

2

Revisão Bibliográfica

2.1

Introdução

Muitas investigações têm sido desenvolvidas com o fim de dar entendimento à interação entre rocha e cortador no processo de corte. A energia específica é a energia requerida para remover uma unidade de volume de rocha.

Muitos autores têm estudado o processo de corte em rocha usando ensaios experimentais ou através de simulações numéricas computacionais. A seguir serão resumidos os principais estudos experimentais e numéricos feitos usando o método dos elementos discretos.

2.2

Ensaio experimental

2.2.1

O ensaio de corte como uma medida de resistência para rochas sedimentares.

Richard *et al.* (1998) descreveram um método experimental usado para avaliar a resistência de rochas sedimentares. O experimento, chamado “ensaio de corte”, é baseado no processo de corte em rocha para uma pequena profundidade de corte, tipicamente de 1.00 mm ou menor. Richard *et al.* (1998) observaram experimentalmente o processo de corte em rocha indicando que existe um mecanismo de ruptura plástico para corte com pequenas profundidades de corte. Ele observou, além disso, que existia a possibilidade de avaliar a resistência de varias rochas sedimentares usando o ensaio de corte.

Os ensaios experimentais mostraram que a força atuando na face do cortador é proporcional à área transversal do cortador, como segue:

$$F_x = MSE * A \quad (2.1)$$

Onde MSE é a energia mecânica específica. Richard (1998) observou que este valor de energia resultava muito próximo ao valor da UCS da rocha.

O ensaio de corte desenvolvido por Richard (1998) consiste na medição da força de corte requerida para cortar um volume de rocha usando um cortador PDC. Este ensaio é controlado cinematicamente mantendo constante a velocidade e a profundidade de corte. Ambas as componentes da força, na direção do corte F_x e na componente normal ao corte F_y , são medidas durante o ensaio.

O dispositivo de corte foi desenvolvido na Universidade de Minnesota, Estados Unidos da América. O último protótipo foi chamado de RSD (Rock Strength Device). Um motor fornece o movimento relativo linear entre o cortador e a rocha com uma faixa de velocidades entre 0,1 e 12 mm/seg. O movimento vertical do cortador é restrito independentemente das forças aplicadas no cortador em ambas as direções durante o corte. A posição do cortador pode ser determinada em qualquer instante e a medição das forças pode ser feita para cada posição do cortador permitindo criar curvas força em função do deslocamento do cortador. O equipamento é semi-automatizado e ele é controlado por computador usando um software escrito em Labview.

A figura 2.1 mostra o RSD desenvolvido por Richard (1998).

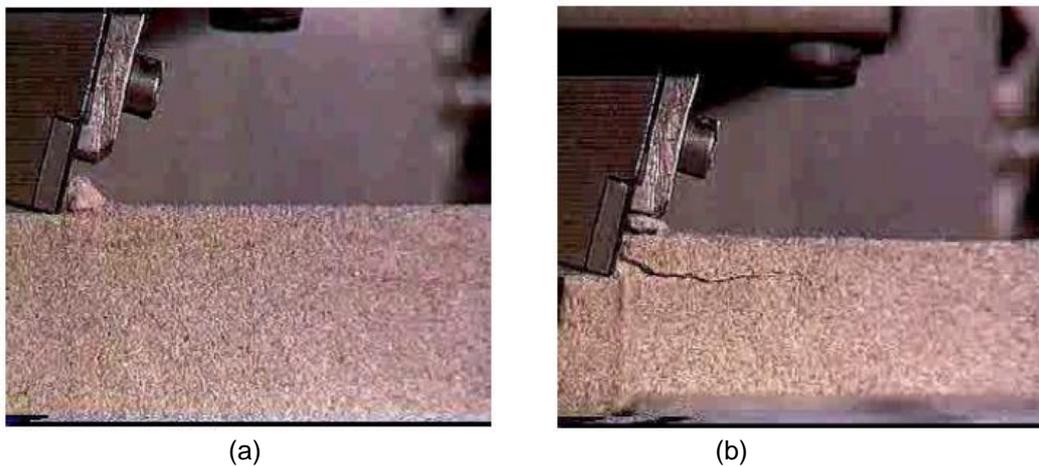


Figura 1.1: Corte no Arenito de Berea. (a) Modo dúctil para $d = 1$ mm (b) e modo frágil para $d = 4$ mm. (Richard *et al.*, 1998)

Richard *et al.* (1998) usaram as medições da força, medida na direção do corte e a área transversal do material cortado, para calcular a energia mecânica

específica. Richard (1998) observou que este valor de energia específica era fortemente relacionado ao valor de resistência da rocha, calculando para várias rochas a energia mecânica específica e relacionando-a ao valor da UCS para cada rocha. Na figura 2.2 e na tabela 2.1, podem-se observar os resultados obtidos por Richard (1998) no ensaio de corte.

Tabela 2.1: Correlação entre a energia específica e a resistência uniaxial a compressão. (Richard *et al.* 1998)

Rochas	q (Mpa)	MSE (Mpa)
Calcáreo	17	13,2
A3-10 Arenito	43	25,5
A2-6 Arenito	18	20,59
A2-4 Arenito	9	11,15
A2-3 Arenito	20	14,2
A2-69 Arenito	63	38
A2-7 Arenito	46	32,3
Lf6 Arenito	24	23
Lf7 Arenito	28	27,3
Arenito de Fontainebleau	178	160,3
Arenito de Rhube	159	132,7
Arenito de Vosges	42	32
Arenito de Red Wildmoor	13	17,3
Calcário Buxy	78	60,04

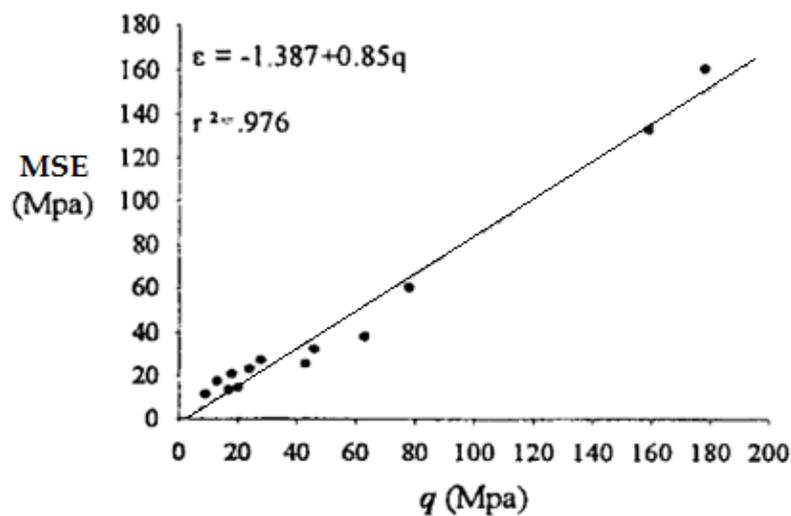


Figura 2.2: Correlação entre a energia específica e a resistência à compressão simples. (Richard *et al.*, 1998)

Nos resultados deste trabalho foi observado que existia uma boa correlação entre a energia mecânica específica e o valor da UCS de cada rocha. É evidente que existe uma dispersão nos dados, especialmente para rochas com baixa resistência, isto é devido às diferenças de escala no processo de corte do scratch test e o ensaio a compressão convencional (geralmente menor que 1.00 mm no scratch test e de 10 a 10² mm no ensaio convencional a compressão).

Outros resultados obtidos por Richard (1998) são apresentados a seguir:

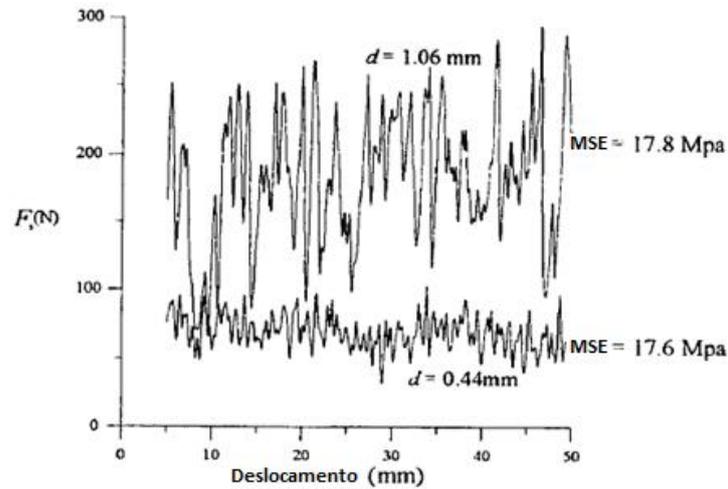


Figura 2.3: Ensaios executados usando o cortador perfeito para o Arenito de Red Wildmoor. (Richard *et al.*, 1998)

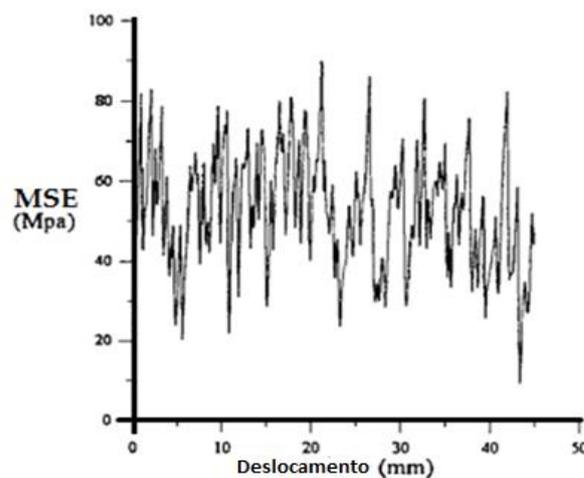


Figura 2.4: Perfil de energia específica obtido usando o cortador perfeito com 1,00 mm de profundidade de corte em rocha de reservatório. (Richard *et al.*, 1998)

Foi concluído que os experimentos usando o RSD podiam ser usados para determinar uma medida da resistência da rocha usando o mecanismo de corte. O procedimento do ensaio é rápido e simples. Resultados de resistência podem

ser obtidos em poucos minutos do mesmo jeito que muitas medições pontuais podem ser feitas num pequeno intervalo de tempo.

2.2.2.

Influência da poropressão na perfuração de rochas com baixa permeabilidade e com dilatância

Detournay *et al.* (2000) examinaram a dependência da energia mecânica específica MSE sob o efeito da poropressão P_0 no processo de corte em duas dimensões usando rochas de baixa permeabilidade e saturadas. Neste análises foi considerado um cortador simples movimentando-se com velocidade e profundidade constantes numa direção específica na superfície da amostra de rocha com condições externas de pressão representadas por P_m e internas de pressão representadas por P_b .

A configuração usada é mostrada na figura 2.5.

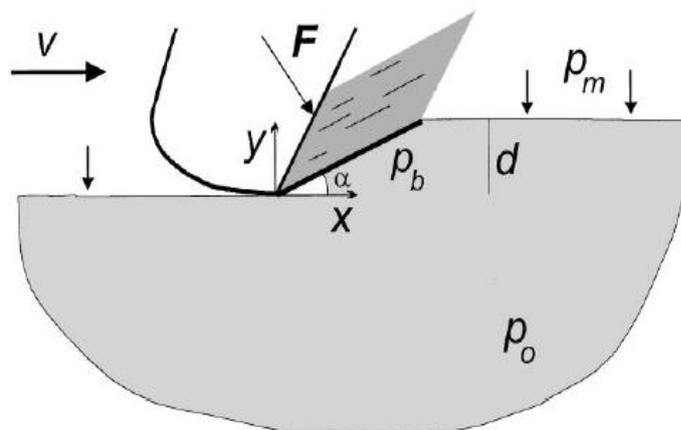


Figura 2.5: Configuração do processo de corte em rocha. (Detournay *et al.*, 2000)

Onde:

V = Velocidade de corte.

F = Força no cortador

α = Inclinação do plano de cisalhamento

P_b = Poropressão ao longo da linha de origem do corte

P_0 = Poropressão inicial

P_m = Pressão confinante

d = Profundidade de corte

Detournay *et al.* (2000) se basearam nos resultados obtidos experimentalmente no processo de corte por Zijsling (1987) para o folhelho de Mancos onde são mostrados gráficos de energia mecânica específica em função da pressão de confinamento P_m mostrando uma possível independência da MSE em relação à poropressão P_0 concluindo que esta energia MSE só depende da pressão confinante P_m . Os resultados obtidos para o folhelho de Mancos por Zijsling (1987) são apresentados na figura 2.6 onde cada símbolo representa um diferente estado de poropressão.

Usando estes resultados, conseguiu-se determinar que a taxa de incremento de MSE em função de P_m é aproximado a um coeficiente m baseado na teoria de Merchant (1944) para o corte em metais. Pode-se notar que os resultados obtidos por Zijsling (1987) são consistentes com uma regressão linear da energia mecânica específica MSE em relação à pressão P_m .

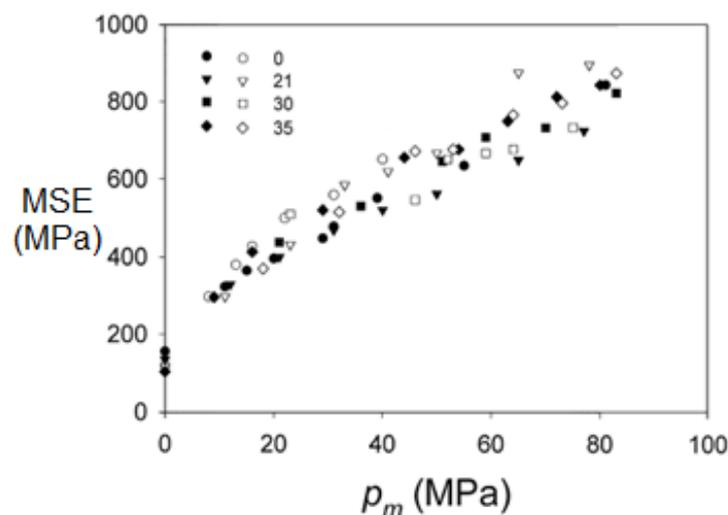


Figura 2.6: Energia mecânica específica em função da pressão de confinamento no caso de corte em rocha usando o folhelho de Mancos. (Zijsling, 1987)

O valor teórico de m baseado na teoria de Merchant em metais é calculado como:

$$m = \frac{2 \sin \varphi \cos(\theta + \psi)}{1 - \sin(\varphi + \theta + \psi)} \quad (2.2)$$

Onde θ é o ângulo de ataque, φ é o ângulo de atrito da rocha e ψ é o ângulo da interface rocha cortador. A comparação com o valor experimental de m precisa da determinação de $(\theta + \psi)$ e φ . O ângulo $(\theta + \psi)$ pode ser calculado

a partir dos resultados experimentais usando a curva MSE vs S , onde S é a resistência da rocha ou UCS, da forma a seguir:

$$S = \zeta E \quad (2.3)$$

Onde $\zeta = \tan(\theta + \psi)$. Pode-se observar na figura 2.7, os resultados obtidos por Zijsling (1987) usando uma curva MSE vs S para diferentes valores de poropressão P_0 .

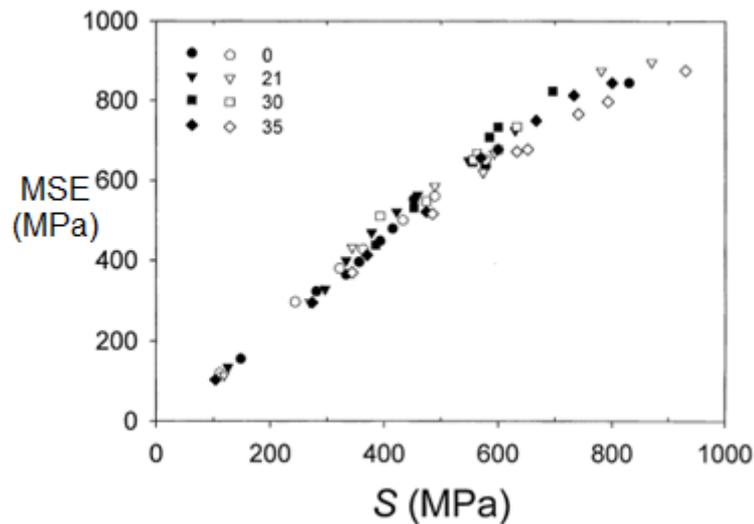


Figura 2.7: Energia mecânica específica em função da resistência à compressão simples no caso de corte em rocha usando o folhelho de Mancos. (Zijsling, 1987)

Detournay *et al.* (2000) concluíram que para condições de perfuração em folhelhos onde existe dilatância cisalhante devido ao processo de corte em rocha, a energia mecânica específica MSE é independente da poropressão inicial P_0 , concordando com os resultados obtidos por Zijsling (1987).

2.2.3.

Dependência da energia específica na perfuração de poços profundos em folhelhos.

Detournay *et al.* (2002) estudaram a dependência da energia mecânica específica MSE em função da pressão confinante P_m no processo de corte em rocha para entender como é que é afetada a perfuração de poços de petróleo em relação à pressão aplicada usando um fluido de perfuração. Os ensaios foram feitos com instrumentos de corte especialmente desenhados para funcionar dentro de uma célula Triaxial. Com esta configuração foram obtidos

resultados do processo de corte para o folhelho de Mancos, o folhelho Pierre I e Johnstone que é um folhelho artificial, usando vários valores de pressão de confinamento.

A célula Triaxial ATC (Autonomous Triaxial Cell), com capacidade de 70 MPa foi usada para os ensaios. O esquema do dispositivo de corte é mostrado na figura 2.8. A amostra foi saturada e foi aplicada uma pressão de confinamento. Para diferentes pressões de confinamento, este valor foi aumentado para conseguir atingir o valor de pressão desejado. Durante a fase de corte o cortador é movimentado com uma velocidade de 10 mm/seg realizando-se aproximadamente 100 medições por cada milímetro cortado.

Como resultado deste trabalho, foi concluído que a energia específica depende somente da pressão de confinamento P_m e não do diferencial de pressões $P_m - P_0$ para o caso de rochas impermeáveis e sob condições de dilatância cisalhante. A figura 2.9 mostra uma curva MSE vs P_0 comprovando este fato para Johnstone e o folhelho Pierre I.

Para estes casos, a energia específica pode ser expressa como:

$$MSE = MSE_0 + m * P_m \quad (2.4)$$

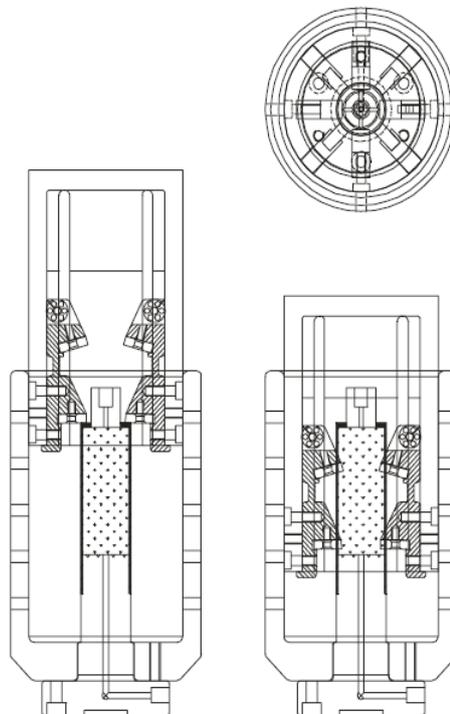


Figura 2.8: Célula Triaxial ATC com dispositivo de corte. (Detournay, 2002)

Onde m é um valor calculado baseado na teoria de Merchant (1944) para metais. Nesta fórmula MSE_0 é a energia específica em condições atmosféricas e m é o coeficiente que depende das condições geométricas do ambiente de corte, calculado segundo Merchant (1945) usando a fórmula 2.5:

$$m = \frac{2 \sin \varphi \cos(\theta + \psi)}{1 - \sin(\varphi + \theta + \psi)} \quad (2.5)$$

Onde:

φ = Ângulo de atrito da Rocha

θ = Ângulo de ataque da ferramenta de corte

ψ = Ângulo de atrito entre a rocha e a face do cortador

Em função ao trabalho de Merchant (1944) o valor de ψ pode ser calculado usando os valores das duas componentes de força medidas no cortador durante o processo de corte. Teoricamente ψ se calcula como:

$$\psi = -\tan^{-1}\left(\frac{F_y}{F_x}\right) - \theta \quad (2.6)$$

Em trabalhos anteriores como o feito por Zijsling (1987) foi comprovado experimentalmente que $MSE_0 \approx UCS$ da rocha quando o ângulo de ataque é de 15°

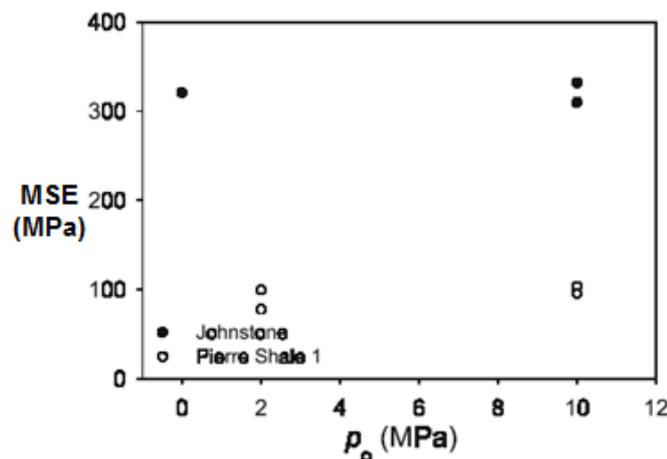


Figura 2.9: Variação da energia específica em função à poropressão inicial para Johnstone e para o folhelho de Pierre I, com pressão confinante de 30 MPa e ângulo de corte de 15° . (Detournay, 2002)

O ângulo de ataque é a inclinação da face da ferramenta de corte em relação à vertical medido no sentido horário.

A figura 2.10 mostra a variação da energia específica MSE em função da pressão confinante P_m para os folhelhos de Pierre I, de Mancos e Johnstone ($\theta=15^\circ$).

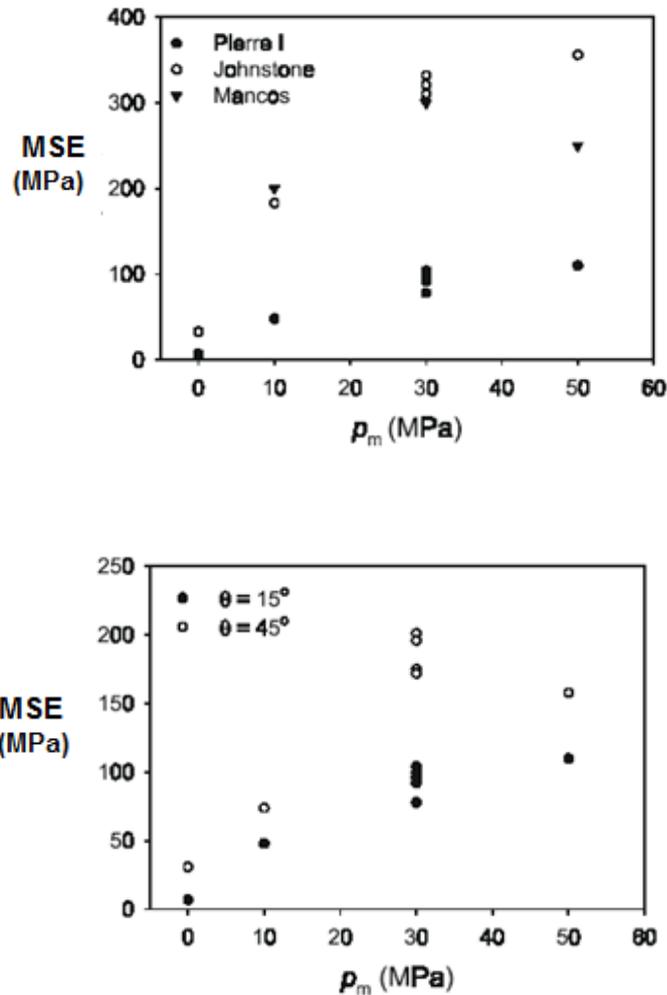


Figura 2.10: Variação da energia específica em função à pressão de confinamento para Johnstone e os folhelhos de Pierre I e Mancos. (Detournay, 2002)

2.2.4. Estudo experimental de corte em rocha sob pressão hidrostática.

Kaitkay *et al.* (2002) realizaram experimentos em laboratório com amostras de mármore de Cartago em condições de pressão atmosférica e sob diferentes pressões hidrostáticas usando um cortador PDC simples para estudar o processo de corte em ambas as condições. No caso do corte sujeito a pressão atmosférica é usada uma configuração, como a mostrada na figura 2.11, para

uma amostra de mármore de Cartago de 96 mm de diâmetro e com capacidade de 30 a 3000 rpm.

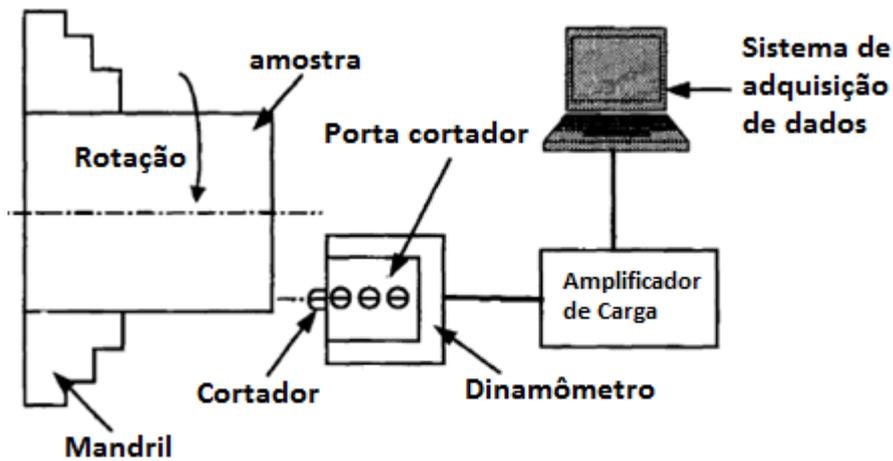


Figura 2.11: Vista superior da configuração do equipamento. (Kaitkay *et al.*, 2002)

A geometria do cortador é mostrada da figura 2.12. O corte é feito em planos de corte circular com inserção e raio de 0.25 polegadas (6,35 mm), de modo que a largura de corte é fixada em 0,375 polegadas (9,52 mm). A inserção é realizada no local com a ajuda de uma pinça de dedo. A ferramenta de corte é montada em um Kistler de três componentes piezelétricos e de dinamômetro, que são montados sobre o carro transversal do torno, por meio de uma placa adaptadora. Os sinais adquiridos são medidos através de um amplificador de carga Kistler dual-mode e processados com um sistema de aquisição de dados, que são controlados utilizando o Labview.

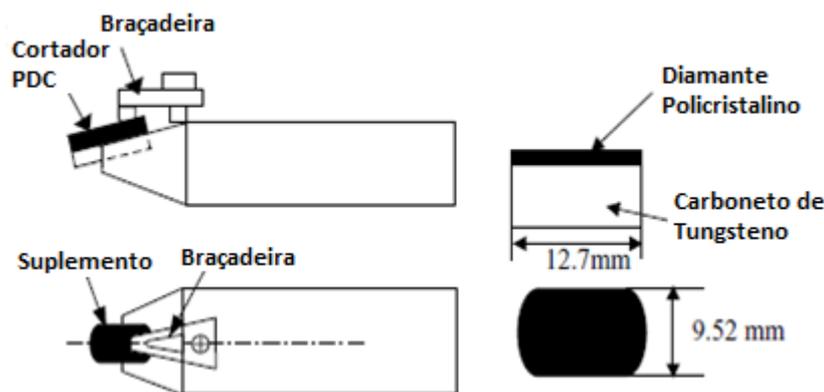


Figura 2.12: Geometria da ferramenta de corte. (Kaitkay *et al.*, 2002)

Os experimentos de corte foram realizados em três posições sobre a face frontal da amostra de rocha, como mostrado na figura. 2.13. Para o primeiro

cutte (ensaio 1), apenas um dos lados do corte estava em contato com a amostra de rocha. No ensaio 2 ambos os lados do cortador estavam em contato com a amostra de rocha. Durante o ensaio 3 ambos os lados não tinham contato com a amostra de rocha.

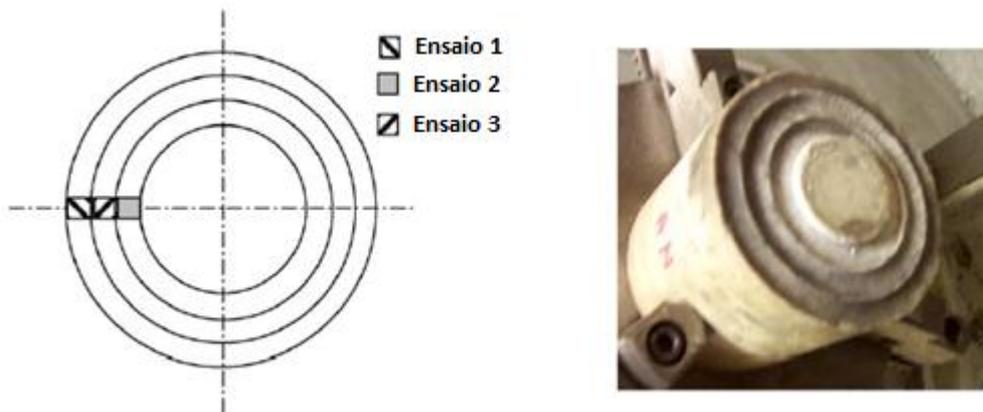


Figura 2.13: Ilustração das três posições de corte para cada teste. (Kaitkay, 2002)

As três posições foram selecionadas para estudar o efeito do atrito entre a amostra de rocha e os lados da ferramenta sob as forças de corte. O RPM nas três posições foram 221, 396 e 284, respectivamente, dando uma velocidade de corte de 1 m / s no centro da broca PDC para cada teste.

As condições para o ensaio de corte em pressão atmosférica são mostradas na tabela 2.2.

Tabela 2.2: Condições mecânicas para o corte em pressão atmosférica. (Kaitkay, 2002)

Condições para o ensaio	
Parâmetro	Valor
Razão de penetração (mm/r)	0.4, 0.8
Velocidade de Corte (m/s)	1.00
Ângulo de Ataque (°)	-15, -20

No caso do corte sob pressão confinante, foi usada uma configuração como a mostrada na figura 2.14. Para investigar o efeito da pressão hidrostática sobre as forças de corte e de formação do chip durante o corte em mármore Cartago, experimentos foram realizados com a cooperação de um fabricante de broca.

A amostra de rocha é colocada em câmara de pressão no qual a pressão hidrostática externa correspondente é mantida através de um conjunto de

bombas. A câmara de pressão pode suportar pressões de até 10.000 psi (69MPa). Dois motores fornecem movimento rotativo a uma coluna rotativa, que por sua vez aciona o cortador.

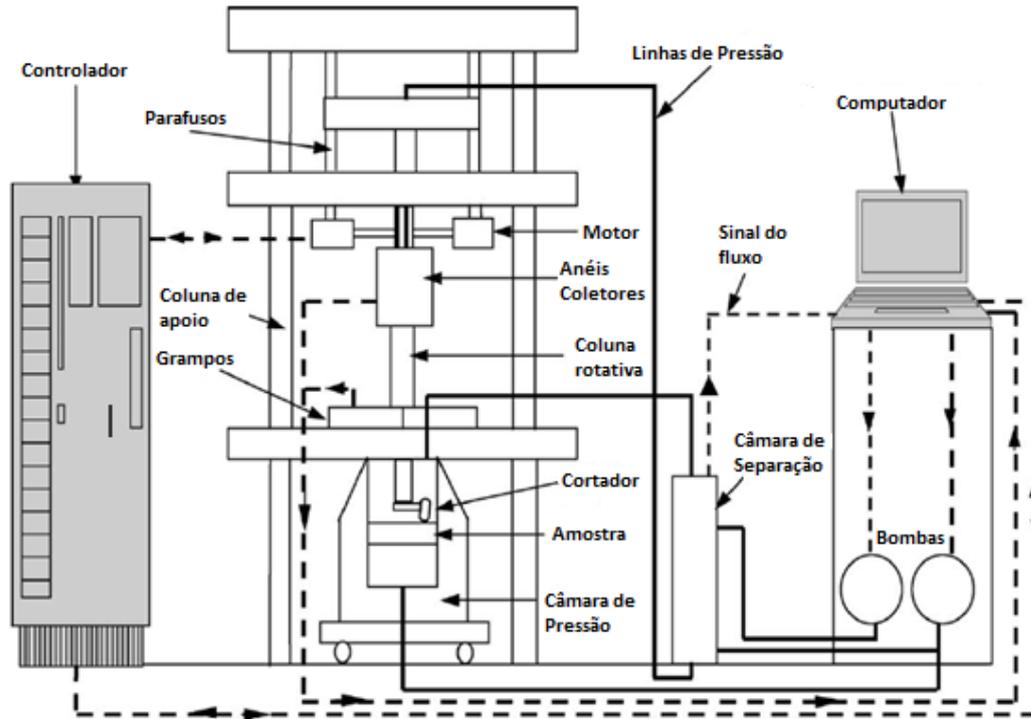


Figura 2.14: Configuração mecânica experimental do corte em pressão confinante. (Kaitkay, 2002)

Os motores também são usados para rodar os dois parafusos que movimentam a coluna rotativa em sentido descendente. Assim, os motores aplicam e alimentam o movimento vertical e rotacional para o cortador. Uma estrutura rígida suporta a câmara de pressão e da unidade. Os medidores de deformação são montados na extremidade inferior da coluna rotativa. Um computador controla a aquisição de dados, os movimentos e os parâmetros durante os experimentos. Dois ângulos de ataque (-15° e -25°) são usados respectivamente. A ferramenta de corte é mostrada na figura 2.15.

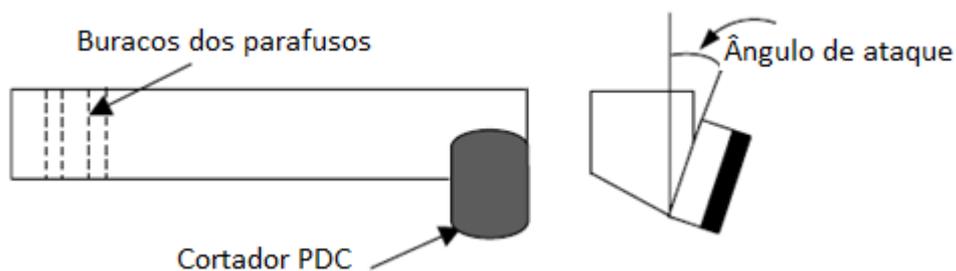


Figura 2.15: Ferramenta de corte para testes em pressão confinante (Kaitkay, 2002)

As condições mecânicas para o experimento em pressão confinante são mostradas na tabela 2.3.

Tabela 2.3: Condições mecânicas para o corte em pressão confinante. (Kaitkay, 2002)

Condições para o ensaio	
Parâmetro	Valor
Razão de penetração (mm/r)	0.4, 0.8
Velocidade de Corte (m/s)	1.00
Ângulo de Ataque (°)	-15, -20
Pressão de confinamento (Mpa)	3.44, 34.4

O cortador é montado no equipamento a uma distância de 1,375 polegadas (35 mm) a partir do centro e gira em torno do centro a 273 rpm. A velocidade resultante na ponta de corte é igual a 1 m / s. O cortador rota sobre seu eixo e se movimenta ao longo do eixo vertical. O cortador se movimenta a uma taxa de penetração de 0,15 polegadas/s (3,8 mm/s) para 2,8 s. Após cada corte, o cortador é trazido de volta à posição inicial a uma velocidade de 0,3 polegadas/s (7,62 mm/s). Cada teste demora ao redor de 4,2 s. Forças de corte são coletadas em uma taxa de amostragem de 500 pontos/s para uma duração de 6s para a força de corte e a força de empuxo. Testes semelhantes são realizados para dois diferentes níveis de pressão de 500 e 5000 psi (3,44 e 34.4 MPa) e para dois ângulos de ataque diferentes (-15° e -25°), respectivamente.

Os resultados encontrados por Kaitkay *et al.* (2002) para o caso de corte em pressão atmosférica foram apresentados na figura 2.16. Os resultados da força vs tempo foram obtidos para cada uma das três componentes de força (forças de corte, empuxo e laterais). Segundo os resultados obtidos nos experimentos, a oscilação nas forças é devido à natureza frágil do material removido.

A figura 2.17 mostra as medições das forças principais para as duas taxas de penetração e para os três tipos diferentes de corte.

Para o caso do corte em pressão confinante, Kaitkay *et al.* (2002) obtiveram resultados de força vs tempo usando uma célula de carga. A figura 2.18 mostra a curva típica dos resultados de corte obtidos para o caso sob pressão confinante.

A análise das forças foi similar ao realizado no caso de corte em pressão atmosférica.

A figura 2.19 mostra um aumento significativo na força média de corte com a aplicação de pressão. O aumento nas forças de corte no caso sem pressão confinante até o corte com pressão confinante de 500 psi (3.44 MPa) é acompanhado por um aumento no comprimento do chip como se vê claramente na figura 2.20.

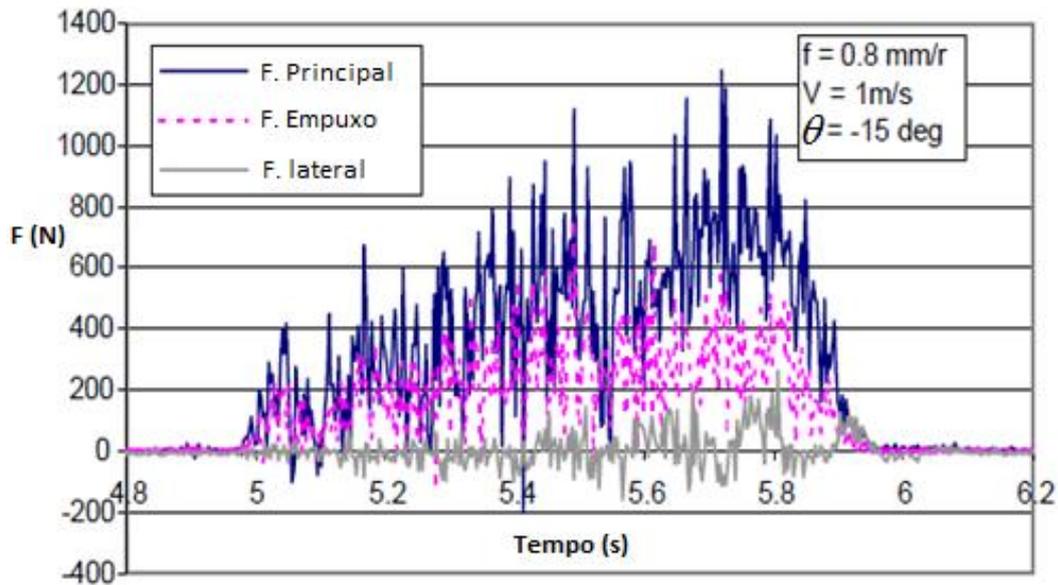


Figura 2.16: Variação das forças no cortador em função do tempo em pressão atmosférica. (Kaitkay, 2002)

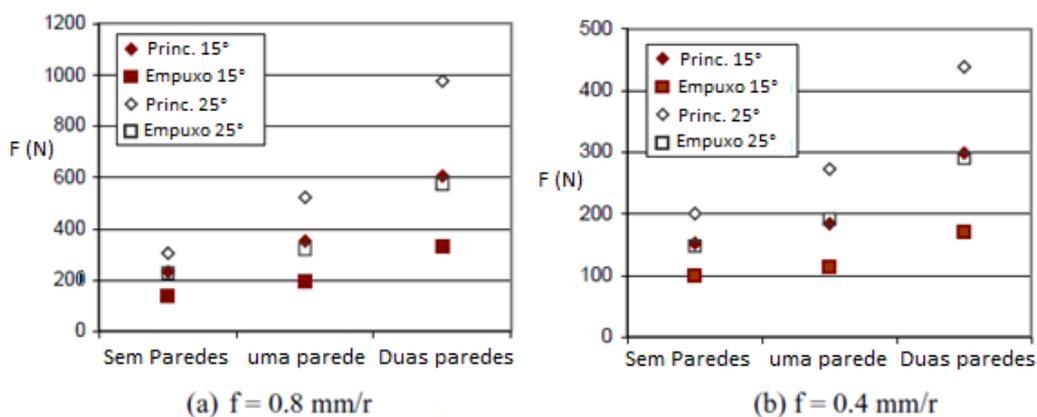


Figura 2.17: Média das forças no corte pressão atmosférica. (Kaitkay, 2002).

A análise das forças foi similar ao realizado no caso de corte sob pressão atmosférica.

A figura 2.19 mostra um aumento significativo na força média de corte com a aplicação de pressão. O aumento nas forças de corte no caso sem pressão

confinante até o corte com pressão confinante de 500 psi (3.44 MPa) é acompanhado por um aumento no comprimento do chip como se vê claramente na figura 2.20.

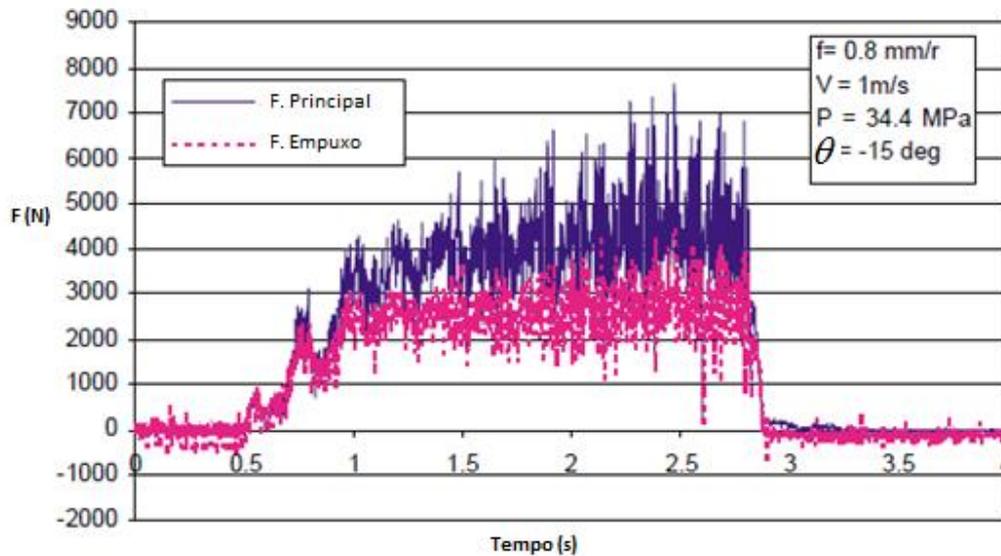


Figura 2.18: Variação das forças no cortador em função do tempo sob pressão confinante. (Kaitkay, 2005).

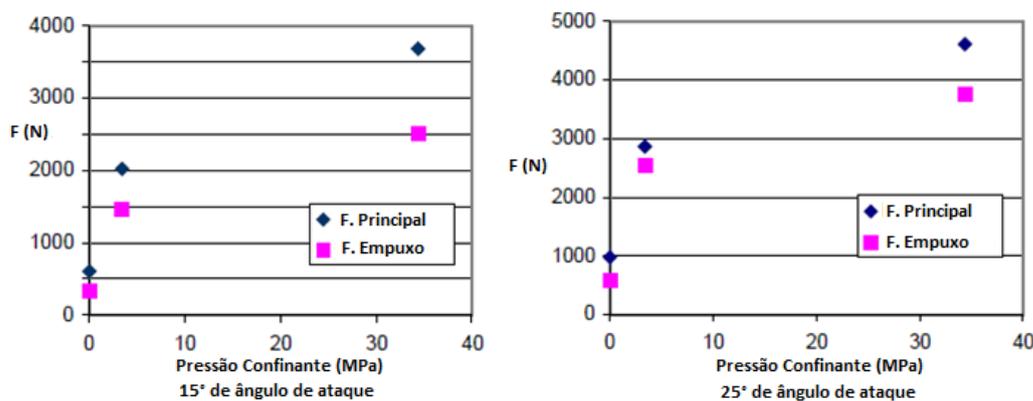


Figura 2.19: Variação da média das forças no corte sob pressão confinante (Kaitkay, 2002).

Kaitkay *et al.* (2002) verificaram no corte sob pressão atmosférica, que as forças de corte com duas paredes são em geral mais de duas vezes as forças de corte para a condição sem paredes. Também encontraram que as forças aumentam com o aumento da profundidade de corte e do ângulo de inclinação. No mecanismo de corte sem pressão confinante é predominantemente a formação de micro-fissuras na frente da ferramenta de corte e a remoção do material de pequenas partículas.

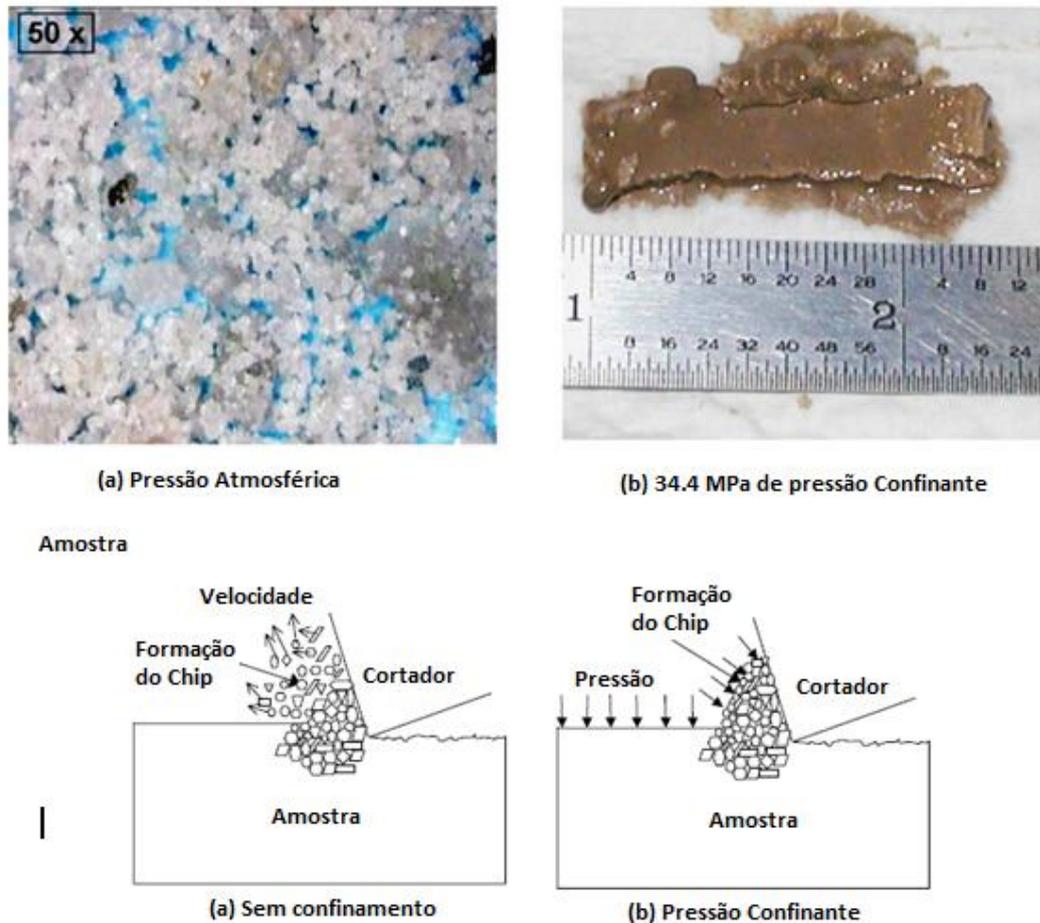


Figura 2.20: Mecanismo do material removido durante o corte. (Kaitkay, 2002).

Verificaram também que uma pressão externa hidrostática é usada para ajudar na formação do chip e transformar o modo de corte de um modo predominantemente frágil para um modo dúctil-frágil.

As forças de corte aumentam com a aplicação de pressão hidrostática, mas a relação encontrada é não-linear, quando a pressão é pequena.

O mecanismo de formação do chip para o corte em rocha em pressão hidrostática pode ter alguma semelhança com o mecanismo de corte em metal, no qual chips de grande comprimento são gerados. Isto é atribuído a uma combinação de dois diferentes mecanismos de falha: (i) a formação de pequenas fissuras, como no caso dos testes não-confinados e, (ii) uma pressão que induz deformação plástica à frente da ferramenta de corte. Os resultados do corte sob pressão hidrostática fornecem algumas idéias sobre perfuração subterrânea. Grandes chips serão formados pela ação do peso da lama na perfuração que eventualmente poderão diminuir a taxa de perfuração.

2.2.5.

Estudo experimental da MSE usando um cortador simples sob condições simuladas de pressão.

O ambiente de pressão no fundo de poço é um dos fatores mais importantes que afetam a taxa de penetração. Acredita-se que as rochas impermeáveis experimentam pressões diferenciais elevadas, devido à dilatação de cisalhamento tornando-se mais fortes e por tanto mais difíceis de perfurar. No entanto, experimentos recentes realizados em pressão atmosférica e pressões maiores com um cortador simples, mostraram que, contrariamente a essa crença, mesmo a baixas pressões (100-200 psi) e mesmo com rochas permeáveis, se tem um aumento significativo em energia mecânica específica (MSE) que pode ser observado em relação aos testes realizados em condições atmosféricas. Os experimentos foram realizados em um único aparato de corte simples em altas pressões junto com sensores de alta precisão e um sistema de aquisição de dados. Nos experimentos, um cortador PDC de 13 mm foi usado para cortar o mármore de Cartago e outras amostras como o calcáreo de Indiana, com profundidades de corte variando entre 0.025-0.050 polegadas. Mais de 70 testes de alta precisão foram realizados sobre estes dois tipos de rocha em pressões de confinamento que variam de 0 até 1000 psi. Os fluidos de confinamento foram água e óleo mineral. Os experimentos deste estudo foram realizados com a célula de alta pressão da Universidade de Tulsa (Figura. 2.21).



Figura 2.21: Célula de alta pressão da Universidade de Tulsa (Rafatian, 2009).

A figura 2.22 apresenta o esquema da instalação. O equipamento é capaz de fornecer três distintas pressões sobre a rocha: a pressão confinante agindo sobre os lados da amostra de rocha cilíndrica, a pressão de poros atuando dentro dos poros da rocha e controlada através da face inferior da amostra, e a pressão do poço atuando na superfície superior da rocha. No entanto, para ter as três pressões controladas separadamente, uma amostra de rocha permeável tem que ser devidamente instalada na célula, juntamente com uma “membrana” de borracha para separar a pressão confinante da pressão dos poros.

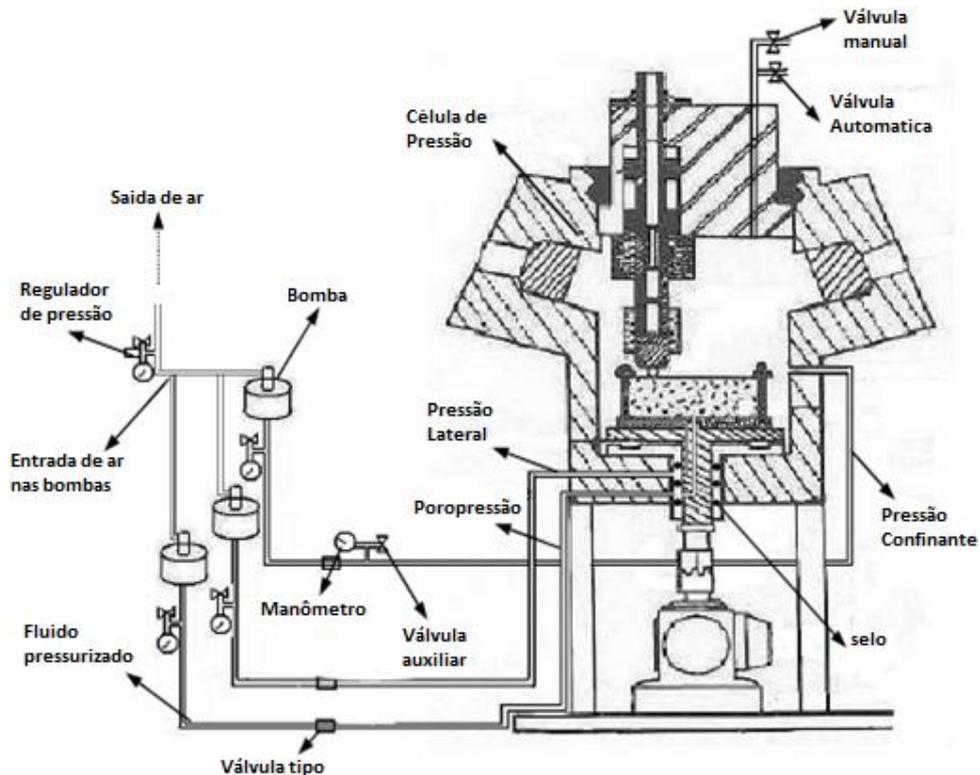


Figura 2.22: Esquema de montagem do equipamento de corte (Garcia, 1998)

Para realizar o ensaio, um cortador simples é instalado com o ângulo de ataque e o ângulo de inclinação lateral desejado em relação do eixo de acionamento. A amostra de rocha é instalada em um suporte e colocada dentro da célula de alta pressão. A célula é preenchida com a pressão do fluido desejado e é fechada. Em seguida, através de uma bomba se faz a pressurização da rocha e uma vez a condição de pressão desejada é atingida, um variador de velocidade faz girar a amostra de rocha no interior da célula de pressão.

Enquanto o cortador simples corta a amostra de rocha, as forças exercidas sobre o cortador são medidas em três direções, com três conjuntos de

medidores de tensão, localizados acima do cortador no eixo de acionamento. Como é mostrado na figura. 2.23, as forças no cortador são medidas na direção do corte (força de corte), na direção vertical (força de empuxo) e na direção lateral (força lateral).

Tabela 2.4: Propriedades da amostra de rocha (Rafatian, 2009).

Propriedades das Amostras de Rocha	
Rocha/Propriedade	Valor
Mármore de Cartago	
Densidade Bulk	2.67 g/cc
UCS	14.500 psi
Porosidade	1-2%
Permeabilidade	<0.05 md
Calcáreo de Indiana	
Densidade Bulk	2.3 g/cc
UCS	7.000 psi
Porosidade	11-16%
Permeabilidade	10 md

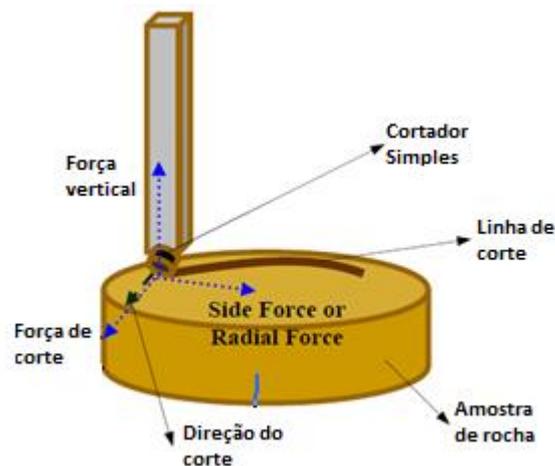


Figura 2.23: Forças no cortador e suas direções (Rafatian, 2009).

As forças exercidas no corte, as condições de pressão, a velocidade de rotação e a posição do cortador são medidas através de vários sensores e adquiridas através do sistema de aquisição de dados a uma taxa de amostragem de 400 Hz.

Um cortador PDC de diâmetro 0,512-in. (13 mm), com 0,017-in foi soldado em uma haste para 20° de ângulo de ataque. O ângulo de inclinação lateral em todos os testes foi feito o mais próximo possível de zero.

Três fluidos de perfuração foram utilizados nos experimentos: óleo mineral leve, óleo mineral viscoso e água de torneira. Todos os fluidos são líquidos claros, sem qualquer material pesado. As amostras do Calcário de Indiana foram embebidas no líquido antes dos ensaios. A figura 2.24 mostra duas amostras de rocha após o experimento.



Figura 2.24: Mármore de Cartago na esquerda, e Calcário de Indiana na direita depois do teste de corte (Rafatian, 2009).

Foi dada ênfase à energia mecânica específica usada no processo de corte durante cada ensaio. A MSE foi calculada através da seguinte equação:

$$MSE = \frac{480 \times \text{Torque} \times \text{RPM}}{\text{Dia}^2 \times \text{ROP}} + \frac{4 \times \text{WOB}}{\text{Dia}^2 \times \pi} \quad (2.7)$$

Onde *RPM* são as revoluções por minuto e *WOB* é o peso sob a broca. Para um cortador simples, a equação acima pode ser simplificada para:

$$MSE = \frac{\text{Trabalho Acumulado}}{\text{Volume de Rocha Cortado}} = \frac{\int (\text{Força}) dx}{\text{Volume cortado}} \quad (2.8)$$

O trabalho mecânico no experimento foi calculado pela integração da área embaixo da curva força no cortador vs deslocamento da ferramenta de corte. O volume de rocha cortado foi calculado através da medição da profundidade de

corte e cálculo geométrico entre as ranhuras de corte e a forma do cortador. A MSE poderia então ser facilmente calculada pela divisão do trabalho mecânico em função do volume de corte.

Inesperadamente, a análise da MSE mostrou consistentemente que um pequeno aumento da pressão confinante da ordem de 150 psi pode aumentar a MSE no processo e reduzir significativamente a eficiência de corte até pela metade. Esta redução na eficiência de corte pode ser ainda mais dramática em rochas permeáveis e saturadas como o calcário de Indiana o que não pode ser explicado somente pelo efeito do fortalecimento da rocha, sob pressão de confinamento.

A MSE obtida através dos experimentos atmosféricos sobre as amostras de mármore Cartago foram de cerca de 28.000 psi e para as amostras de calcário de Indiana foram cerca de 11.000 psi. Estes números são ligeiramente superiores aos valores da UCS das amostras de rochas, mas acredita-se que com maiores profundidades de corte, esses números seriam menores.

Na figura 2.25 são apresentadas as parcelas dos valores de MSE obtidos nos testes em amostras de mármore de Cartago contra a pressão de confinamento. Os pontos azuis representam os pontos de dados de ensaios com óleo mineral leve como fluido de perfuração e os pontos marrons representam pontos de dados a partir de testes com óleo mineral viscoso. O gráfico mostra que a viscosidade do óleo mineral não tem efeito nenhum sobre o gasto de energias específicas de corte do mármore Cartago impermeável.

No entanto, a tendência crescente dos valores de MSE com a pressão é significativa. O aumento da pressão confinante em apenas 5-10 psig requer milhares de psi a mais de MSE para cortar o mármore Cartago. A cerca de 150 psig de pressão confinante, a MSE necessária para cortar a rocha é o dobro da quantidade necessária para cortar a rocha, sob pressão atmosférica. Deve ser lembrado que todos os testes atmosféricos foram feitos com rocha imersa no fluido de perfuração.

A linha pontilhada no gráfico mostra o efeito da pressão de confinamento sobre a resistência à compressão confinada da rocha (CCS). Os valores da MSE têm uma mudança mais dramática em pressões mais baixas (0-150 psig) do que nas faixas de maior pressão do experimento (150-950 psig). A figura 2.26 apresenta a eficiência de corte dos experimentos com as amostras de mármore Cartago. Mais uma vez, pode ser visto que só é necessário ter 100 psig para reduzir a eficiência de corte em mais de 30%. Muitos dos experimentos foram

realizados com óleo mineral como fluido de saturação e de confinamento. Vários testes foram realizados com água da torneira como fluido confinante e salmoura como fluido de saturação. Aumentos significativos na MSE e reduções na eficiência são observados para o Calcáreo permeável de Indiana, no entanto, os fluidos confinantes e de saturação tem um efeito discreto sobre estes valores. Quando a água é utilizada como fluido de confinamento, os aumentos nos valores de MSE são menos dramáticos, mas é muito maior do que o efeito do fortalecimento da rocha pela pressão confinante.

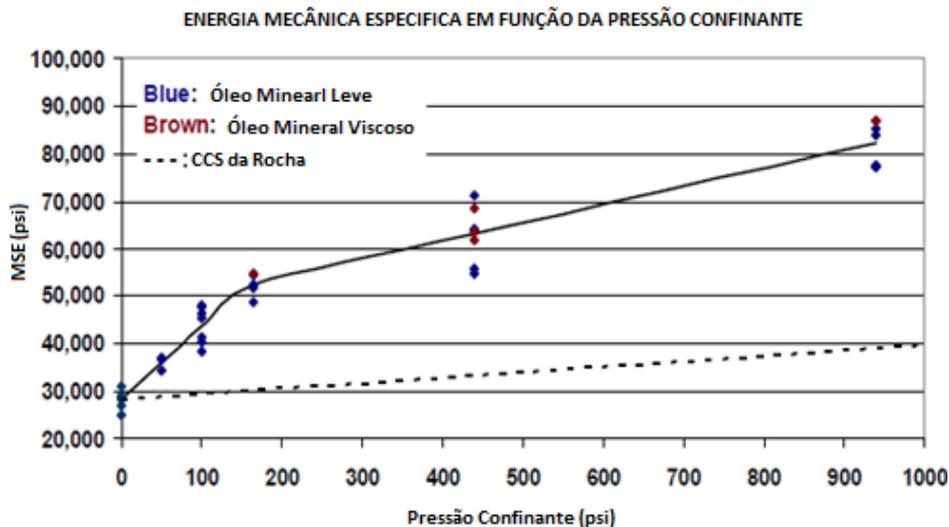


Figura 2.25: MSE VS. Pressão confinante para o mármore de Cartago em óleo leve e óleo viscoso (Rafatian, 2009).

Muitos dos experimentos foram realizados com óleo mineral como fluido de saturação e de confinamento. Vários outros testes foram realizados com água da torneira como fluido confinante e salmoura como fluido de saturação. Aumentos significativos na MSE e reduções na eficiência são observados para o calcário permeável de Indiana, no entanto, os fluidos confinantes e de saturação tem um efeito discreto sobre estes valores. Quando a água é utilizada como fluido de confinamento, os aumentos nos valores de MSE são menos dramáticas, mas é muito maior do que o efeito do fortalecimento da rocha pela pressão.

Neste trabalho foi concluído que pressões de confinamento tão baixas quanto 100 psig podem aumentar drasticamente as energias específicas para o processo de corte. Este aumento dramático na energia específica é observado no mármore de Cartago impermeável e no calcário de Indiana permeável, e não podem ser explicadas por meio pelo efeito do fortalecimento da rocha intacta com a pressão de confinamento.

A tendência de aumento da MSE é mais dramática na faixa inferior da pressão de confinamento (0-150 psig) em relação à faixa mais alta (150-950 psi) em ambos os tipos de rocha mármore de Cartago e calcário de Indiana.

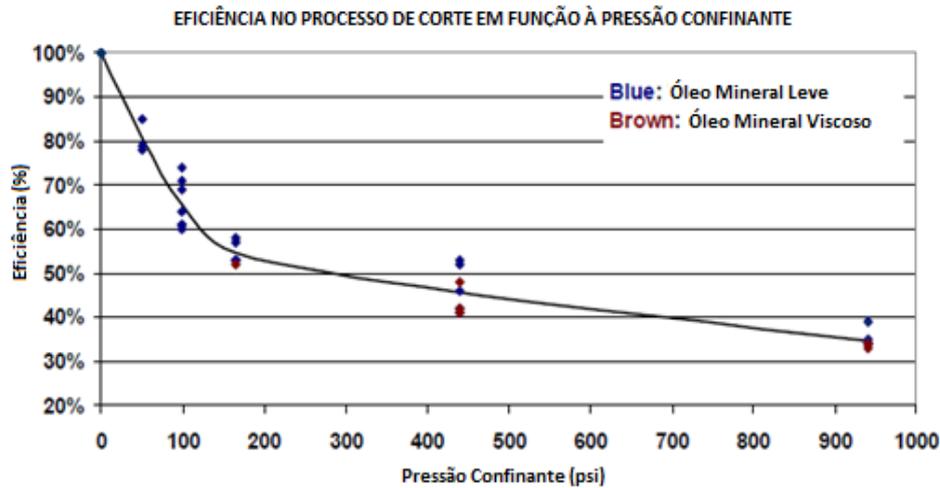


Figura 2.26: Eficiência de corte versus pressão confinante para o mármore de Cartago com óleo leve e óleo viscoso (Rafatian, 2009).

2.3. Ensaio Numéricos.

2.3.1. Modelagem usando PFC2D de corte em rocha em altas condições de pressão.

Durante muitos anos indústria de petróleo e exploração de gás tem usado a resistência à compressão, o ângulo de atrito e a lei de Mohr-Coulomb, como relações constitutivas na tentativa de modelar o processo de perfuração. Taxas de penetração baseadas nestes modelos não preveem devidamente o efeito da pressão na perfuração. Isto sugere que deve haver outras propriedades da rocha que governam o processo de perfuração em condições pressurizadas. A modelagem com elementos discretos (DEM) de corte de rocha submetida à alta pressão indica que as propriedades mecânicas de detritos são mais importantes que as propriedades mecânicas da rocha original elástica. A formação e extrusão de detritos consome a maior parte da energia necessária para cortar a rocha no fundo do poço. O resultado deste estudo sugere que algumas medidas

de comportamento inelástico da rocha em condições confinadas, como a área sob a curva de tensão – deformação pode ser uma medida mais apropriada de perfurabilidade da rocha em ambientes de alta pressão. A área abaixo da curva tensão – deformação é uma medida da energia específica. A caracterização da rocha em termos de área da curva tensão - deformação pode abrir a porta a formas mais precisas para parametrizar modelos específicos de energia de perfuração.

Conforme descrito por Potyondy *et al.* (2004), os materiais usando o DEM são criados pelo estabelecimento de uma equivalência entre o comportamento mecânico do material a testes de laboratório e o comportamento de modelos DEM aos mesmos “testes de laboratório”. O sucesso no método DEM exige que testes de laboratórios adequados e parâmetros mecânicos escolhidos possam calibrar o material DEM.

A prática adotada para calibrar o material DEM de uma rocha é fazer coincidir a resposta esforço–deformação da rocha com a do material DEM, isso para alta deformação, e para uma vasta gama de pressões hidrostáticas.

O código DEM utilizado é o PFC2D desenvolvido pela Itasca. As funções FISH que são comumente usadas para simular ensaios triaxiais no PFC2D não permitem grandes deformações, pois a pressão confinante é aplicada por paredes rígidas que não podem deformar-se lateralmente evitando a distorção do espécime. Foram desenvolvidos por Ledgerwood III (2009), uma série de ensaios triaxiais em PFC2D, aplicando pressão confinante com as mesmas rotinas topológicas que exercem pressão sobre a superfície de um chip na modelagem do processo de corte.

A figura 2.27 mostra as curvas de tensão-deformação geradas pelo PFC2D no trabalho de Ledgerwood III, para uma rocha virtual típica. As curvas sólidas representam a deformação axial e as curvas tracejadas representam deformação volumétrica, os resultados negativos, representam a dilatação.

A pressão confinante variou de 7 MPa (1000 psi) a 280 MPa (40.000 psi). Estas curvas tensão deformação virtuais apresentam as características que eram de se esperar: amolecimento a baixa pressão e endurecimento a pressões superiores; dilatação em baixas pressões e dilatação mínima em altas pressões. Esta rocha virtual em particular tinha 18% de porosidade, rochas virtuais com maior porosidade sofrem compactação a alta pressão. A figura 2.28 mostra os resultados dos ensaios triaxiais usando PFC2D com baixa e alta pressão confinante.

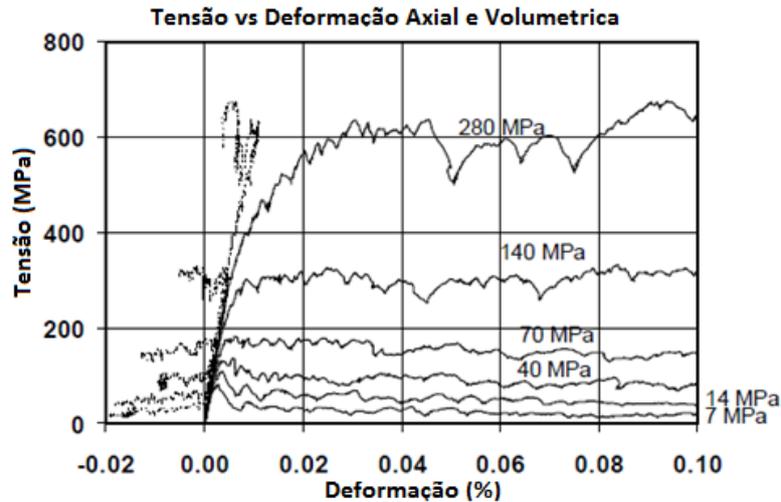


Figura 2.27: Curvas tensão deformação geradas de rochas virtuais PFC2D. (Ledgerwood III, 2009).

A pressão confinante variou de 7 MPa (1000 psi) a 280 MPa (40.000 psi). Estas curvas tensão deformação virtuais apresentam as características que eram de se esperar: amolecimento a baixa pressão e endurecimento a pressões superiores; dilatação em baixas pressões e dilatação mínima em altas pressões. Esta rocha virtual em particular teve 18% de porosidade, rochas virtuais com maior porosidade sofrem compactação a alta pressão. A figura 2.28 mostra os resultados dos ensaios triaxiais usando PFC2D com baixa e alta pressão confinante.

No caso do processo de corte, o corte em condições pressurizadas é muito diferente do corte em condições atmosféricas. Em condições atmosféricas, o cortador produz longas fraturas ou rachaduras dentro da rocha criando grandes chips de rocha elástica. Estes chips normalmente vão a voar para longe da face do cortador devido à liberação da energia elástica. O corte em rocha em pressão confinante, em um ambiente usando a lama de perfuração, não cria esses chips. Corte em pressão confinante faz longas tiras de material rochoso que sobem pela face do cortador e se apresentam em forma de dentes, como é mostrado por Armagost *et al.* (1988).

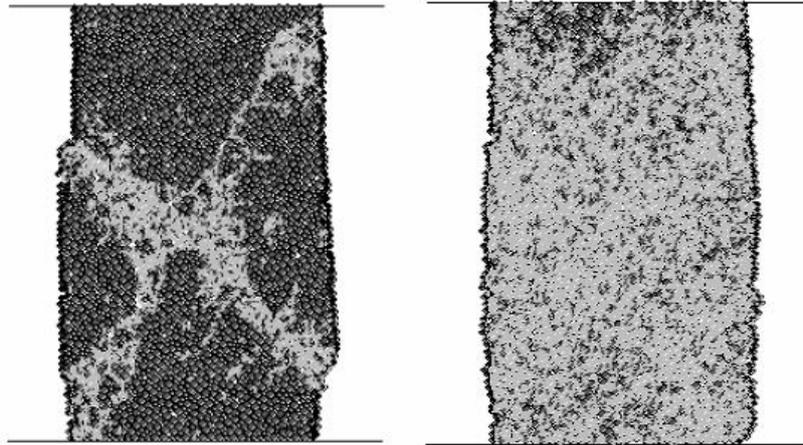


Figura 2.28: Típicos espécimes triaxiais. Esquerda 6.90 MPa de pressão confinante, direita 280 MPa de pressão confinante. (Ledgerwood III, 2009)

Um grande desafio na modelagem de corte de rocha usando o DEM é o de simular o efeito da pressão de confinamento no corte. A superfície do corte não é conhecida a priori. Ledgerwood III (2009) criou uma topologia em uma rotina que é executada em cada etapa enésima que examina o estado atual do modelo DEM e identifica todos os elementos discretos na superfície do corte. Em seguida, aplica-se uma força que representaria a pressão hidrostática para as partículas identificadas na superfície. Assim, estamos modelando a condição extrema de corte de uma rocha muito impermeável. Este é um limite superior no concernente com as forças de corte que estão envolvidas. O outro extremo, é o caso de corte a pressão atmosférica, que pode ser modelado com facilidade, uma vez que esta condição de contorno de pressão não é necessária. O caso atmosférico representa um limite inferior no concernente com as forças de corte que estão envolvidas. Devido a que uma grande quantidade de deformação plástica ocorre neste processo de corte em rocha, é de se esperar que as propriedades inelásticas da rocha sejam importantes. É também de se esperar que o endurecimento ou amolecimento desempenharem um papel principal. A resistência à compressão simples e o ângulo de atrito da rocha não capturam este comportamento inelástico da rocha.

As figuras 2.29 e 2.30 mostram modelos PFC2D de corte de rocha nos dois extremos das condições de pressão: a atmosférica e alta pressão. O cortador, e mostrado como uma linha preta que se move da esquerda para a direita. As partículas com pontos pretos na figura 2.30 representam o limite em que a pressão confinante é aplicada.

Note que os mecanismos evidentes nesses modelos são semelhantes às descrições da vida real. Com pressão atmosférica, grande fendas são apresentadas na rocha matriz elástica (não visível na figura) e grandes chips elásticos são jogados fora da superfície (peças escuras). No caso de alta pressão, o corte é composto de material completamente esmagado, tendo uma forma de dente de serra e o material se mantém junto por conta da pressão confinante. O corte é reiniciado expulsando o material pela face da ferramenta. Note que também há material esmagado de rocha sob o cortador, este material já fluiu na face do cortador.

Como conclusões, Ledgerwood III (2009) afirma que o DEM é uma boa ferramenta de modelagem para o corte de rocha. Grandes deformações e propagação de trincas são tratadas naturalmente. O PFC2D dá uma boa concordância qualitativa entre os modelos de corte real e os testes de corte usando o DEM. Ele encontrou que as propriedades inelásticas têm uma forte influência sobre a perfurabilidade da rocha, ainda maior que as propriedades elásticas. Como na indústria, deveria-se estar buscando identificar parâmetros que caracterizem inelasticamente a rocha. Além disso, deveria-se começar a avaliar as rochas em níveis mais elevados de deformação e para procurar novas propriedades mecânicas fundamentais que vão governar o processo de perfuração.

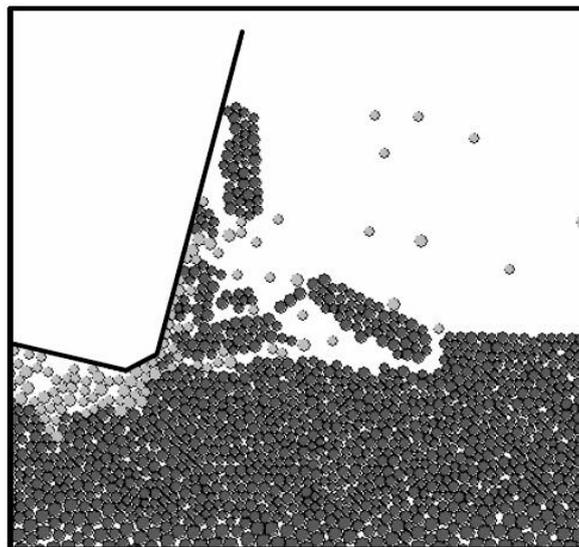


Figura 2.29: Corte a pressão atmosférica. (Ledgerwood III, 2009)

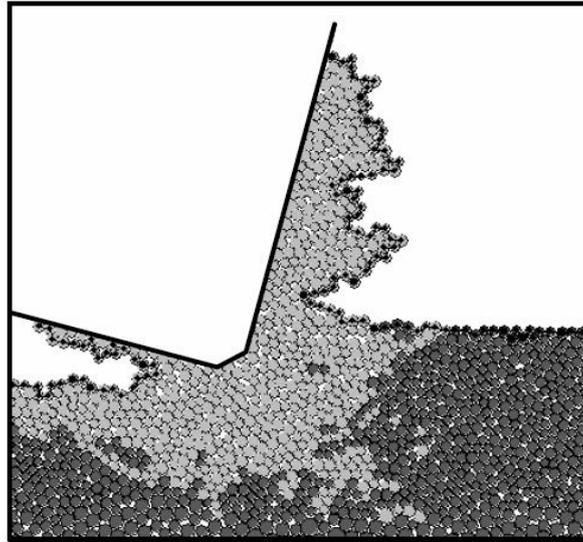


Figura 2.30: Corte a pressão de 20 Mpa. (Ledgerwood III, 2009)

A curva tensão – deformação pode ser um bom parâmetro para quantificar a perfurabilidade da rocha. Dado o interesse atual na energia específica, existem oportunidades para utilizar a área da curva tensão – deformação para nos ajudar a entender como aplicar esses modelos à alta pressão. A diferença de tensões em alta deformação pode também ser uma medida praticamente possível de correlacionar o processo de corte e a perfurabilidade em rochas altamente pressurizadas.

2.3.2.

A influência do modo de fratura dinâmica no corte em rocha.

Block et al. (2009) estudaram a eficiência da perfuração para cada modo de falha no processo de corte e a morfologia do corte durante a perfuração. Eles usaram um código comercial do método dos elementos discreto em 2D para estudar a relação entre a morfologia do corte em rocha e as condições no poço durante a perfuração usando um cortador PDC simples. No seu estudo, Block (2009) usou o PFC2D, para simular o corte em rocha aproveitando a facilidade que tem o PCF2D para simular ambos os casos de morfologia de falha (frágil e dúctil) nas diferentes condições de corte.

Block *et al.* (2009) calibraram a rocha virtual simulando ensaios numéricos biaxiais, e a seguir, comparam os resultados destes ensaios numéricos com os resultados de ensaios triaxiais em laboratório. Block (2009) conseguiu simular o

arenito de Berea usando os dados obtidos por na literatura para esta rocha. Os resultados destas simulações são mostrados na figura 2.31.

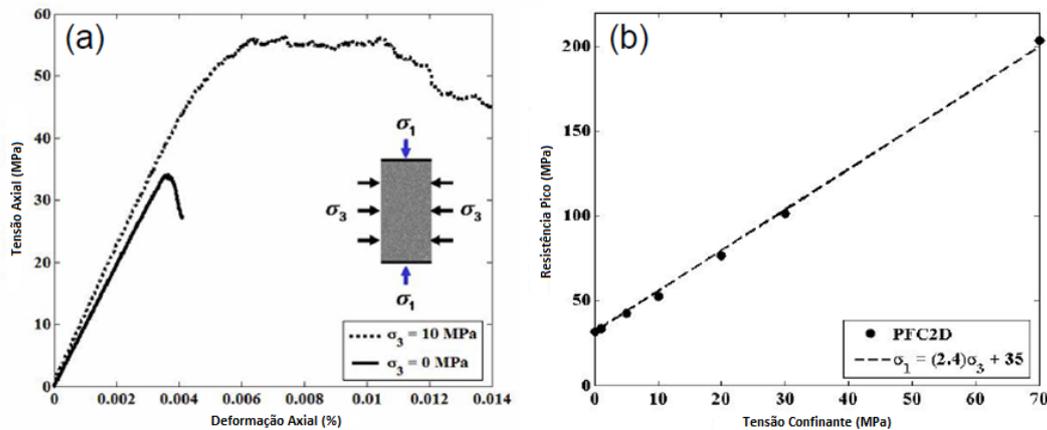


Figura 2.31: Calibração biaxial. (a) curva tensão deformação para Piceance Shale, e (b) envoltória de falha para Berea Sandstone. (Block, 2009).

No procedimento adotado por eles, o cortador foi movimentado horizontalmente com uma velocidade constante ao tempo que uma força vertical foi aplicada para simular o peso sob a broca ou WOB. O ambiente de corte do Block *et al.* (2009) é mostrado na figura 2.32.

Flutuações nas forças verticais, laterais e a posição vertical foram monitoradas durante a simulação. Um algoritmo foi aplicado no código Fish para criar uma cadeia de partículas para simular a pressão confinante sobre a face superior da amostra e pressões confinantes foram aplicadas nos lados da amostra de rocha virtual para simular as tensões in situ.

Como resultados da simulação numérica do corte em rocha, Block *et al.* (2009) apresentam as figuras 2.33 e 2.34.

As simulações desenvolvidas para baixos valores de pressão confinante e baixos WOB são descritas pelo modo de falha frágil apresentando a formação do chip, no entanto, para altos valores de pressão confinante e altos WOB, o modo de falha é representado pelo comportamento dúctil do material apresentando a formação dos chamados dentes de serra. O modo de falha dúctil é comumente associado à deformação plástica localizada perto da superfície da rocha.

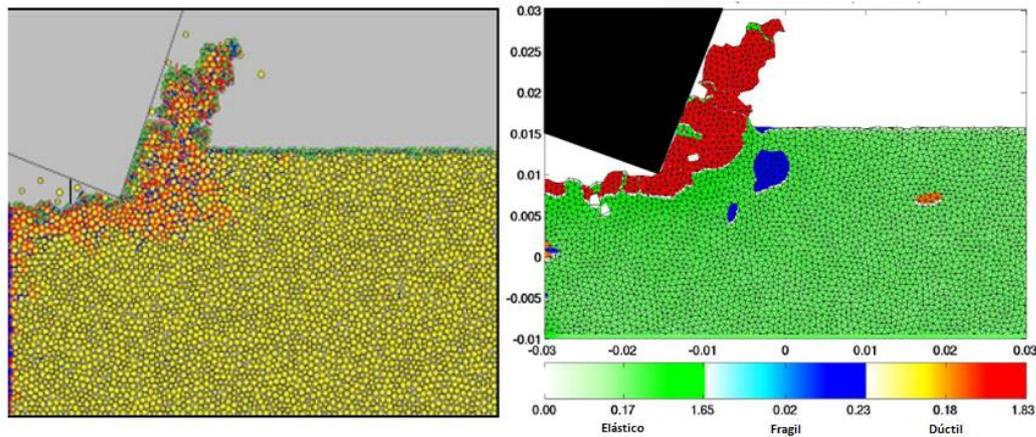


Figura 2.34: Diagrama de densidade (watt/m^2) para $\text{WOB} = 200 \text{ KN}$ e $P_m = 30 \text{ MPa}$. (Block, 2009).

A figura 2.36 mostra a transição morfológica desde o modo frágil para o dúctil em função da profundidade. Esta gráfica indica que o modo predominante no processo de corte em rocha é o modo dúctil.

Block *et al.* (2009) concluíram que as operações de perfuração em rocha dependem criticamente do processo de corte em rocha especialmente na eficiência do processo para poços profundos. Simulações em DEM são viáveis para reproduzir alguns aspectos da morfologia do corte em campo. Eles encontraram que as simulações usando DEM podiam prever as tendências da MSE na perfuração de poços profundos como o discutido na literatura.

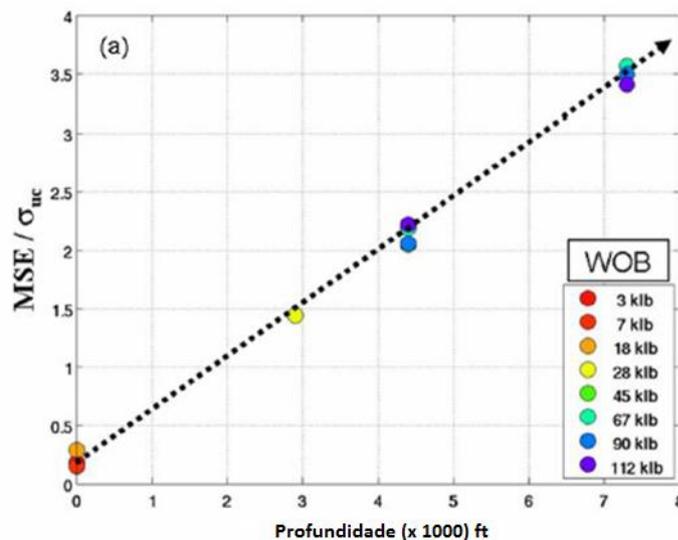


Figura 2.35: MSE como resultado das simulações de corte em rocha. (Block, 2009).

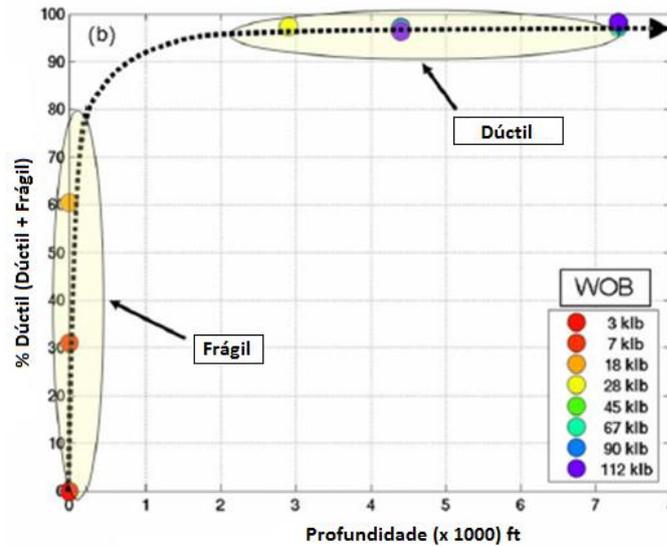


Figura 2.36: Energia no modo dúctil em função da profundidade. (Block, 2009).

Quando a energia total do processo é separada entre os modos dúctil e frágil de falha, a transição frágil-dúctil obtém uma grande importância na formação do chip ou do dente de serra. No entanto, futuras pesquisas são necessárias para verificar a relação entre as envoltórias de falha e as morfologias.

2.3.3.

Simulação do corte em rocha usando o método dos elementos distintos – PFC2D.

Kaitkay et al. (2004) usaram o método dos elementos discretos DEM para modelar uma rocha virtual, neste caso o mármore de Cartago, e simular o corte ortogonal neste material com e sem pressão confinante. Este estudo foi realizado como complemento aos resultados experimentais obtidos por Lei et al. (2003). O espécime de rocha virtual mostrado na figura 2.37 foi gerado segundo três fases para a geração da amostra usando PFC2D, Itasca 1999. Os principais parâmetros são mostrados na tabela 2.5.

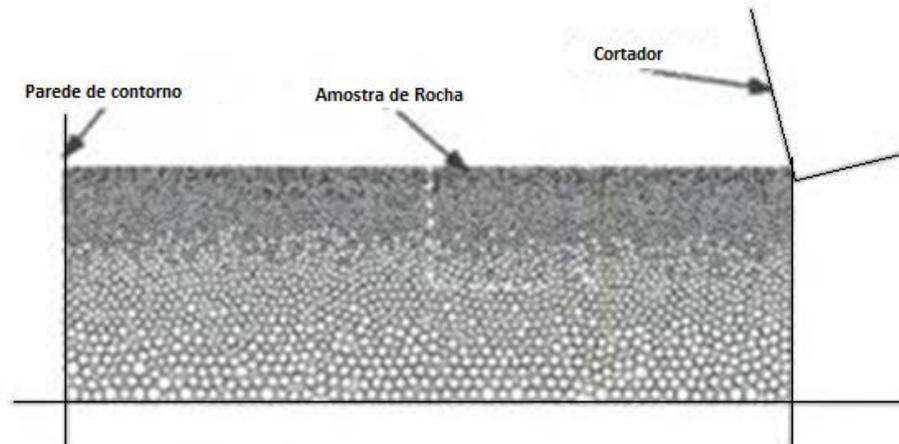


Figura 2.37: Espécime de rocha virtual. (Lei, 2004).

Tabela 2.5: Principais parâmetros para simular o mármore de Cartago. (Lei, 2004).

Parâmetro	Símbolo	Valor
Altura da Amostra (mm)	H	140
Espessura da Amostra (mm)	W	70
Raio da partícula mínimo (mm)	R_{min}	0,625
Relação dos raios das partículas	R_{max}/R_{min}	1,3
Densidade das partículas (kg/m^3)	ρ	2650
Modulo elástico das partículas (Gpa)	E_c	35,5
Relação de rigidezes das partículas	K_n/K_s	2,6
Multiplicador do raio do contato paralelo	$\bar{\lambda}$	1,00
Modulo elástico do contato (Gpa)	\bar{E}_c	35,5
Relação de rigidezes dos contatos	\bar{K}_n/\bar{K}_s	2,6
Coefficiente de atrito das partículas	μ	0,577
Resistência normal do contato, média (Mpa)	$\bar{\sigma}_{c,mean}$	45,4
Resistência normal do contato, desvio (Mpa)	$\bar{\sigma}_{c,std}$	1,00
Resistência cisalh. do contato, média (Mpa)	$\bar{\tau}_{c,mean}$	105
Resistência cisalh. do contato, desvio (Mpa)	$\bar{\tau}_{c,std}$	1,00

A primeira fase foi gerar um pacote compacto de partículas aproximado a um material sólido. Esta fase é dividida em quatro passos: (1) gerar um arranjo compacto inicial, (2) instalar as tensões isotrópicas específicas, (3) eliminar os floaters (partículas com numero menor de três contatos atuando com outras partículas), e (4) instalar a ligação entre as partículas. Para esta ligação de partículas é usado o critério de ligação paralela.

Na segunda fase, ensaios numéricos biaxiais são gerados para estudar o comportamento do espécime de rocha virtual. Nesta fase são obtidas curvas tensão-deformação e obtidas as propriedades elásticas como módulo de Young

e coeficiente de Poisson ν , além disso, o valor de resistência à compressão do material. O ajuste dos parâmetros da tabela 2.5 envolve um processo iterativo até obter resultados satisfatórios.

A tabela 2.6 mostra a comparação dos resultados obtidos na rocha virtual em função dos valores obtidos em ensaios reais de laboratório para o mármore de Cartago por Terra Tek Inc. (1987) com erros menores aos 10%. Os autores concluíram que estes parâmetros eram suficientes para simular o mármore de Cartago.

Tabela 2.6: Resultados dos ensaios numéricos biaxiais. (Lei *et al.* 2004).

Propriedade	Mármore de Cartago	Espécime PFC
Modulo elástico (Gpa)	44,8	43,9
Coeficiente de poisson	0,24	0,23
Resistência a compressão simples (Mpa)	103	111
Resistência a compressão confinada de 34,4 (Mpa)	186	180

Na terceira fase, foi gerado um espécime com gradiente de partículas usado no processo de corte. A razão para usar gradiente de partículas foi para diminuir o tempo computacional na simulação do corte. A ferramenta de corte foi gerada usando segmentos de muro no PFC2D.

A simulação foi feita usando um ambiente de corte gerado em PFC2D como mostra a figura 2.37.

A ferramenta de corte foi modelada pelos autores, como um elemento rígido usando segmentos de muro. No espécime, o muro superior foi deletado para permitir a geração do chip. Os muros dos lados e da base da amostra são usados como restrições ao movimento da amostra. O processo de corte começa movimentando a ferramenta de corte com uma velocidade constante na direção horizontal. A tabela 2.7 mostra os valores usados como condições da simulação.

Tabela 2.7: Condições da simulação do processo de corte. (Lei, 2004).

Parâmetro	Valores
Profundidade de Corte (mm)	0.4, 0.8
Ângulo de ataque (graus)	15, 25
Pressão confinante (Mpa)	3.44, 34.4
Velocidade (m/s)	1.00

Como resultados da simulação, são extraídos os valores de força nas direções vertical e horizontal para diferentes valores de posição da ferramenta de corte. Para a simulação usando pressão confinante é gerado um algoritmo que foi implementado no PFC2D para encontrar as partículas na superfície limite e aplicar uma força externa a cada partícula da cadeia para obter a magnitude de pressão confinante requerida.

As figuras 2.38 e 2.39 mostram os resultados do processo de corte sem pressão confinante e para uma pressão confinante de 34,4 MPa respectivamente.

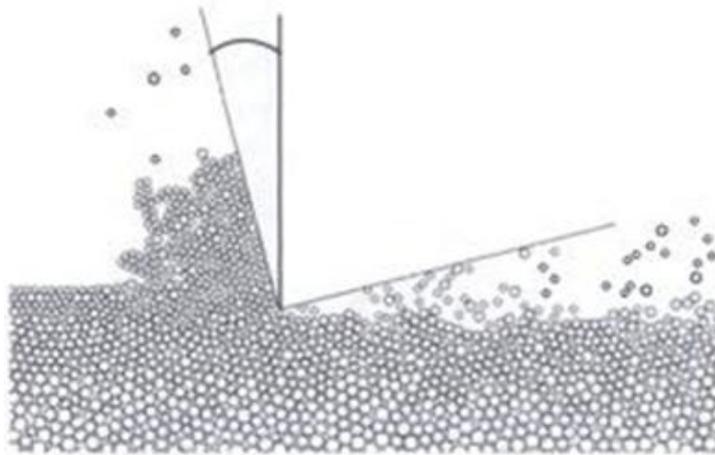


Figura 2.38: Sem pressão confinante. (Lei *et al.* 2004).

Nestas simulações a profundidade de corte foi de 0.80mm e o ângulo de ataque de 15°. Nas figuras 2.38 e 2.39, foi possível observar a formação do chip no caso do corte sem pressão e do dente de serra para o caso de corte com pressão confinante. Os resultados de força são mostrados nas figuras 2.40 e 2.41, para os casos de corte sem e com pressão confinante respectivamente.

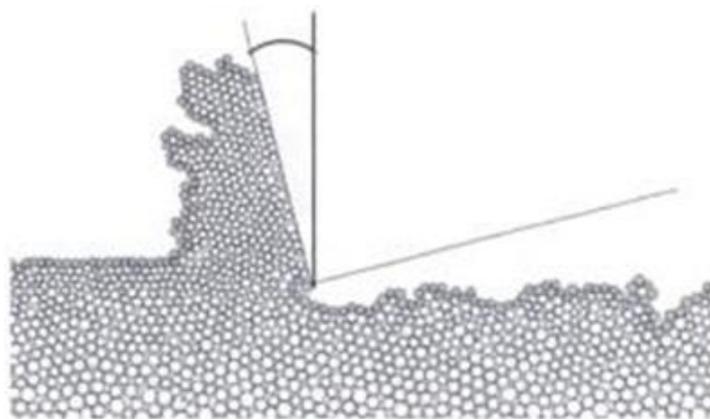


Figura 2.39: Com pressão confinante de 34.4 MPa. (Lei *et al.* 2004).

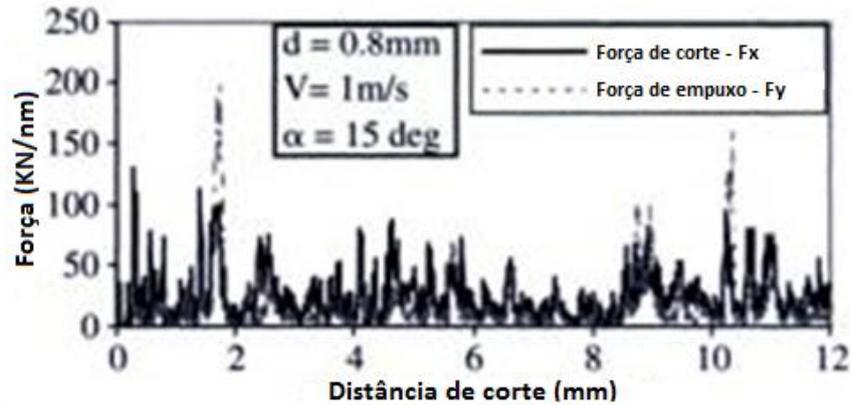


Figura 2.40: Forças no caso sem pressão confinante. (Lei *et al.* 2004).

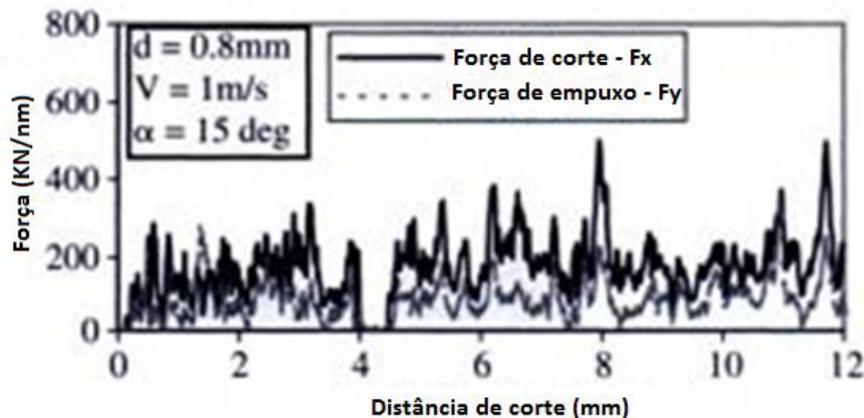


Figura 2.41: Forças no caso com pressão confinante. (Lei *et al.* 2004).

A figura 2.42 mostra a variação da força em função da profundidade de corte para dois ângulos de ataque. A componente de força incrementa em função da profundidade de corte devido ao incremento do volume de material removido.

Também se pode observar que a média das forças incrementa quando o ângulo de ataque incrementa.

A variação da média das forças de corte em função a pressão confinante é mostrada na figura 2.43 a força incrementa em função ao aumento da pressão confinante. A componente de força na direção X é aproximadamente duas vezes a força na direção Y. Este comportamento é não linear relacionado à pressão confinante.

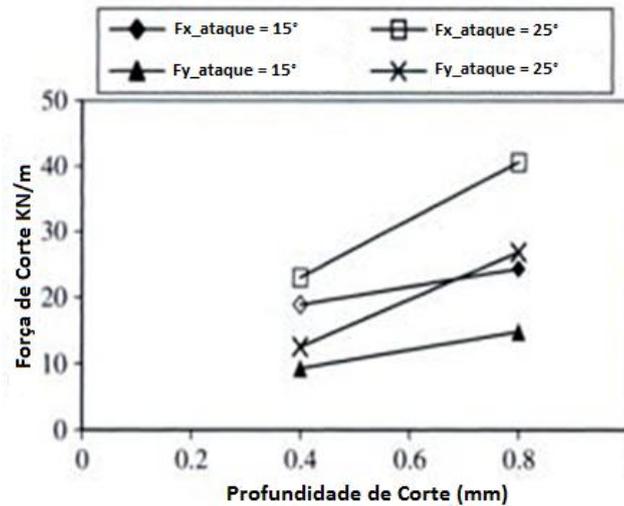


Figura 2.42: Variação da média da força em função da profundidade de corte e do ângulo de ataque. (Lei *et al.* 2004).

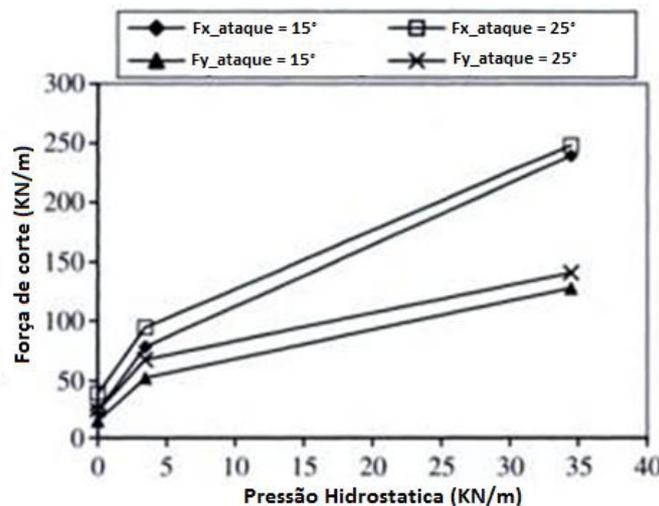


Figura 2.43: Variação da média da força em função da pressão confinante. (Lei *et al.* 2004).

Como conclusão a este trabalho, Lei *et al.* (2004) falam que a simulação com ou sem pressão confinante é possível usando o método dos elementos discretos. Com uma apropriada seleção de parâmetros para as partículas, um arranjo de partículas pode ser criado para simular uma rocha virtual em PFC2D. Lei *et al.* (2004) concluíram que os parâmetros apresentados na tabela 2.4, foram os indicados para simular o mármore de Cartago usando o PFC2D. Os resultados da simulação apresentaram um incremento da força em função da pressão confinante. Este incremento é apresentado não linear. As forças de corte incrementam com o aumento da profundidade de corte e o ângulo de

ataque. Eles concluem também que a simulação do processo de corte em rocha tem um role importante no desenho de brocas melhorando a eficiência na perfuração.