

4 Resultados

Neste capítulo, são apresentados todos os resultados do estudo. Inclui os resultados das interpretações e medições das imagens de tomografia, das simulações realizadas, dos ajustes obtidos do modelo ao dado experimental e da análise da variação de permeabilidade durante os ensaios triaxiais.

4.1

Interpretação e medição das imagens de tomografia

A partir das imagens de tomografia disponíveis para cada corpo de prova, foram realizadas medições para obter as dimensões a serem modeladas posteriormente. As Figuras 32, 33 e 34 ilustram as medições realizadas e os valores obtidos em cada porção das imagens.

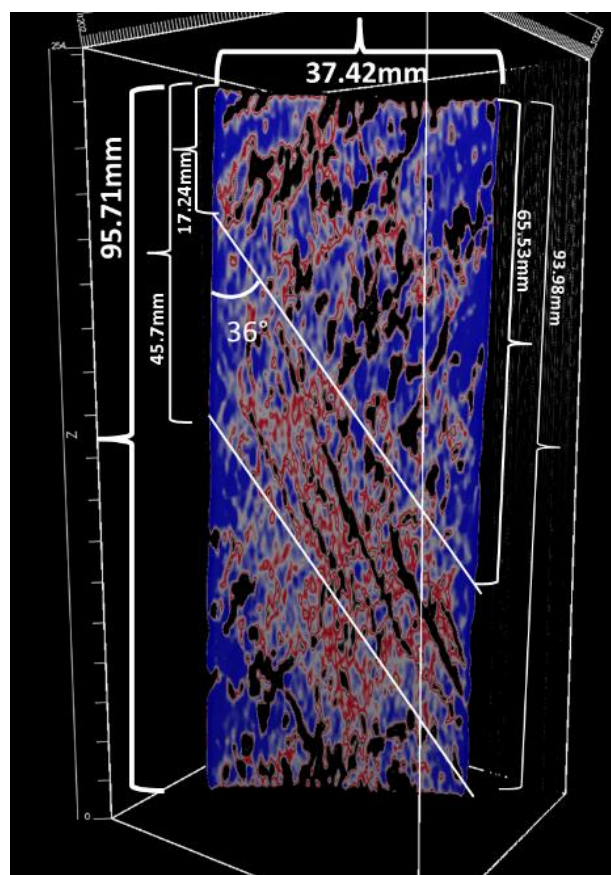


Figura 32 – Medições feitas sobre imagem de tomografia computadorizada de raio-x do CP1 antes do ensaio triaxial. Notar fraturas cruzando a zona de falha.

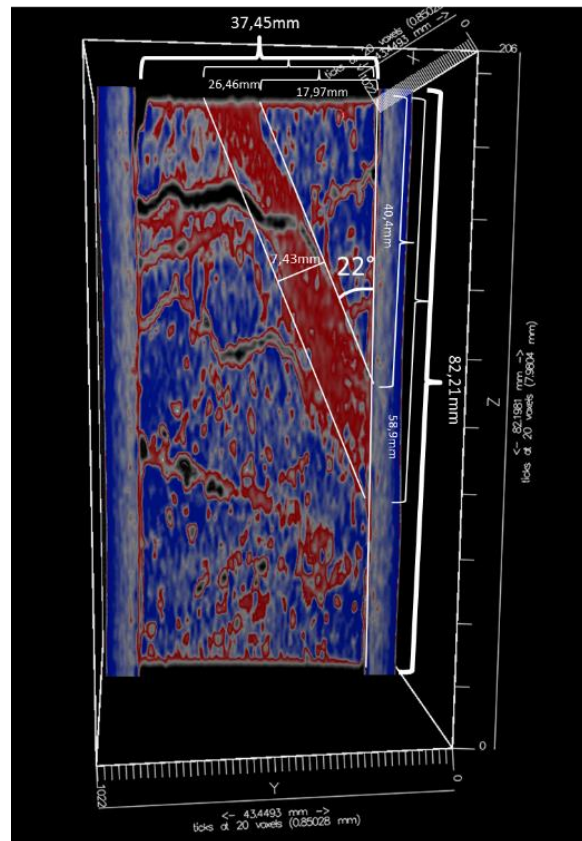


Figura 33 – Medições feitas sobre imagem de tomografia computadorizada de raio-x do CP2 antes do ensaio triaxial. Notar na cor vermelha o núcleo da falha contido no corpo de prova.

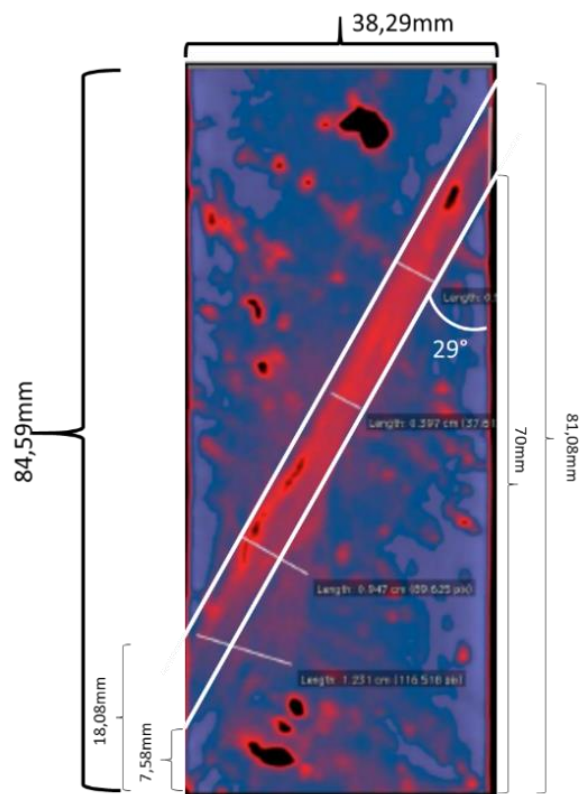


Figura 34 – Medições feitas sobre imagem de tomografia computadorizada de raio-x do CP3 antes do ensaio triaxial.

Utilizando como base teórica para as interpretações as estruturas propostas pelos estudos de Riedel, pôde-se identificar nas imagens tomográficas várias estruturas similares às descritas no estudo citado. Foram realizados cortes centrais nas imagens de tomografia, como forma de identificar em detalhe a geometria da zona de falha. A Figura 35 mostra as estruturas encontradas no CP2, onde pode-se observar a extensão da região mais deformada pertencente à zona de falha, com limites bem definidos no contato com a rocha intacta. Em geral, o material mais cominuído pertencente a este corpo de prova, análogo a materiais em núcleos de falhas geológicas, se mostra bem fino e encaixado na zona cisalhada, o que dificulta o mapeamento de feições estruturais dentro dele. Devido à alta deformação presente nesta zona, estruturas secundárias podem ser obliteradas. No entanto, foi possível identificar dentro da zona de falha algumas estruturas, que se apresentaram bem descontínuas e de pequena extensão. Foi possível observar uma fratura de tração (T) na região da rocha intacta, e outras cisalhantes, que podem ser interpretadas como pertencentes a uma “zona de dano” adjacente à zona de falha principal gerada pelo ensaio de cisalhamento direto. As fraturas pré-deformacionais, foram cortadas pelo plano de falha, e a fratura pós-deformacional aparentemente “descolou” a zona de falha do material intacto após o evento do cisalhamento, tal fratura pode ter sido propiciada por estruturas prévias da rocha (acamamento alargado ou fraturas). É importante notar que o plano de falha, neste corpo de prova, não o atravessa de modo a separar a região superior da região inferior. Na Figura 35 observa-se que a região de rocha intacta ao lado direito da zona de falha se estende de uma extremidade a outra do corpo de prova sem separação alguma pela região falhada, possivelmente conferindo a esta amostra um comportamento mais rígido, advindo da maior sollicitação da rocha intacta durante o ensaio triaxial de reativação realizado.

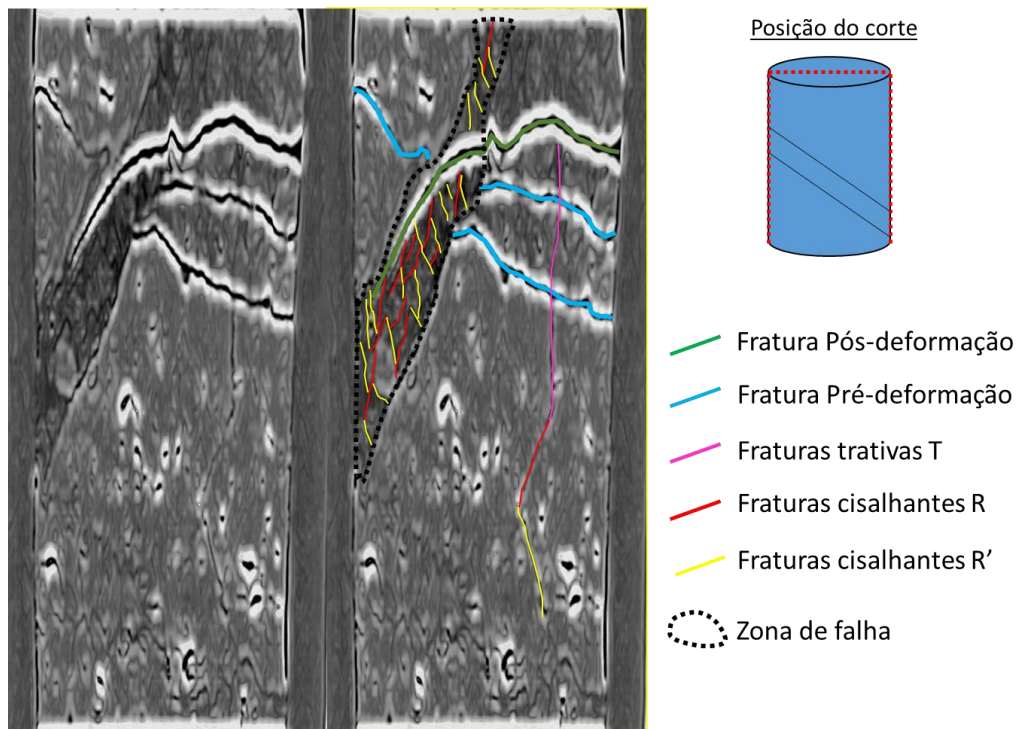


Figura 35 – Interpretação da imagem de tomografia, pré ensaio de reativação, do corpo de prova 2. Cores preta: Maior gradiente. Cores Brancas: Menores gradientes.

A Figura 36 mostra as estruturas encontradas no CP1. Neste corpo de prova, pode-se observar melhor as estruturas dentro da zona de falha, pois o material não sofreu uma deformação tão intensa como no CP2, devido ao menor deslocamento cisalhante imposto neste corpo de prova na ordem de 20 mm no CP1, contra os 120 mm impostos no CP2. Pode-se observar abundantemente fraturas cisalhantes do tipo R e R' dentro da zona de falha demarcada no CP1. As fraturas cisalhantes que ocorrem no CP1, diferentemente das fraturas no CP2, são maiores e contínuas ao longo da zona de falha, assim como se espera que ocorram em zona de dano em falhas naturais.

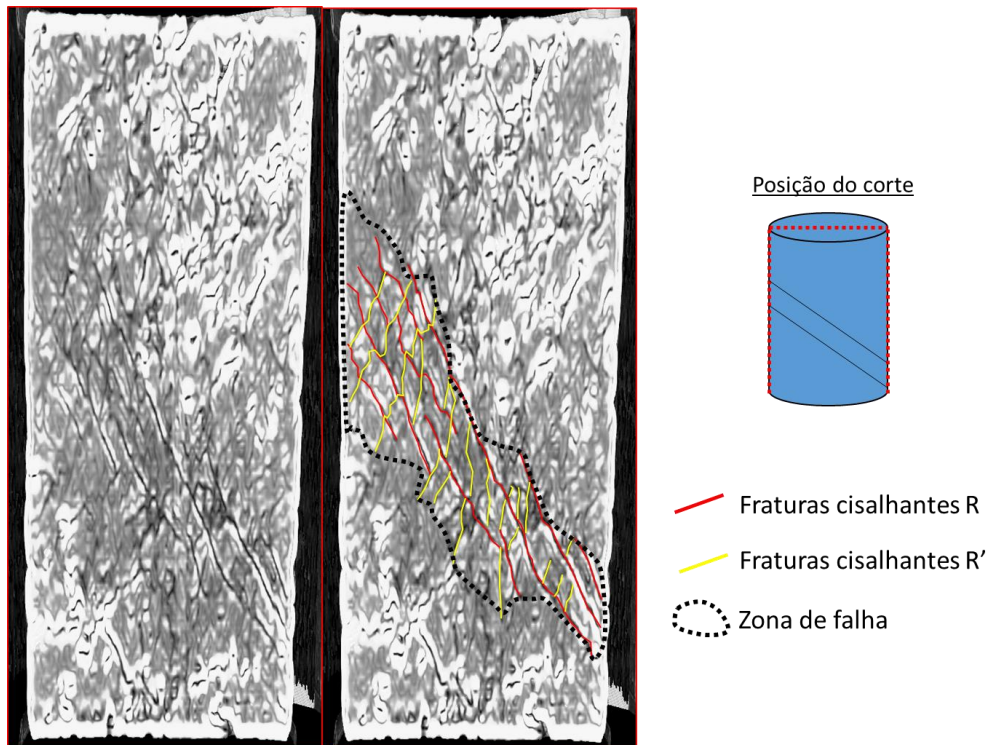


Figura 36 – Interpretação da imagem de tomografia, pré ensaio de reativação, do corpo de prova 1. Cores preta: Maior gradiente. Cores Brancas: Menores gradientes.

Não foi possível realizar a interpretação na imagem do CP3 devido à baixa resolução desta.

4.2

Modelagem numérica dos ensaios através do MEF

Neste item serão apresentados os resultados provenientes das simulações dos modelos gerados e das análises realizadas sobre os dados experimentais.

4.2.1

Resultados da modelagem do corpo de prova 1

O corpo de prova 1 (CP1) apresentou comportamento mecânico experimental similar a outros corpos de prova ensaiados nas mesmas condições, mostrando que a amostra pode ser usada como referência de um comportamento médio representativo do material ensaiado. Na Figura

37 pode-se observar o comportamento mecânico do CP1 (corpo de prova com rocha mista portando material representativo de zona de dano e rocha intacta) em conjunto com outros corpos de prova ensaiados em condições similares, apresentados em Falcão *et al.*, 2014.

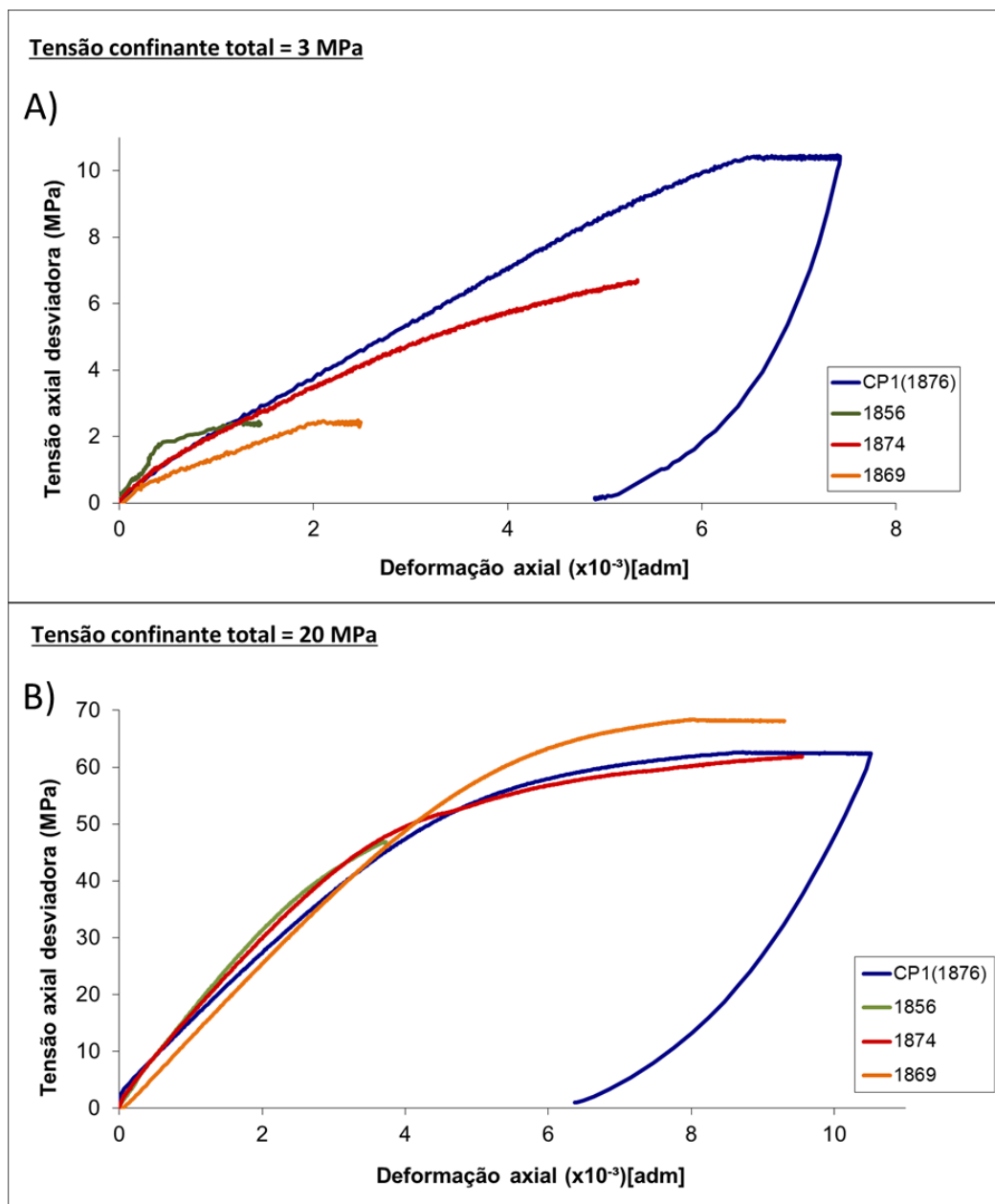


Figura 37 – Curvas tensão-deformação experimentais do CP1 e de amostras similares resultantes de ensaios triaxiais com confinamentos de 3 MPa (A) e 20 MPa (B).

Baseando-se na comparação das curvas tensão-deformação experimentais apresentadas na Figura 37 com as curvas obtidas numericamente, os parâmetros mecânicos de entrada (i.e. ϕ , ψ , c , ν , E) do

modelo numérico na região da falha foram sendo ajustados como forma de se obter os parâmetros mecânicos mais representativos da zona de falha. O melhor ajuste obtido para o confinamento de 3 MPa é demonstrado nas Figuras 38 e 39.

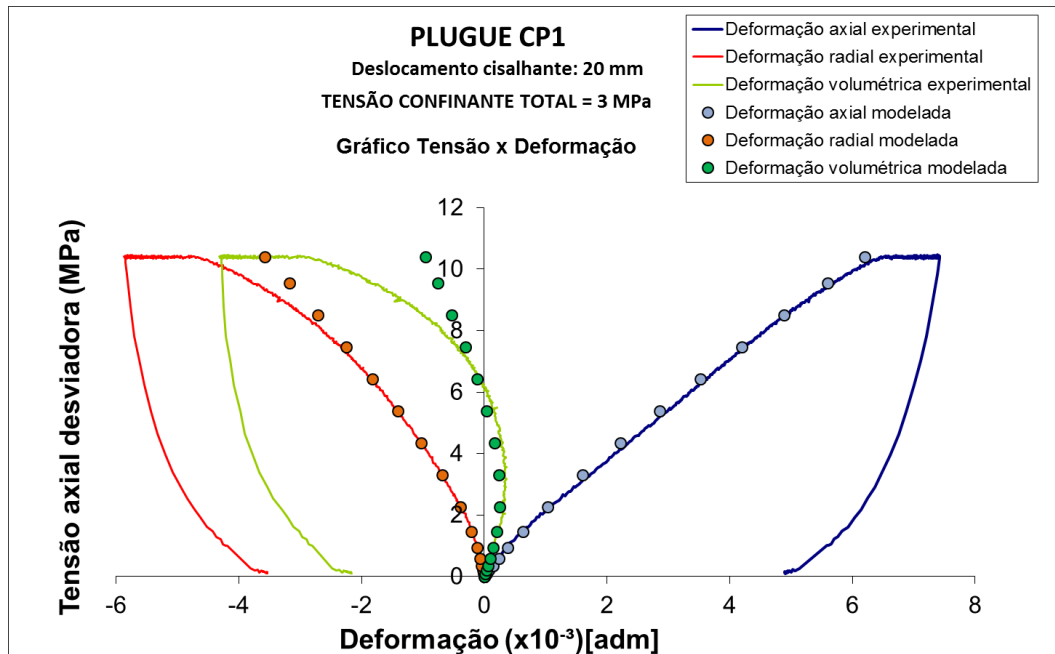


Figura 38 – Gráfico tensão-deformação comparativo do resultado da simulação com os dados experimentais do CP1 (Zona de dano + Rocha intacta), para o confinamento de 3 MPa.

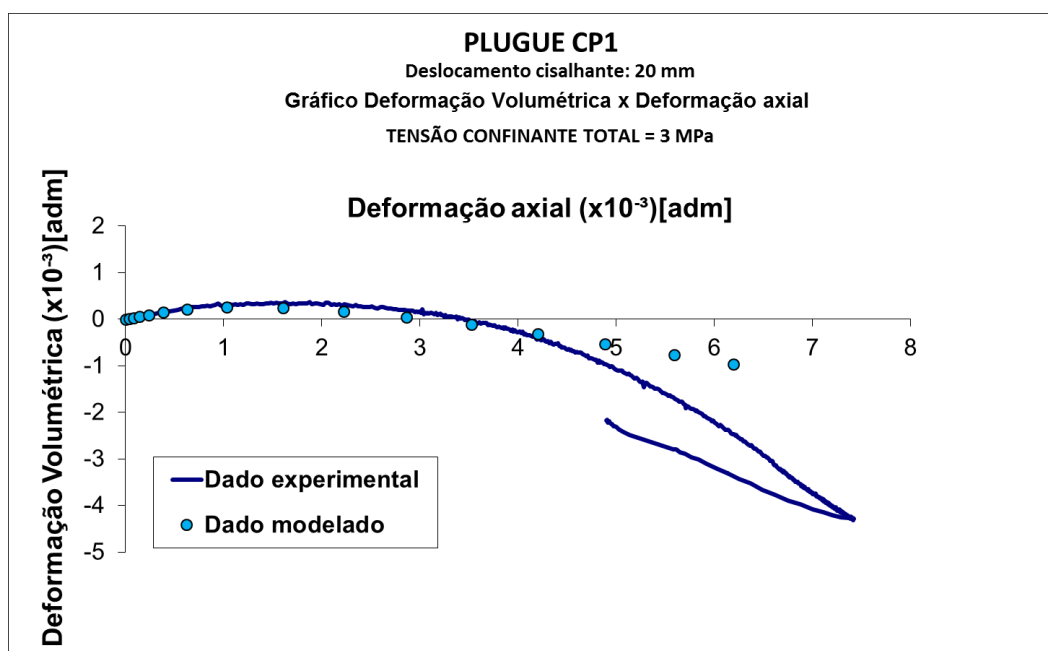


Figura 39 – Gráfico deformação volumétrica-deformação axial comparativo do resultado da simulação com os dados experimentais do CP1 (Zona de dano + Rocha intacta), para o confinamento de 3 MPa.

Também foram realizados ajustes para o confinamento de 20 MPa, que são demonstrados a seguir nas Figuras 40 e 41.

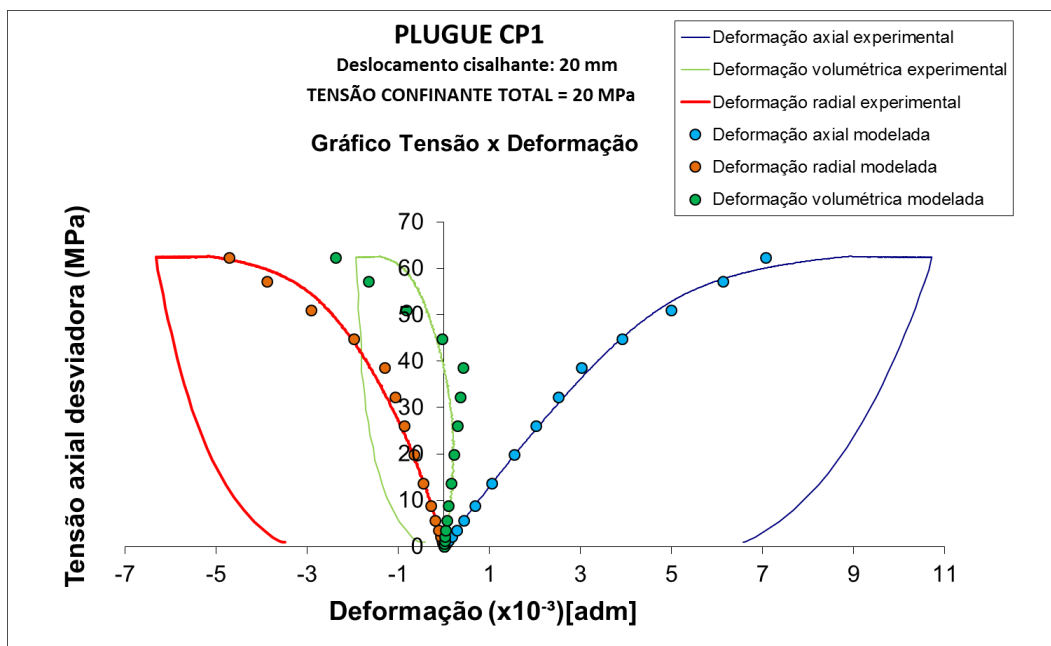


Figura 40 – Gráfico tensão-deformação comparativo do resultado da simulação com os dados experimentais do CP1 (Zona de dano + Rocha intacta), para o confinamento de 20 MPa.

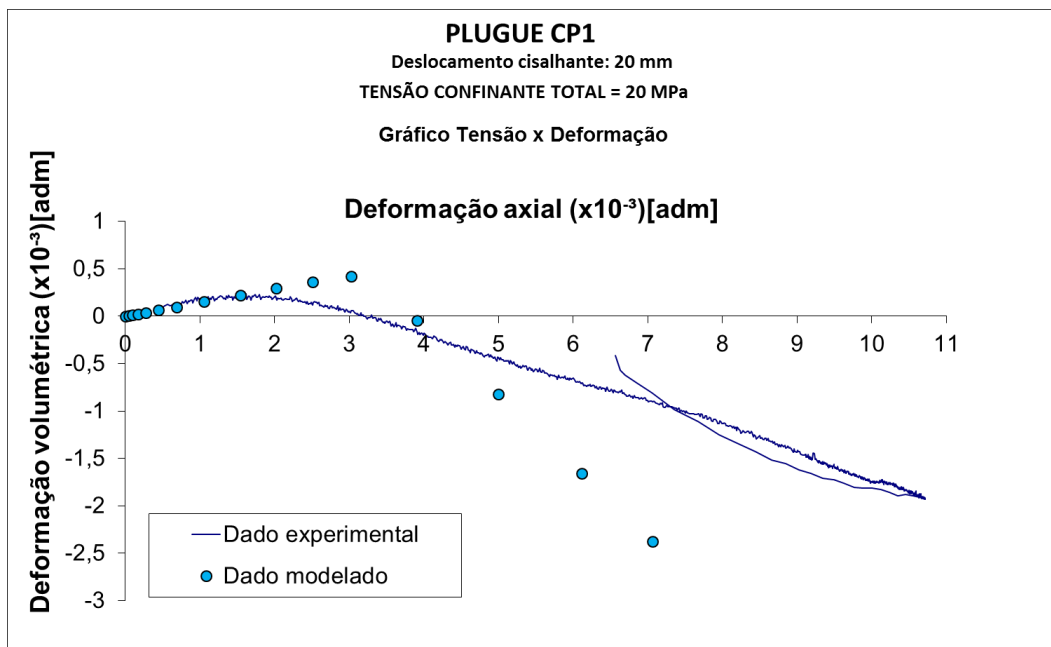


Figura 41 - Gráfico deformação volumétrica-deformação axial comparativo do resultado da simulação com os dados experimentais do CP1 (Zona de dano + Rocha intacta), para o confinamento de 20 MPa.

A Tabela 4 mostra a regra de endurecimento utilizada para ajustar cada confinamento no modelo do CP1. É importante ressaltar que o método

utilizado para endurecimento foi a variação do intercepto coesivo mantendo o ângulo de atrito constante, esta é uma simplificação, e portanto, a aplicação de outros métodos de endurecimento podem vir a trazer variações nos resultados encontrados.

Tabela 4 – Regra de endurecimento utilizada no ajuste do modelo do CP1.

Intercepto coesivo (MPa)	Deformação plástica (adm)	Tensão confinante (MPa)
0.1	0	3
0.725	0.005	
1.35	0.01	
1.975	0.015	
2.6	0.02	
3.225	0.025	
3.85	0.03	
4.475	0.035	
5.1	0.04	
5.725	0.045	
6.35	0.05	
0.1	0	
1.6	0.005	
3.1	0.01	
4.6	0.015	
6.1	0.02	
7.6	0.025	
9.1	0.03	
10.6	0.035	
12.1	0.04	
13.6	0.045	
15.1	0.05	

A Tabela 5 apresenta os valores dos parâmetros mecânicos utilizados para ajustar o modelo do CP1.

Tabela 5 – Valores utilizados no ajuste do modelo do CP1

<u>Ajuste - CP1</u>	Módulo de Elasticidade (GPa)	Razão de Poisson	Ângulo de dilatância (graus)	Coesão (MPa)	Ângulo de atrito (graus)
Rocha intacta inclinada	48,55	0,33	8,9	11,08	15,08
Zona de dano (3MPa)	0,68	0,02	3	0,1	20
Zona de dano (20MPa)	3,95	0,16	3	0,1	20

4.2.1.1

Resultados da modelagem do corpo de prova 1 com malha fina

Como forma de controle de qualidade da malha adotada na modelagem, o modelo ajustado para o CP1 foi simulado em uma malha mais refinada como detalhada no item 3.2.2.3. O resultado obtido pode ser observado na Figura 42.

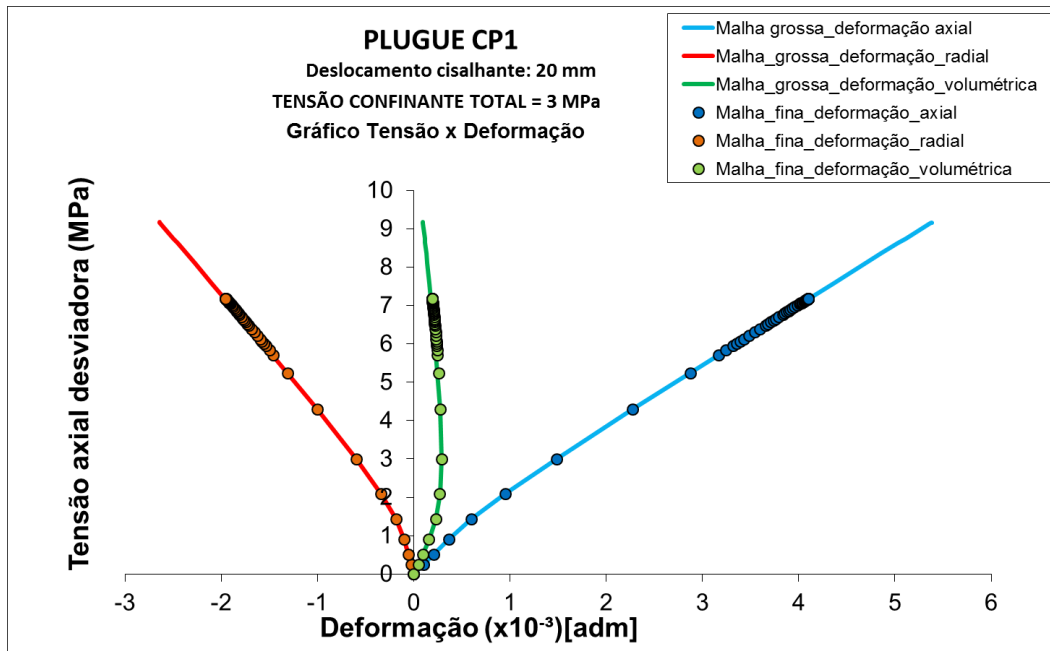


Figura 42 – Gráfico tensão-deformação comparativo do resultado da simulação do modelo com malha grossa e com malha fina.

A partir do resultado apresentado na Figura 42, pode-se dizer que o modelo com malha grossa não teve seu resultado afetado pela menor discretização utilizada, pois o resultado da simulação com malha fina replica exatamente o resultado da simulação da malha grossa, mostrando uma boa precisão no resultado da malha grossa. Sendo assim, a malha grossa (elementos com 5 mm) foi aplicada a todos os outros modelos.

4.2.2

Resultados da modelagem do Corpo de prova 2

A modelagem do CP2 foi realizada seguindo-se os mesmos procedimentos adotados para a modelagem do CP1. No entanto, devido à geometria diferenciada do plano de falha ao longo da amostra, algumas ressalvas devem ser consideradas acerca dos resultados do ensaio triaxial de reativação realizado no CP2. Podemos observar na Figura 43 um gráfico onde o CP2 é plotado em conjunto com outros corpos de prova ensaiados em condições similares, apresentados em Falcão *et al.*, 2014. É nítido o comportamento menos rígido do material do CP2 em relação aos outros corpos de prova, no confinamento mais baixo, de 3 MPa. Contudo,

quando se observa o confinamento de 20 MPa, a amostra apresenta um comportamento bem mais rígido, denotando uma mudança significativa em seu comportamento, e possivelmente em sua estrutura. Quando observadas suas imagens de tomografia (Figura 35), o CP2 apresenta fraturas abertas, que provavelmente foram responsáveis pelo escoamento precoce quando comparado com outras amostras semelhantes, devido ao provável colapso destas fraturas logo no primeiro estágio de 3 MPa de confinamento (Figura 44). Os resultados dos ensaios plotados na Figura 43 são de amostras do mesmo tipo (deslocamento cisalhante de 120 mm) e, portanto, esperava-se um comportamento similar entre elas.

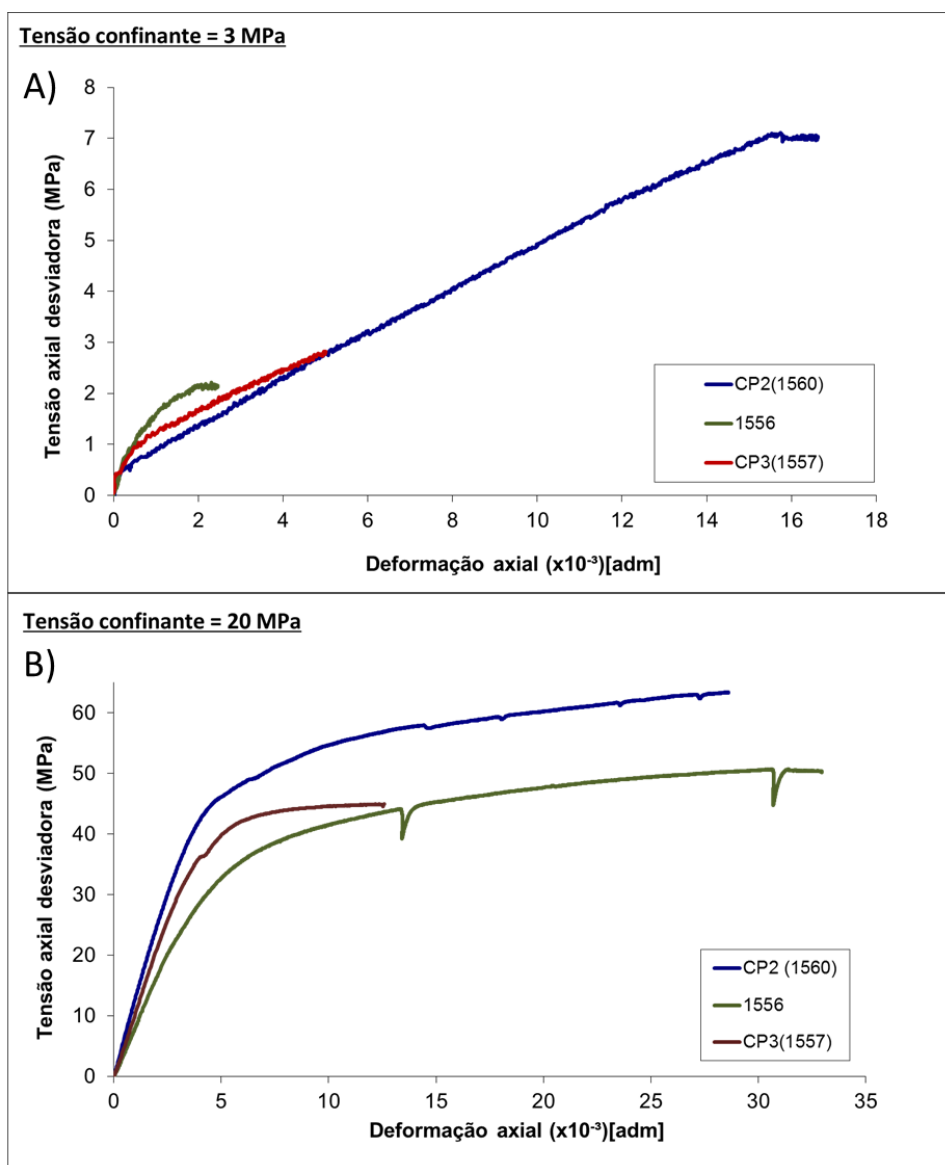


Figura 43 – Curvas tensão-deformação do CP2 (Núcleo de falha + Rocha intacta) e de amostras similares para confinamentos de 3 MPa (A) e 20 MPa (B).

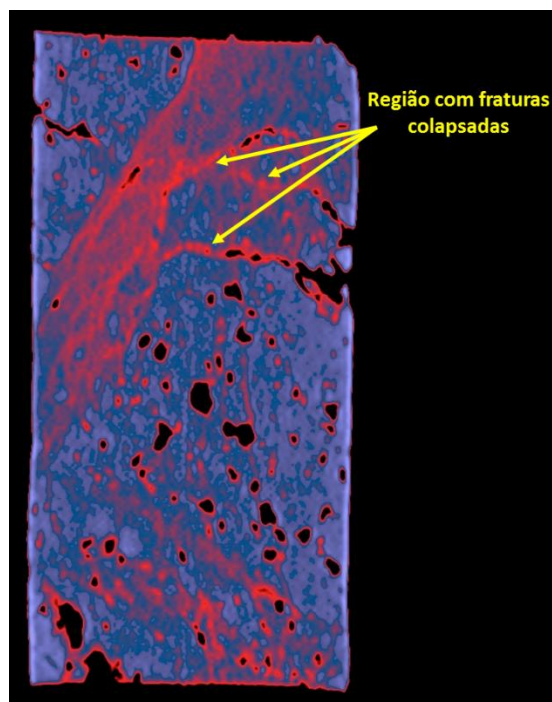


Figura 44 – Imagem tomográfica do CP2, após o ensaio triaxial de reativação, com detalhe na região onde provavelmente ocorreu colapso de fraturas.

No confinamento de 20 MPa deste mesmo corpo de prova, podemos observar o comportamento mais rígido apresentado pela amostra CP2. Tal comportamento mais rígido, provavelmente está associado ao fato de que nesta amostra a rocha intacta se estende ao longo de todo o comprimento axial (Figura 45), fazendo com que durante a compressão axial a resposta ao deslocamento do topo seja predominantemente controlada pela rocha intacta e não pela rocha da falha.

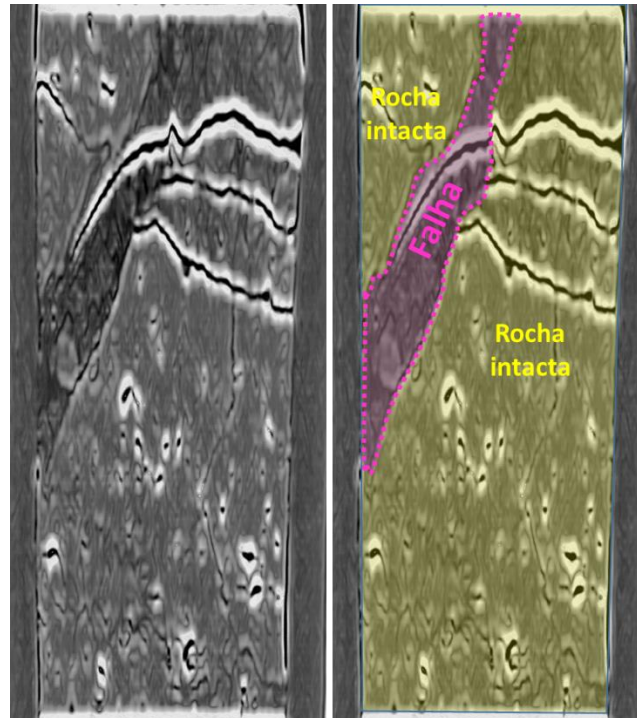


Figura 45 – Imagem do CP2 indicando as regiões de rocha intacta e de falha.

O resultado da modelagem realizada para este corpo de prova ilustra bem a região que é solicitada durante o ensaio triaxial. Na Figura 46 observa-se que as tensões simuladas se concentram no lado da rocha intacta, demonstrando que nos ensaios realizados neste corpo de prova, a falha não foi a região mais solicitada.

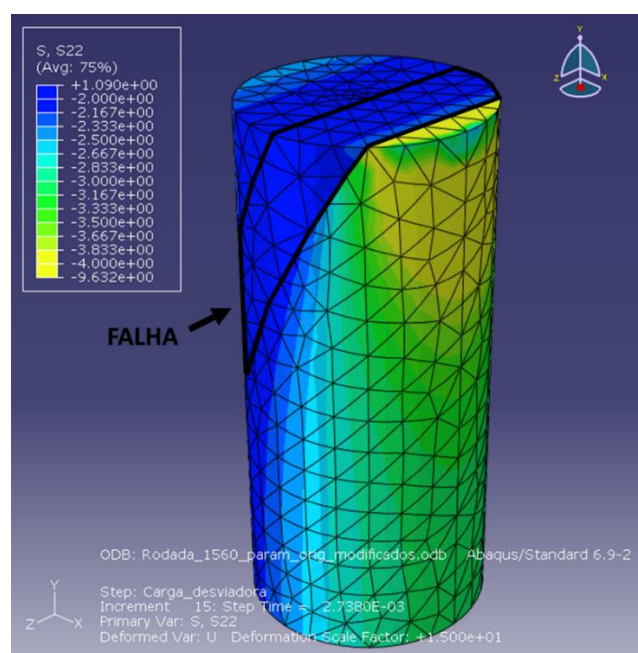


Figura 46 – Imagem do resultado da tensão axial (MPa) advinda da simulação realizada no CP2.

Sendo assim, sugere-se que o CP2 deve ser utilizado com muita cautela nos estudos mecânicos de rocha de falha, pois seu comportamento mecânico pode ser proveniente da rocha intacta. Após a análise dos dados acima, optou-se pela não continuação dos ajustes com o modelo do CP2.

4.2.3

Resultados da modelagem do corpo de prova 3

O corpo de prova 3 (CP3), apresentou um comportamento que aparenta ser mais representativo do material de falha que o CP2, como pode-se observar nas curvas na Figura 43, pois é menos divergente da amostra 1556, ensaiada em condições similares no projeto do CSIRO anteriormente citado e analisada mais profundamente por Kiewiet, 2015. Sendo assim, foram realizados ajustes no modelo deste corpo de prova, para que honrassem o dado experimental, e os resultados são demonstrados abaixo nas Figuras 47 e 48.

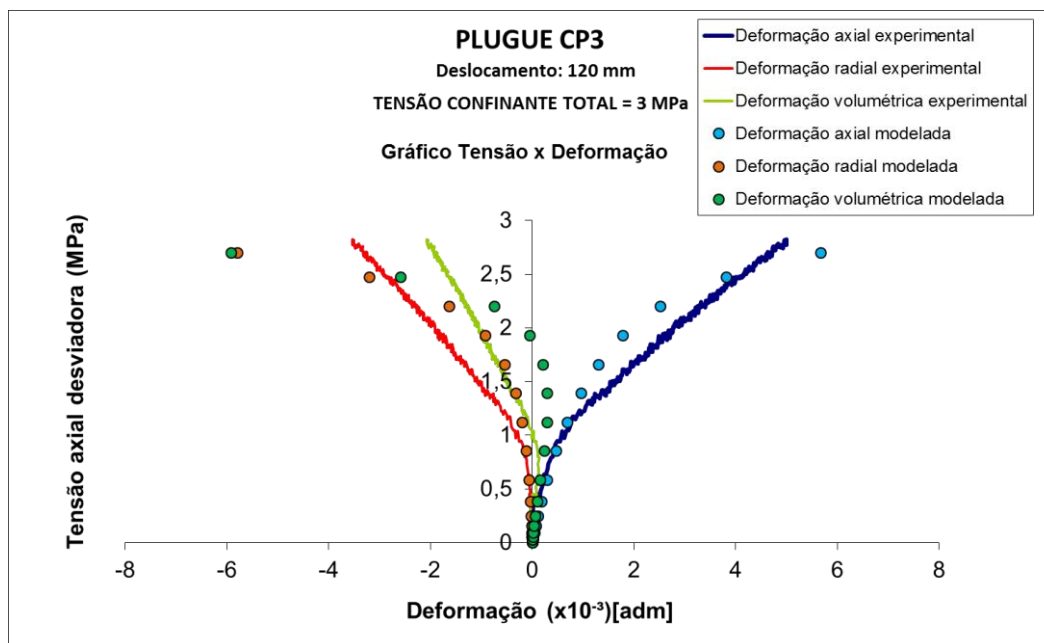


Figura 47 – Gráfico tensão-deformação comparativo do resultado da simulação com os dados experimentais do CP3 (Núcleo de falha + Rocha intacta), para o confinamento de 3 MPa

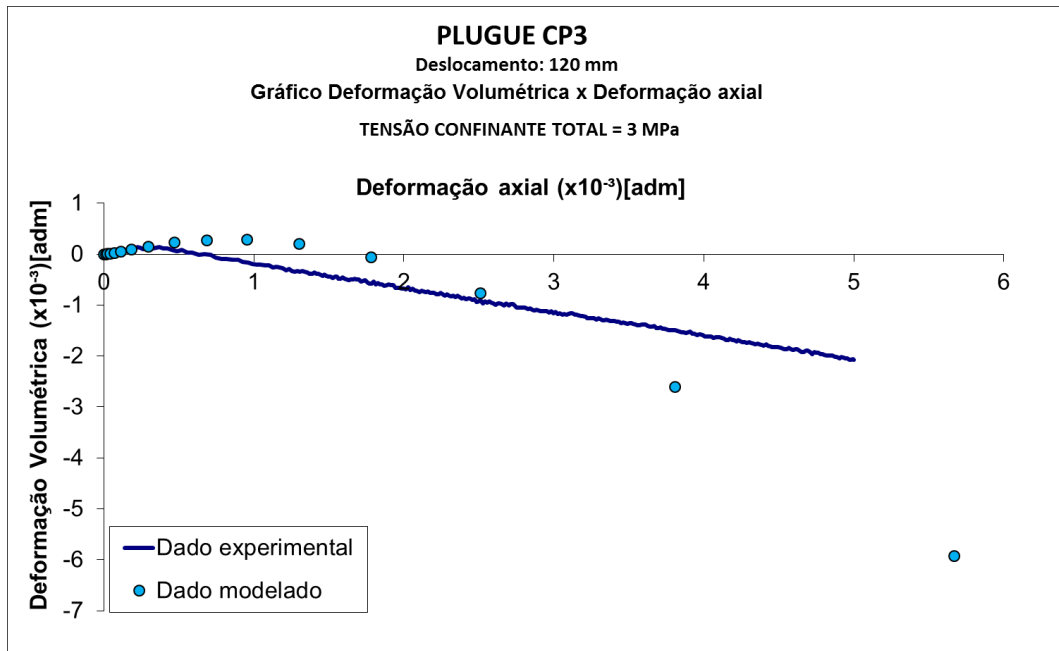


Figura 48 – Gráfico deformação volumétrica-deformação axial comparativo do resultado da simulação com os dados experimentais do CP3 (Núcleo de falha + Rocha intacta), para o confinamento de 3 MPa.

Os ajustes no confinamento de 20 MPa também foram feitos, e são apresentados abaixo nas Figuras 49 e 50.

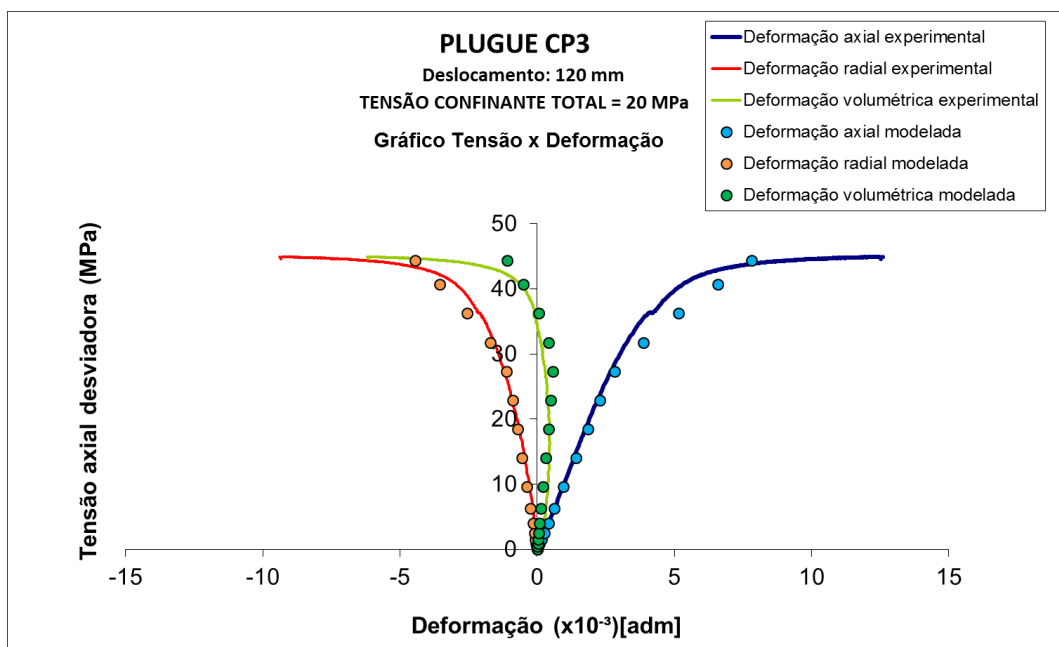


Figura 49 – Gráfico tensão-deformação comparativo do resultado da simulação com os dados experimentais do CP3 (Núcleo de falha + Rocha intacta), para o confinamento de 20 MPa.

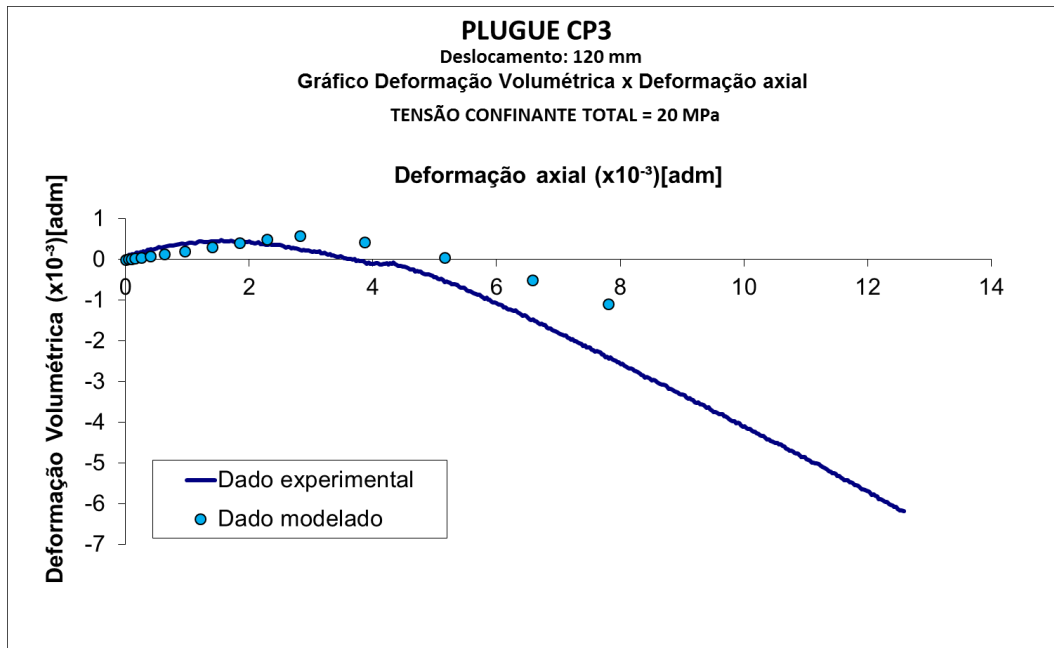


Figura 50 – Gráfico deformação volumétrica-deformação axial comparativo do resultado da simulação com os dados experimentais do CP3 (Núcleo de falha + Rocha intacta), para o confinamento de 20 MPa.

A Tabela 6 mostra a regra de endurecimento utilizada para ajustar cada confinamento no modelo do CP3.

Tabela 6 – Regra de endurecimento utilizada no ajuste do modelo do CP3.

Intercepto coesivo (MPa)	Deformação plástica (adm)	Tensão confinante (MPa)
0.1	0	3
0.4	0.3	
0.7	0.33	
1	0.36	
1.3	0.39	
1.6	0.42	
1.9	0.45	
2.2	0.48	
2.5	0.51	
2.8	0.54	
0.1	0	20
0.35	0.005	
0.6	0.01	
0.85	0.015	
1.1	0.02	
1.35	0.025	
1.6	0.03	
1.85	0.035	
2.1	0.04	
2.35	0.045	

A Tabela 7 mostra os parâmetros utilizados para se obter o ajuste em ambos confinamentos.

Tabela 7 – Valores utilizados no ajuste do modelo do CP3.

Ajuste - CP3	Módulo de Elasticidade (GPa)	Razão de Poisson	Ângulo de dilatância (graus)	Coesão (MPa)	Ângulo de atrito (graus)
Rocha intacta inclinada	48,55	0,33	8,9	11,08	15,08
Núcleo da falha (3 MPa)	0,175	0,05	17	0,1	20
Núcleo da falha (20 MPa)	0,8	0,03	11	0,1	20

4.3

Comentários sobre o resultado dos ajustes dos modelos e ensaios analisados

Podemos observar na Tabela 8 os parâmetros dos dois modelos ajustados postos juntos para fins de comparação.

Tabela 8 – Tabela comparativa entre os parâmetros ajustados nos modelos do CP1 e CP3.

Confinamento (MPa)	Corpo de Prova	Deslocamento Cisalhante	Material representativo	Módulo de Elasticidade (GPa)	Razão de Poisson (adm)	Ângulo de dilatância (graus)	Coesão (MPa)	Ângulo de atrito (graus)
3	CP1	20 mm	Zona de dano	0,68	0,02	3	0,1	20
	CP3	120 mm	Nucleo da falha	0,175	0,05	17	0,1	20
20	CP1	20 mm	Zona de dano	3,95	0,16	3	0,1	20
	CP3	120 mm	Nucleo da falha	0,8	0,03	11	0,1	20

A partir dos valores dos parâmetros utilizados no ajuste, podemos levantar alguns pontos importantes a serem observados.

- 1) O confinamento impacta o comportamento elástico do material de falha, aumentando a rigidez do material à medida que o confinamento aumenta.
- 2) O material de zona de dano tende a ser mais rígido e a transmitir maior deformação lateral que o material de núcleo de falha, devido ao Módulo de Elasticidade e Razão de Poisson maiores.
- 3) O material de núcleo de falha é menos rígido e tem comportamento mais dilatante que a zona de dano, devido ao maior ângulo de dilatância ajustado neste material.

- 4) Em termos de coesão e ângulo de atrito, pode-se observar que não houve diferenças entre os valores utilizados para materiais representativos de zona de dano e de núcleo de falha.

A partir do resultado da modelagem e dos valores de tensão observados nas curvas tensão-deformação experimentais, onde pôde-se observar a ocorrência da ruptura do material nos dois ensaios triaxiais realizados no CP1 e no ensaio de confinamento de 20 MPa do CP3, calculou-se as superfícies de ruptura para cada caso e o intercepto coesivo correspondente.

Utilizando os valores de resistência última do material durante o experimento e as equações de transformação de tensões, pôde-se calcular as tensões normais e cisalhantes incidentes na falha no momento da ruptura, e assim, utilizando o ângulo de atrito de 20° obtido nos ajustes dos modelos diretamente na equação de Mohr-Coulomb, calculou-se o intercepto coesivo de cada caso e as superfícies de rupturas correspondentes. Observe que, como o endurecimento utilizado no modelo foi o aumento do intercepto coesivo com a deformação plástica, o ângulo de atrito se mantém constante em todos os casos. (Tabela 9) (Figura 51).

Tabela 9 – Tabela com dados da envoltória de ruptura dos materiais e de tensões na zona de falha no momento da ruptura.

Corpo de prova	Material	σ'_1 (MPa)	σ'_3 (MPa)	σ'_{falha} (MPa)	τ_{falha} (MPa)	Int. Coesivo(MPa)	Âng. de atrito
CP1	Zona de dano	10,3	2	4,52	3,47	1,82	20°
		62,4	19	33,65	20,16	7,91	20°
CP3	Núcleo de falha	44,9	19	24,85	10,55	1,51	20°

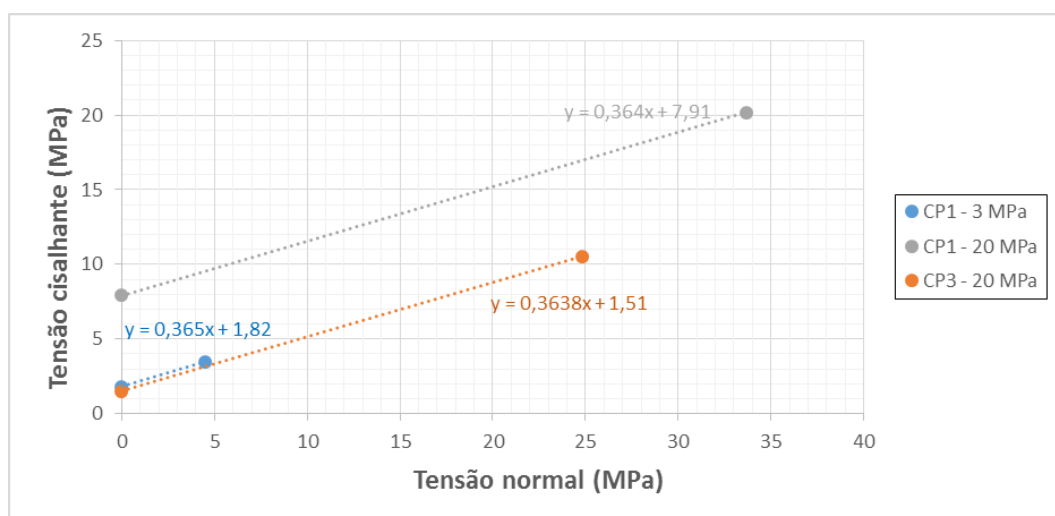


Figura 51 - Envoltórias de ruptura dos materiais de falha dos corpos de prova CP1 e CP3 calculadas com base na tensão de ruptura.

4.4

Observações acerca da permeabilidade através da falha

Os ensaios triaxiais realizados nos corpos de prova aqui estudados foram feitos em conjunto com ensaios de permeabilidade axial, tanto em condições hidrostáticas, como em condições de tensão desviadora máxima. Tais ensaios são importantes para avaliar se a reativação da falha ao longo do corpo de prova pode modificar a permeabilidade através desta (permeabilidade axial).

Os resultados dos ensaios laboratoriais de permeabilidade realizados nos corpos de prova modelados são ilustrados na Figura 52. Com o aumento da tensão confinante, a permeabilidade axial da amostra diminui, possivelmente devido à compactação do espaço poroso, e consequente diminuição das gargantas de poros, impactando assim fortemente a permeabilidade.

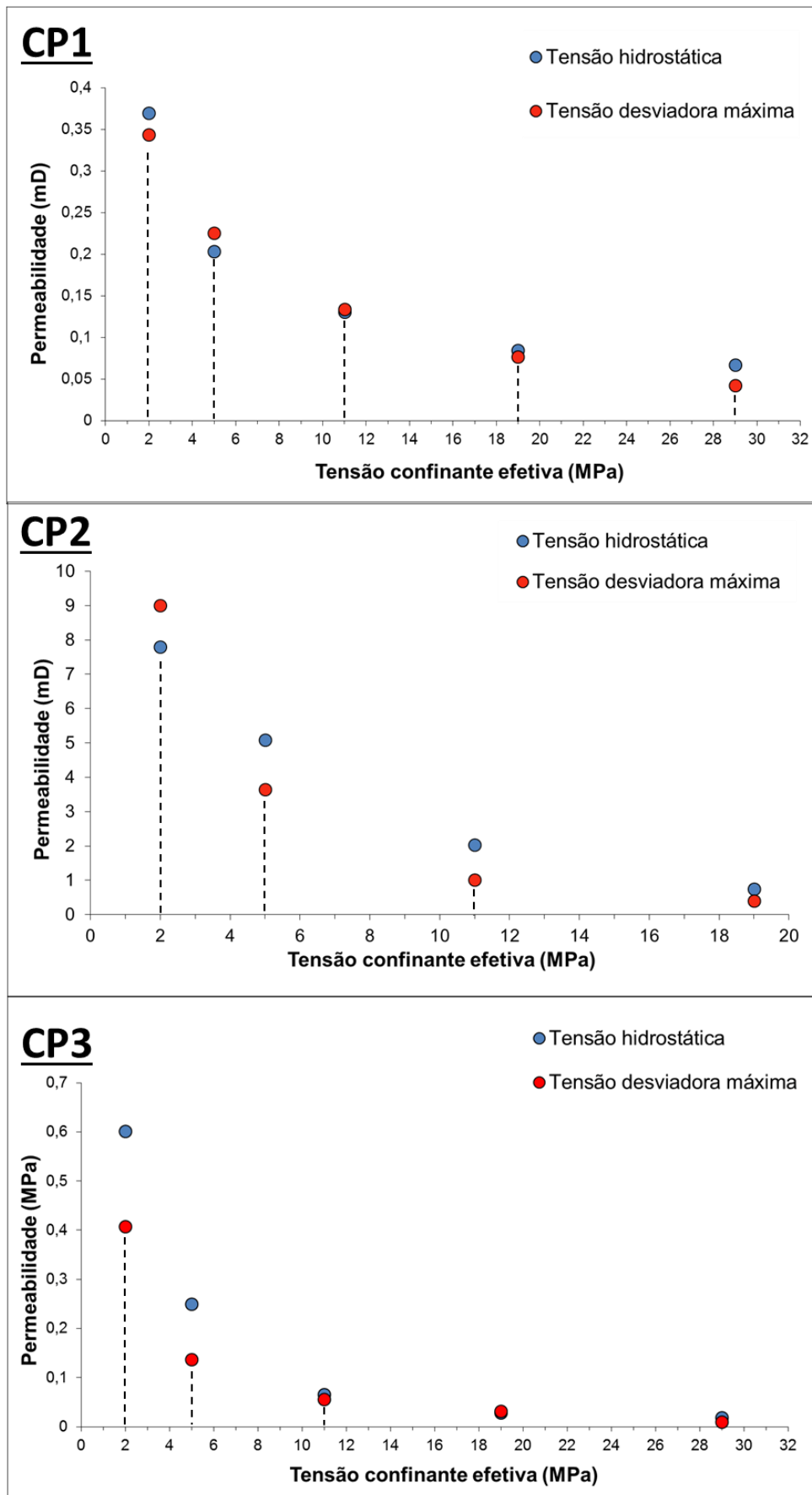


Figura 52 – Resultado das medições de permeabilidade nos corpos de prova, nos estados de tensão hidrostática e desviadora máxima (modificado de Kiewiet et al. 2016)

Observa-se também que há uma dependência da permeabilidade com o estado de tensões aplicado. Nos corpos de prova estudados, a permeabilidade é diminuída ainda mais, na maior parte das vezes, ao se aplicar uma tensão desviadora e, conseqüentemente, tensão cisalhante ou carregamento cisalhante sobre o plano de falha. Tal observação também pode ser explicada pelo efeito da compactação do espaço poroso, que impacta a permeabilidade uma vez que o cisalhamento imposto no plano de falha diminui a facilidade que os fluidos têm para percolarem entre os poros e atravessarem o plano de falha. Essa observação diverge com a de Wiprut & Zoback (2000), citada no item 2.2, que associa a reativação da falha, ou ruptura por cisalhamento, a um aumento de permeabilidade. No entanto, é importante observar que este experimento avaliou a permeabilidade numa combinação de direções paralela e transversal ao plano de falha (k_i) (Figura 53). Como o experimento foi realizado com fluxo axial à amostra, não se pode afirmar que em casos reais de reativação de falha, a permeabilidade ao longo da falha (k_y) seria reduzida assim como no resultado experimental. O experimento realizado não foi adequado para avaliar a permeabilidade (k_y) isoladamente, uma vez que a falha se encontra inclinada em relação ao fluxo axial, fornecendo assim um possível efeito combinado entre as várias direções de permeabilidade. Existe a possibilidade de, com o aumento da tensão cisalhante, se observar incremento de permeabilidade na direção k_y , decorrente de fraturamento e dilatância do material.

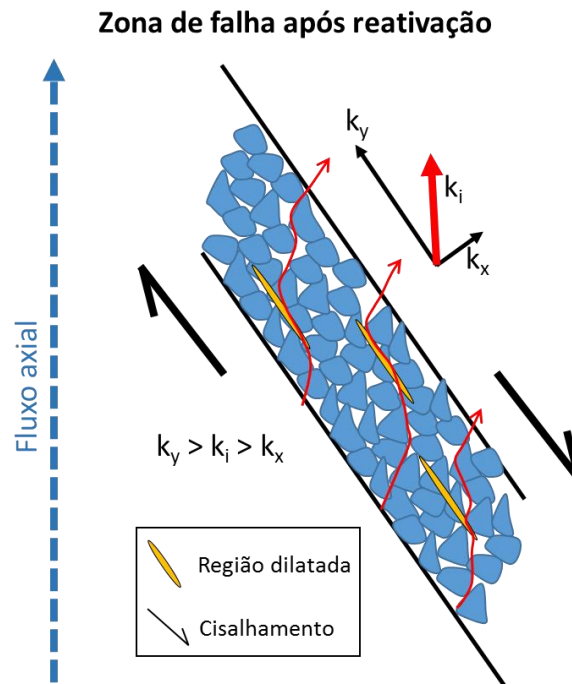


Figura 53 – Detalhamento hipotético do fluxo na zona de falha pós-reativação.

No projeto conduzido em parceria entre Petrobras e CSIRO, foram obtidas uma série de medidas de permeabilidade (Kiewiet, 2016), e considerando os 9 corpos de prova cilíndricos de travertino disponíveis para os deslocamentos de 20 e 120 mm, além do estado de tensão em que foi feita a medida, se hidrostático ou desviador, um total 38 medidas de permeabilidade foram analisadas neste presente estudo. O gráfico comparativo entre as permeabilidades no estado de tensão hidrostático e de tensão desviadora máxima obtidas em cada ensaio pode ser observado na Figura 54. Pode-se dizer que a maioria das amostras se situa na região de redução de permeabilidade durante o carregamento cisalhante na falha (incidência de tensão desviadora), ou seja, para a grande maioria das amostras analisadas a permeabilidade através do plano de falha diminui em condições próximas à ruptura cisalhante ou “reativação”.

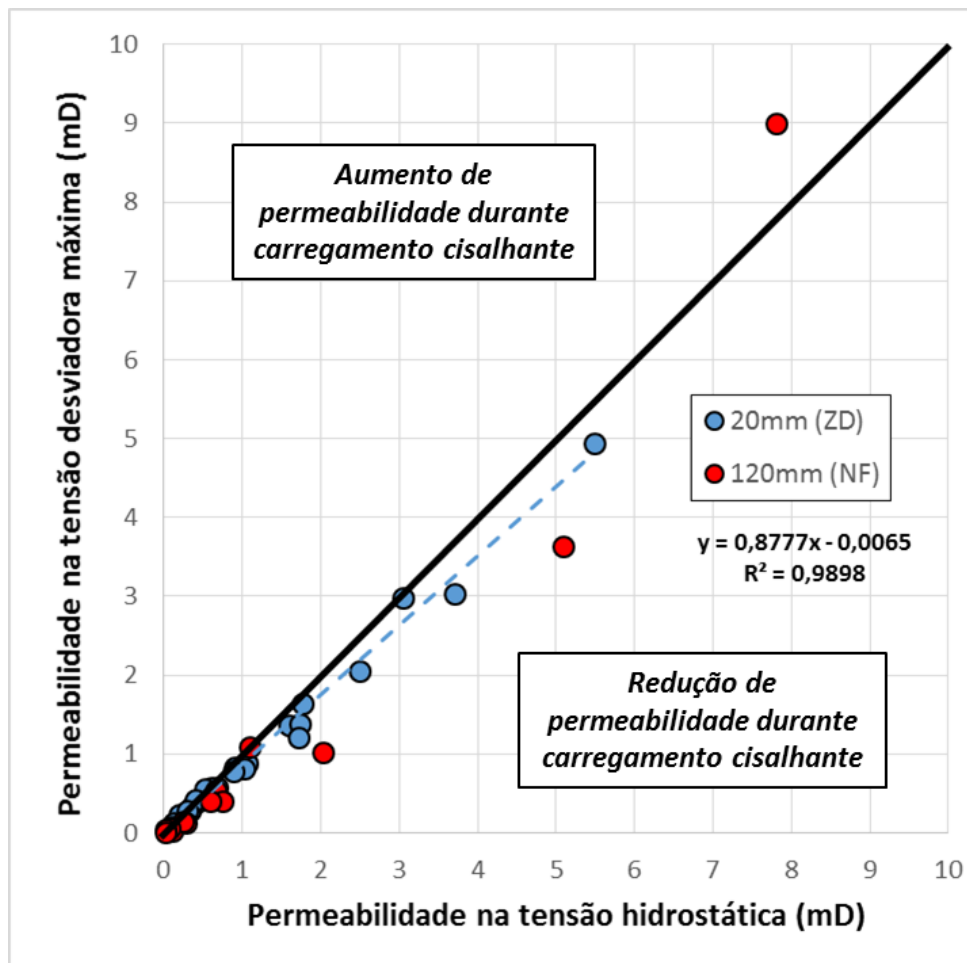


Figura 54 – Gráfico comparativo de permeabilidade durante estados de tensão hidrostática e desviadora máxima. ZD=Zona de dano; NF=Núcleo de falha.

Por conta da relação teórica entre permeabilidade e deformação volumétrica, análises de correlação entre estas duas variáveis foram realizadas. Apesar da deformação volumétrica utilizada aqui ser a deformação média do corpo de prova, representado pelo conjunto rocha intacta + rocha de falha, entende-se que o material da rocha intacta afetou pouco os resultados de medição de deformação volumétrica devido a sua alta rigidez e, portanto, pode-se assumir que os valores de deformação volumétrica obtidos no ensaio do corpo de prova, contendo estes dois materiais, são em maior parte devidos à deformação da rocha de falha. Na Figura 55 são apresentados os resultados de variação da permeabilidade com a deformação volumétrica para amostras representativas de núcleo de falha (Figura 55a,b,c), *i.e.* 120 mm de deslocamento cisalhante e amostras representativas de zona de dano (Figura 55d,e,f), *i.e.* 20 mm de

deslocamento cisalhante. Considerando as amostras representativas do núcleo de falha, pode-se observar uma relação mais forte entre a deformação volumétrica e a variação de permeabilidade. Dividindo-se a permeabilidade medida em condições de tensão desviadora máxima pela permeabilidade medida em condições hidrostáticas, obtêm-se um fator que relaciona as duas medidas, e que pode ser utilizado como fator multiplicante para corrigir ou transformar mutuamente uma permeabilidade na outra. A eq.(27) foi obtida a partir do ajuste aos pontos no gráfico da Figura 55a, e calcula o fator apropriado para correção da permeabilidade de falha medida em condições de tensão hidrostática, para a permeabilidade em condições de tensão desviadora máxima, utilizando a deformação volumétrica resultante da deformação do corpo de prova carregado no sentido axial.

$$\text{Fator multiplicante} = 0.0458\varepsilon_{vol} + 0,8255 \quad \text{eq.(27)}$$

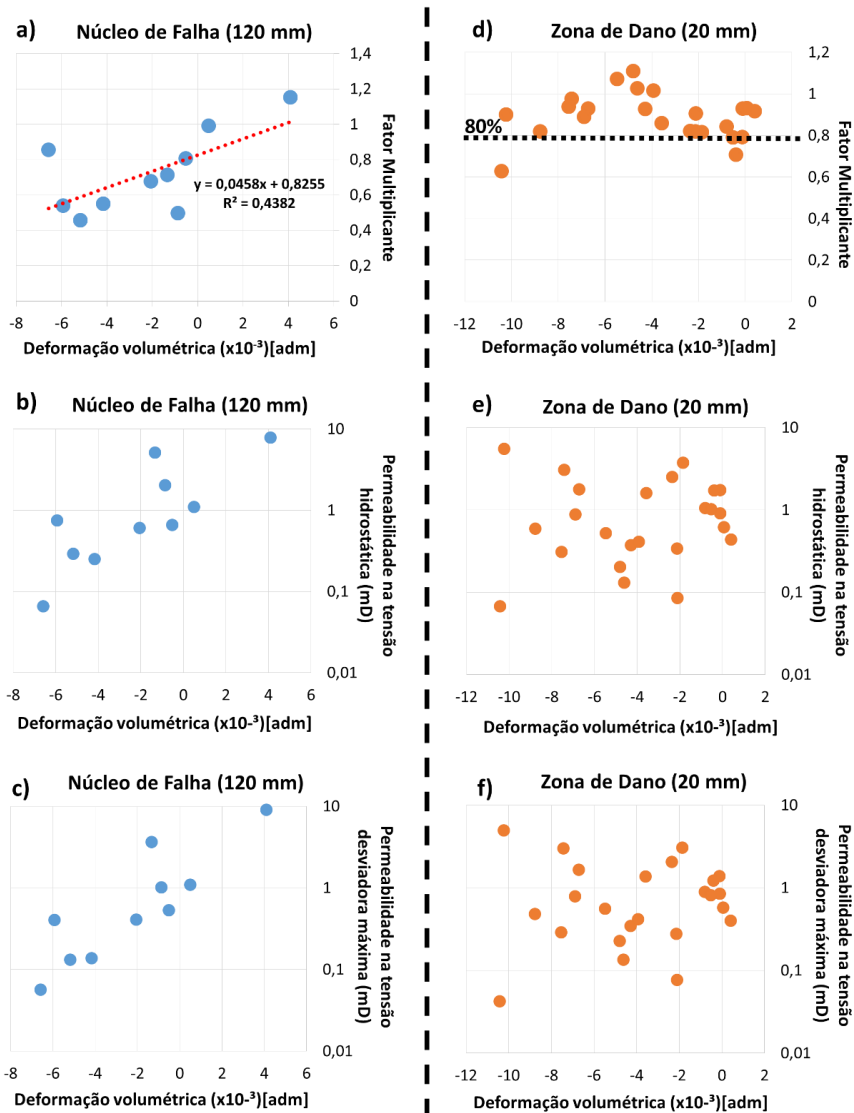


Figura 55 – Gráfico comparativo de permeabilidade x deformação volumétrica na tensão desviadora máxima.

Material representativo de núcleo de falha: a) Multiplicador de permeabilidade. b) Permeabilidade na tensão hidrostática. c) Permeabilidade na tensão desviadora máxima.

Material representativo de zona de dano: d) Multiplicador de permeabilidade. e) Permeabilidade na tensão hidrostática. f) Permeabilidade na tensão desviadora máxima

Os resultados relativos às amostras representativas de zona de dano indicam baixa relação entre a deformação volumétrica e a variação da permeabilidade, diferentemente do observado nas amostras de núcleo de falha. No entanto, a partir do gráfico da Figura 55d, podemos observar que a redução da permeabilidade na maioria das amostras de zona de dano se limita a 80% da permeabilidade original medida em condição de tensão hidrostática, de modo que este valor pode ser utilizado como uma referência de variação máxima de permeabilidade na zona de dano, durante eventos de reativação.