

## 6

### Modelagem bidimensional do processo de corte em rocha

Este capítulo descreve um modelo bidimensional do processo de corte em rocha e apresenta as análises dos resultados obtidos com a variação do refinamento da malha e dos parâmetros: profundidade de corte e pressão de confinamento.

#### 6.1. Geometria do modelo

A geometria dos modelos bidimensionais do processo de corte de rocha é apresentada na Figura 6.1, esta geometria foi baseada nos trabalhos de Cogollo (2011) e Martinez (2011).

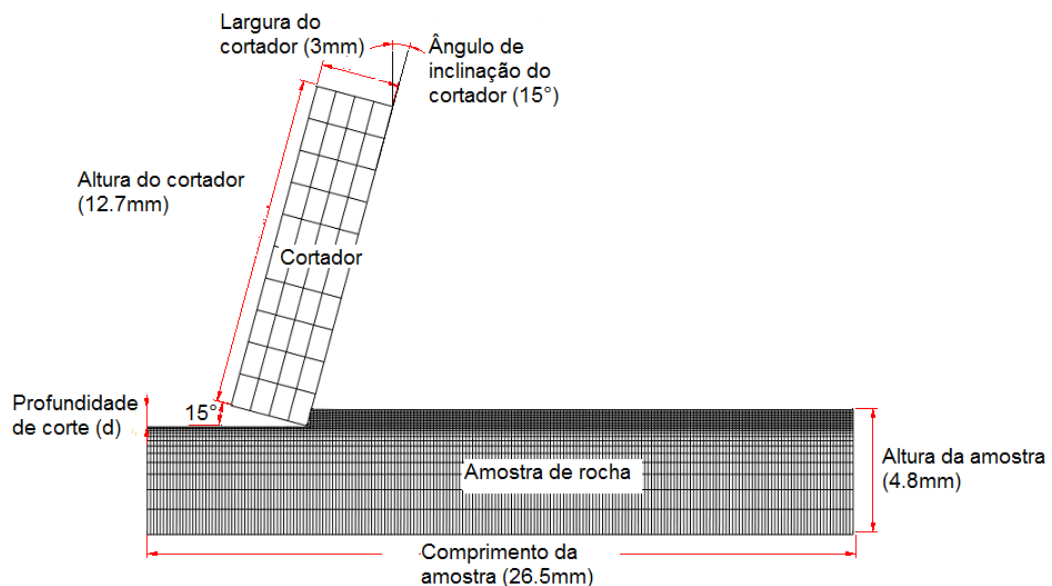


Figura 6.1 – Geometria dos modelos bidimensionais de corte.

#### 6.2. Condições de contorno

As condições de contorno mecânicas são ilustradas na Figura 6.2. Os deslocamentos horizontais e verticais não são permitidos aos nós da superfície abaixo da amostra de rocha. Os nós das faces laterais da amostra foram deixados sem restrição de movimento. Nos nós da parte de trás do cortador são colocados

apoios para calcular as forças de corte na direção do avanço do cortador, através do somatório das reações de apoio. No cortador é aplicada uma velocidade horizontal constante, e, no caso dos modelos com profundidade variável, é aplicada uma velocidade vertical no cortador. Na superfície da amostra de rocha é aplicada uma pressão de confinamento, uniformemente distribuída, que representa a pressão exercida pelo fluido de perfuração no fundo do poço.

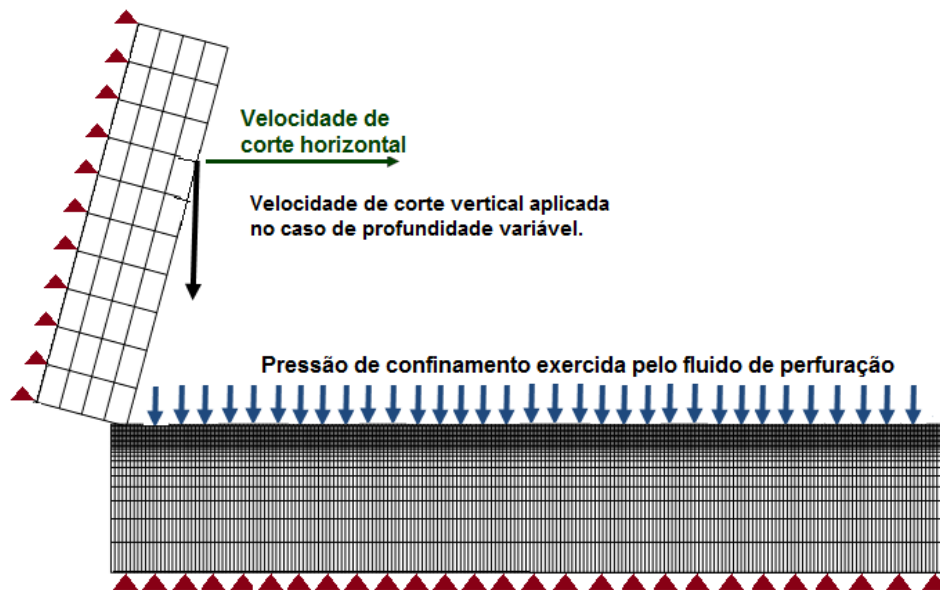


Figura 6.2 – Condições de contorno dos modelos bidimensionais de corte.

### 6.3. Definição dos materiais

O Quadro 6.1 mostra um resumo das propriedades do cortador e da amostra de rocha. O cortador representado nas simulações deste trabalho apresenta as propriedades mecânicas do compacto policristalino de diamante (PDC) descrito em Cheng *et al.* (2010). A amostra de rocha modelada representa o arenito analisado por Gowd & Rummel (1980).

Quadro 6.1– Propriedades dos materiais.

Parâmetros do material	Cortador PDC	Arenito
Módulo de Young (GPa)	890	16.6
Coefficiente de Poisson	0.07	0.23
Resistência à compressão não confinada –q (MPa)	-----	60
Densidade (kg.m <sup>-3</sup> )	3510	2200

Para descrever o comportamento plástico da rocha foi aplicado o modelo linear de Drucker-Prager, descrito no Capítulo 4. Os parâmetros de entrada para este modelo são apresentados no Quadro 6.2. e na Tabela 5.1.

Quadro 6.2 – Parâmetros plásticos da amostra de rocha.

Ângulo de Atrito no plano p-t ( $\beta$ )	52.16°
Relação entre a tensão de plastificação em tração e compressão triaxial (K)	0.778
Ângulo de dilatância	15.5°

#### 6.4. Malha

Como exposto na seção 3.2, todos os modelos foram desenvolvidos com a formulação Lagrangeana Modificada na malha de elementos.

Todas as malhas dos modelos bidimensionais estão compostas por elementos tipo CPE4R (Figura 6.3). Segundo a notação usada pelo programa ABAQUS, estas siglas (CPE4R) são a abreviatura das seguintes características do elemento: Quadrilátero (C), deformação plana (PE), com quatro nós (4) e integração reduzida nos pontos de Gauss (R). Optou-se pela interpolação linear e integração reduzida (um ponto de integração), pois reduz significativamente o tempo computacional das simulações. Cada malha foi altamente refinada na zona do corte.

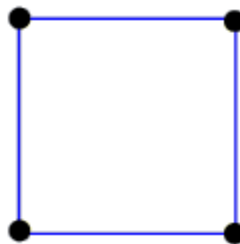


Figura 6.3 – Elemento finito tipo CPE4R usado nas malhas dos modelos bidimensionais.

## 6.5. Resultados e Análises

### 6.5.1. Análise de sensibilidade ao refinamento da malha de elementos finitos

Um dos aspectos mais importantes na modelagem com o método dos elementos finitos é a determinação do grau de refinamento da malha de elementos. A natureza do método dos elementos finitos indica que, dentro de certos limites, a precisão da solução aumenta com o número de elementos considerados, porém um grande número de elementos na malha pode requerer um alto custo computacional.

Neste trabalho foram considerados dois graus de refinamento na malha de elementos (grossa e fina) que representa a amostra de rocha. A discretização destes graus de refinamento se resume no Quadro 6.3. O número de elementos da malha do cortador foi mantido constante.

Quadro 6.3 – Graus de discretização das malhas para os modelos 2D.

Malha	Nós			Elementos		
	Cortador	Rocha	Total	Cortador	Rocha	Total
Grossa	55	1308	1363	40	1188	1228
Fina	55	5232	5287	40	4991	5031

Nas simulações, foi usado o modelo de profundidade de corte variável, no qual o cortador se traslada horizontalmente com uma velocidade constante de 1m/s e se afunda na amostra com uma velocidade vertical constante de 0.0604 m/s até atingir a metade da longitude da amostra. A partir da metade do comprimento da amostra, o processo de corte é realizado com profundidade de corte constante até acabar a simulação. A Figura 6.4 e a Figura 6.5 mostram os resultados das simulações para os dois tipos de malhas. Nestas figuras, também é mostrada a variável de dano denominada SDEG que indica a degradação da resistência da rocha. Através desta variável é possível observar como o modelo de erosão, usado na modelagem, representa adequadamente o desprendimento da rocha que atinge o máximo nível de dano ou perda total da resistência.

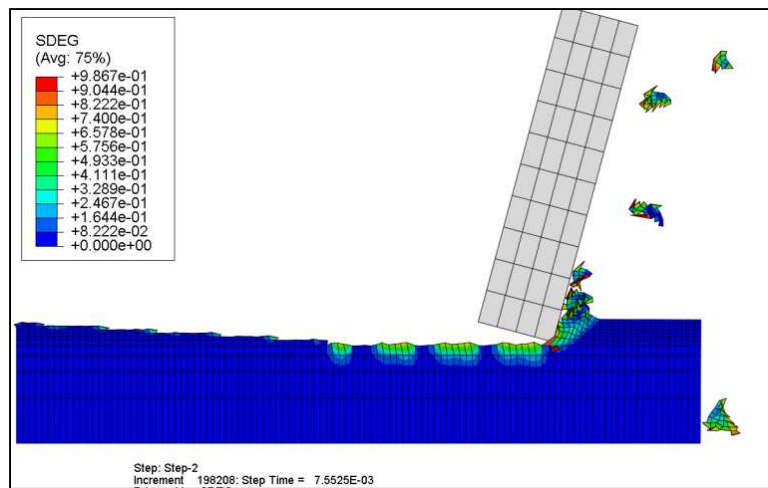


Figura 6.4 – Modelo 2D com malha grossa na amostra de rocha. Profundidade de corte variável e sem pressão de confinamento.

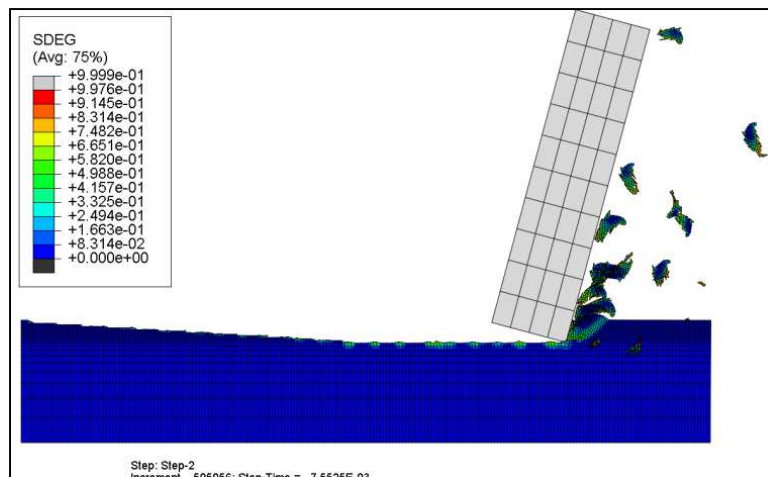


Figura 6.5 – Modelo 2D com malha fina na amostra de rocha. Profundidade de corte variável e sem pressão de confinamento.

Na Figura 6.6 e Figura 6.7 são mostradas as forças registradas no modelo de malha grossa e malha fina, respectivamente. Nota-se que o modelo de malha fina apresenta uma maior frequência na oscilação da força de corte no qual representa mais adequadamente o comportamento esperado de um meio contínuo. Quanto mais próximo ao tamanho dos grãos da rocha o elemento da malha for modelado, mais real será a representação do comportamento do material. Porém, se o tamanho dos elementos da malha for muito pequeno, as simulações podem requerer um alto tempo computacional.

O modelo de malha fina apresenta um histórico de forças de corte mais aproximado com as observações experimentais de Kaitkay & Lei (2005).

Conseqüentemente, nas simulações de variação de profundidade de corte e de pressão de confinamento dos modelos bidimensionais desenvolvidos neste trabalho, foi usada somente a malha fina.

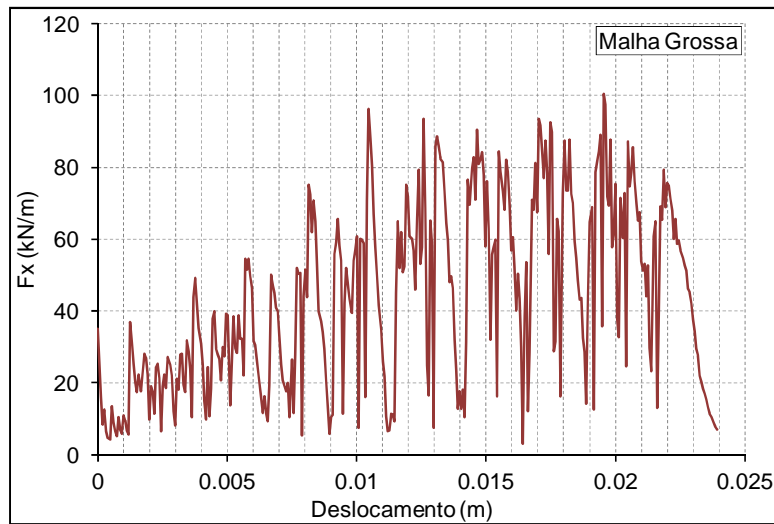


Figura 6.6 – Histórico de forças horizontais para modelo 2D de malha grossa, com profundidade de corte variável e sem pressão de confinamento.

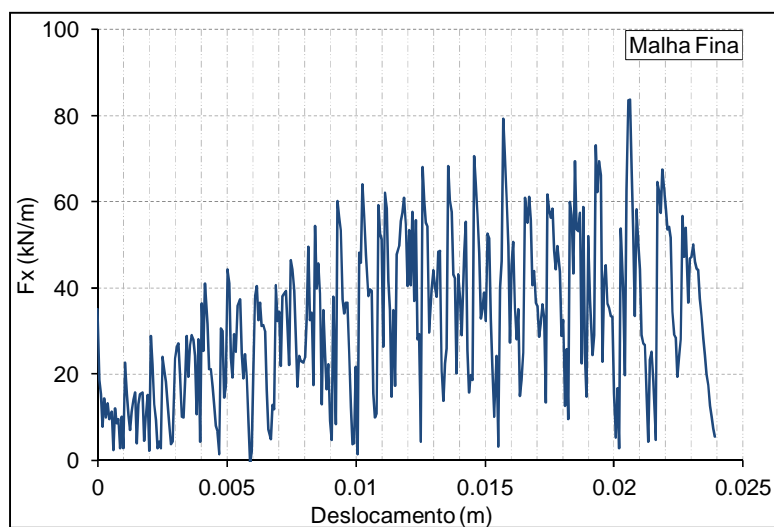


Figura 6.7 – Histórico de forças horizontais para modelo 2D de malha fina, com profundidade de corte variável e sem pressão de confinamento.

Para observar mais claramente o efeito do refinamento da malha, foi computada a área embaixo da curva  $F_x$  versus Deslocamento para obter o trabalho acumulado ao longo do deslocamento do cortador. Observa-se na Figura 6.8 que o uso de uma malha grossa apresenta uma maior quantidade de trabalho mecânico, no qual indica que este tipo de malha pode gerar superestimações das forças requeridas para o corte. Esta observação poderia

ser intuitiva, pois em uma malha mais grossa o cortador precisa de maior força para arrastar e cortar um elemento de maior tamanho.

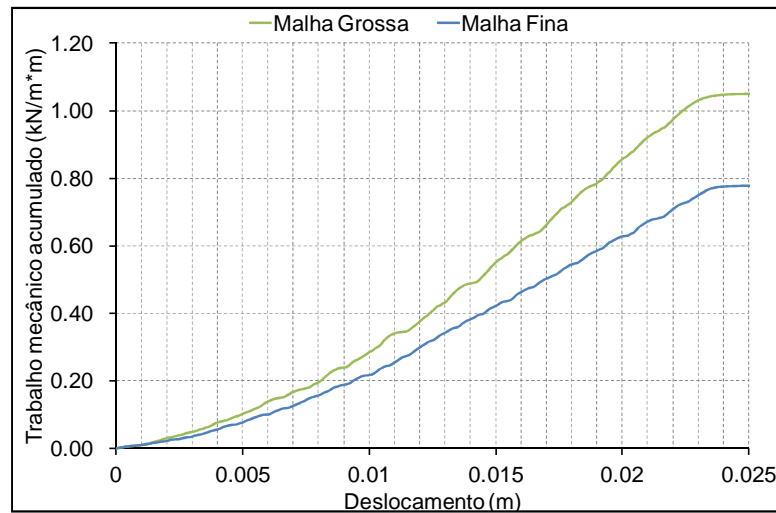


Figura 6.8 – Trabalho mecânico acumulado para dois tipos de malha. Modelo 2D sem pressão de confinamento e com profundidade de corte variável.

### 6.5.2.

#### **Análise da influência da variação da profundidade de corte**

Para a análise da influência da variação da profundidade de corte, foram usados modelos com profundidade de corte constante. A velocidade horizontal do cortador é mantida constante com um valor de 1m/s, enquanto que a velocidade vertical do cortador é nula.

A morfologia do material cortado para diferentes profundidades de corte pode ser apreciada na Figura 6.9, Figura 6.10 e Figura 6.11. Uma maior quantidade de rocha cortada é acumulada na frente do cortador quando a profundidade de corte é aumentada. Como dito acima, a variável de dano SDEG indica que a resistência do material de alguns elementos foi totalmente degradada. Essa degradação da resistência permite a remoção do material cortado da amostra, pelo qual se pode observar que as lascas de rocha foram desprendidas nas zonas com maior SDEG (cor vermelha e laranja).

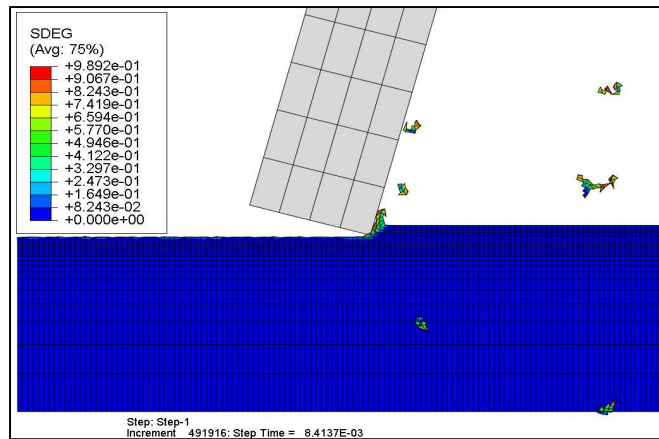


Figura 6.9 – Modelo de corte 2D com profundidade de corte 0.18mm e sem pressão de confinamento.

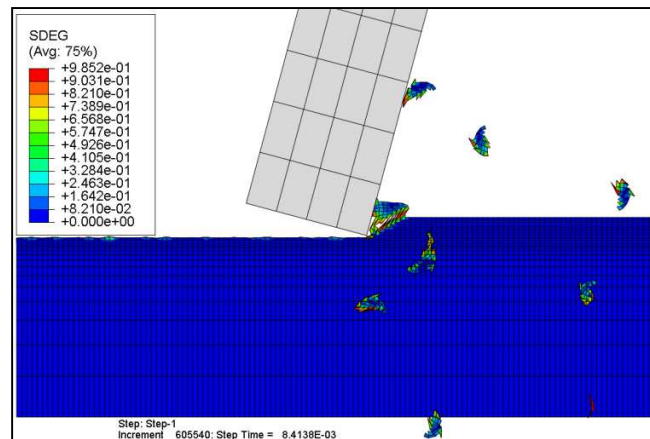


Figura 6.10 – Modelo de corte 2D com profundidade de corte 0.37mm e sem pressão de confinamento.

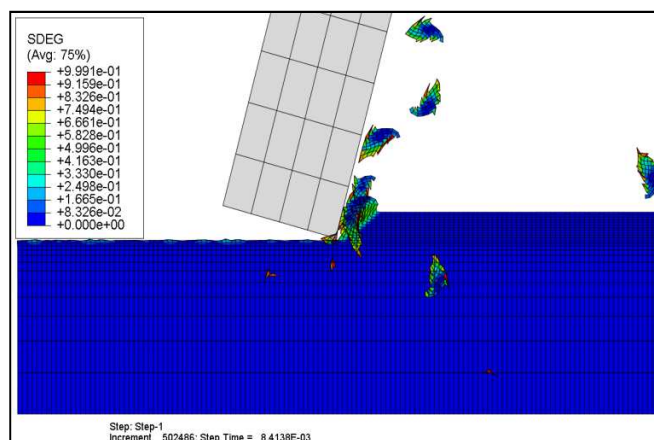


Figura 6.11 – Modelo 2D com profundidade de corte 0.55mm e sem pressão de confinamento.



Os históricos da força horizontal para profundidades de corte de 0.18mm, 0.37mm e 0.55mm são apresentados na Figura 6.12, Figura 6.13 e Figura 6.14, respectivamente. Apesar das flutuações das forças serem perceptíveis, é observado que a força média necessária para cortar a rocha é incrementada quando a profundidade de corte é aumentada, devido a uma maior quantidade de rocha removida.

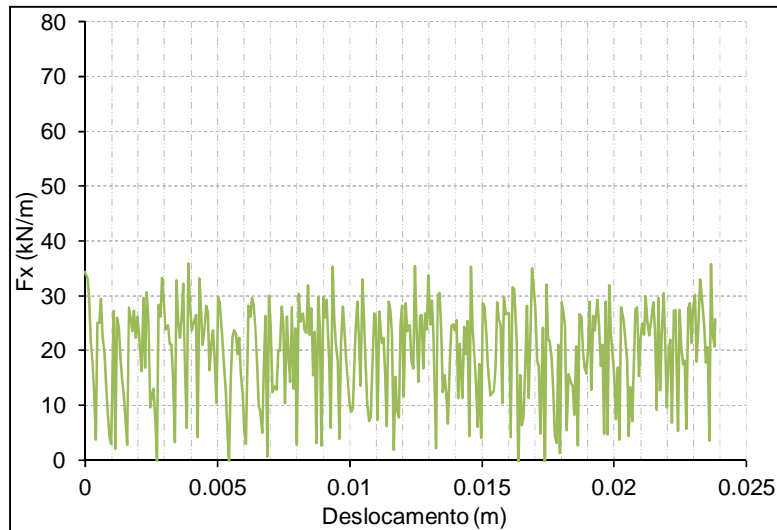


Figura 6.12 – Histórico de forças horizontais para uma profundidade de corte de 0.18mm. Modelo 2D sem pressão de confinamento.

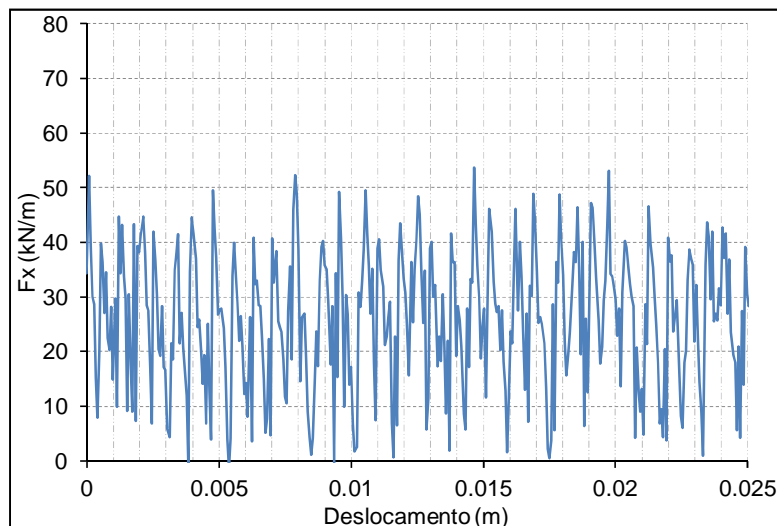


Figura 6.13 – Histórico de forças horizontais para uma profundidade de corte de 0.37mm. Modelo 2D sem pressão de confinamento.

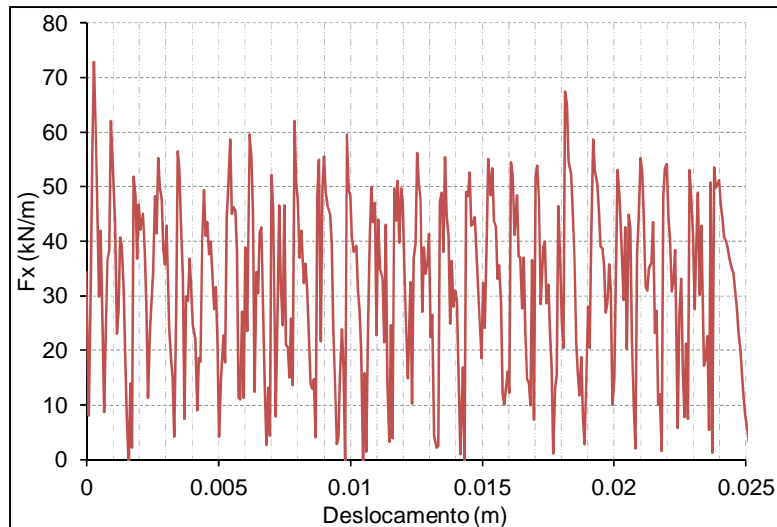


Figura 6.14 – Histórico de forças horizontais para uma profundidade de corte de 0.55mm. Modelo 2D sem pressão de confinamento.

O trabalho mecânico acumulado exercido pelo cortador sobre a amostra de rocha em uma distância  $x$  é calculado através da área embaixo da curva força-deslocamento. A Figura 6.15 apresenta os resultados do trabalho acumulado para as três profundidades de corte modeladas, mostrando que o cortador precisa exercer maior trabalho se o corte é realizado com maior profundidade.

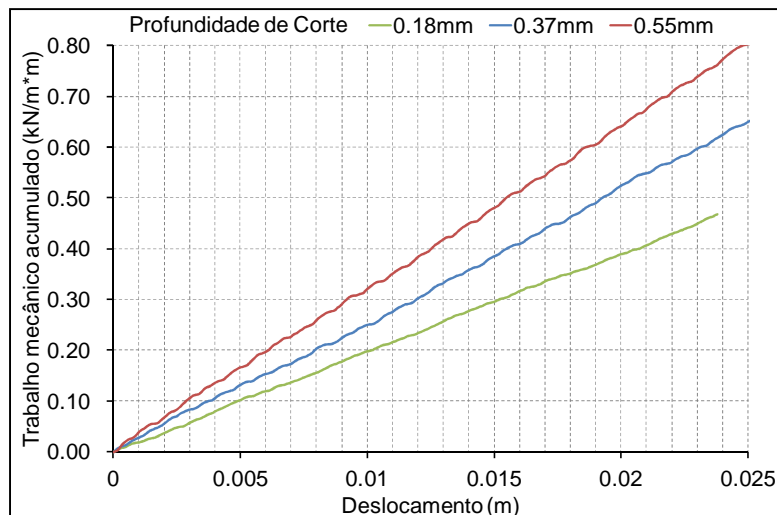


Figura 6.15 – Trabalho mecânico acumulado para diferentes profundidades de corte. Modelo 2D sem pressão de confinamento.

Para calcular a energia específica através da razão do trabalho mecânico por volume cortado, foi necessário estimar o volume de corte para cada profundidade. Devido à velocidade horizontal constante do cortador, o volume de

corte acumulado aumenta linearmente com o deslocamento. Logicamente, o volume de rocha cortado deve aumentar com a profundidade de corte. A Figura 6.16 mostra o volume de corte acumulado para as três profundidades de corte analisadas.

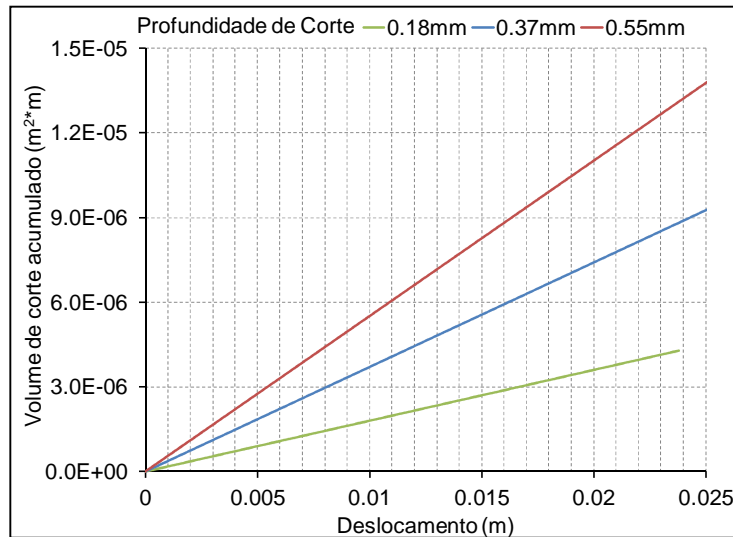


Figura 6.16 – Volume de corte acumulado para diferentes profundidades de corte. Modelo 2D sem pressão de confinamento.

Dividindo o trabalho mecânico (Figura 6.15) pelo volume de corte acumulado (Figura 6.16) em cada ponto da trajetória do cortador, foram obtidos os valores de energia específica mostrados na Figura 6.17. Estes resultados são coerentes com as observações feitas no trabalho de Zhang *et al.* (2011) que concluíram que a energia específica mecânica tende a diminuir quando a profundidade de corte aumenta.

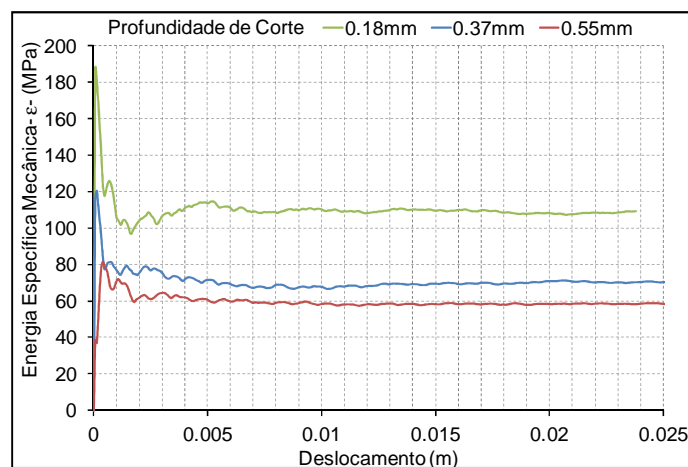


Figura 6.17 – Energia específica mecânica para diferentes profundidade de corte. Modelo 2D sem pressão de confinamento.

A Figura 6.17 também mostra que, para uma profundidade de corte de 0.55mm, o valor da energia específica mecânica é igual à resistência à compressão uniaxial da rocha (60 MPa) em condições de pressão atmosférica. Isso concorda com as observações feitas por Richard *et al.* (1998) que indicam que a energia específica é aproximadamente o valor da resistência uniaxial da rocha quando o corte é feito em condições atmosféricas e com um cortador inclinado a 15°.

Finalmente, para avaliar o efeito da profundidade de corte nas forças normais à superfície de corte, foi usado o conceito de Resistência à Perfuração (S). A Resistência à Perfuração (S) é definida de forma analógica à energia específica, pois relaciona a força normal à superfície de corte com o volume de corte, enquanto que a energia específica faz esta relação com as forças agindo em sentido paralelo à superfície de corte. Na Figura 6.18 observa-se que os resultados obtidos na simulação numérica são similares com os resultados experimentais obtidos por Adachi *et al.* (1996) apresentados na Figura 2.7. No diagrama da Figura 6.18 observa-se que a resistência à perfuração e a energia específica diminuem com o aumento da profundidade.

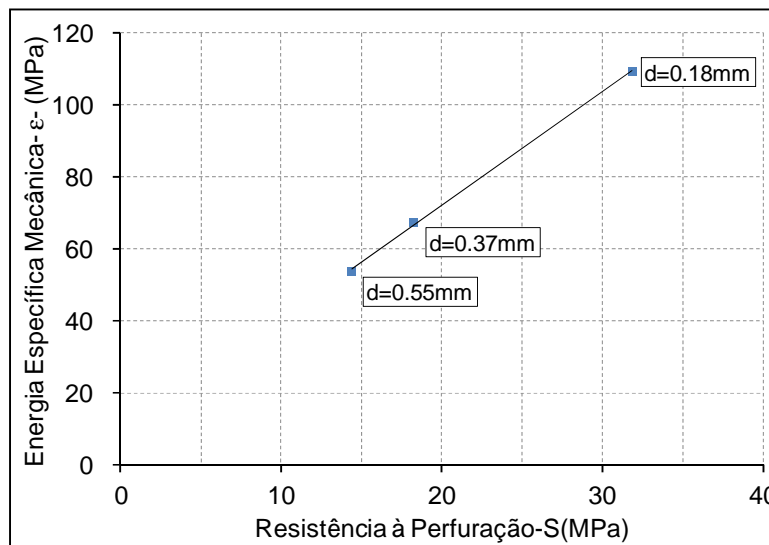


Figura 6.18 – Diagrama de Energia Específica versus Resistência à Perfuração para diferentes profundidades de corte (d). Modelo 2D sem pressão de confinamento.

### 6.5.3. Análise da variação da pressão confinante

Como foi apresentado na revisão bibliográfica, a aplicação de uma pressão de confinamento durante o processo de corte pode transformar o modo de

fratura do material rochoso de frágil para dúctil. Na Figura 6.19, Figura 6.20 e Figura 6.21 são apresentadas as morfologias do material cortado sob diferentes pressões de confinamento mantendo a profundidade constante (0.55mm). Pode-se observar que, para os cortes realizados sob pressões de confinamento de 5 MPa e 10 MPa, aparece a formação de lascas que indicam a presença de um modo de falha dúctil.

Da mesma forma que foi obtida a Figura 6.15 (através da integração da área embaixo da curva força-deslocamento), foi obtida a Figura 6.22 que apresenta o efeito conjunto da influência da profundidade e da pressão de confinamento. Observa-se que o trabalho mecânico necessário para o corte de rocha aumenta quando a pressão confinante e a profundidade são incrementadas.

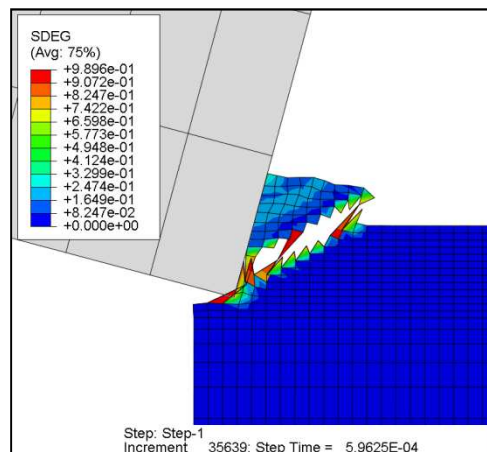


Figura 6.19 – Modelo 2D sem pressão de confinamento (0 MPa) e com profundidade de corte 0.55mm.

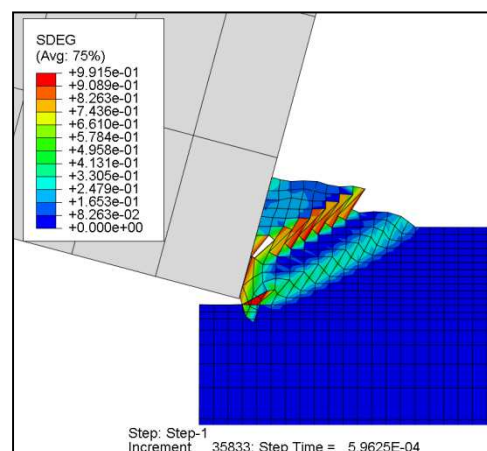


Figura 6.20 - Modelo 2D com pressão de confinamento (5 MPa) e com profundidade de corte 0.55mm.

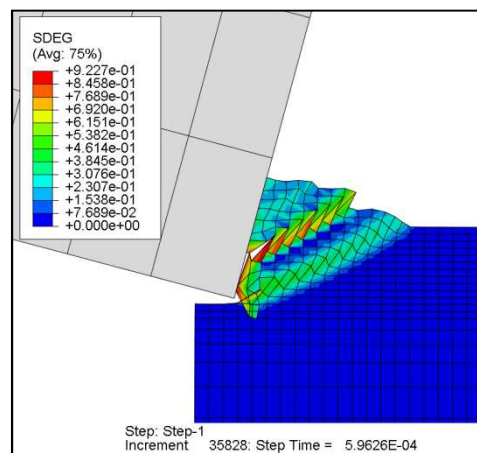


Figura 6.21 - Modelo 2D com pressão de confinamento (10 MPa) e com profundidade de corte 0.55mm.

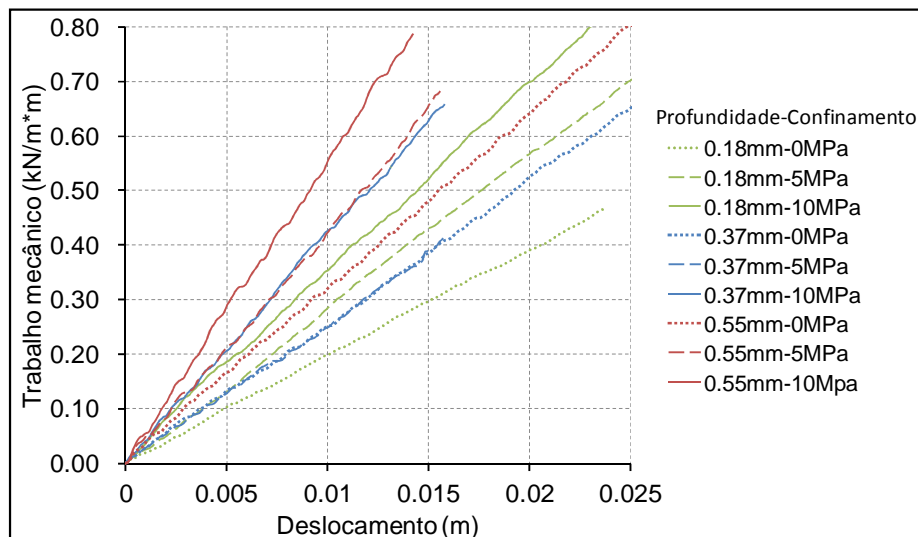


Figura 6.22 – Variação do trabalho mecânico com a pressão de confinamento para diferentes profundidades de corte. Modelos 2D.

A Figura 6.23 ilustra um resumo do valor das forças médias de cortes para diferentes profundidades e diferentes pressões de confinamento. Observa-se que a força média aumenta com a profundidade de corte e com a pressão de confinamento. Isso indica que a modelagem representa qualitativamente bem o acréscimo da resistência dos materiais rochosos com o incremento da tensão confinante.

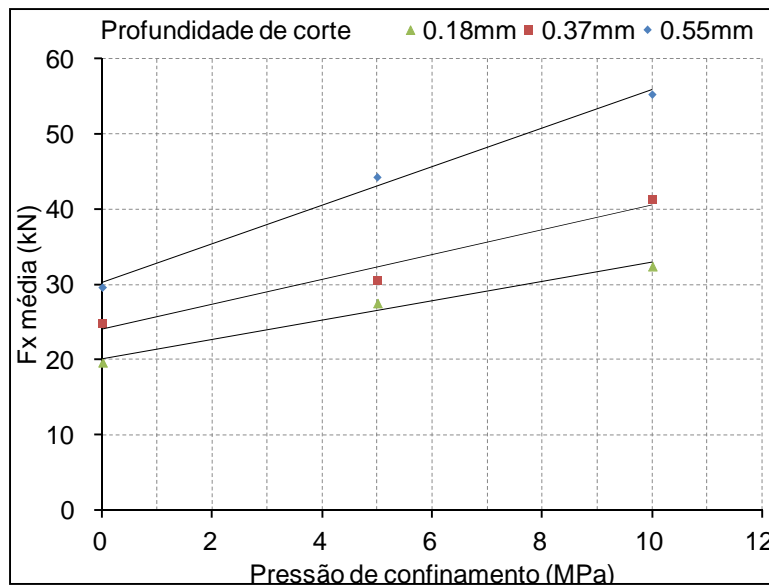


Figura 6.23 – Variação da força média de corte com pressão de confinamento para diferentes profundidades de corte em modelos 2D.

A Figura 6.24 mostra que a energia específica mecânica incrementa com a tensão confinante, porém diminui com o aumento da profundidade de corte. Esta tendência de redução da energia específica quando a profundidade de corte aumenta concorda com os resultados dos ensaios experimentais de cortadores únicos de Zhang (2011) mostradas na Figura 2.5.

A relação linear entre a energia específica e a pressão de confinamento apresentada por Detournay & Tan (2002) e mostrada na Equação (2.15), pode ser comparada com os resultados obtidos nas simulações deste trabalho porque cumprem com as condições com que esta relação linear foi proposta (cortador perfeitamente afiado que se movimenta a uma velocidade constante e remove o material a uma profundidade constante).

A Figura 6.24 mostra a relação linear da energia específica com a pressão de confinamento para as três profundidades de corte analisadas. Observa-se, em primeiro lugar, que o coeficiente “m” da Equação (2.15) para as três profundidades é coerente com a afirmação de Detournay & Tan (2002) que declaram que uma vez o ângulo de atrito interno de muitas rochas tenha um valor dentro do intervalo de 15° a 45°, espera-se que o coeficiente “m” varie entre valores de 3 a 25 para cortadores inclinados a um ângulo  $\theta=15^\circ$ .

Nota-se também que a melhor correlação linear é obtida para uma profundidade de corte de 0.55mm, que foi a profundidade que apresentou o melhor comportamento dúctil (Figura 6.21). Nesta profundidade de corte,

observa-se que a energia específica em condições atmosféricas teria um valor de 55 MPa. Fazendo uma relação entre a energia específica em condições atmosféricas e a resistência à compressão uniaxial foi obtido que  $\varepsilon/q = 0.92$ . Este valor é muito aproximado com alguns dos valores obtidos para diferentes arenitos nos trabalhos de Detournay *et al.* (1995) mostrados no Quadro 2.1.

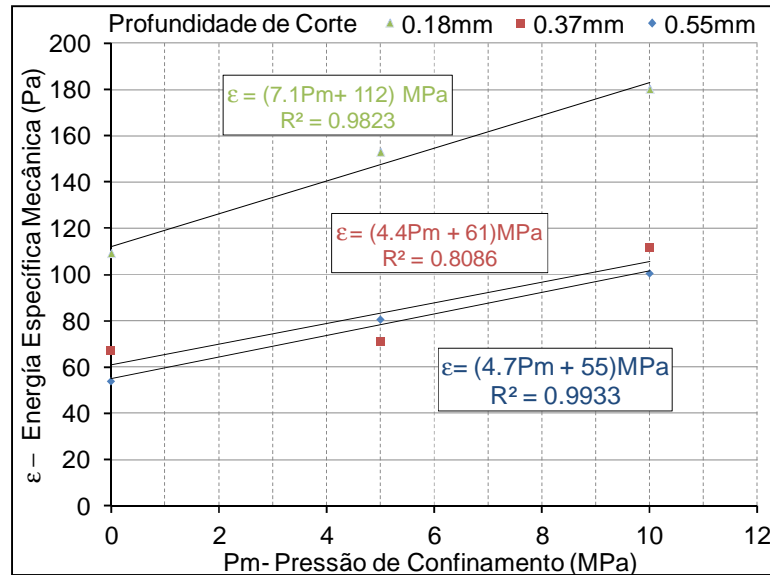


Figura 6.24 – Relação linear entre a energia específica ( $\varepsilon$ ) e a pressão de confinamento ( $P_m$ ) para diferentes profundidades de corte. Modelos 2D.