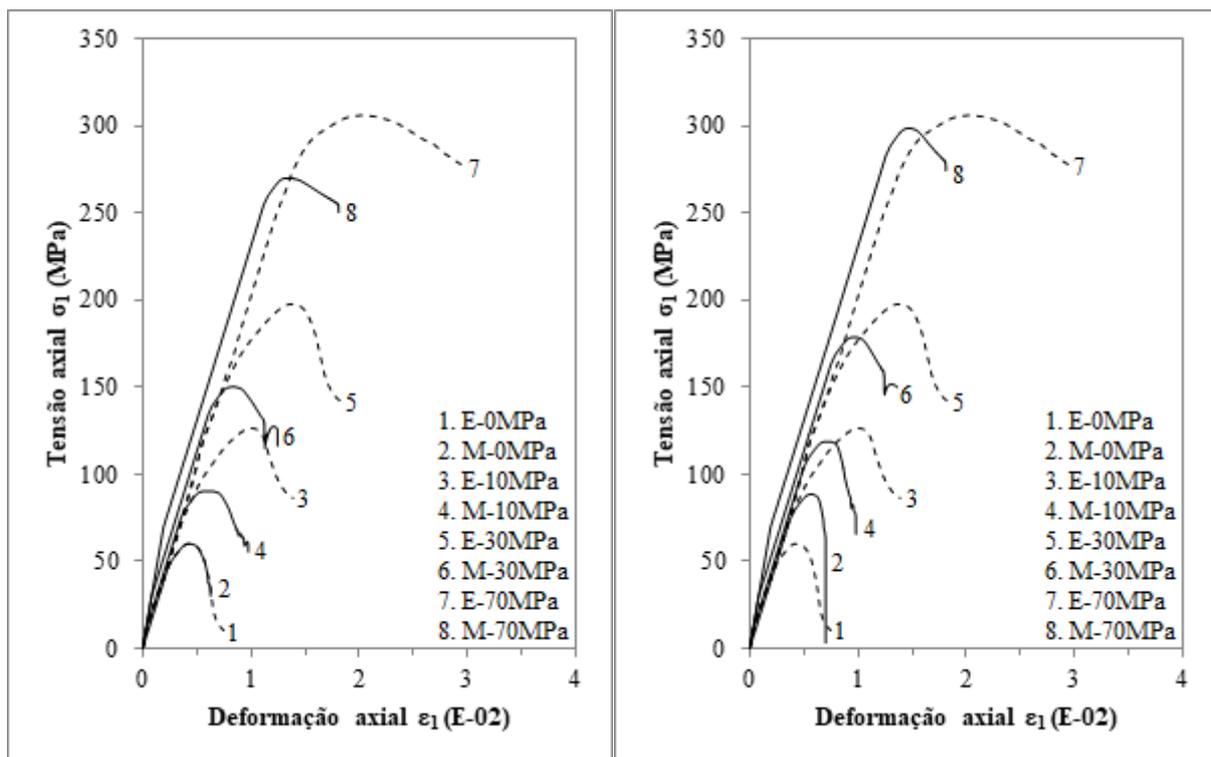


Figura 5.8. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem dos ensaios triaxiais para o Arenito com início do dano na  $\sigma_{cd}$  e critério dúctil, com o ajuste do UCT (esquerda) e da envoltória de ruptura (direita) (E: Ensaio, M: Modelo).

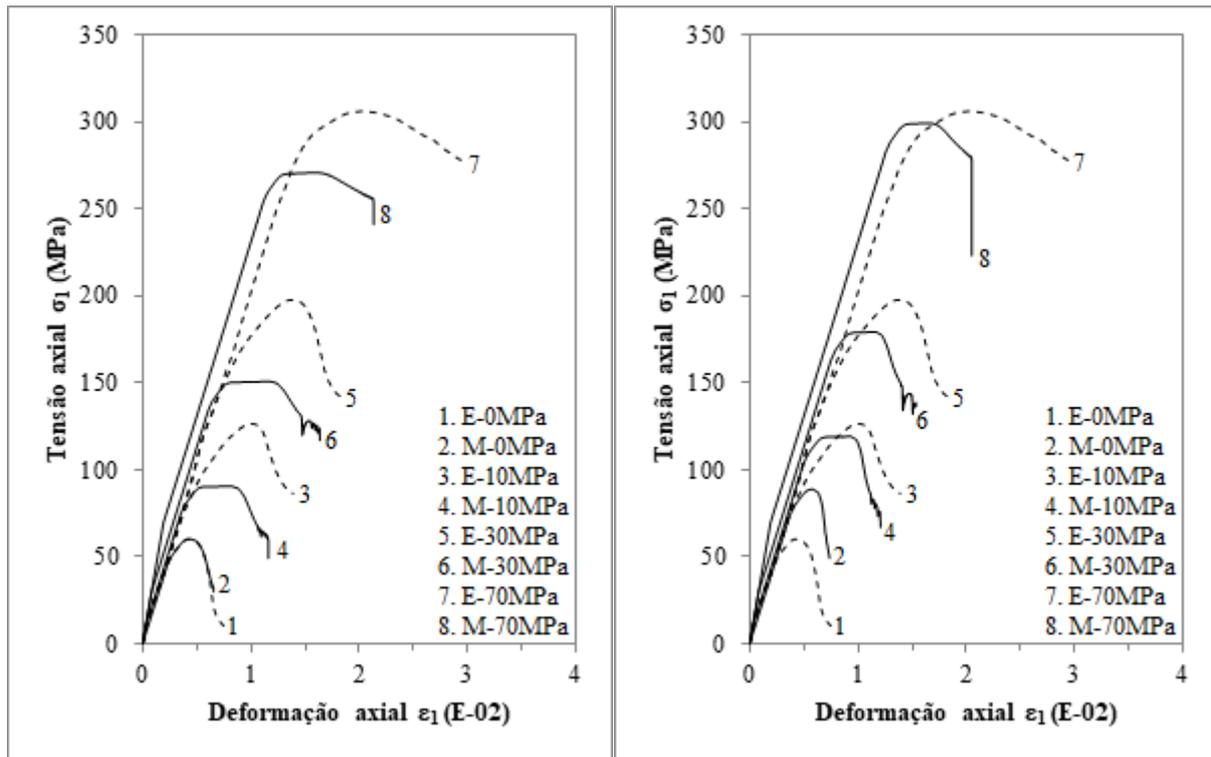


Figura 5.9. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem dos ensaios triaxiais para o Arenito com início do dano na  $\sigma_{m\acute{a}x}$  e critério dúctil, com o ajuste do UCT (esquerda) e da envoltória de ruptura (direita) (E: Ensaio, M: Modelo).

As Figuras 5.10 e 5.11 mostram os cilindros no momento da ruptura total dos modelos com critério dúctil e início do dano na  $\sigma_{cd}$  e na  $\sigma_{m\acute{a}x}$  respectivamente, evidenciando-se superfícies de fraturas similares às conseguidas para o critério cisalhante, pelo que qualquer dos dois critérios de início do dano podem ser usados na modelagem do Arenito.

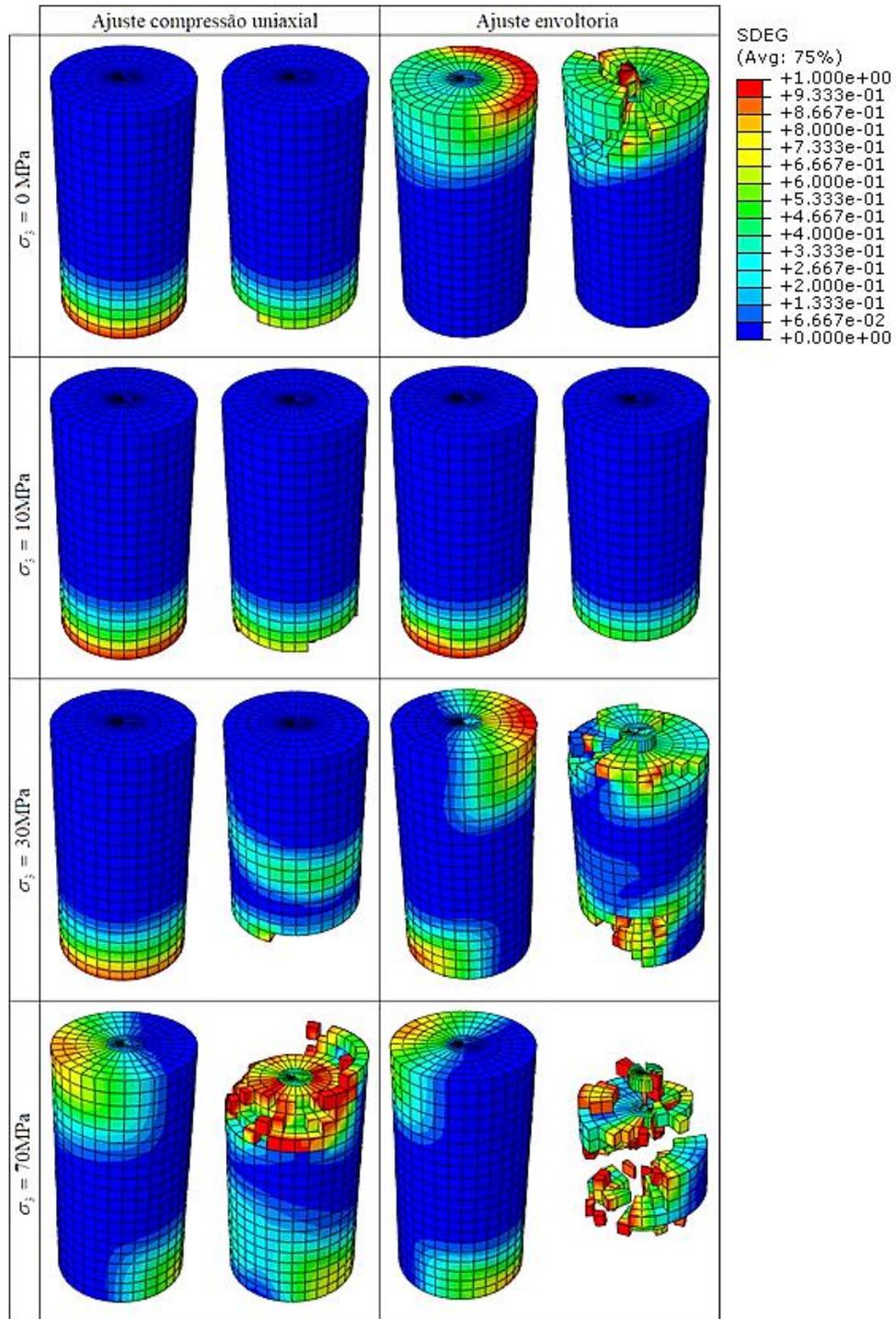


Figura 5.10. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para os ensaios triaxiais do Arenito considerando o critério dúctil, início do dano na  $\sigma_{cd}$  e ambos os ajustes realizados.

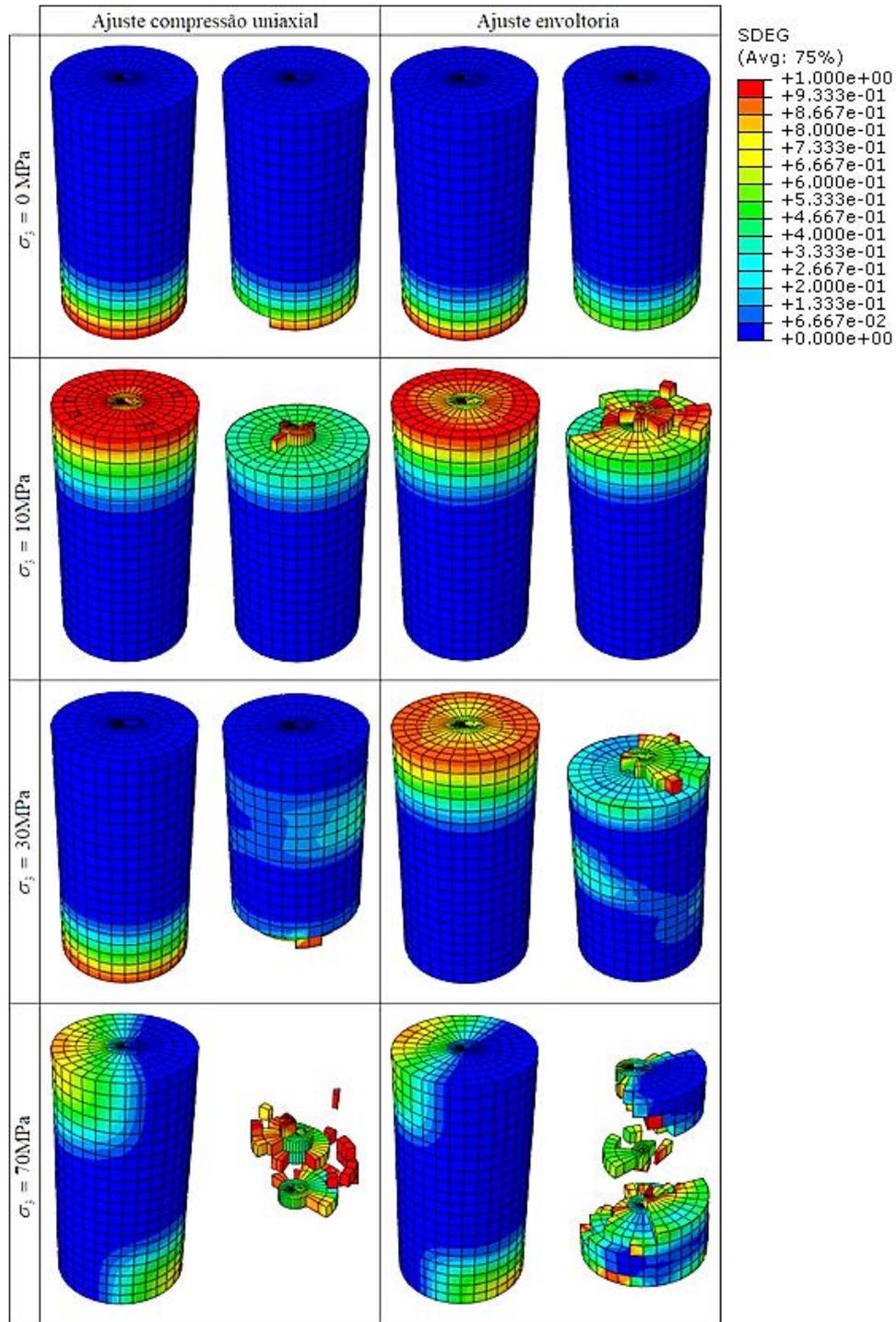


Figura 5.11. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para os ensaios triaxiais do Arenito considerando o critério dúctil, início do dano na  $\sigma_{máx}$  e ambos os ajustes realizados.

## 5.2. TRIAXIAL GRANITO

Para o caso da modelagem dos ensaios triaxiais para o Granito, foram aplicadas as tensões de confinamento de 5MPa, 10MPa e 20MPa, assumindo a mesma geometria do modelo apresentada na Figura 4.28. Como a envoltória de ruptura linear conseguida para esta rocha se aproxima muito bem dos resultados experimentais (ver Figura 3.7) não foi necessário modificar e evolução das deformações plásticas para lograr uma boa representação do comportamento do material, como aconteceu com o Arenito. Ao final, foram avaliados também os dois pontos de inicio dano e os dois critérios considerados durante as modelagens anteriores, assumindo os mesmos valores dos parâmetros que permitiram o melhor ajuste da curva de compressão uniaxial, obtendo-se os resultados mostrados nas Figuras 5.12 e 5.13.

Como se pode observar, os resultados conseguidos se aproximam muito bem dos dados experimentais para as diferentes tensões de confinamento, independentemente do critério e ponto de inicio do dano utilizado. Por outra parte, do mesmo modo que aconteceu com o Arenito, quando se supõe o inicio do dano na tensão máxima cria-se um trecho horizontal ao

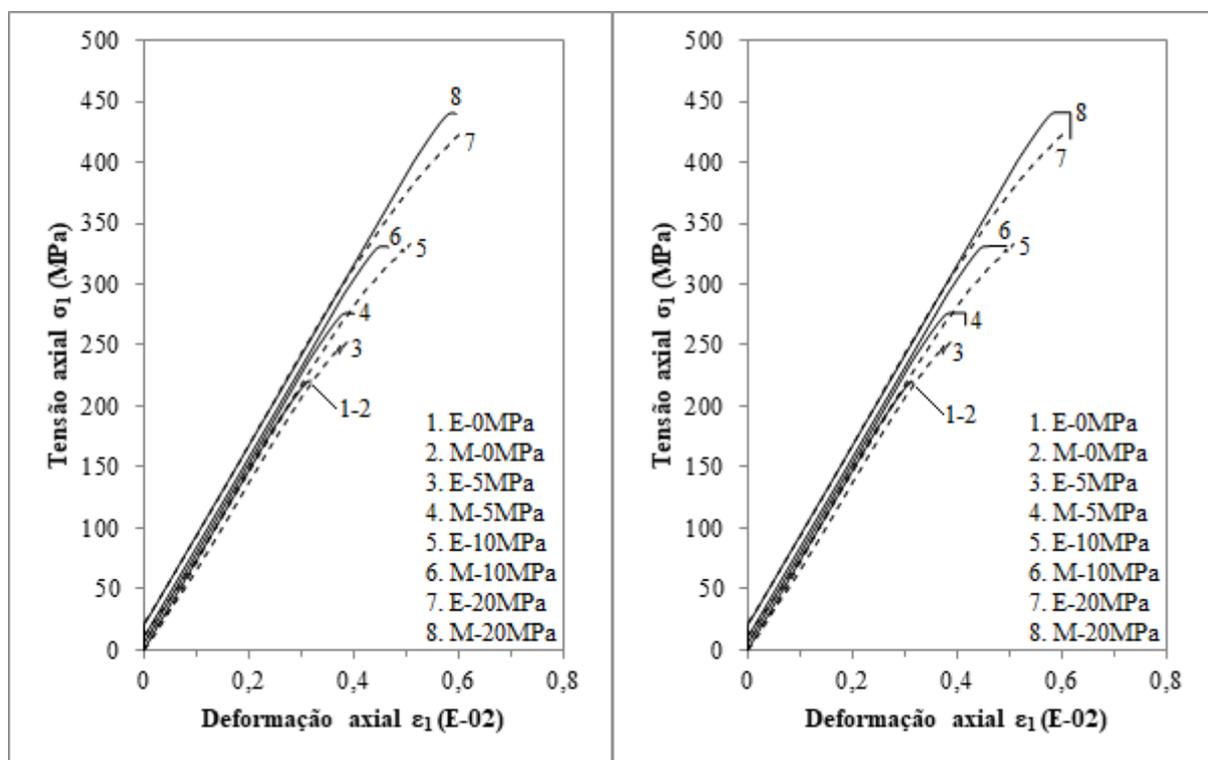


Figura 5.12. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem dos ensaios triaxiais para o Granito com critério cisalhante e inicio do dano na  $\sigma_{cd}$  (esquerda) e na  $\sigma_{m\acute{a}x}$  (direita) (E: Ensaio, M: Modelo).

ser alcançada a tensão pico, causado porque o modelo atinge rapidamente este nível de tensão a uma deformação plástica menor que aquela considerada como de início do dano, pelo que o material plastifica perfeitamente até esse ponto, ocorrendo depois a ruptura frágil do material. Por este motivo, os modelos com início do dano na  $\sigma_{cd}$  permitem uma evolução do comportamento da rocha mais natural, pelo que pode ser considerada como a melhor opção para conseguir uma boa representação do Granito.

As Figuras 5.14 e 5.15 mostram os corpos de prova obtidos para os modelos com critério cisalhante e início do dano na  $\sigma_{cd}$  e na  $\sigma_{máx}$  respectivamente, para as diferentes condições de confinamento; igualmente as Figuras 5.16 e 5.17 apresentam na mesma ordem os cilindros correspondentes aos modelos com critério dúctil para os mesmos pontos de início da degradação.

Nota-se como o ponto de início do dano afeta consideravelmente as fraturas conseguidas independentemente do critério utilizado, já que quando ele coincide com a tensão de dano por fraturas, grande parte do material é apagada, dificultando a identificação dos tipos de

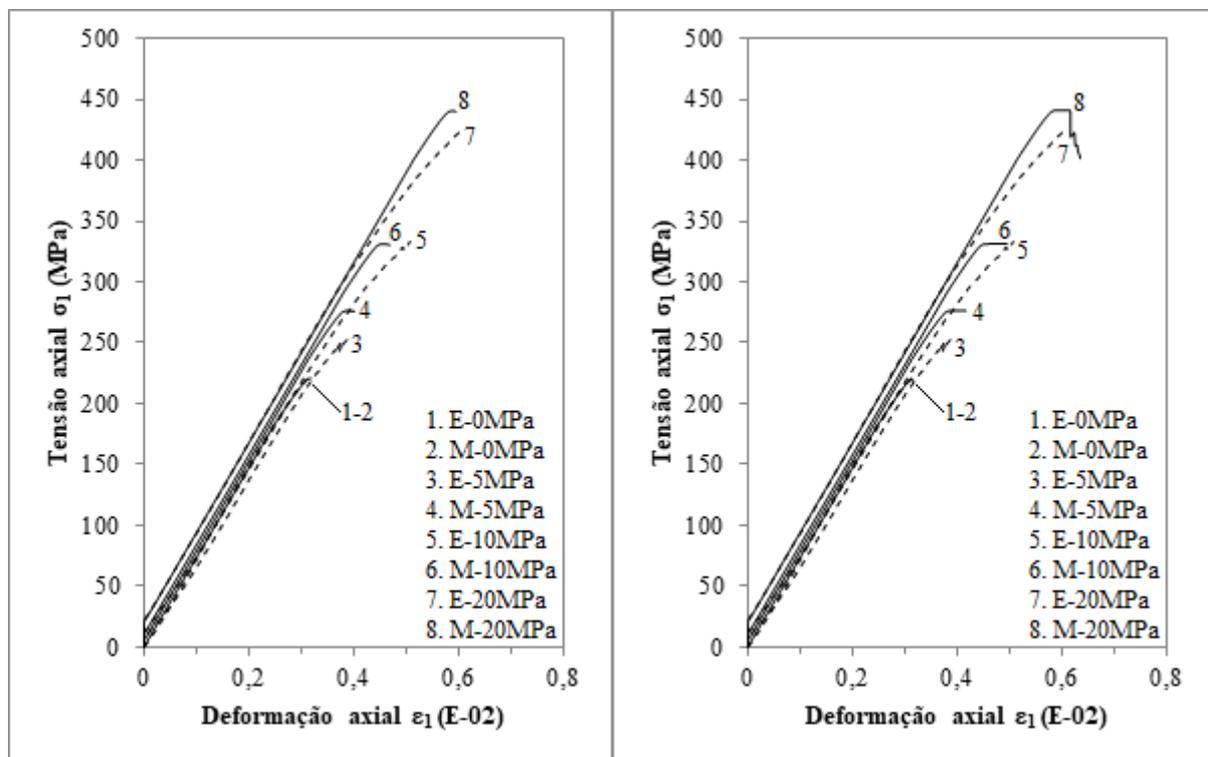


Figura 5.13. Curvas tensão-deformação obtidas da modelagem dos ensaios triaxiais para o Granito com critério dúctil e início do dano  $\sigma_{cd}$  (esquerda) e na  $\sigma_{máx}$  (direita) (E: Ensaio, M: Modelo).

superfícies desenvolvidas e sua comparação com as imagens dos ensaios de laboratório (Figura 3.6). Em contrapartida, quando o início do dano acontece na tensão máxima, maior quantidade do material permanece sem atingir a degradação máxima, permitindo identificar várias superfícies de tipo cisalhante e axiais semelhantes às conseguidas nos modelos de compressão uniaxial.

Em conclusão, qualquer dos dois critérios avaliados permite uma boa aproximação do comportamento frágil do Granito para a faixa de tensões de confinamento analisada, supondo o início do dano na tensão de dano por fraturas sem importar que ele não permita a identificação das zonas de ruptura geradas, já que como foi dito anteriormente, prevalece o ajuste das curvas de tensão versus deformação antes que as superfícies de falha conseguidas.

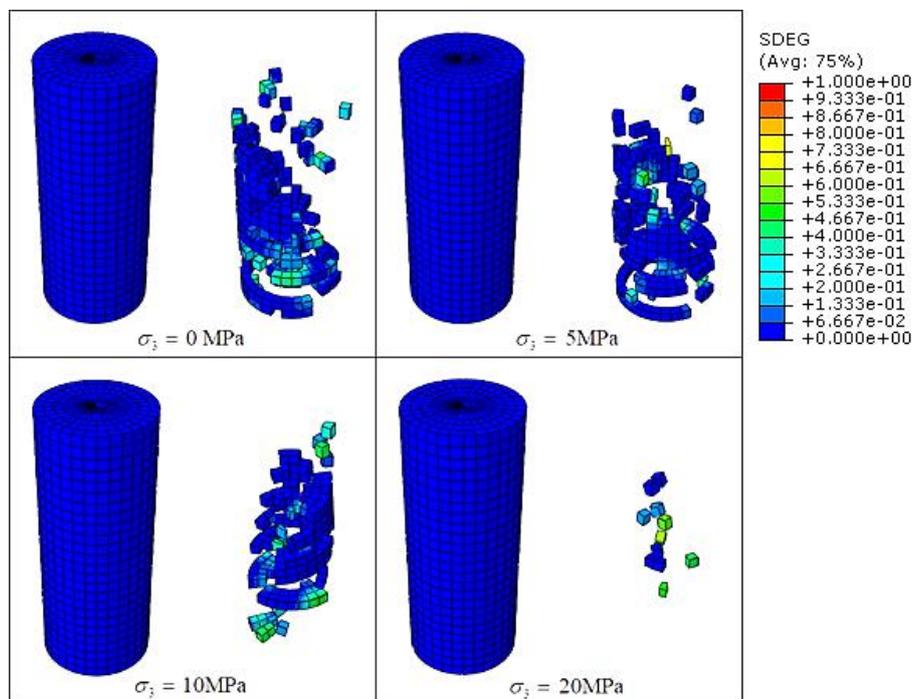


Figura 5.14. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para os ensaios triaxiais do Granito considerando o critério cisalhante e início do dano na  $\sigma_{cd}$ .

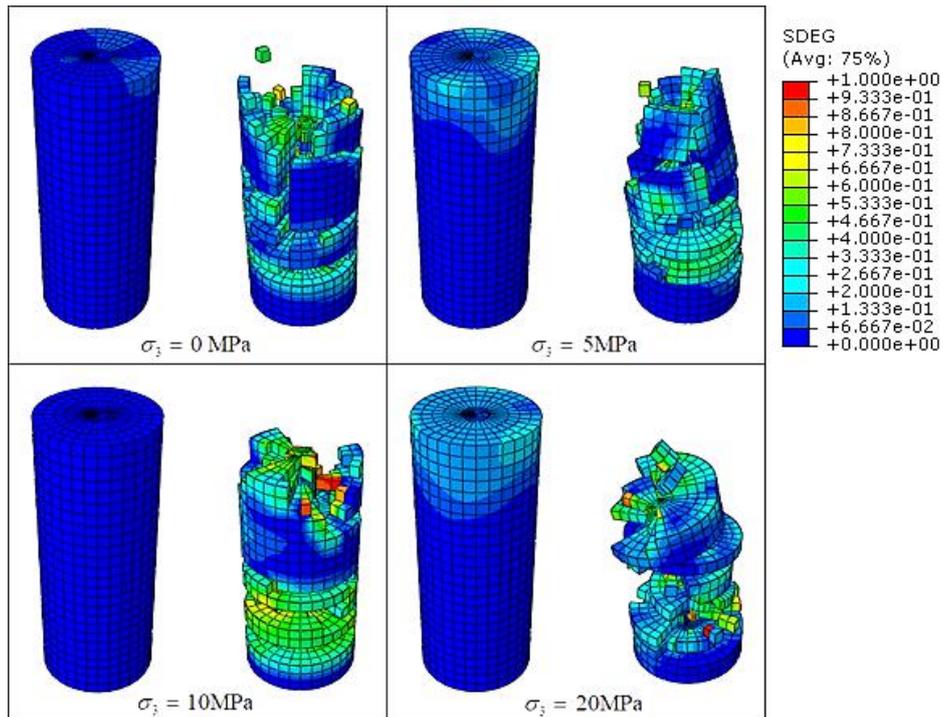


Figura 5.15. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para os ensaios triaxiais do Granito considerando o critério cisalhante e início do dano na

$$\sigma_{m\acute{a}x} \cdot$$

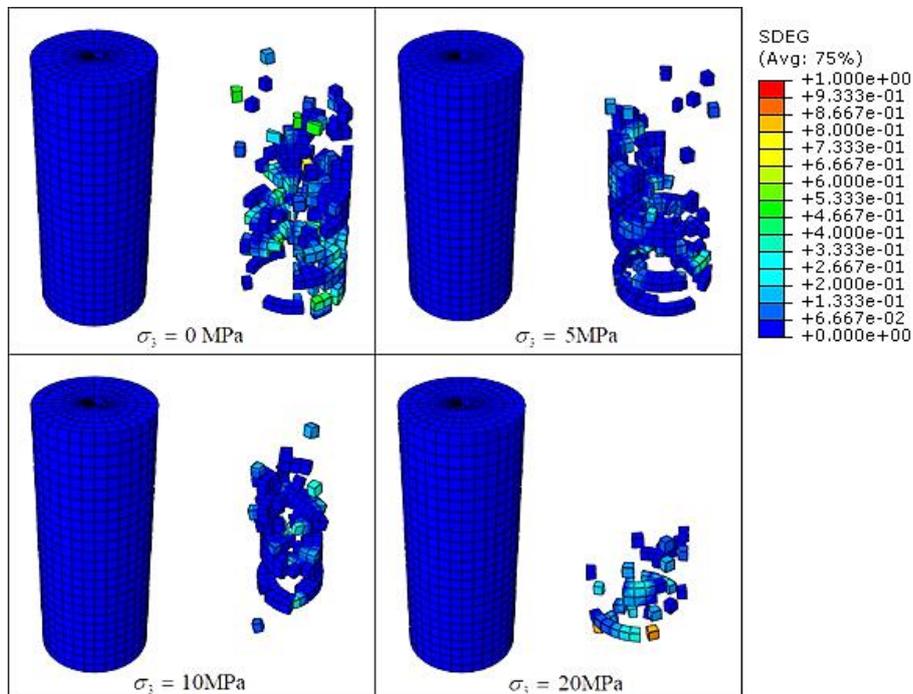


Figura 5.16. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para os ensaios triaxiais do Granito considerando o critério dúctil e início do dano na  $\sigma_{cd}$ .

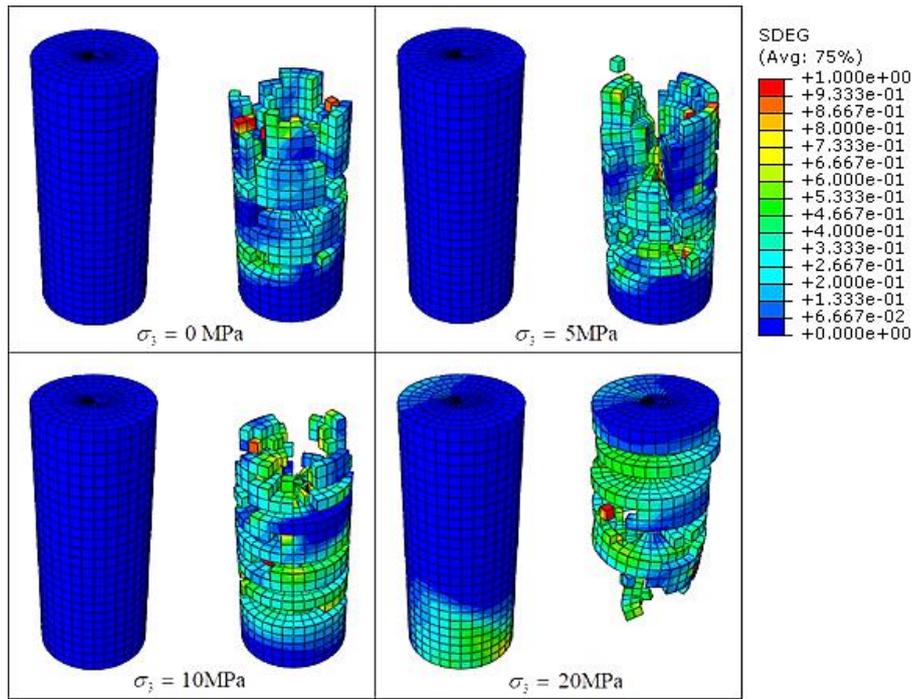


Figura 5.17. Corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) do momento da ruptura total para os ensaios triaxiais do Granito considerando o critério dúctil e início do dano na  $\sigma_{máx}$ .

## 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como foi visto ao longo do trabalho, o modelo inserido considerando o Mecanismo de Dano permite uma boa modelagem do comportamento dos dois tipos de rocha analisados, conseguindo representar o amolecimento do Arenito e a resposta frágil do Granito, tanto em condição de compressão uniaxial como triaxial. Não obstante o modelo linear de Drucker-Prager apresenta uma limitação na definição da envoltória de ruptura quando se trabalha com um amplo intervalo de tensões de confinamento, onde comumente se apresenta uma não linearidade pelo que sugere-se utilizar outras formulações de tipo exponencial ou hiperbólico em pesquisas futuras.

Os modelos permitiram simular a maioria dos trechos encontrados nas curvas de tensão-deformação a exceção de aquele referente ao fechamento das fraturas, já que não considera nenhuma condição inicial que levara em conta a presença de micro-fraturas internas, como sim pode ser encontrado em modelos que integrem métodos de elementos discretos.

Em quanto ao critério de início do dano que deveria ser usado para modelar o comportamento de rochas similares às aqui avaliadas, ambos os critérios conseguem um desempenho análogo tanto no ajuste das curvas de tensão versus deformação como na representação das superfícies de fraturas, não obstante, o critério dúctil não considera aquele parâmetro do material  $k_s$  o qual é definido de uma maneira empírica sem apresentar um significado conceitual ou físico no modelo de Mecanismo de Dano, pelo que é mais recomendável que o critério cisalhante.

Por outra parte, a definição do ponto de início do dano pode ser assumida em qualquer nível de tensão prévio à resistência máxima do material, já que o ajuste da lei de evolução do dano permite adaptar quase perfeitamente a resposta do modelo aos resultados dos ensaios de compressão uniaxial; igualmente as superfícies de ruptura conseguidas para os dois pontos avaliados seguem uma aparência similar quando é analisado o efeito dos outros parâmetros, pelo que não parece afetar os tipos de fraturas obtidas. Quando foram avaliados os modelos com confinamento lateral, o ponto de início na tensão máxima gerou um comportamento plástico pouco coerente quando a tensão no corpo de prova atingia o valor pico, portanto é mais conveniente assumir o início da degradação na tensão de dano por fraturas, além de que conceitualmente é mais congruente com o comportamento das rochas submetidas a estados de compressão. Já com respeito aos valores dos parâmetros que melhor ajustam o

comportamento de cada rocha, foram apresentados nas secções correspondentes além das leis de evolução do dano empregadas.

Não obstante, em relação às superfícies de fraturas conseguidas para ambos os tipos de rocha, os resultados não foram acordes aos mostrados nos ensaios experimentais, devido principalmente à dependência da geração e propagação das fraturas da malha de elementos finitos utilizada, pois no momento da falha são apagados grandes blocos de material que levam a geração de vazios que modificam o comportamento do corpo de prova e provocam eventos mais explosivos que os realmente acontecidos. Sem embargo, o refinamento da malha, procurando melhorar a representação das fraturas, levaria a um incremento considerável no tempo de modelagem, voltando pouca prática a implementação do modelo de Mecanismo de Dano, além de que com a mudança no tamanho dos elementos deve ser calibrada novamente a evolução do dano para conseguir a mesma resposta do modelo.

A limitação principal do modelo de Mecanismo de Dano usado é sua formulação de tipo escalar que considera que o dano é isotrópico, coisa que realmente não acontece no material já que, adicionalmente a anisotropia própria da rocha, durante o carregamento se favorece a propagação das fraturas em certas direções, pelo que o modelo deveria definir o dano de forma vectorial ou tensorial como tem sido empregado em outros trabalhos de pesquisa. No entanto, cabe ressaltar que o modelo seria mais complexo já que seria necessário definir um critério de início do dano e uma lei de evolução para cada um dos coeficientes de elasticidade, sendo pouco prático na modelagem do material e indo contra os objetivos de este trabalho, além de se precisar de dados de calibração subministrados pelos resultados de ensaios mais custosos e difíceis de realizar.

Como sugestão para pesquisas futuras propõe-se a aplicação deste modelo para simular outros ensaios feitos sobre rochas, tais como a tração direta e a indireta (ensaio brasileiro), igualmente em casos que envolvem o fraturamento de rochas devido a uma concentração de tensões, como por exemplo, o processo de escavação de túneis e poços, a análise do fenômeno de *rockburst* ou a estabilidade de grandes taludes em rocha que podem sofrer de processos de flambagem.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAQUS. (2005). ABAQUS/Explicit: Advanced Topics. Copyright ABAQUS, Inc.
- ABAQUS. (2014). Analysis user's guide. Copyright ABAQUS, Inc.
- Alejano, L. R., & Alonso, E. (2005). Considerations of the dilatancy angle in rocks and rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42, 481–507.
- Aelvan, G. M. (2017). Aplicação do Método dos Elementos Finitos para Análise de Deslizamentos de Encostas e Impacto em Barreiras. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília.
- Alfarah, B., López-Almansa, F., & Oller, S. (2017). New methodology for calculating damage variables evolution in Plastic Damage Model for RC structures. *Engineering Structures*, 132, 70–86.
- Aubertin, M., & Simon, R. (1997). A damage initiation criterion for low porosity rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 34(3–4), 15.
- Basu, A., Celestino, T. B., & Bortolucci, A. A. (2009). Evaluation of rock mechanical behaviors under uniaxial compression with reference to assessed weathering grades. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 42, 73–93.
- Bieniawski, Z. T. (1967a). Mechanism of brittle fracture of rock: Part I - Theory of the fracture process. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 4, 395–406.
- Bieniawski, Z. T. (1967b). Mechanism of brittle fracture of rock: Part II - Experimental studies. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 4, 407–423.
- Bieniawski, Z. T. (1967c). Mechanism of brittle fracture of rock: Part III - Fracture in tension and under long-term loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 4, 425–430.
- Blake, W., & Hedley, D. G. F. (2009). *Rockburst - Case Studies from North American Hard-rock Mines*. Littleton, USA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
- Brekelmans, W. A. M., & de Vree, J. H. P. (1995). Reduction of mesh sensitivity in continuum damage mechanics. *Acta Mechanica*, 110, 49–56.
- Cieřlik, J. (2013). Scalar damage variable determined in the uniaxial and triaxial compression conditions of sandstone samples. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 35(1), 73–84.
- Costin, L. S. (1987). Time-dependent deformation and failure. In B. K. Atkinson (Org.), *Fracture Mechanics of Rock* (p. 167–215). London, UK: Academic Press Limited.
- de la Vergne, J. N. (2008). *Hard Rock Miner's Handbook*. (S. L. Andersen, Org.) (5th Ed.). Edmonton, Canadá: Stantec Consulting.
- Gowd, T. N., & Rummel, F. (1980). Effect of confining pressure on the fracture behaviour of

- a porous rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 17, 225–229.
- Hillerborg, A., Modéer, M., & Petersson, P. E. (1976). Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and Concrete Research*, 6(6), 773–781.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165–1186.
- Hoek, E., & Martin, C. D. (2014). Fracture initiation and propagation in intact rock - A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6, 287–300.
- Homand-Etienne, F., Hoxha, D., & Shao, J. F. (1998). A continuum damage constitutive law for brittle rocks. *Computers and Geotechnics*, 22(2), 135–151.
- Hooputra, H., Gese, H., Dell, H., & Werner, H. (2004). A comprehensive failure model for crashworthiness simulation of aluminium extrusions. *International Journal of Crashworthiness*, 9(5), 449–463.
- Jacobsson, L. (2004a). Forsmark site investigation - Borehole KFM02A Triaxial compression test of intact rock, SKB P-04-228. Stockholm, Sweden. Recuperado de <https://www.skb.se/publication/637752/P-04-228webb.pdf>
- Jacobsson, L. (2004b). Forsmark site investigation - Borehole KFM02A Uniaxial compression test of intact rock, SKB P-04-224. Stockholm, Sweden. Recuperado de <http://www.skb.com/publication/637784/P-04-224webb.pdf>
- Jacobsson, L. (2004c). Forsmark site investigation - Borehole KFM04A Triaxial compression test of intact rock, SKB P-04-230. Stockholm, Sweden. Recuperado de <http://www.skb.se/upload/publications/pdf/P-04-230webb.pdf>
- Johnson, G. R., & Cook, W. H. (1985). Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*, 21(1), 31–48.
- Kaiser, P. K., & Cai, M. (2012). Design of rock support system under rockburst condition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 4(3), 215–227. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1235.2012.00215>
- Kemeny, J. M. (1991). A model for non-linear rock deformation under compression due to sub-critical crack growth. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 28(6), 459–467.
- Khelifa, M., Oudjene, M., & Khennane, A. (2007). Fracture in sheet metal forming: Effect of ductile damage evolution. *Computers and Structures*, 85, 205–212.
- Lanaro, F., & Fredriksson, A. (2005). Rock mechanics model - Summary of the primary data. Stockholm, Sweden. Recuperado de <http://www.skb.se/publikation/1107184/R-05-83.pdf>
- Lemaitre, J. (1985). A continuous damage mechanics model for ductile fracture. *Journal of Engineering Materials and Technology (Transactions of the ASME)*, 107, 83–89.
- Levanger, H. (2012). Simulating Ductile Fracture in Steel Using the Finite Element Method:

- Comparison of Two Models for Describing Local Instability due to Ductile Fracture. Master's Thesis, University of Oslo.
- Li, S. (1999). Modeling Fracture and Deformation of Brittle Rock Under Compressive Loading. Doctoral Thesis, University of Manitoba.
- López Santacruz, R. A., Consoli, N. C., & Aquino Duarte, F. A. (2016). Modelação computacional do mecanismo de início da fissuração de um solo reforçado com fibras com a aplicação de uma lei constitutiva elastoplástica com dano contínuo . In Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica COBRAMSEG (p. 7). Belo Horizonte, Brasil: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica ABMS.
- Malcher, L. (2011). Da Mecânica do Dano Contínuo: Uma Evolução do Modelo de Lemaitre para Redução da Dependência do Ponto de Calibração. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília.
- Martin, C. D. (1993). The strength of massive Lac du Bonnet granite around underground openings. Doctoral Thesis, University of Manitoba.
- Martin, C. D., & Chandler, N. A. (1994). The progressive fracture of Lac du Bonnet granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 31(6), 643–659.
- Martinez, I. M. R. (2012). Modelagem Numérica do Processo do Corte em Rocha para Perfuração de Poços de Petróleo. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro.
- Ortlepp, W. D., & Stacey, T. R. (1994). Rockburst mechanisms in tunnels and shafts. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 9(1), 59–65.
- Paterson, M. S., & Wong, T.-F. (2005). *Experimental Rock Deformation - The Brittle Field*. *Experimental Rock Deformation - The Brittle Field* (2nd Ed.). Netherlands: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Rasmussen, L. L., de Farias, M. M., & de Assis, A. P. (2018). Extended Rigid Body Spring Network method for the simulation of brittle rocks. *Computers and Geotechnics*, 99, 31–41.
- Ribeiro, J., Santiago, A., & Rigueiro, C. (2016). Damage model calibration and application for S355 steel. *Procedia Structural Integrity*, 2, 656–663.
- Ruzicka, J., Spaniel, M., Prantl, A., Dzugan, J., Kuzelka, J., & Moravec, M. (2012). Identification of ductile damage parameters in the Abaqus. *Bulletin of Applied Mechanics*, 8(32), 89–92.
- Sgaoula, J., Aubertin, M., & Gill, D. E. (1995). Using internal state variables for modeling the viscoplastic behavior of rocksalt in the semi-brittle regime. In *The 35th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS)* (p. 749–754). Reno, USA: American Rock Mechanics Association.
- Stacey, T. R. (2012). Support of Excavations Subjected to Dynamic (Rockburst) Loading. In *International Society for Rock Mechanics Congress* (p. 137–145). Londres, England: Taylor & Francis Group.

- Wang, C. (2018). *Evolution, Monitoring and Predicting Models of Rockburst: Precursor Information for Rock Failure*. Beijing, China: Springer Singapore. Recuperado de <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-981-10-7548-3.pdf>
- Yuan, S.-C., & Harrison, J. P. (2004). An empirical dilatancy index for the dilatant deformation of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, 679–686.
- Zhang, W., & Cai, Y. (2010). *Continuum Damage Mechanics and Numerical Applications*. (Zhejiang University Press, Org.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.