

5

Corte em Rocha

5.1.

Introdução

Ensaio de corte em rocha em laboratório feitos por Richard (1999) num dispositivo chamado de “Rock Strength Device” desenvolvido na Universidade de Minnesota, mostraram que existem dois modos de falha que dependem da profundidade de corte. Quando a profundidade de corte é pequena, menor que 1,00 mm aproximadamente, a rocha rompe em modo dúctil. Este modo de falha é associado com o fluxo plástico contínuo que pulveriza o material na frente da ferramenta de corte. Quando a profundidade de corte aumenta, apresenta-se uma pequena quantidade de material esmagado na ponta da ferramenta de corte. No entanto, a maioria de eventos apresentados durante o corte no modo frágil corresponde à formação do “Chip”.

As fraturas se apresentam inicialmente perto da ponta do cortador e se propagam ao longo do material até atingir a superfície livre. O modo de falha, além da profundidade de corte, depende das condições de pressão aplicadas durante o ensaio. Para condições atmosféricas, geralmente o modo de falha é apresentado de forma frágil e para condições de corte sob pressão confinante o modo de falha é apresentado de forma dúctil. A figura 5.1 mostra um exemplo da variação de força horizontal versus o comprimento do corte.

Observações similares foram apresentadas por Chaput (1991) para o mecanismo de corte em rocha. Chaput (1991) observou que a profundidade de corte crítica para a transição entre os modos de falha diminui com a resistência do material. As soluções dadas por Merchant (1944) e Nishimatsu (1972) assumem o critério de falha de Mohr – Coulomb ao longo do plano de falha que se estende desde a ponta da ferramenta de corte até a superfície livre. Trabalhos mais recentes se concentram no esforço de determinar a energia específica no processo de corte.

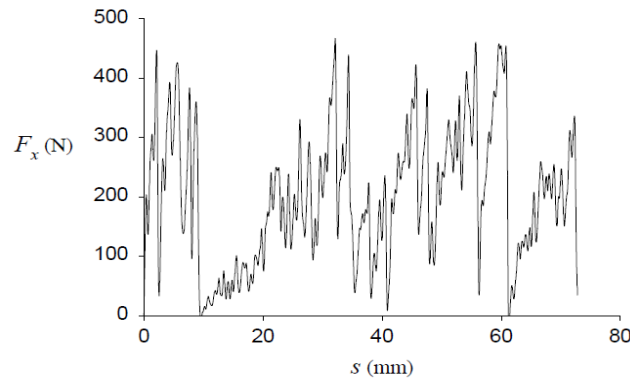


Figura 5.1: Valores de força típicos no ensaio de corte em rocha em arenito de Voges com $d = 3,6 \text{ mm}$ e $\theta = 15^\circ$. (Richard, 1999).

Detournay (2002) observou o efeito da energia específica no corte em rocha efetuando experimentos para quantificar a dependência desta energia em função da pressão de confinamento. Ledgerwood (2007) utilizou o método dos elementos discretos usando modelos em PFC2D e indicou que algumas medições do comportamento inelástico das rochas sob pressão confinante, como no caso da área embaixo da curva tensão – deformação, podem ser apropriados para determinar a perfurabilidade da rocha em altas pressões sendo esta área uma medida da energia específica.

5.2. Metodologia

O problema do corte em rocha é ilustrado nas figuras 5.2 e 5.3. Uma ferramenta de corte perfeita encontra-se inclinada de um ângulo θ (ângulo de ataque) e se movimenta horizontalmente a uma velocidade V constante ao longo da superfície da rocha.

A geometria do ensaio de corte neste trabalho é definida a seguir. Vide figura 5.2:

$H = \text{altura do especime} = 15 \text{ mm}$

$W = \text{Comprimento do especime} = 50 \text{ mm}$

$l = \text{comprimento do cortador} = 15 \text{ mm}$

$\theta = \text{rake angle} = 15^\circ$

$P = \text{pressão confinante}$

$s = \text{comprimento de corte} = 25 \text{ mm}$

$d = \text{Profundidade de corte} = 0.80 \text{ mm}$

$R_{min} = \text{Raio minimo das particulas} = 0.10 \text{ mm}$

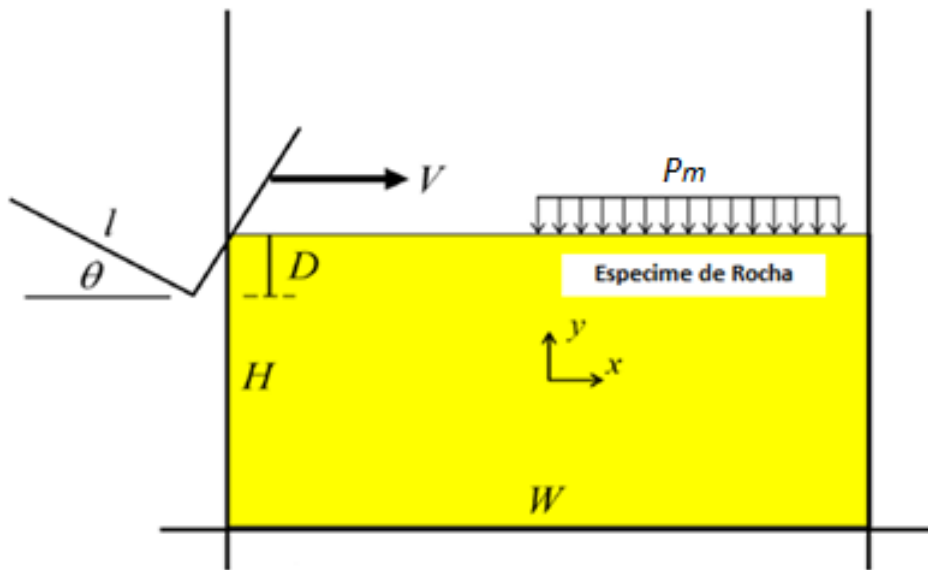


Figura 5.2: Ambiente de corte. (Itasca, 1999).

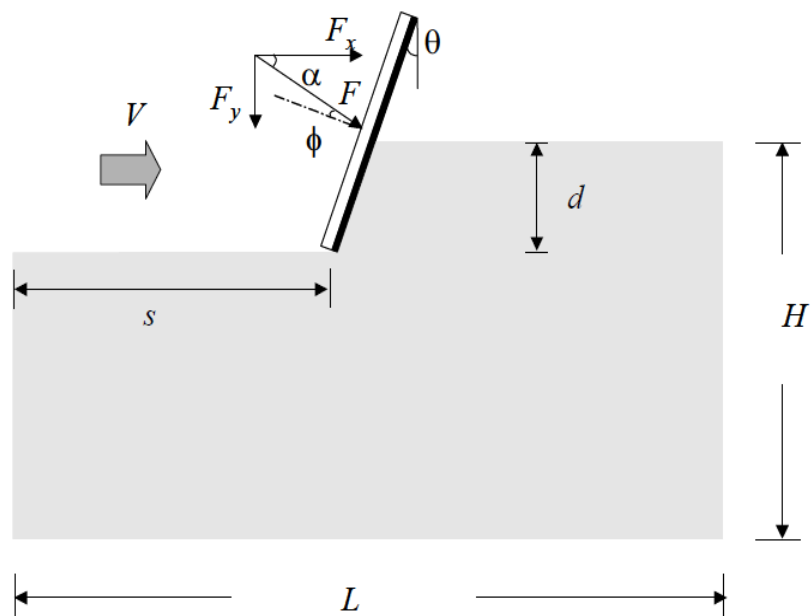


Figura 5.3: Configuração do processo de corte. (Huang, 1999)

A fim de obter os suficientes graus de liberdade na simulação de corte, as relações $L/R \gg 1,00$ e $H/R \gg 1,00$ são necessárias. Para minimizar os efeitos de fronteira, as relações H/d , s/d e L/s também precisam ser o suficientemente grandes na simulação numérica (Huang, 1999).

Muitos ensaios de corte em rocha feitos por Richard (1999) têm mostrado que o dano na rocha, causado no corte, limita-se à relação L/H .

Para este trabalho, foi tido em conta que os valores de força, a partir do modo de falha dúctil, tendem-se a estabilizar após o avanço do cortador como função da profundidade de corte, assim neste trabalho, o comprimento de corte é definido como a metade do comprimento da amostra (25 mm). As relações escolhidas para o domínio do médio discreto na simulação de corte foram de $H/R = 150$ e $L/R = 0,30$. O número de partículas usadas na análise foi de 16607.

Tendo em conta as considerações anteriores, foram criados dois arranjos de partículas com as mesmas propriedades elásticas e de resistência para a simulação, uma amostra (A) para simular o corte em rocha em condições atmosféricas e uma amostra (B) para simular o corte em rocha sob o efeito de uma pressão confinante. Os micro-parâmetros usados para a preparação destas amostras são apresentados na tabela 5.1.

A velocidade da ferramenta de corte foi escolhida o suficientemente pequena ($V = 1 \text{ m/seg}$) para garantir a condição de corte quase-estática.

Logo assim, é gerado um espécime (rocha virtual) de 50 mm x 15 mm que representará o mármore de Cartago virtual que será cortado. O espécime é confinado por três muros sem atrito, um na parte inferior e dois nos seus lados esquerdo e direito. O cortador é representado por dois simples segmentos de muro perpendiculares um com o outro apresentando um ângulo de ataque $\theta = 15^\circ$ e com um atrito interno de 0,20. O cortador é movimentado horizontalmente atravessando a rocha com uma velocidade constante de 1 m/seg. e com uma profundidade de corte de 0.8 mm.

As figuras 5.4 e 5.5 mostram o ambiente de corte, feito neste trabalho, para a simulação em PFC2D.

Note-se que na figura 5.5 a pressão é aplicada nas partículas de cor verde, na superfície do espécime de rocha. O código usado para aplicar a pressão de confinamento foi desenvolvido pela Itasca (2010).

Tabela 5.1: Micro – parâmetros usados na preparação da amostra para caracterizar o mármore de Cartago.

Propriedade	Unidade	Valor
σ_0^t	MPa	-0,1
R_{max}/R_{min}	-	1,3
ρ_{bulk}	kg/m^3	2650
E_c	GPa	35,5
K_n/K_s	-	2,6
μ	-	0,577
λ	-	1,0
E_c	GPa	35,5
K_n/K_s	-	2,6
$\sigma_c (mean)$	MPa	45,5
$\sigma_c (std)$	MPa	1,0
$\tau_c (mean)$	MPa	105
$\tau_c (std)$	MPa	1,0



Figura 5.4: Ambiente de corte simulado em PFC2D para condições atmosféricas.

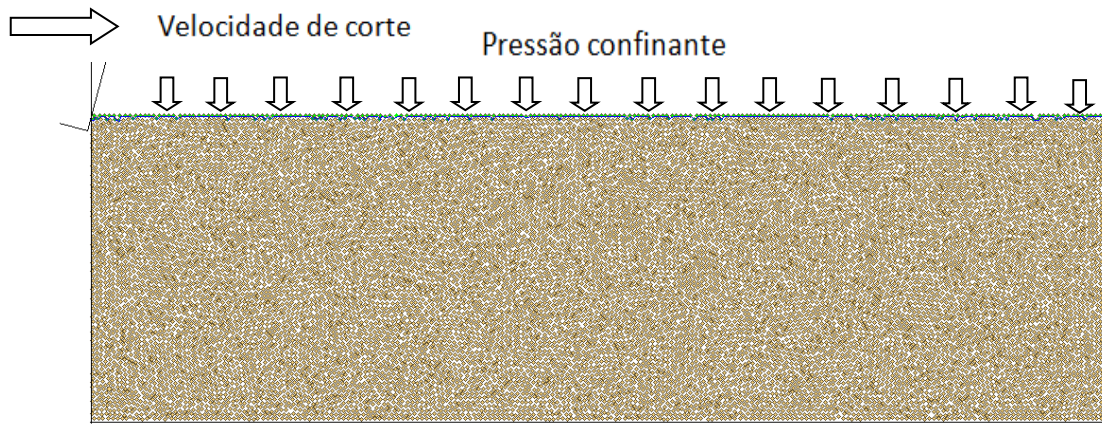


Figura 5.5: Ambiente de corte simulado em PFC2D para condições sob pressão confinante.

O código foi desenvolvido para identificar e criar uma cadeia de partículas conectadas que vão desde a face do cortador, selecionando as partículas estritamente superiores da amostra até atingir a última partícula que faz contato com o muro de confinamento. Esta cadeia é gerada usando uma função que verifica os contatos de cada partícula com o cortador e seguidamente procurando as partículas superiores que conformam a rocha virtual. A cadeia define uma superfície que é usada para aplicar uma força baseada na pressão de confinamento aplicada para cada caso (Itasca, 2010). Para diferentes deslocamentos da ferramenta de corte, até 25 mm (neste caso, cada 5 mm), foram obtidas as curvas de forças que atuam na cara do cortador nos eixos X do sistema de coordenadas cartesianas e calculada a energia mecânica específica usando a expressão 5.1 que está em função do valor do Trabalho Mecânico Acumulado:

$$MSE = \frac{\text{Trabalho Acumulado}}{\text{Volume de Rocha Cortado}} = \frac{\int (\text{Força}) dx}{\text{Volume cortado}} \quad (5.1)$$

Neste caso:

$$MSE = \frac{\int_0^{0,025m} F_x * dx}{w * d * 0,025m} \quad (5.2)$$

MSE ou Energia Mecânica Específica, é a energia necessária para remover ou cortar uma unidade de volume de rocha (Teale, 1964).

5.3. Cálculos, simulação do corte e resultados.

As seguintes figuras 5.6 e 5.7 são usadas com o fim de entender cada um dos resultados das simulações feitas nesta pesquisa.

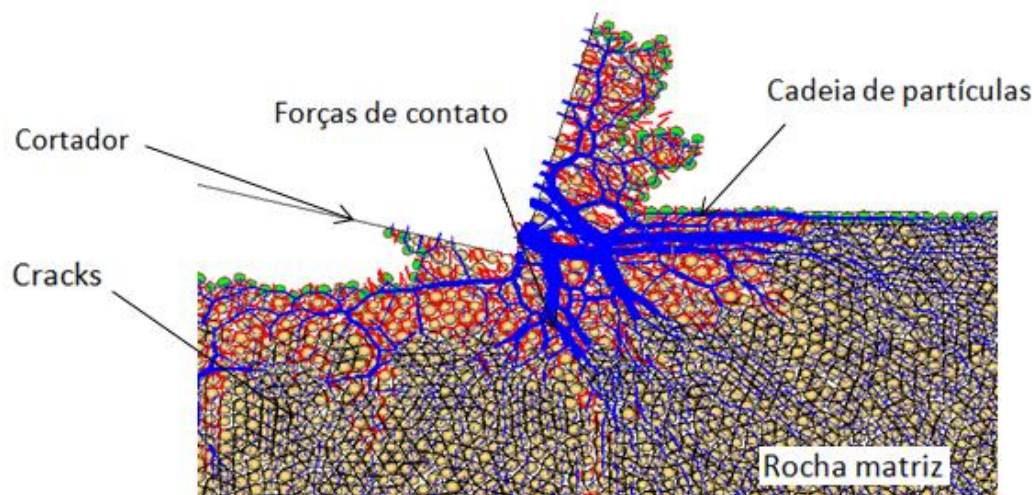


Figura 5.6: Principais componentes do ambiente de corte simulado em PFC2D.

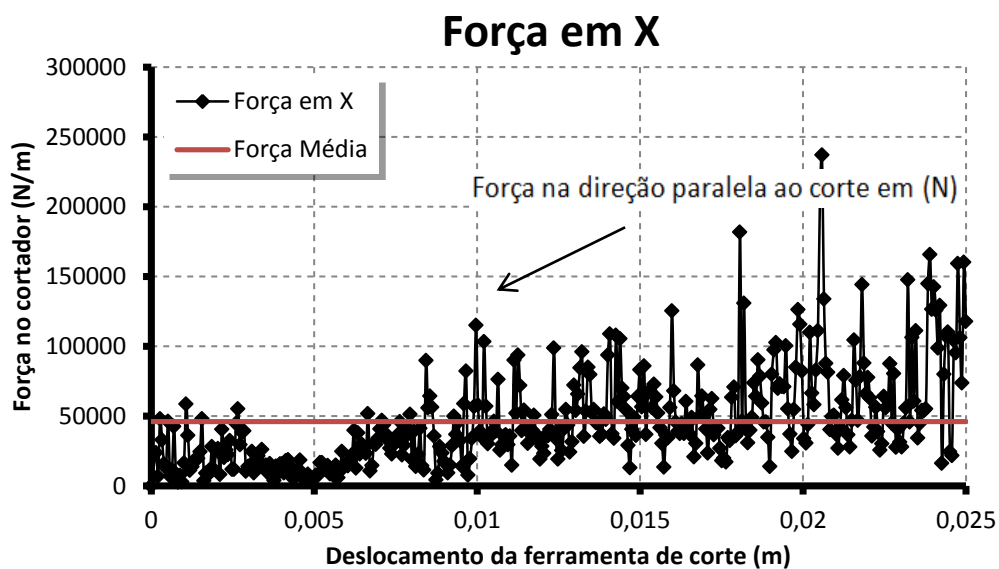


Figura 5.7: Forças no cortador (N) vs Deslocamento da ferramenta de corte (m).

5.3.1. Simulação do corte em condições atmosféricas:

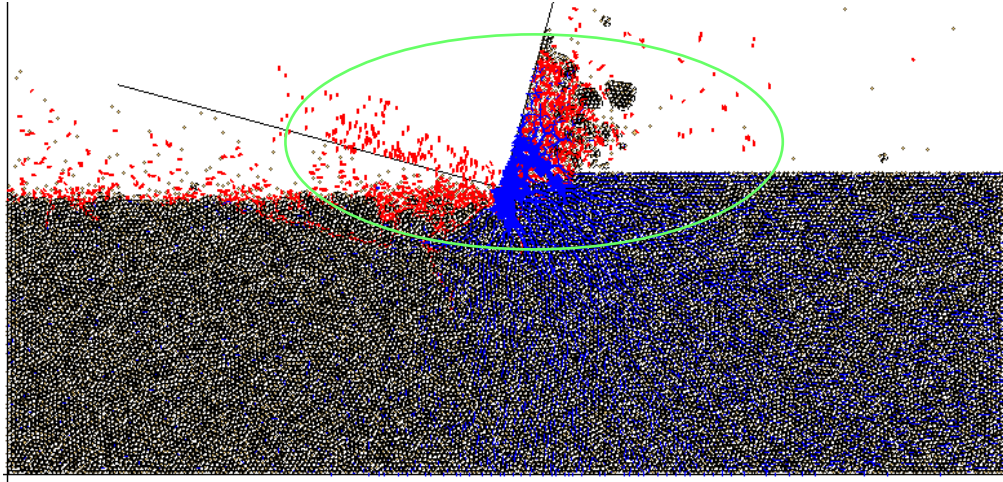


Figura 5.8: Ambiente de corte para condições atmosféricas para 25 mm

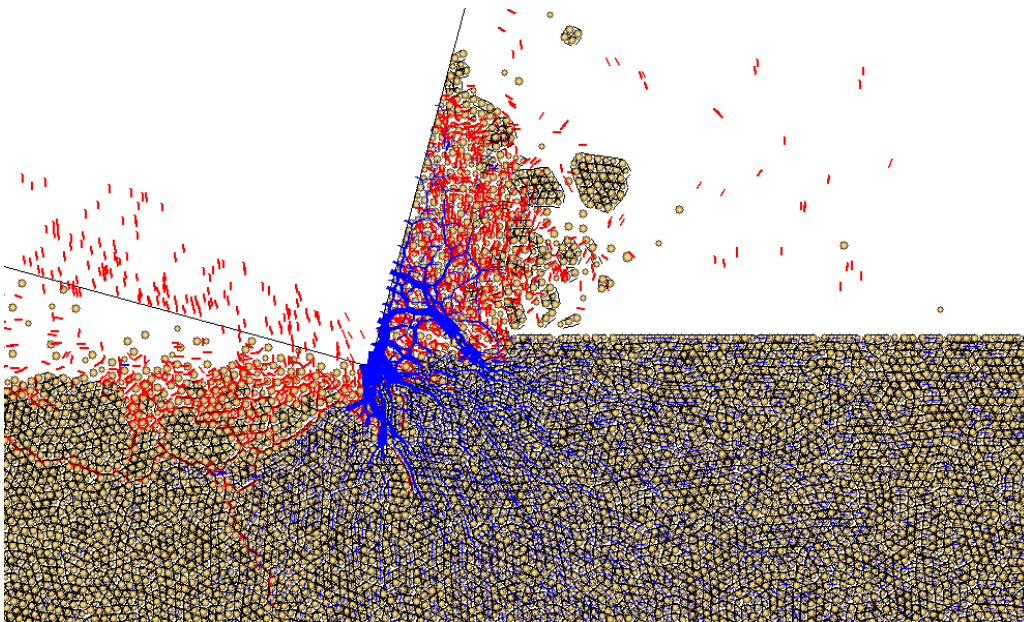


Figura 5.9: Detalhe do corte para condições atmosféricas para 25 mm de deslocamento da ferramenta de corte

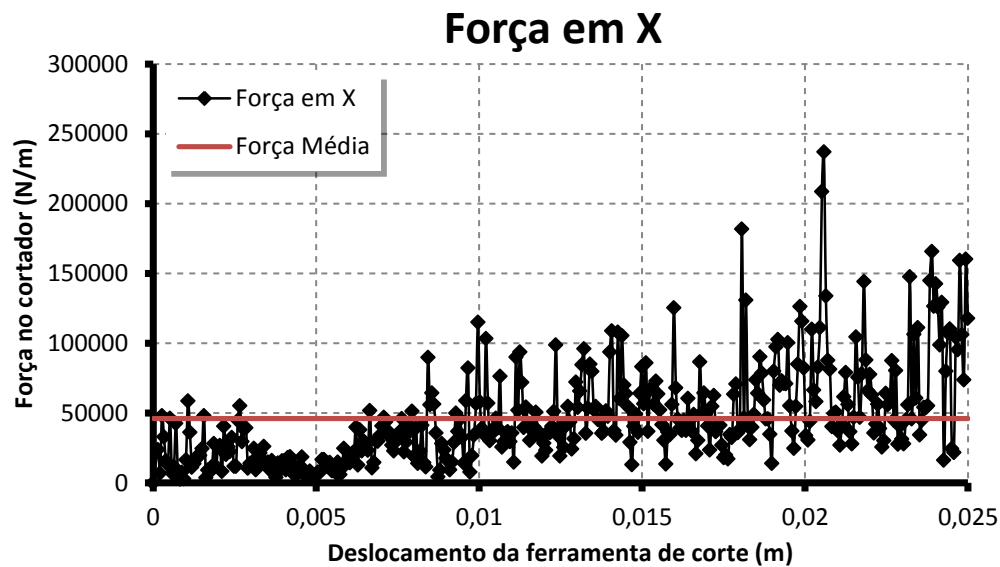


Figura 5.10: Forças no cortador em (N) para condições atmosféricas vs Deslocamento da ferramenta de corte em (m)

A figura 5.11 apresenta os resultados obtidos no cálculo do trabalho acumulado e pode-se obter desta curva o valor da força média. Com este valor de força média podemos calcular a MSE pela integral.

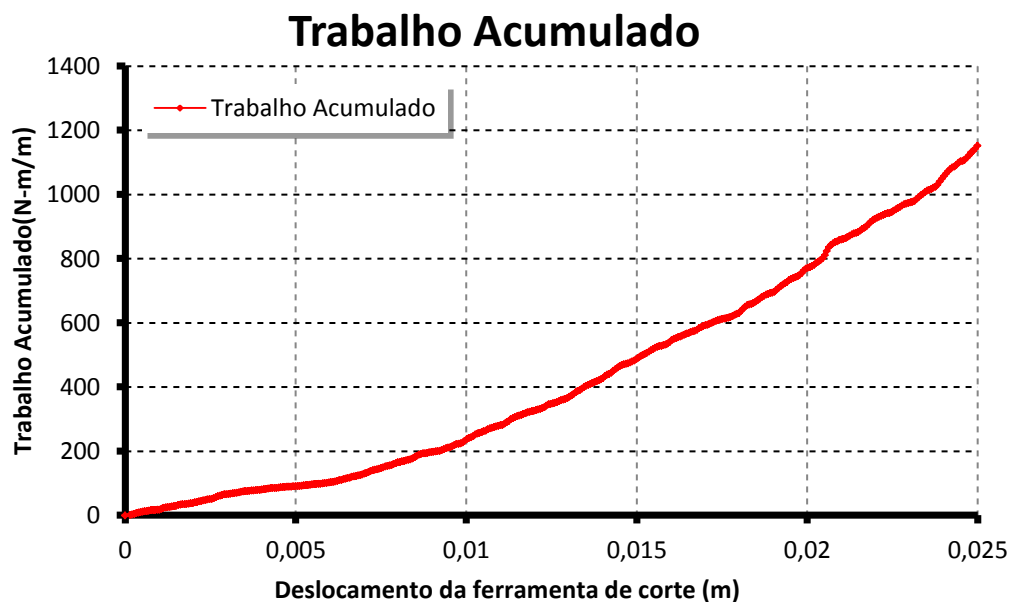


Figura 5.11: Trabalho mecânico acumulado em (kN-m/m) para condições atmosféricas vs Deslocamento da ferramenta de corte em (m)

A energia mecânica específica em condições atmosféricas calculada com a formulação da integral e é dada por:

$$MSE = \frac{\int_0^{0,025m} F_x * dx}{w * d * 0,025m} = \frac{46110,26N * 0,025m}{1,00m * 0,0008m * 0,025m} = 57,637 MPa$$

Os resultados da simulação estão apresentados na tabela 5.2.

Tabela 5.2: Resultados da simulação para corte sob pressão atmosférica.

Resultados da Simulação	
Força média (N) =	46110,26
MSE (MPa) =	57,637

Tem sido mostrado experimentalmente que a energia mecânica específica (MSE) para condições atmosféricas é aproximadamente igual à resistência à compressão simples (UCS) da rocha para um corte realizado com um cortador inclinado 15°, isto é um valor do ângulo de ataque = +15°. (Richard *et al.* 1998). No entanto, é observado que o valor de MSE para condições atmosféricas é menor ao UCS para os cálculos feitos na modelagem em 2D, isto se deve a que não são tidos em conta os efeitos das forças de atrito na terceira dimensão que no caso de ensaio em laboratório é tido em conta.

A figura 5.12 e a tabela 5.3 mostram os valores de energia específica variando o ângulo de ataque para +15°, +20° e +25° e mantendo os outros parâmetros do ambiente de corte constantes. Nesta gráfica pode-se observar que existe uma tendência polinomial, no qual para o trecho entre 15° e 25° o valor da MSE aumenta com uma tendência não linear.

A medida que o ângulo da ferramenta de corte aumenta, a taxa de perfurabilidade da rocha diminui devido a que é necessária uma maior energia mecânica específica para perfurar a rocha. Um gráfico de MSE variando a profundidade de corte e mantendo os outros parâmetros do ambiente de corte constantes também foi obtido como resultado das simulações.

O gráfico 5.13 descreve o comportamento da MSE para valores de profundidade de corte entre 0,8 mm e 1,20 mm e a tabela 5.4 mostra estes resultados. No caso de corte sobre pressão atmosférica, o valor de MSE aumenta em razão ao aumento da profundidade de corte até aproximadamente 1

mm e diminui logo após ter atingido seu valor máximo de MSE. Este comportamento pode ser dado pela transição dúctil – frágil. Os gráficos 5.12 e 5.13 mostram um comportamento similar com valores aproximados de MSE.

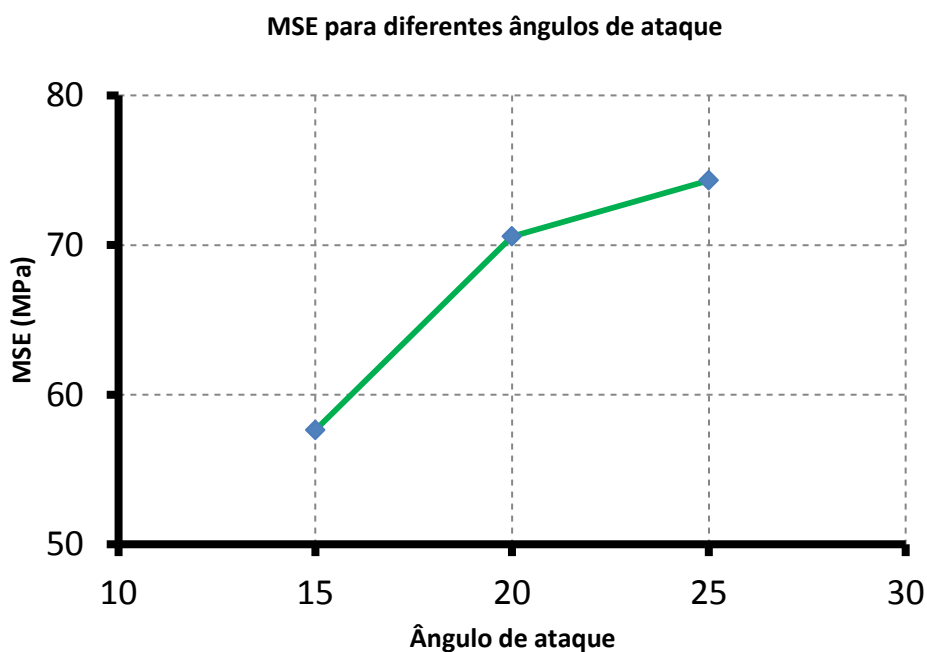


Figura 5.12: MSE para diferentes valores de ângulo de ataque sob pressão atmosférica.

Tabela 5.3: MSE para diferentes valores do ângulo de ataque em condições atmosféricas.

ENERGIA MECÂNICA ESPECÍFICA PARA DIFERENTES ÂNGULOS DE ATAQUE				
Força X	Força Y	Desloc.	Ângulo de ataque	MSE
(N)	(N)	(m)	(MPa)	(MPa)
-517000	363700	0,0250	15	57,63
-579200	383800	0,0250	20	70,574
-623700	517400	0,0250	25	74,32

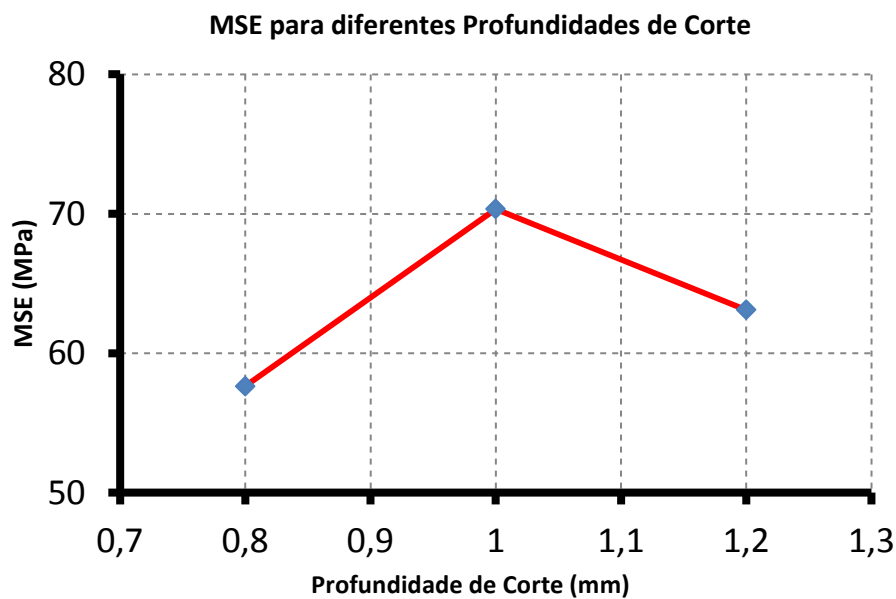


Figura 5.13: MSE para diferentes valores de profundidade de corte sob condições atmosféricas.

Tabela 5.4: MSE para diferentes valores de profundidade de corte em condições atmosféricas.

ENERGIA MECÂNICA ESPECÍFICA PARA DIFERENTES PROFUNDIDADES DE CORTE				
Força X (N)	Força Y (N)	Desloc (m)	Prof de corte (MPa)	MSE (MPa)
-517000	363700	0,0250	0,8	57,63
-594800	531800	0,0250	1,0	70,34
-552800	404500	0,0250	1,2	63,11

5.3.2 Simulação do corte sob pressão confinante

No caso de corte sob pressão confinante, a energia mecânica específica é calculada pela expressão da integral usada anteriormente no caso de corte em condições atmosféricas e pelo método descrito por Detournay (2002).

5.3.2.1 Pressão confinante de 2,80 MPa:

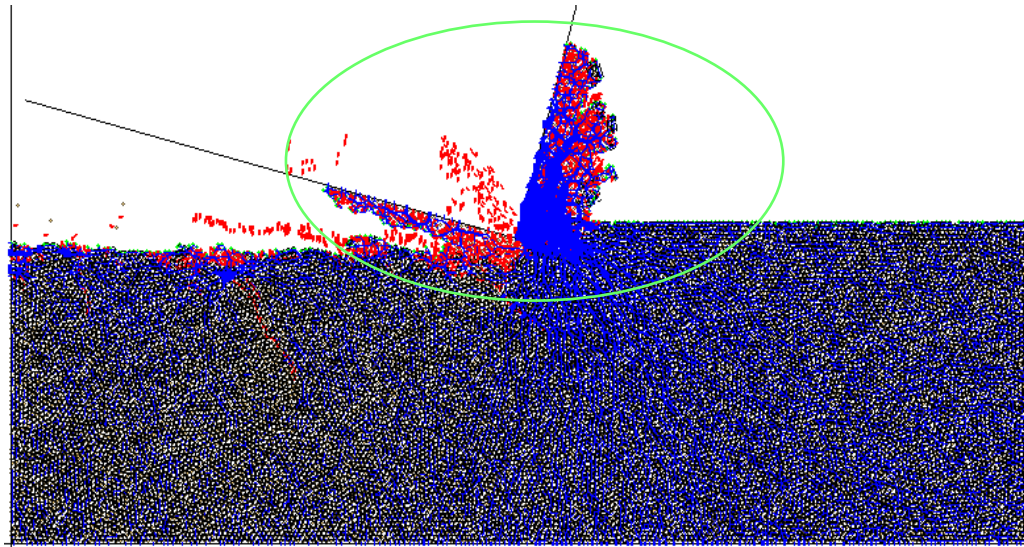


Figura 5.14: Forças no cortador com 2,80 MPa de pressão confinante para 25 mm

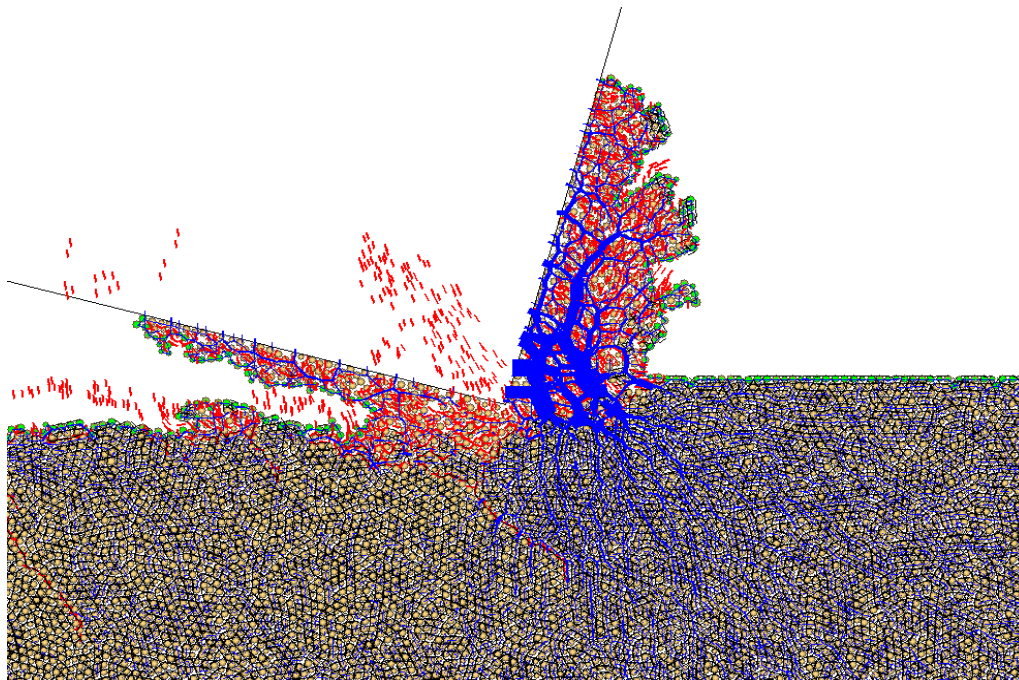


Figura 5.15: Detalhe do corte para 2,80 MPa de pressão confinante para 25 mm de deslocamento da ferramenta de corte

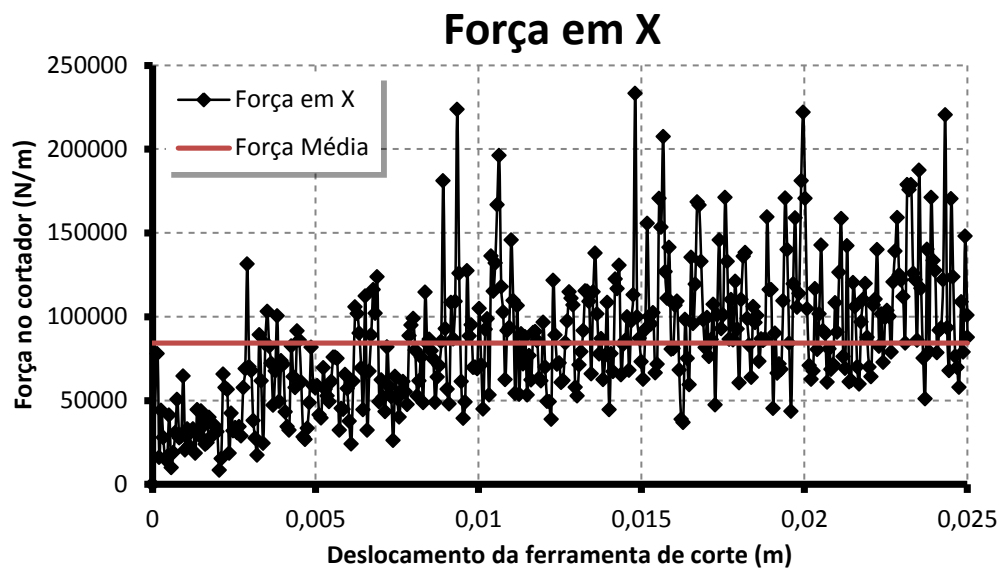


Figura 5.16: Forças no cortador em (N) para pressão de confinamento de 2.80 MPa vs Deslocamento da ferramenta de corte em (m)

A figura 5.17 apresenta os resultados obtidos no cálculo do trabalho acumulado e pode-se obter desta curva o valor da força média. Com este valor de força média podemos calcular a MSE pela integral.

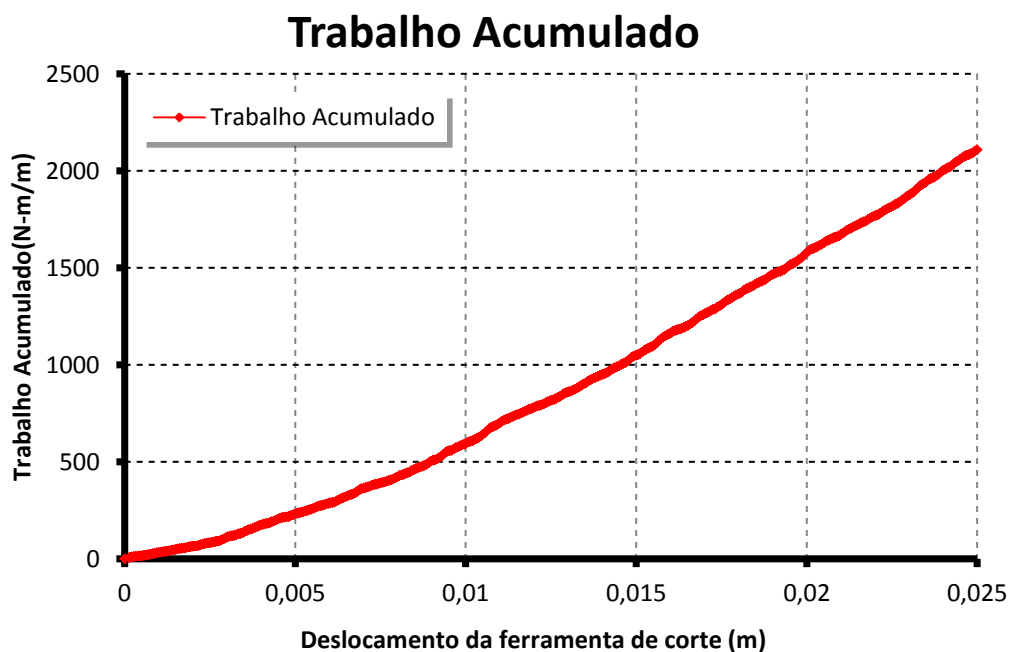


Figura 5.17: Trabalho mecânico acumulado em (kN-m/m) para 2,80 MPa de pressão de confinamento vs Deslocamento da ferramenta de corte em (m)

A energia mecânica específica para um ambiente de corte com pressão confinante de 2,80 MPa calculada pela expressão de Detournay é:

$$\psi = -\tan^{-1}\left(\frac{F_y}{F_x}\right) - \theta = -\tan^{-1}\left(\frac{44900}{-82600}\right) - 15 = 13,526$$

$$m = \frac{2 * \sin(\varphi) * \cos(\theta + \psi)}{1 - \sin(\varphi + \psi + \theta)} = \frac{2 * \sin(30) * \cos(13,526 + 15)}{1 - \sin(30 + 13,526 + 15)} = 5,972$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + m * P_m = 93,206 \text{ MPa} + 5,972 * 2,80 \text{ MPa} = 109,929 \text{ MPa}$$

As forças F_x e F_y foram determinadas como as forças aplicadas no cortador no final da simulação.

A energia específica calculada pela integral para uma pressão confinante de 2,80 MPa é:

$$MSE = \frac{\int_0^{0,025m} F_x * dx}{w * d * 0,025m} = \frac{84316,54 \text{ N} * 0,025m}{1,00 \text{ m} * 0,0008m * 0,025m} = 105,39 \text{ MPa}$$

Os resultados da simulação estão apresentados na tabela 5.5.

Tabela 5.5: Resultados da simulação para corte em rocha com pressão confinante de 2,80 MPa.

Resultados da Simulação	
Força média (N) =	84316,54
MSE (MPa) =	105,395

5.3.2.2

Pressão confinante de 6,65 MPa:

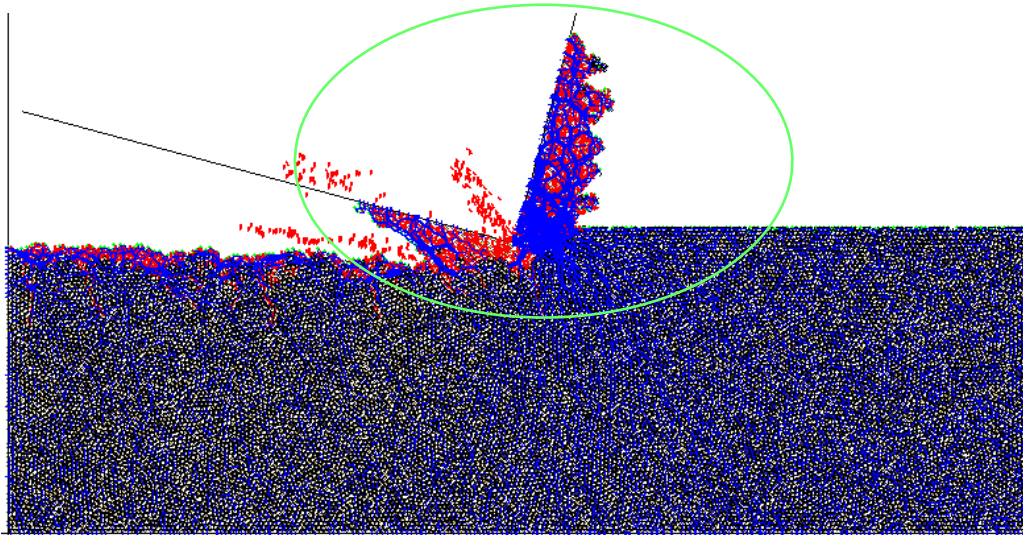


Figura 5.18: Forças no cortador com 6,65 MPa de pressão confinante para 25 mm

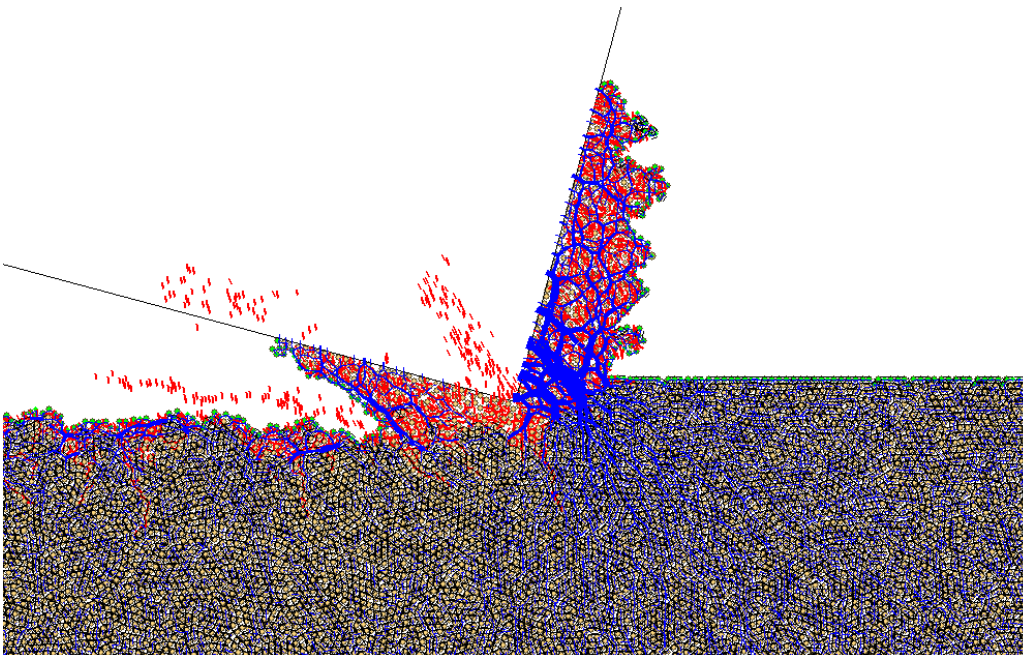


Figura 5.19: Detalhe do corte para 6,65 MPa de pressão confinante para 25 mm de deslocamento da ferramenta de corte

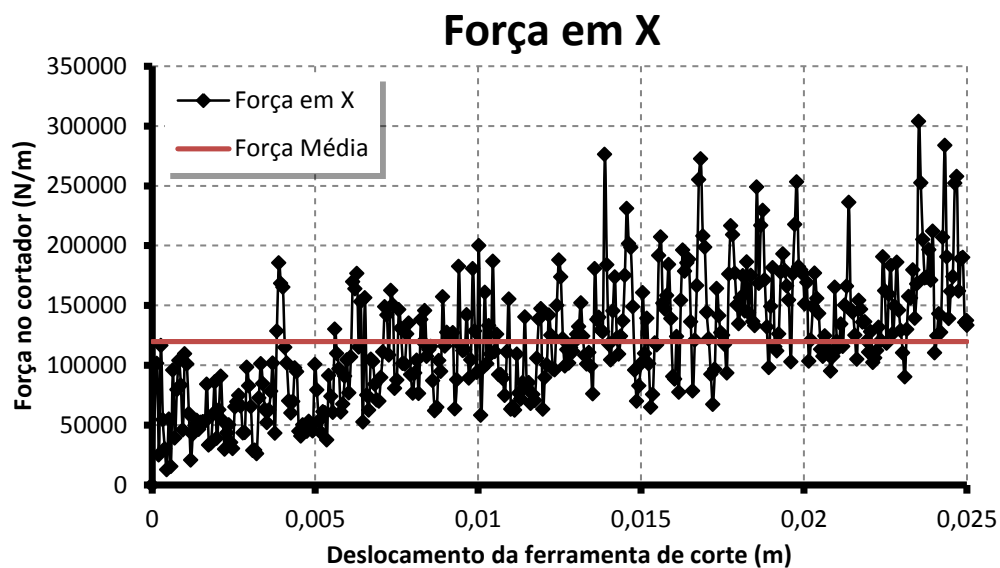


Figura 5.20: Forças no cortador em (N) para pressão confinante de 6.65 MPa vs Deslocamento da ferramenta de corte em (m)

A figura 5.21 apresenta os resultados obtidos no cálculo do trabalho acumulado e pode-se obter desta curva o valor da força média. Com este valor de força média podemos calcular a MSE pela integral.

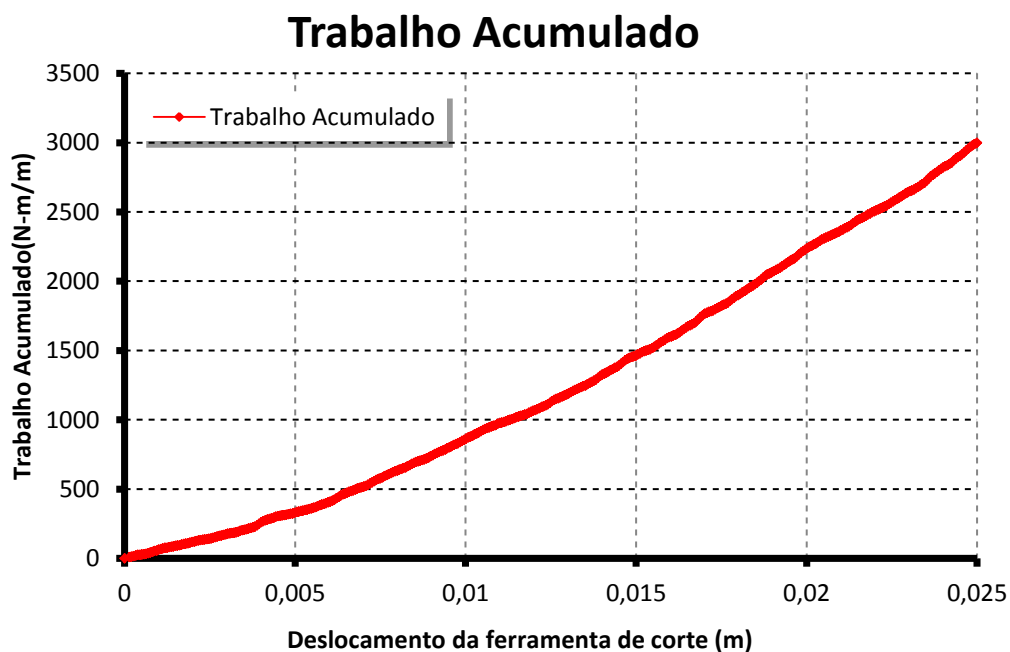


Figura 5.21: Trabalho mecânico acumulado em (kN-m/m) para 6,65 MPa de pressão de confinamento vs Deslocamento da ferramenta de corte em (m)

A energia mecânica específica para um ambiente de corte com pressão confinante de 6,65 MPa calculada pela expressão de Detournay é:

$$\psi = -\tan^{-1}\left(\frac{F_y}{F_x}\right) - \theta = -\tan^{-1}\left(\frac{85550}{-128100}\right) - 15 = 18,735$$

$$m = \frac{2 * \sin(\varphi) * \cos(\theta + \psi)}{1 - \sin(\varphi + \psi + \theta)} = \frac{2 * \sin(30) * \cos(18,735 + 15)}{1 - \sin(30 + 18,735 + 15)} = 8,055$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + m * P_m = 93,206 \text{ MPa} + 8,055 * 6,65 \text{ MPa} = 146,766 \text{ MPa}$$

As forças F_x e F_y foram determinadas como as forças aplicadas no cortador no final da simulação.

A energia específica calculada pela integral para uma pressão confinante de 6,65 MPa é:

$$MSE = \frac{\int_0^{0,025m} F_x * dx}{w * d * 0,025m} = \frac{119901,43 \text{ N} * 0,025m}{1,00 \text{ m} * 0,0008m * 0,025m} = 149,87 \text{ MPa}$$

Os resultados da simulação estão apresentados na tabela 5.6.

Tabela 5.6: Resultados da simulação para corte em rocha com pressão confinante de 6,65 MPa.

Resultados da Simulação	
Força média (N) =	119901,43
MSE (MPa) =	149,87

5.3.2.3

Pressão confinante de 34,4 MPa:

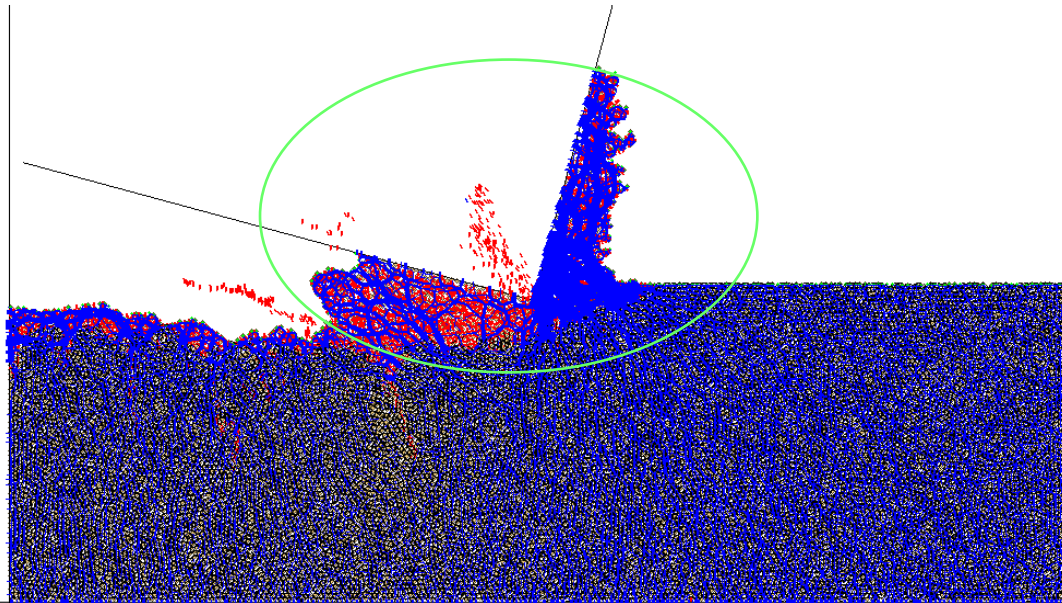


Figura 5.22: Forças no cortador com 34,4 MPa de pressão confinante para 25 mm

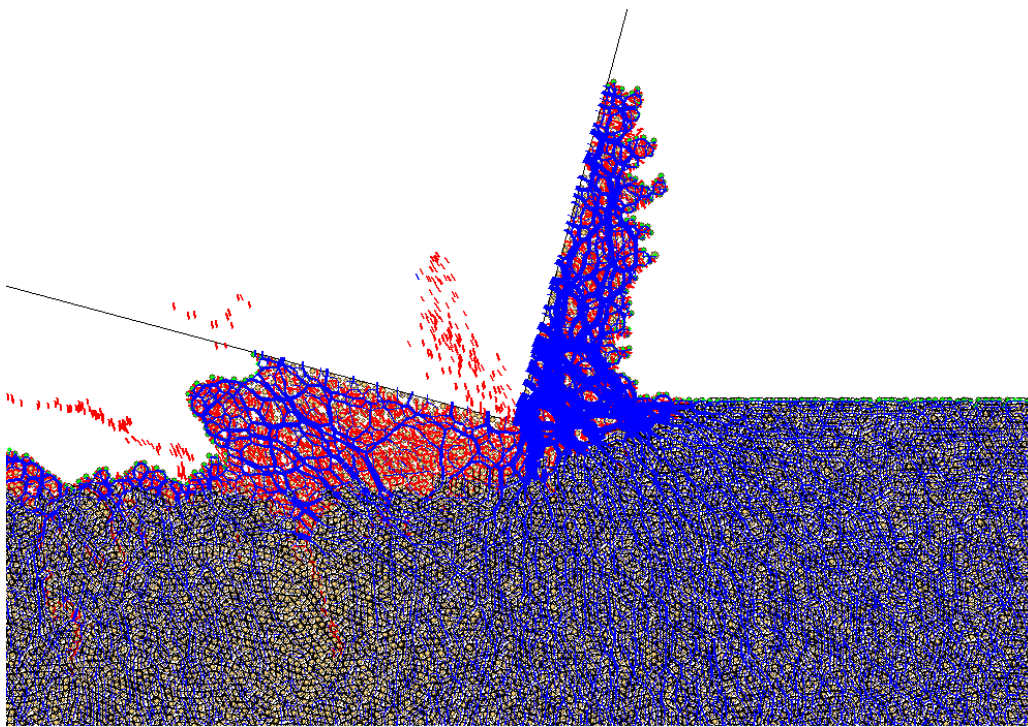


Figura 5.23: Detalhe do corte para 34,4 MPa de pressão confinante para 25 mm de deslocamento da ferramenta de corte

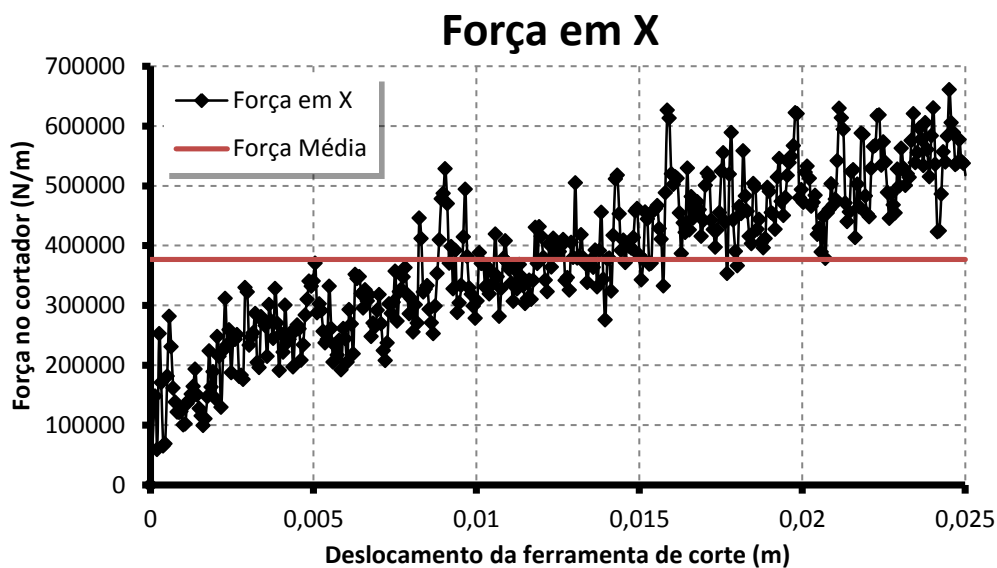


Figura 5.24: Forças no cortador em (N) para pressão confinante de 34.4 MPa vs Deslocamento da ferramenta de corte em (m)

A figura 5.25 apresenta os resultados obtidos no cálculo do trabalho acumulado e pode-se obter desta curva o valor da força média. Com este valor de força média podemos calcular a MSE pela integral.

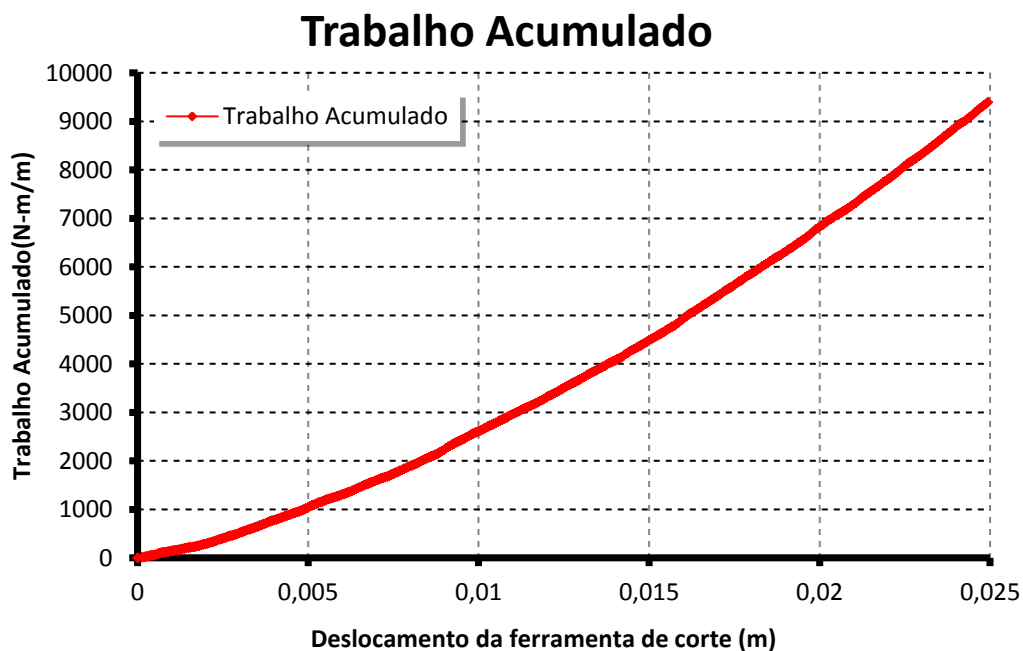


Figura 5.25: Trabalho mecânico acumulado em (kN-m/m) para 34,4 MPa de pressão de confinamento vs Deslocamento da ferramenta de corte em (m)

A energia mecânica específica para um ambiente de corte com pressão confinante de 34,4 MPa calculada pela expressão de Detournay é:

$$\psi = -\tan^{-1}\left(\frac{F_y}{F_x}\right) - \theta = -\tan^{-1}\left(\frac{363700}{-571000}\right) - 15 = 20,12$$

$$m = \frac{2 * \sin(\varphi) * \cos(\theta + \psi)}{1 - \sin(\varphi + \psi + \theta)} = \frac{2 * \sin(30) * \cos(20,12 + 15)}{1 - \sin(30 + 20,12 + 15)} = 8,81$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + m * P_m = 93,206 \text{ MPa} + 8,81 * 34,4 \text{ MPa} = 396,49 \text{ MPa}$$

As forças F_x e F_y foram determinadas como as forças aplicadas no cortador no final da simulação.

A energia específica calculada pela integral para uma pressão confinante de 34,4 MPa é:

$$MSE = \frac{\int_0^{0,025m} F_x * dx}{w * d * 0,025m} = \frac{376973,37 \text{ N} * 0,025m}{1,00 \text{ m} * 0,0008m * 0,025m} = 471,21 \text{ MPa}$$

Os resultados da simulação estão apresentados na tabela 5.7.

Tabela 5.7: Resultados da simulação para corte em rocha com pressão confinante de 34,4 MPa.

Resultados da Simulação	
Força média (N) =	376973,37
MSE (MPa) =	471,216

5.3.2.4

Pressão confinante de 60,0 MPa:

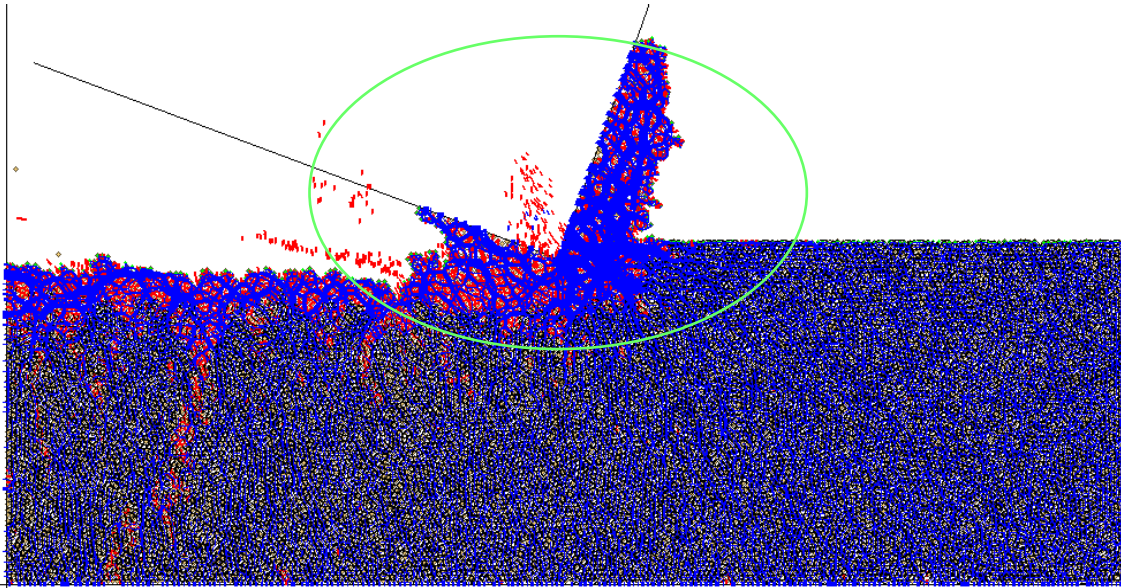


Figura 5.26: Forças no cortador com 60 MPa de pressão confinante para 25 mm

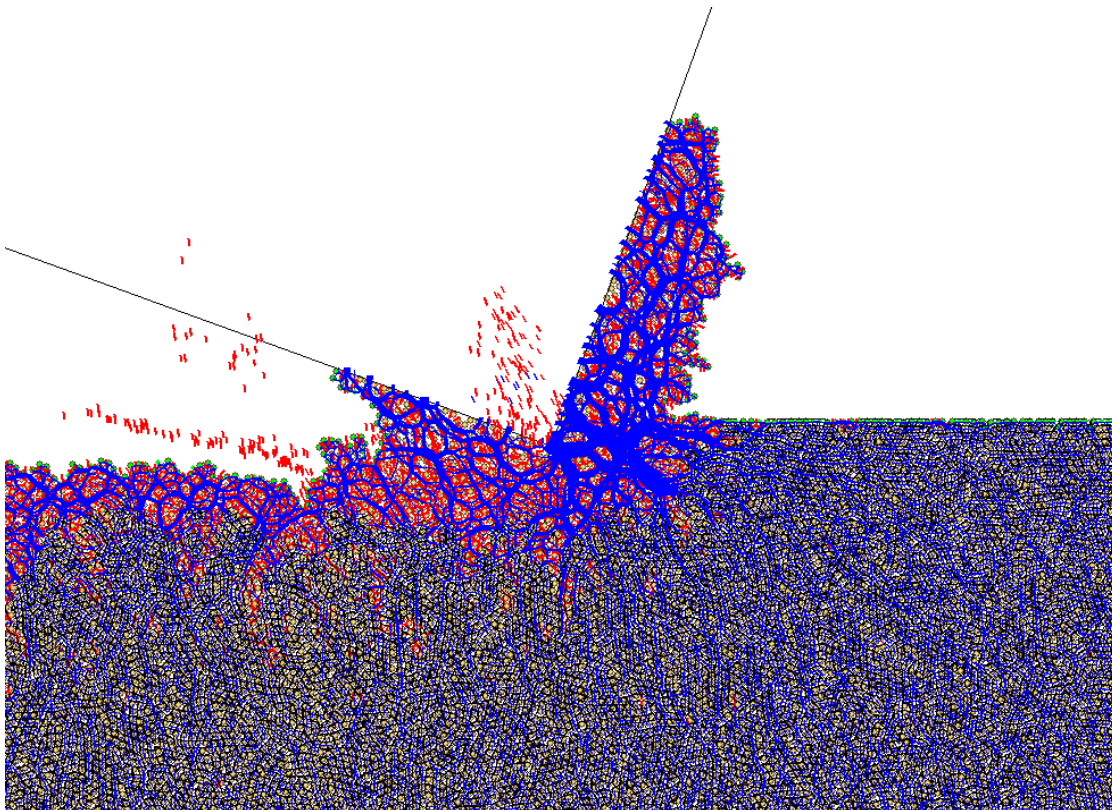


Figura 5.27: Detalhe do corte para 60 MPa de pressão confinante para 25 mm de deslocamento da ferramenta de corte

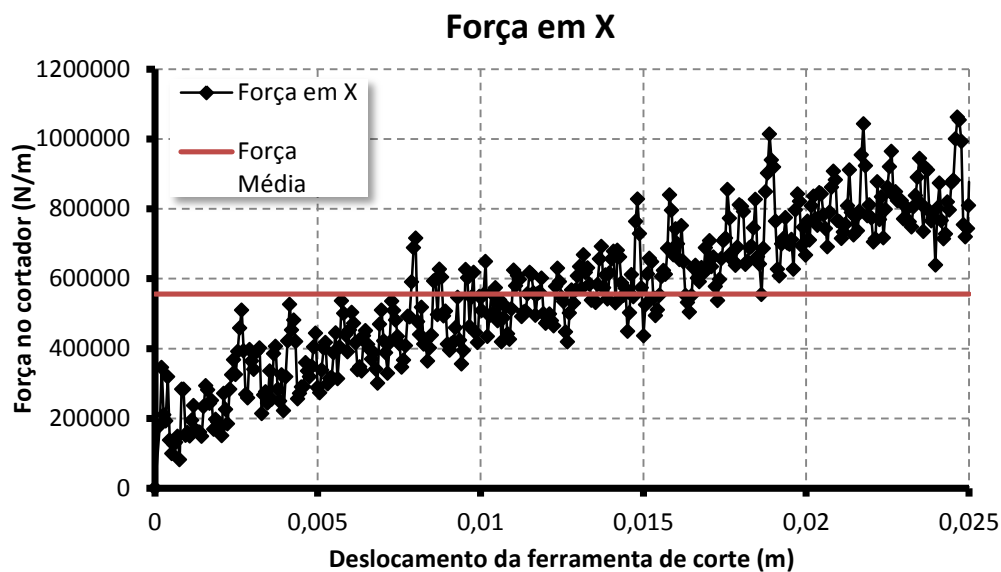


Figura 5.28: Forças no cortador em (N) para pressão confinante de 60.0 MPa vs deslocamento da ferramenta de corte em (m)

A figura 5.29 apresenta os resultados obtidos no cálculo do trabalho acumulado e pode-se obter desta curva o valor da força média. Com este valor de força média podemos calcular a MSE pela integral.

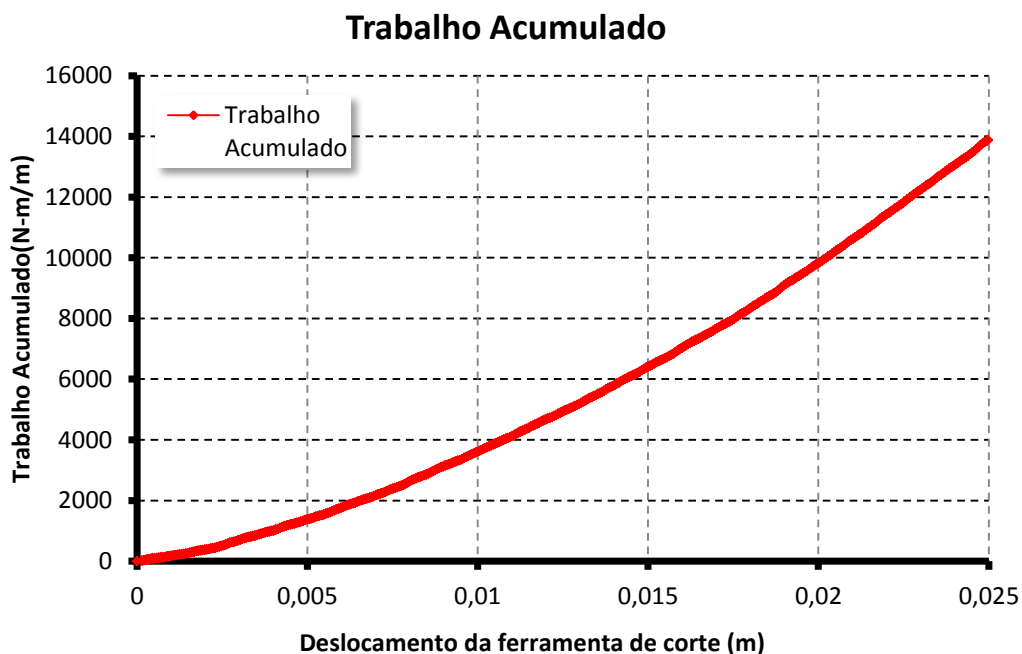


Figura 5.29: Trabalho mecânico acumulado em (kN-m/m) para 60 MPa de pressão de confinamento vs deslocamento da ferramenta de corte em (m)

A energia mecânica específica para um ambiente de corte com pressão confinante de 60 MPa calculada pela expressão de Detournay é:

$$\psi = -\tan^{-1}\left(\frac{F_y}{F_x}\right) - \theta = -\tan^{-1}\left(\frac{427250}{-565400}\right) - 15 = 22,07$$

$$m = \frac{2 * \sin(\varphi) * \cos(\theta + \psi)}{1 - \sin(\varphi + \psi + \theta)} = \frac{2 * \sin(30) * \cos(22,07 + 15)}{1 - \sin(30 + 22,07 + 15)} = 10,1027$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + m * P_m = 93,206 \text{ MPa} + 17,311 * 60 \text{ MPa} = 1131,894 \text{ MPa}$$

As forças F_x e F_y foram determinadas como as forças aplicadas no cortador no final da simulação.

A energia específica calculada pela integral para uma pressão confinante de 60 MPa é:

$$MSE = \frac{\int_0^{0,025m} F_x * dx}{w * d * 0,025m} = \frac{556055,47 \text{ N} * 0,025m}{1,00 \text{ m} * 0,0008m * 0,025m} = 695,06 \text{ MPa}$$

Os resultados da simulação estão apresentados na tabela 5.8.

Tabela 5.8: Resultados da simulação para corte em rocha com pressão confinante de 60 MPa.

Resultados da Simulação	
Força média (N) =	556055,47
MSE (MPa) =	695,069

5.3.2.5

Pressão confinante de 90,0 MPa:

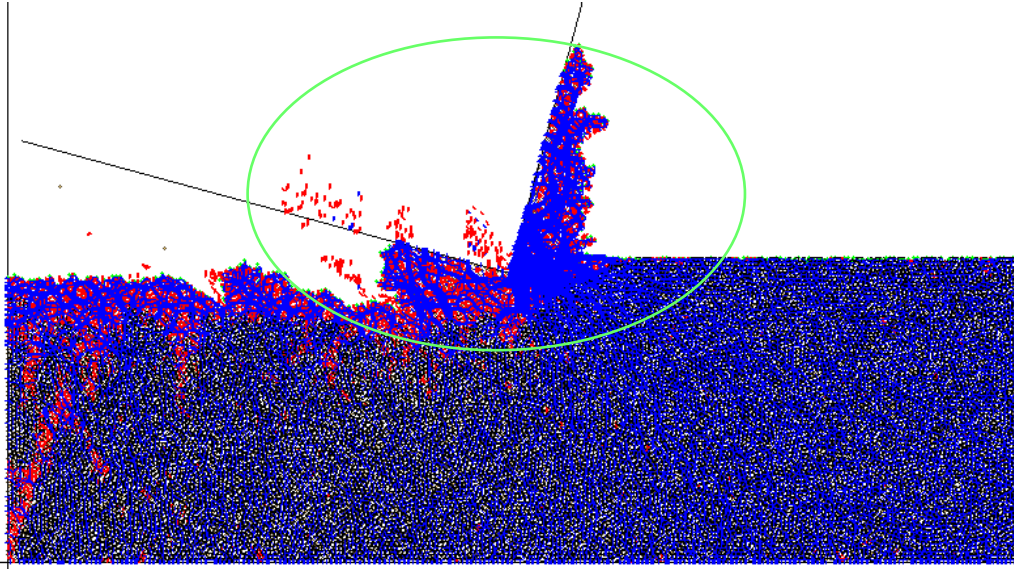


Figura 5.30: Forças no cortador com 90 MPa de pressão confinante para 25 mm

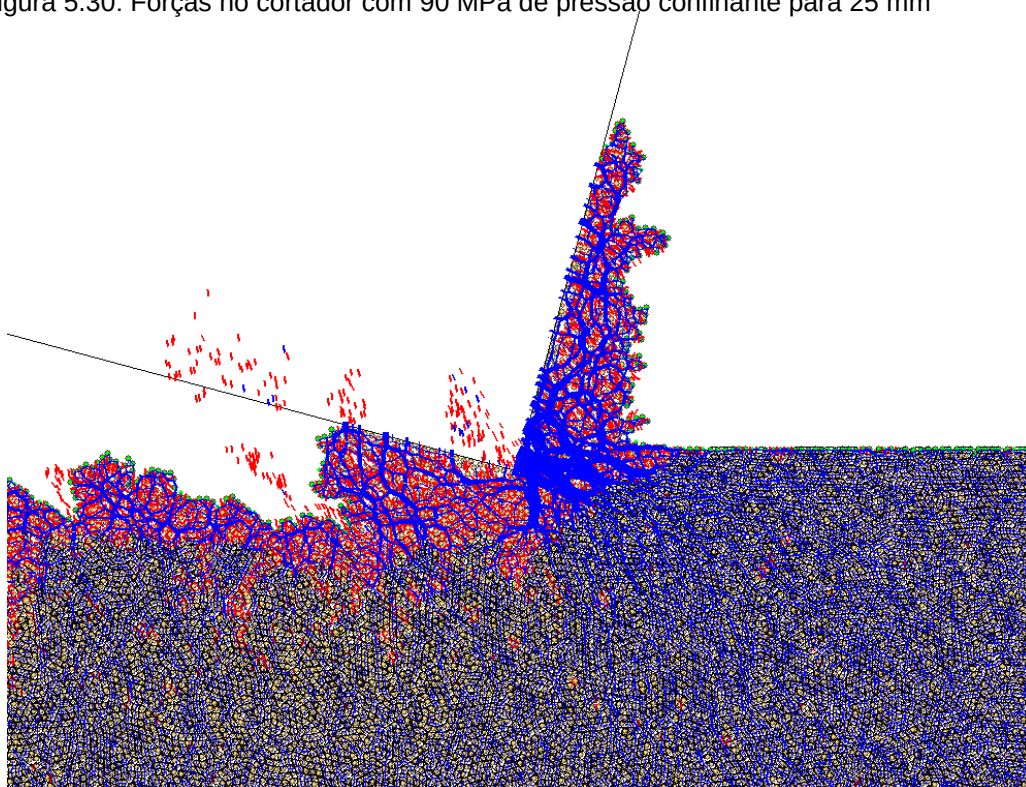


Figura 5.31: Detalhe do corte para 90 MPa de pressão confinante para 25 mm de deslocamento da ferramenta de corte

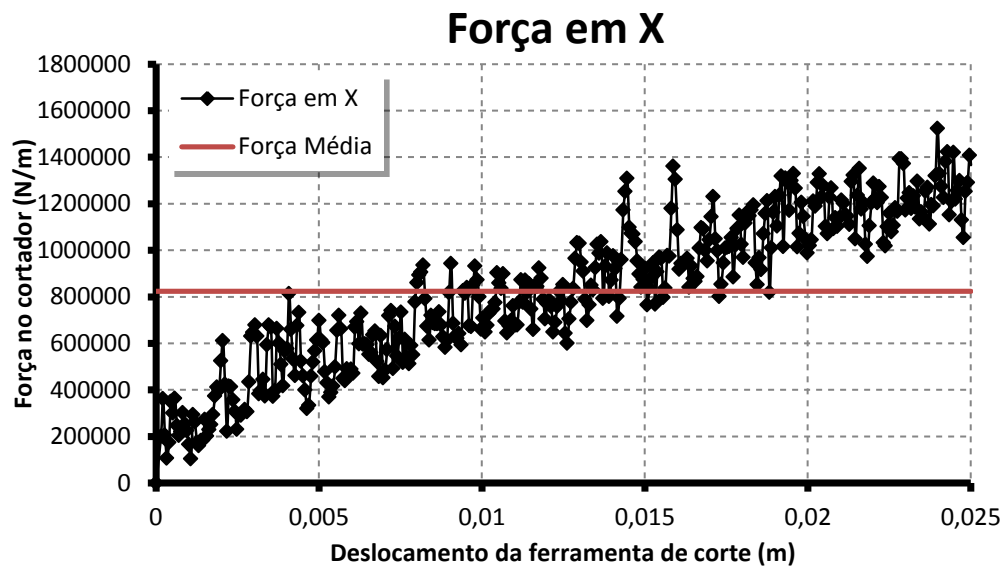


Figura 5.32: Forças no cortador em (N) para pressão confinante de 90.0 MPa vs Deslocamento da ferramenta de corte em (m)

A figura 5.33 apresenta os resultados obtidos no cálculo do trabalho acumulado e pode-se obter desta curva o valor da força média. Com este valor de força média podemos calcular a MSE pela integral.

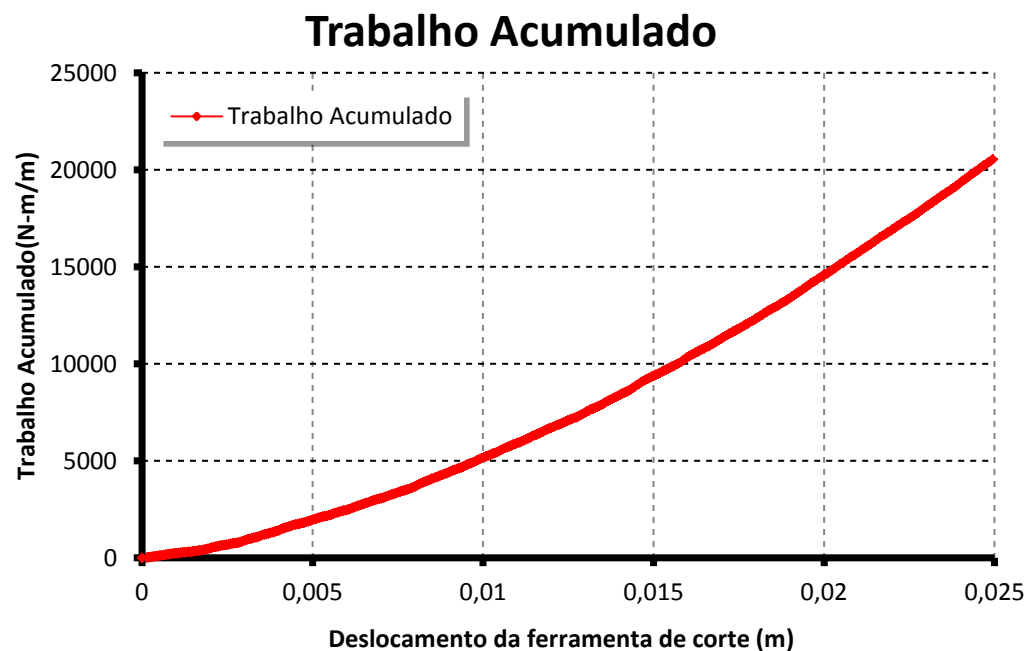


Figura 5.33: Trabalho mecânico acumulado em (kN-m/m) para 90 MPa de pressão de confinamento vs deslocamento da ferramenta de corte em (m)

A energia mecânica específica para um ambiente de corte com pressão confinante de 90 MPa calculada pela expressão de Detournay é:

$$\psi = -\tan^{-1}\left(\frac{F_y}{F_x}\right) - \theta = -\tan^{-1}\left(\frac{992800}{-1366000}\right) - 15 = 20,96$$

$$m = \frac{2 * \sin(\varphi) * \cos(\theta + \psi)}{1 - \sin(\varphi + \psi + \theta)} = \frac{2 * \sin(30) * \cos(20,96 + 15)}{1 - \sin(30 + 20,96 + 15)} = 9,3638$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + m * P_m = 93,206 \text{ MPa} + 9,3638 * 90 \text{ MPa} = 935,9511 \text{ MPa}$$

As forças F_x e F_y foram determinadas como as forças aplicadas no cortador no final da simulação.

A energia específica calculada pela integral para uma pressão confinante de 90 MPa é:

$$MSE = \frac{\int_0^{0,025m} F_x * dx}{w * d * 0,025m} = \frac{824118,3445 \text{ N} * 0,025 \text{ m}}{1,00 \text{ m} * 0,0008 \text{ m} * 0,025 \text{ m}} = 1030,14 \text{ MPa}$$

Os resultados da simulação estão apresentados na tabela 5.9.

Tabela 5.9: Resultados da simulação para corte em rocha com pressão confinante de 90 MPa.

Resultados da Simulação	
Força média (N) =	824118,34
MSE (MPa) =	1030,147

5.3.2.6

Pressão confinante de 120,0 MPa:

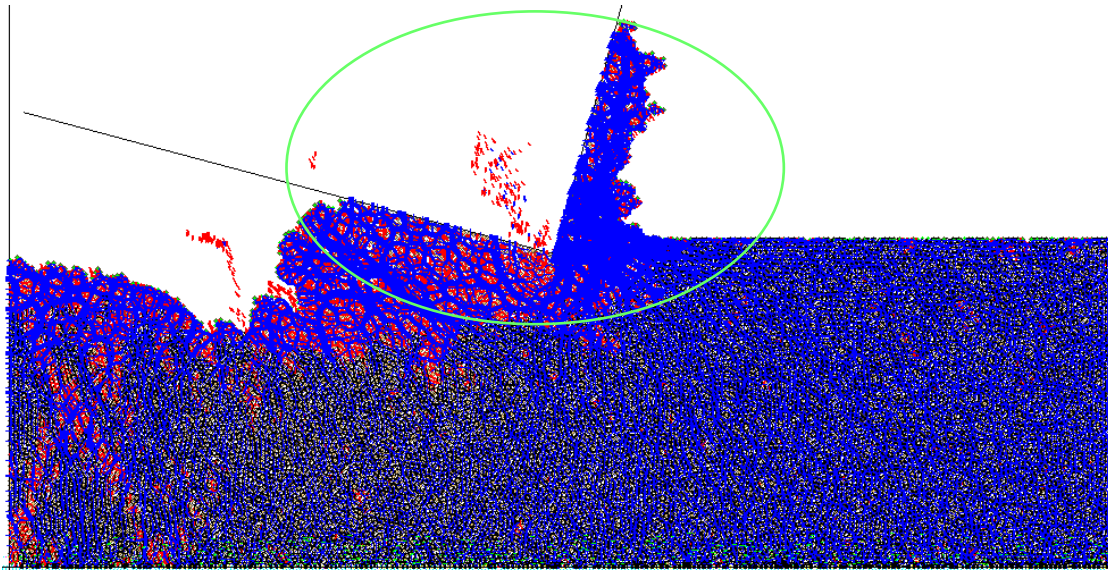


Figura 5.34: Forças no cortador com 120 MPa de pressão confinante para 25 mm

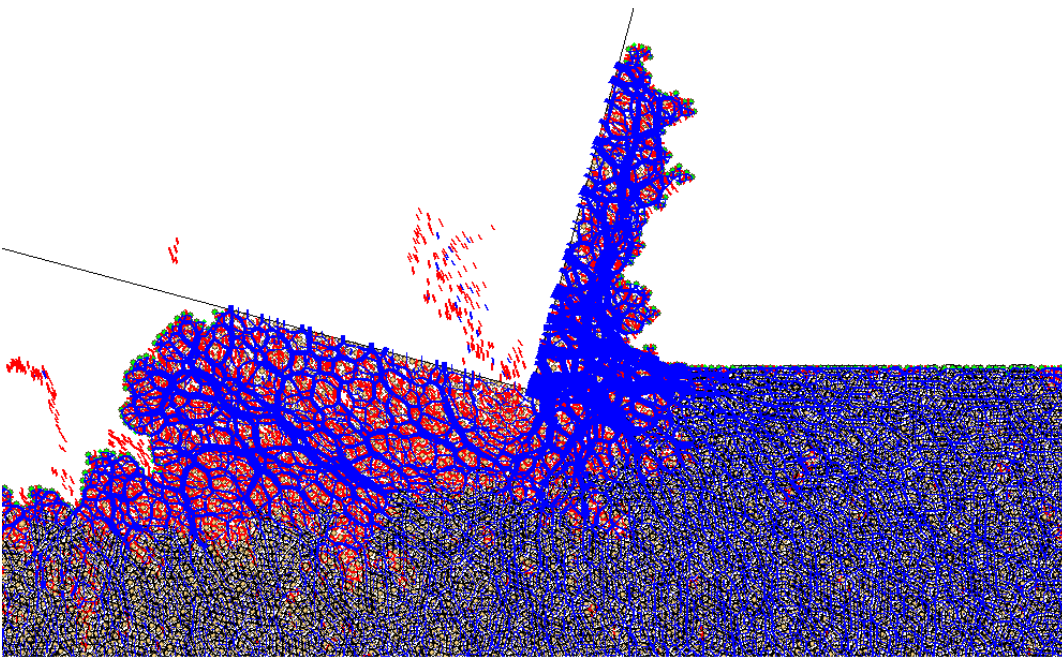


Figura 5.35: Detalhe do corte para 120 MPa de pressão confinante para 25 mm de deslocamento da ferramenta de corte

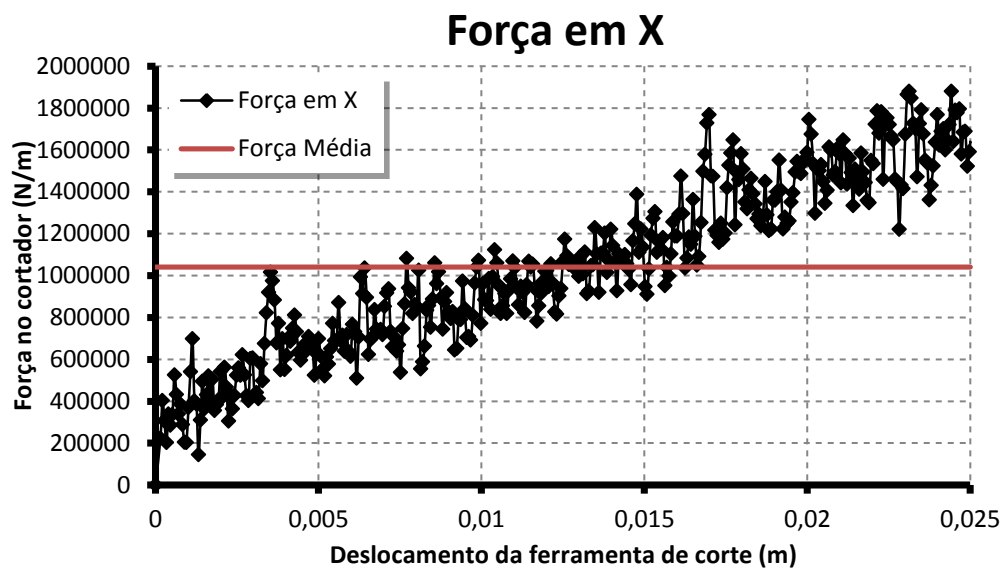


Figura 5.36: Forças no cortador em (N) para pressão confinante de 120.0 MPa vs deslocamento da ferramenta de corte em (m)

A figura 5.37 apresenta os resultados obtidos no cálculo do trabalho acumulado e pode-se obter desta curva o valor da força média. Com este valor de força média podemos calcular a MSE pela integral.

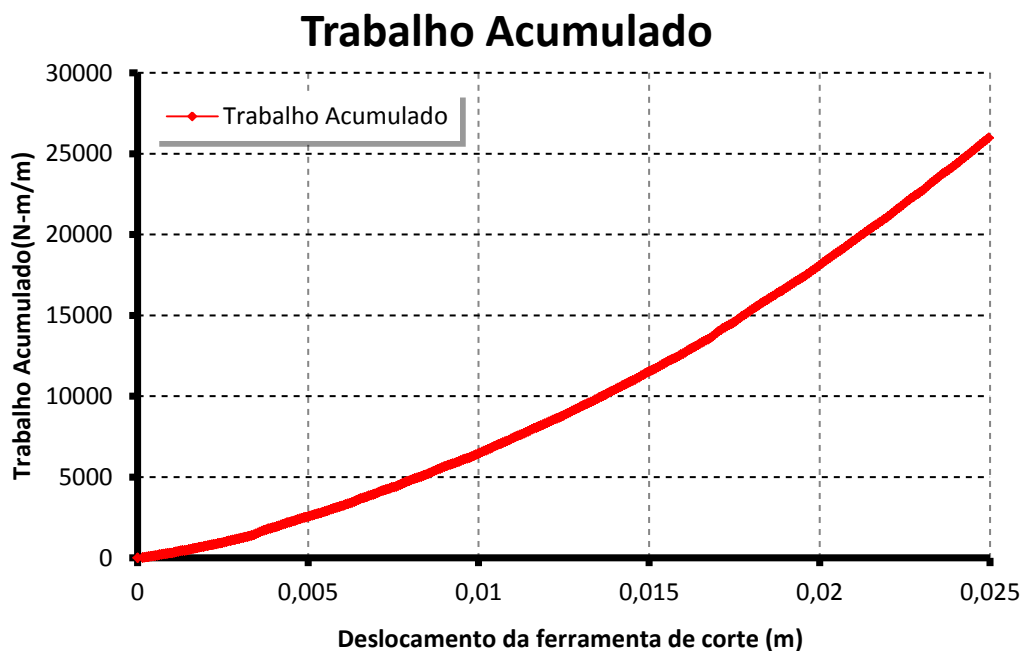


Figura 5.37: Trabalho mecânico acumulado em (kN-m/m) para 120 MPa de pressão de confinamento vs deslocamento da ferramenta de corte em (m)

A energia mecânica específica para um ambiente de corte com pressão confinante de 120 MPa calculada pela expressão de Detournay é:

$$\psi = -\tan^{-1}\left(\frac{F_y}{F_x}\right) - \theta = -\tan^{-1}\left(\frac{1371000}{-1634000}\right) - 15 = 24,99$$

$$m = \frac{2 * \sin(\varphi) * \cos(\theta + \psi)}{1 - \sin(\varphi + \psi + \theta)} = \frac{2 * \sin(30) * \cos(24,99 + 15)}{1 - \sin(30 + 24,99 + 15)} = 12,700$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + m * P_m = 93,206 \text{ MPa} + 12,700 * 120 \text{ MPa} = 1617,25 \text{ MPa}$$

As forças F_x e F_y foram determinadas como as forças aplicadas no cortador no final da simulação.

A energia específica calculada pela integral para uma pressão confinante de 120 MPa é:

$$MSE = \frac{\int_0^{0,025m} F_x * dx}{w * d * 0,025m} = \frac{934603 \text{ N} * 0,025 \text{ m}}{1,00 \text{ m} * 0,0008 \text{ m} * 0,025 \text{ m}} = 1168,25 \text{ MPa}$$

Os resultados da simulação estão apresentados na tabela 5.10.

Tabela 5.10: Resultados da simulação para corte em rocha com pressão confinante de 120 MPa.

Resultados da Simulação	
Força média (N) =	1040794,33
MSE (MPa) =	1300,992

5.3.2.7

Análise dos resultados:

Uma série de simulações do ensaio à compressão foi realizada pela Terra Tek para determinar o valor do CCS para diferentes pressões de confinamento sendo os resultados apresentados na tabela a seguir:

Tabela 5.11: Resultados de CCS para diferentes pressões confinantes. (Terra Tek, 2007).

MÁRMORE DE CARTAGO			
Pressão de Confinamento		Resistência à Compressão	
psi	MPa	psi	MPa
0	0	16000	103
2000	14	22000	154
4000	28	27000	189
6000	42	32000	224
8000	56	36000	252
10000	70	39000	273
12000	84	42000	294
14000	98	44000	308
16000	112	46500	325,5

Foram agrupados os resultados das simulações do ensaio de corte para o mármore de Cartago na tabela a seguir:

Tabela 5.12: Resultados da simulação do ensaio de corte para diferentes pressões confinantes para 25 mm

MÁRMORE DE CARTAGO SOB DIFERENTES PRESSÕES CONFINANTES							
Muros	Força X	Força Y	Desloc	Pm	MSE (integral)	Pm	MSE (Detournay)
	(N)	(N)	(m)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
CORTADOR	-118500	81320	0,0250	0,0	57,63	0,0	93,21
	-82600	44900	0,0250	2,8	105,39	2,8	109,92
	-128100	85550	0,0250	6,65	149,87	6,65	146,77
	-517000	363700	0,0250	34,4	471,21	34,4	396,49
	-879900	830100	0,0250	60,0	695,06	60,0	1131,89
	-1366000	992800	0,0250	90,0	1030,14	90,0	935,95
	-1634000	1371000	0,0250	120,0	1300,99	120,0	1617,25

Para traçar a curva MSE versus P_m foram usados os resultados obtidos calculados pela expressão da integral e os obtidos pela expressão descrita por Detournay (2002) comparando estes resultados com o CCS do mármore de Cartago.

$$MSE = \frac{\text{Trabalho Acumulado}}{\text{Volume de Rocha Cortado}} = \frac{\int (\text{Força}) dx}{\text{Volume cortado}} \quad (5.3)$$

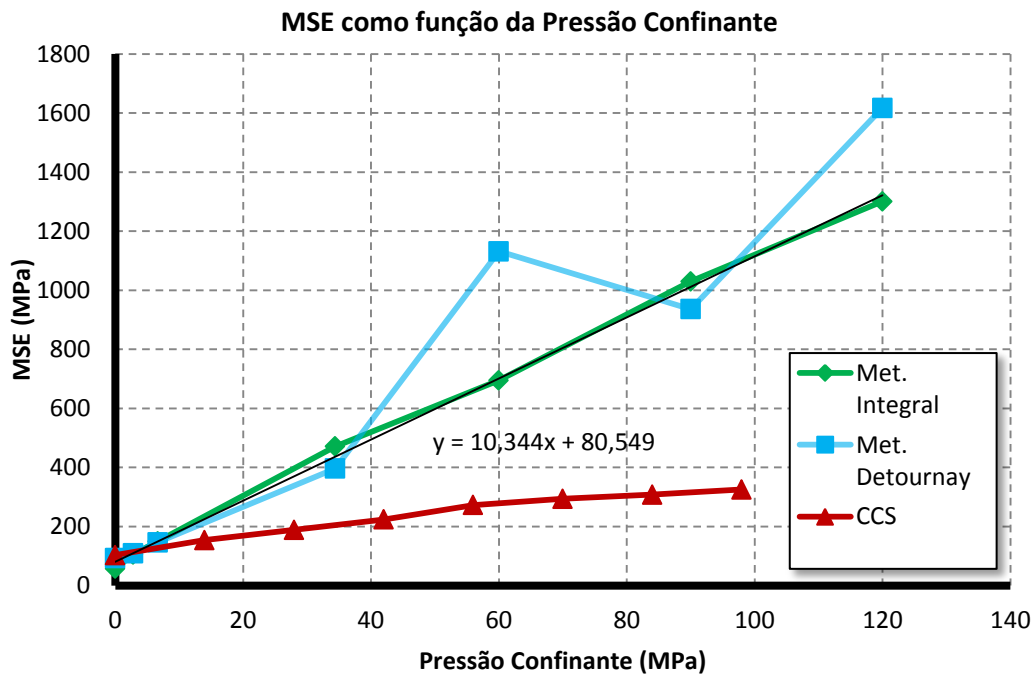


Figura 5.38: MSE vs Pressão Confinante para 25 mm

Da figura 5.38 pode-se obter a seguinte expressão:

$$MSE = E_0 + m * P_m = 80,549 \text{ MPa} + 10,344 * P_m \quad (5.4)$$

Onde:

E_0 = Energia mecânica específica em condições atmosféricas = 80,549 MPa

m = Coeficiente que depende de $(\theta, \psi, \varphi) = 10,344$

P_m = mud pressure (MPa)

Para os valores de pressão confinante entre 2,80 e 6,65 MPa é traçada uma curva MSE vs Pressão confinante para obter um melhor ajuste da constante lineal da correlação para compará-lo com a UCS da rocha. Nesta curva também

foram comparados os resultados obtidos usando a expressão da integral e a metodologia de Detournay.

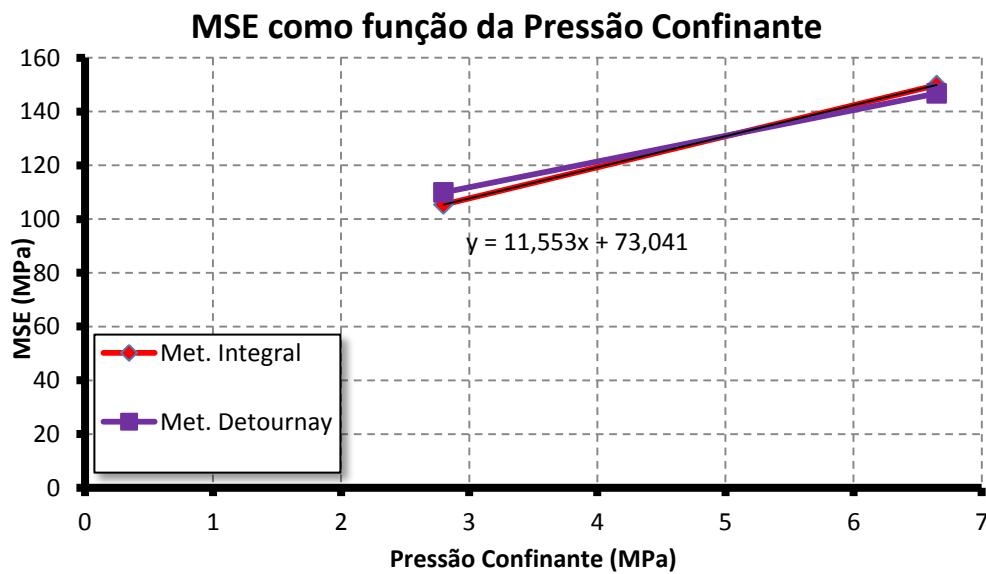


Figura 5.39: MSE vs Pressão confinante para 25 mm

Da figura 5.39 pode-se obter a seguinte expressão

$$MSE = E_0 + m * P_m = 73,041 MPa + 11,553 * P_m \quad (5.5)$$

Onde:

E_0 = Energia mecânica específica em condições atmosféricas = 73,041 MPa

m = Coeficiente que depende de (θ, ψ, φ) = 11,553

P_m = mud pressure (MPa)

Comparando os valores de MSE para condições atmosféricas calculadas anteriormente pelo conceito de energia e pelas correlações lineares com o valor de USC da rocha, tem-se que:

$$E_{0(CORRELAÇÃO LINEAR)} = 73,041 MPa$$

$$E_{0(SIMULAÇÃO NUMÉRICA)} = 57,63 MPa$$

$$UCS_{(CARTHAGE MARBLE)} = 103 MPa$$

Neste caso, para o mármore de Cartago, o valor de UCS da rocha não é uma boa aproximação para determinar a energia mecânica específica em

condições atmosféricas, pois estes valores não estão muito próximos, devido a que na simulação numérica, não se tem em conta os efeitos tridimensionais na força média aplicada no cortador. Uma expressão obtida para o calculo da MSE usando o valor do UCS para o mármore de Cartago é escrita como:

$$E_0 = 0,709 * UCS \quad (5.6)$$

Neste caso, a energia mecânica específica no corte em rocha para condição atmosférica pode ser considerada como 70,90% do valor da resistência a compressão simples da rocha. No entanto, para um valor de deslocamento da ferramenta de corte de 10 mm, é analisado o comportamento da força na direção de corte vs a pressão confinante na figura 5.40 onde pode-se observar um cambio na inclinação da curva devido ao aumento da pressão confinante para este caso. Os valores de força foram comparados com os resultados obtidos pelos pesquisadores da Kansas State University (Kaitkay P.; Lei S.. 2003) e pode ser observado um comportamento similar na inclinação da força dada pela tendência bilinear da força em função à pressão confinante. A diferencia para ambos os casos de valores de força, pode ser devido a que esta é uma medida pontual de força que depende especialmente dos parâmetros usados para simular a rocha virtual e o corte.

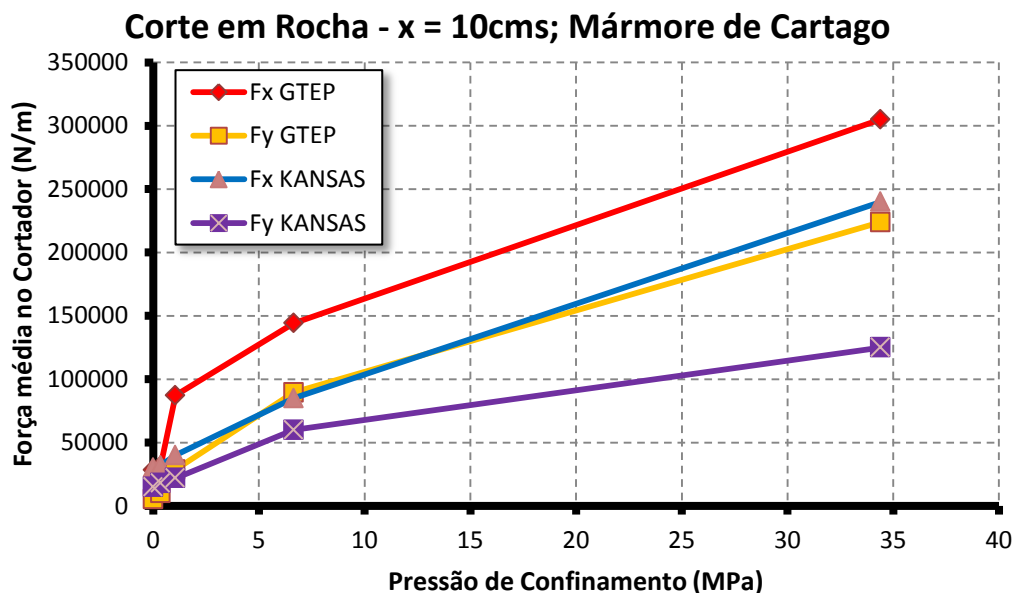


Figura 5.40: Força média no cortador vs Pressão confinante para 10 mm

Também são comparados alguns valores de MSE vs Pressão confinante com os resultados obtidos por Rafatian (2009) para o mármore de Cartago, na figura 5.41, usando os resultados obtidos por Rafatian (2009) obtidos através de ensaios experimentais de laboratório e os resultados obtidos no PFC2D nesta dissertação, sem ter em conta os efeitos tridimensionais na força média de corte.

MSE como função da Pressão Confinante

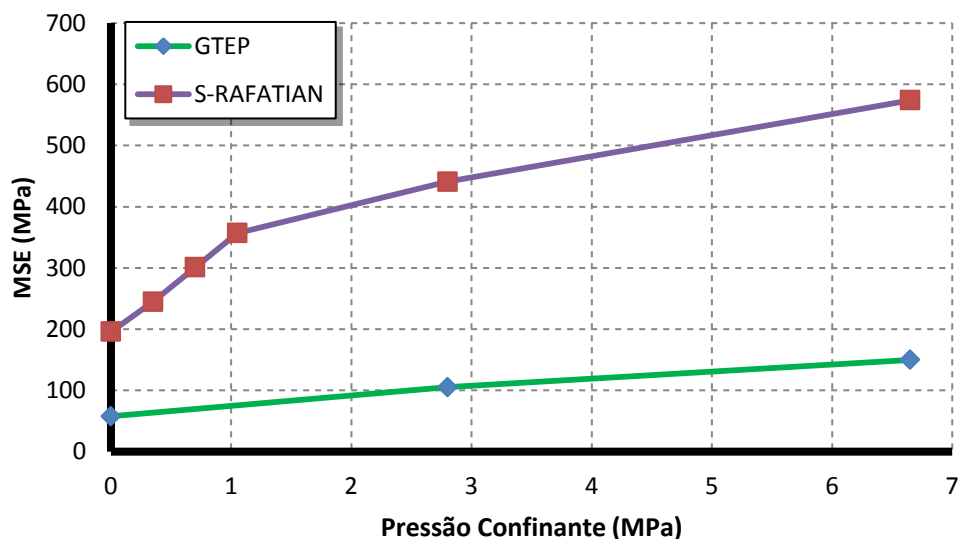


Figura 5.41: MSE vs Pressão confinante para 25 mm de corte

A figura 5.42 mostra os valores de energia específica variando o ângulo de ataque para +15°, +20° e +25° e mantendo os outros parâmetros do ambiente de corte constantes. Nesta figura pode-se observar que existe uma tendência polinomial, no qual para o trecho entre 15° e 25° o valor da MSE diminui em razão do aumento do ângulo da ferramenta de corte. Podemos concluir que no processo de corte em rocha sob pressão confinante, o aumento do ângulo da ferramenta de corte ajuda a diminuir a MSE necessária para cortar um volume de rocha unitário.

Também foram obtidos resultados de MSE para a variação da profundidade de corte mantendo os outros parâmetros do ambiente de corte constantes. O gráfico 5.43 descreve o comportamento da MSE para valores de profundidade de corte entre 0,8 mm e 1,20 mm. Comprovando o que já tinha sido dito por outros pesquisadores anteriormente, o comportamento registrado descreve a diminuição da MSE em razão ao aumento da profundidade de corte.

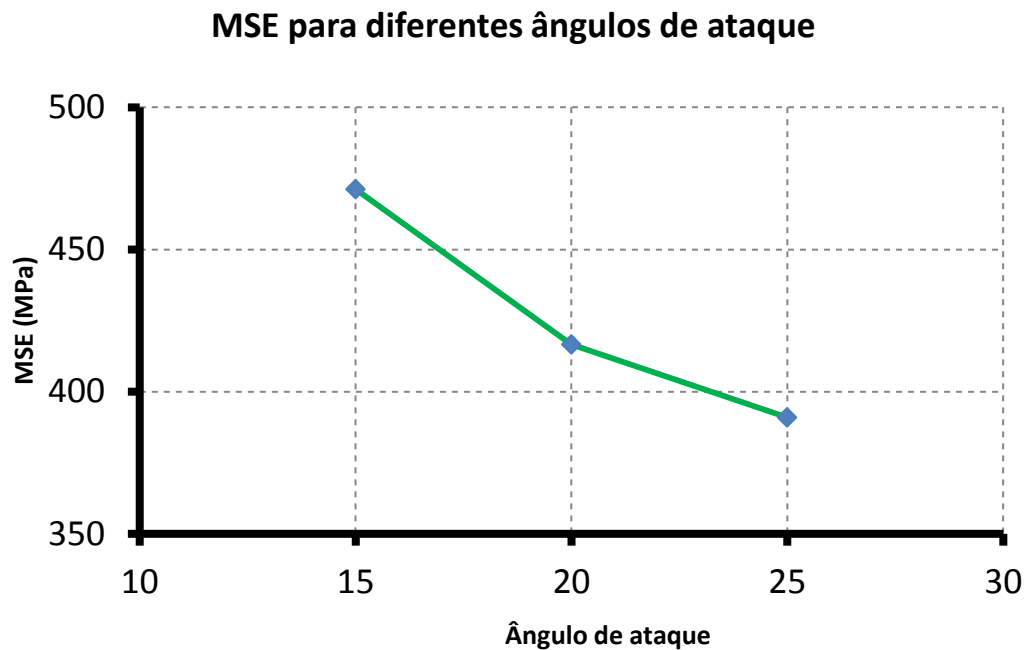


Figura 5.42: MSE para diferentes valores de ângulo de ataque com pressão confinante de 34,4 MPa

Os resultados do gráfico 5.42 para MSE variando o ângulo de ataque são apresentados na tabela a seguir:

Tabela 5.13: MSE para diferentes valores do ângulo de ataque em sob pressão confinante de 34,4 MPa.

ENERGIA MECÂNICA ESPECÍFICA PARA DIFERENTES ÂNGULOS DE ATAQUE				
Força X (N)	Força Y (N)	Desloc (m)	Ângulo de ataque (Mpa)	MSE (Mpa)
-517000	363700	0,0250	15	471,21
-579200	383800	0,0250	20	416,59
-623700	517400	0,0250	25	390,9

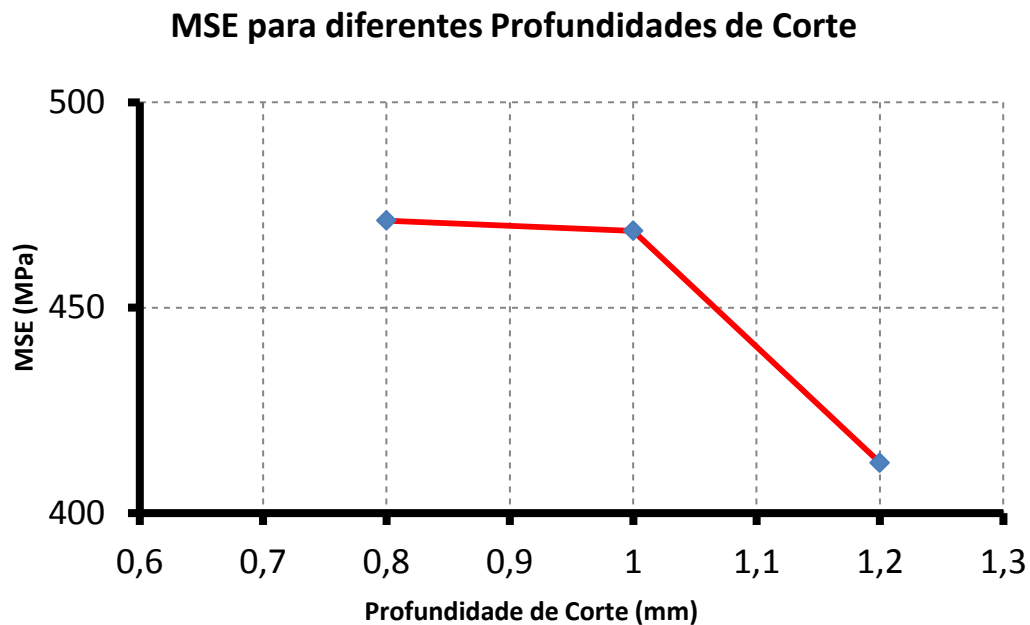


Figura 5.43: MSE para diferentes valores de profundidade de corte com pressão confinante de 34,4 MPa.

Também são apresentados os resultados de MSE variando a profundidade de corte que são mostrados no gráfico 5.43, resumidos na tabela a seguir:

Tabela 5.14: MSE para diferentes valores de profundidade de corte sob pressão confinante de 34,4 MPa.

ENERGIA MECÂNICA ESPECÍFICA PARA DIFERENTES PROFUNDIDADES DE CORTE				
Força X (N)	Força Y (N)	Desloc (m)	Prof de corte (Mpa)	MSE (Mpa)
-517000	363700	0,0250	0,8	471,21
-594800	531800	0,0250	1,0	468,68
-552800	404500	0,0250	1,2	412,23