2.
Revisão bibliográfica

2.1.
Processo de corte em rocha

O mecanismo de corte em rocha é muito estudado pela indústria do petróleo na área de perfuração de poços, tendo como finalidade, melhorar o tempo e a eficiência do processo. No entanto, o entendimento da interação existente entre a broca e a rocha durante o corte apresenta um desafio na estimativa das forças de corte desenvolvidas no cortador.

Além das perfurações feitas em campo, são realizados ensaios de laboratório que simulam o processo de corte. Estes podem ser feitos com uma broca PDC em tamanho real (*Full scale*), ou os ensaios podem analisar a ação de um cortador único da broca (*Single cutter*). Estes termos serão introduzidos nos itens seguintes.

2.1.1.
Brocas PDC

A broca PDC (*Polycrystalline Diamond Compact*) é uma avançada ferramenta para perfuração de poços e é composta de uma multiplicidade de cortadores individuais agrupados sobre aletas montadas no corpo da broca. Os cortadores parecem pastilhas, feitos de um diamante sintético no formato de um compacto de diamante policristalino fundidos sobre aletas de carboneto de tungstênio ou aço montadas na broca. Os dois materiais das aletas proporcionam diferentes capacidades de corte e, portanto, sua escolha depende da necessidade de sua aplicação. Ela possui um desenho hidráulico com sistemas de jatos. A Figura 2.1 apresenta um modelo de broca PDC.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

Figura 2.1-Brocas PDC (Plácido, 2014)

Os cortadores são dispostos na face da broca para garantir uma cobertura completa da seção do poço. A orientação dos cortadores, dada pelos ângulos de ataque e de inclinação lateral (ângulos *backrake* e *siderake*), e a exposição do cortador (profundidade de corte) (Figura 2.2) influenciam diretamente a taxa de penetração da broca PDC e a eficiência do corte.

O ângulo de ataque do cortador é aquele que relaciona a face do cortador a uma linha perpendicular à formação que está sendo perfurada. Este ângulo contribui para o desempenho da broca influenciando a eficiência da sua limpeza (feita através da circulação de fluido), aumentando a sua agressividade e prolongando a vida útil do cortador (Wamsley e Ford, 2006).

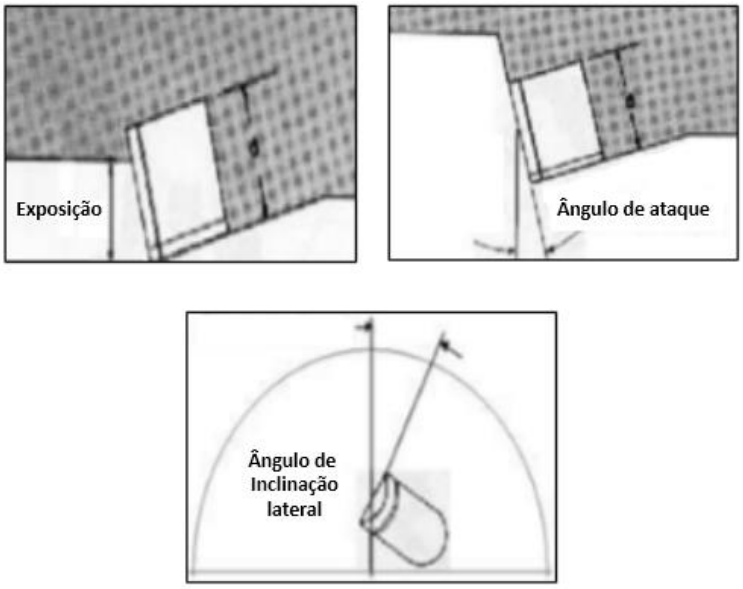

Figura 2.2-Exposição, ângulos de ataque e inclinação lateral de um cortador (Plácido, 2014)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

Cada cortador apresenta uma orientação diferente, que varia com a sua posição entre o centro da broca e a parte externa (calibre). O mecanismo de perfuração da broca PDC é por cisalhamento e arraste do material cortado.

Devido a seu desenho e características, as brocas PDC tem ampla gama de tipos e fabricantes, especificações para formações desde muito moles até muito duras e diferentes diâmetros de acordo com o projeto de cada poço. Além disso, estas brocas podem deslocar-se a altas velocidades, podendo ser utilizadas com motores de fundo e com diferentes pesos sobre a broca.

As brocas PDC fornecem melhores taxas de penetração do que outras brocas (brocas de cones) no caso dos folhelhos (Rahmani et al., 2012). Portanto, maioria dos estudos recentes é focada na eficiência da perfuração das brocas PDC em outros materiais.

2.1.2. Ensaio de cortador único

Os ensaios de laboratório são realizados para reproduzir os processos de corte das brocas PDC sob condições mais controláveis do que no campo. Para o melhor entendimento da interação existente entre a rocha e a broca existem ensaios experimentais *Full Scale*, que simulam o processo de perfuração utilizando uma broca em tamanho real. No entanto, os ensaios em tamanho real medem propriedades médias da broca.

O ensaio de cortador único (*Single Cutter*), simula o efeito gerado por um único cortador, permitindo determinar a força de penetração e de arrastre que atua em cada cortador que compõe a broca.

No ensaio de cortador único considera-se na sua análise parâmetros como:

- Geometria do cortador
- Orientação do cortador na broca (ângulos de ataque e inclinação lateral)
- Material de composição do cortador
- Propriedades de resistência da rocha
- Pressão de confinamento sob o material
- Processo de raspagem da rocha
- Remoção do material cortado

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

- Desgaste do cortador
- Geometria do chanfro
- Tipo de fluido de perfuração
- Velocidade de corte

Todos estes parâmetros atuam na geração das forças de penetração e arraste que agem na face do cortador, afetando a eficiência do processo de corte na rocha.

Parâmetros como velocidade de corte, profundidade de corte, inclinação do cortador, pressão de confinamento na amostra são conhecidos antecipadamente à execução dos ensaios.

O equipamento utilizado no ensaio do cortador único assemelha-se ao usado na Universidade de Tulsa que foi descrito por Rafatian et al. (2009). A Figura 2.3, ilustra a amostra de rocha contida em um recipiente pressurizado e selada com uma membrana de borracha. O equipamento pode aplicar três diferentes tipos de pressões:

- Pressão de confinamento que atua nas faces laterais do cilindro que contém a amostra.
- Pressão de poros que atua nos poros da rocha (esta pressão é aplicada e controlada através da superfície de base da amostra).
- Pressão de lama que atua na superfície de topo da amostra.

O ensaio pode ser feito de dois modos: fixando a amostra e girando o cortador, o qual é suportado por uma haste cujo eixo é girado por um motor elétrico; ou a amostra é rotada enquanto o cortador é movimentado na direção axial, determinando a penetração na rocha.

Segundo Rafatian et al. (2009), para a realização do experimento, o cortador único é instalado com uma orientação definida pelos ângulos de ataque e inclinação lateral com relação ao eixo da haste. A amostra é instalada na célula de pressão que é preenchida com o fluido desejado e logo é fechada.

Uma bomba pressuriza a amostra até que a condição de pressão confinante seja atingida e logo é acionada uma velocidade de rotação na célula de pressão. Enquanto a rocha é rotacionada sob as condições de pressão, o cortador é empurrado na direção axial, fazendo um corte na rocha a uma profundidade de corte fixa, também definida previamente (Figura 2.3).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

Figura 2.3-Célula de pressão do ensaio do cortador único (Rafatian et al., 2009)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

No momento em que o cortador está raspando a amostra da rocha, as forças exercidas na sua face são medidas em três direções com três medidores de deformação localizados na haste acima do cortador.

Como mostra a Figura 2.4, as forças de corte são medidas na direção de corte horizontal (tangencial), na direção de endentação (vertical) e na direção lateral (radial).

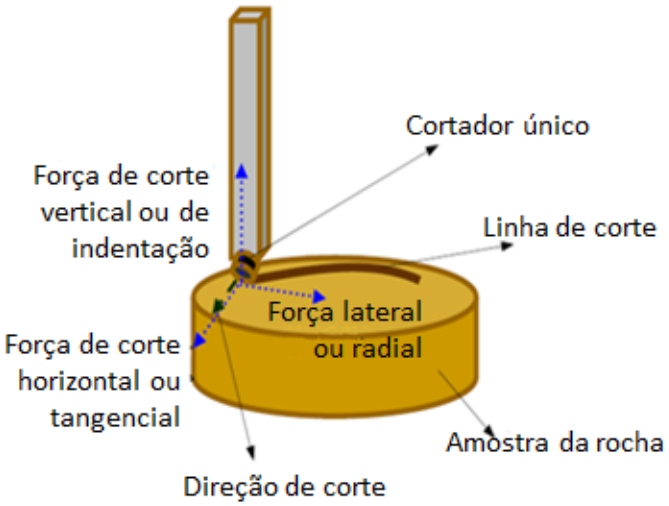

Figura 2.4-Forças sob o cortador e suas direções (Rafatian et al., 2009)

2.1.3.
Forças no processo de corte e conceito de energia específica

Após a realização do ensaio de cortador único, são analisados os dados registrados das componentes da força de corte, juntamente com as condições da ruptura na rocha e o volume cortado.

As forças de corte apresentam elevada frequência de oscilação. Isto porque a força aumenta até atingir o pico máximo da oscilação correspondente à remoção do fragmento de rocha durante o corte. Quando o material rompe, a força diminui até alcançar o menor pico da oscilação. Este processo se repete ao longo do ensaio. (Richard et al., 1998)

A magnitude das forças de corte é dependente de parâmetros geométricos como a área do cortador, os ângulos de orientação, a profundidade de corte, o desgaste e o chanfro que apresente o cortador. Também depende das condições de contorno do ensaio como a pressão confinante, tipo de fluido de perfuração e das propriedades mecânicas e mineralógicas da rocha.

Na indústria do petróleo é utilizado comumente o termo de energia mecânica específica para medir a eficiência do processo de corte. A energia mecânica específica é expressa como o trabalho realizado para cortar um determinado volume de rocha. Na análise do corte de uma broca PDC em tamanho real, podem-se prever parâmetros como o torque e a taxa de penetração que permitem determinar o trabalho feito ao cortar a rocha. Assim, a energia mecânica específica necessária para destruir a rocha pode ser expressa conforme a Equação 2.1.

$$MSE = \frac{4 \times WOB}{Dia^2 \times \pi} + \frac{480 \times Torque \times RPM}{Dia^2 \times ROP} \tag{2.1}$$

Onde WOB é o peso sobre a broca, RPM é a velocidade angular da broca dada em revoluções por minuto e ROP é a taxa de penetração da broca.

A expressão da energia mecânica específica para análise de um cortador único pode ser simplificada e determinada pela razão entre a integral da área sob a curva da força de corte versus seu deslocamento horizontal, e o volume de material cortado (Equação 2.2).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

$$MSE = \frac{\int_0^{lx} F_c^H dx}{V} \tag{2.2}$$

Onde F_c^H é a força de corte horizontal, lx é a distância horizontal percorrida pelo cortador e V é o volume de rocha cortada. A Equação 2.2 pode ser reduzida à seguinte expressão:

$$MSE = \frac{F_c^H}{A_t} \tag{2.3}$$

Onde A_t é a área transversal de corte, que representa a projeção da face do cortador num plano vertical.

Portanto, para o cálculo, é utilizada somente a componente horizontal da força de corte. A componente horizontal da força é a de maior magnitude, sendo a que define o trabalho realizado.

Consistente com a definição da energia, que frequentemente é expressa em unidades de Joule/cm^3, nesta abordagem a energia mecânica específica será expressa em unidades de MegaPascal (MPa). As duas unidades são numericamente equivalentes (Richard et al., 1998).

A energia mecânica específica além de ser utilizada para determinar a eficiência de corte, auxilia a decidir quando é o melhor momento para trocar de broca.

2.1.4. Observações experimentais

As observações experimentais realizadas por Richard et al. (1998), indicam que o modo de falha dúctil ocorre em profundidades rasas de corte (geralmente menores que 1mm), para ensaios em condições de pressão atmosférica. O corte pode ser caracterizado pelo esmagamento e acúmulo de material na frente do cortador.

Para profundidades maiores as rochas podem apresentar um modo de falha frágil caracterizado por grandes fissuras que iniciam na ponta do cortador e formam várias trajetórias irregulares, conforme ilustra a Figura 2.5.

Existe uma profundidade de corte crítica na qual se separam os modos de falha dúctil e frágil, conforme pode ser visto na Figura 2.6.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

(a) (b)

Figura 2.5-Modos de falha
(a) dúctil, com pouca profundidade de corte
(b) frágil, com maior profundidade de corte
(Richard et al., 1998 apud Schei et al., 2000)

A profundidade de corte tem um efeito direto na magnitude das forças de corte. Um exemplo da geração das forças na face do cortador durante seu movimento de corte é apresentado na Figura 2.7.

A curva de maior magnitude corresponde à maior profundidade de corte. Estes experimentos foram executados em condições atmosféricas (Richard et al., 1998).

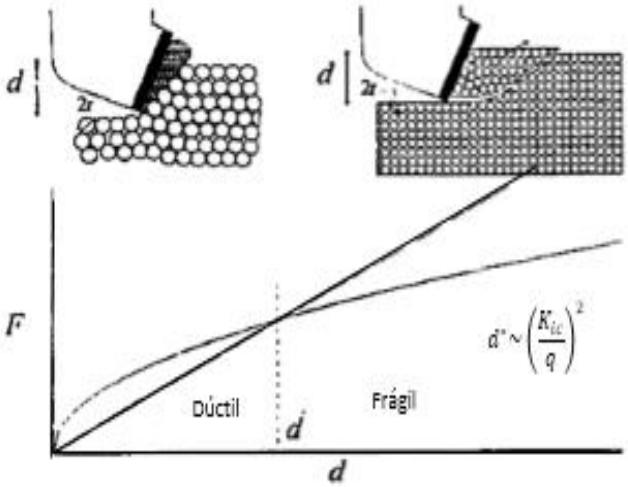

Figura 2.6-Forças de corte linear e não linear em função da profundidade de corte (Richard e al., 1998)

Richard et al. (2012) estudaram as forças de corte de um cortador afiado com seção retangular e largura de 10mm, e perceberam que o incremento das forças com a profundidade de corte tende a ser linear para ensaios em qualquer tipo de rocha, conforme mostra a Figura 2.8.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

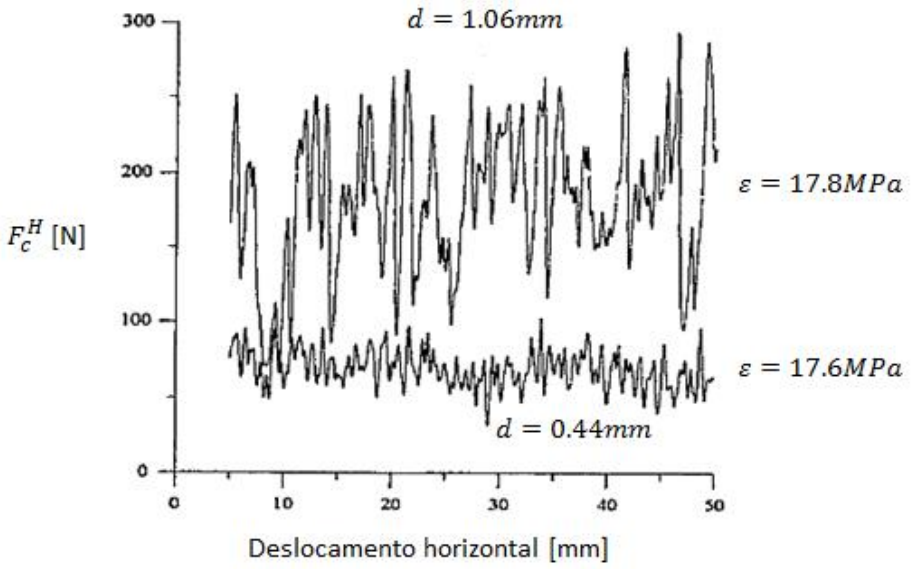

Figura 2.7- Força de corte horizontal com duas profundidades de corte diferentes – arenito Wildmoor Red (Richard et al., 1998)

Zhang et al. (2011), apresentaram resultados experimentais que permitem observar que a energia mecânica específica tende a diminuir quando a profundidade de corte aumenta.

Foi demostrado que a tendência é similar tanto para ensaios com cortador único, quanto para experimentos feitos com uma broca em tamanho real (*Full scale*), conforme apresenta a Figura 2.9.

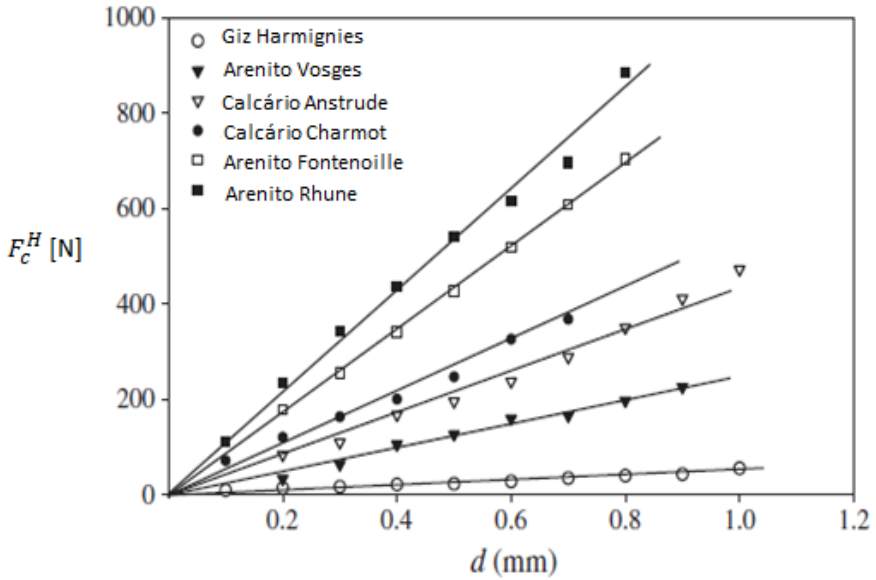

Figura 2.8-Variação das forças de corte com a profundidade de corte para diferentes materiais (Richard et al., 2012)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

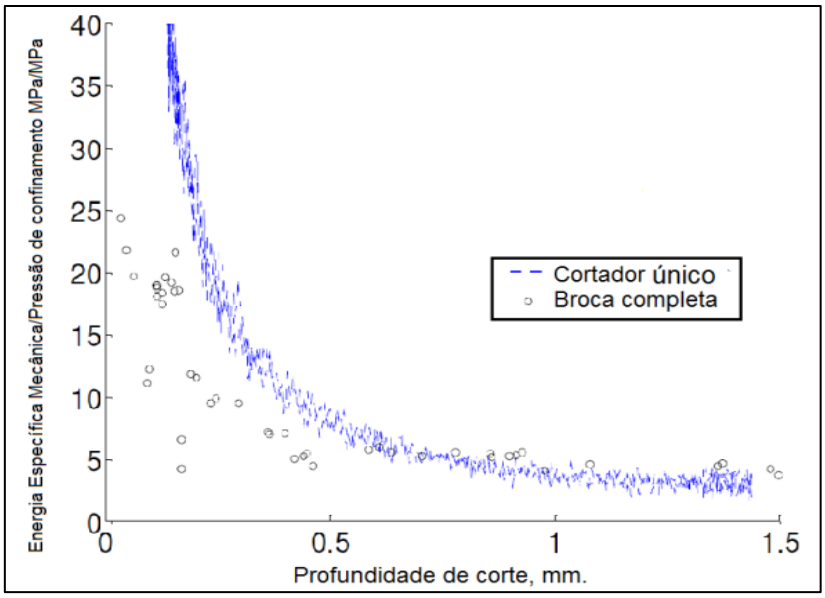

Figura 2.9-Variação da energia específica mecânica com a profundidade de corte (Zhang et al., 2011)

Em condições atmosféricas, estudos sugerem que a energia específica intrínseca necessária para cortar a rocha pode ser considerada como equivalente a resistência à compressão simples da rocha (UCS). Este tipo de energia definida como intrínseca (ε), considera o processo de corte da rocha sem incluir efeitos de desgaste. Na pressão atmosférica o corte da rocha somente precisa da ação de uma força na face do cortador que supere a resistência de ligação existente entre os grãos que conformam o material.

Tabela 2.1-Valores da resistência à compressão simples e da energia específica intrínseca de diferentes rochas (Richard et al., 2012)

Rocks	UCS (MPa)	ε (MPa)
Giz Harmignies	4,9	5,0
Arenito Fontainebleau	85,3	87,3
Arenito Fontainebleau	110,0	85,0
Arenito Rhune	110,0	122,0
Arenito Rhune	159,0	132,7
Arenito Vosges	42,0	32,0
Arenito Vosges	17,2	27,2
Arenito Red Wildmoor	13,0	17,0
Arenito Red Wildmoor	12,1	12,6
Limo Buxy	49,1	54,4
Limo Anstrude	22,6	34,0

Os resultados apresentados por Richard et al. (1998), foram realizados por meio de um ensaio conhecido como *Scratch test*, com profundidade de corte

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

constante e geometria de cortador retangular. Os resultados são apresentados na Tabela 2.1 e na Figura 2.10.

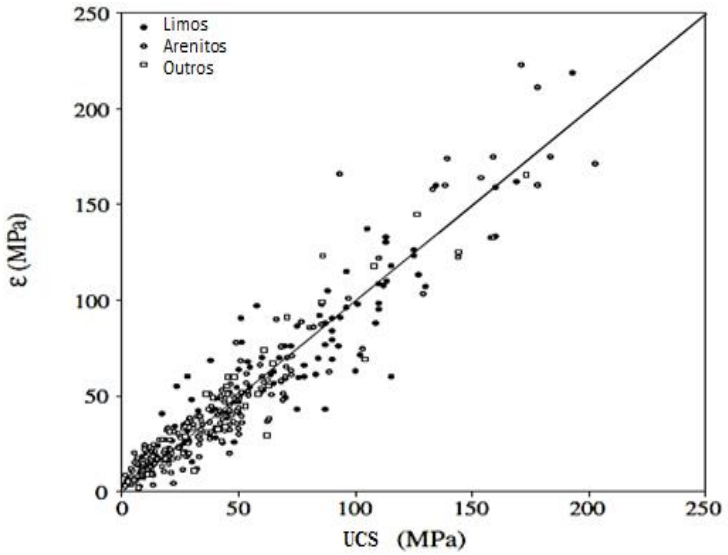

Figura 2.10-Correlação entre a resistência à compressão simples (UCS) e a energia específica intrínseca (ε) de diferentes rochas (Richard et al., 2012)

Porém, a relação que pode existir entre a energia específica e a resistência à compressão simples é um estudo que não inclui o efeito da hidráulica dos fluidos de perfuração, mudanças na resistência à compressão da formação, variação dos parâmetros geométricos do cortador ou propriedades físicas da rocha.

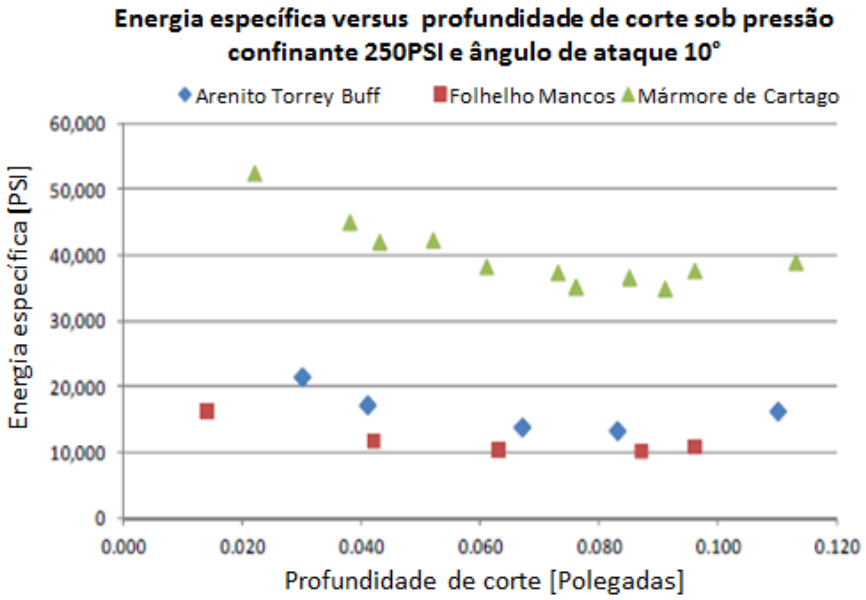

Figura 2.11-Variação da energia específica mecânica com a profundidade de corte para diferentes materiais sob pressão confinante de 250PSI (Rajabov et al., 2012)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

Rajabov et al. (2012) realizaram ensaios em diferentes materiais (mármore de Cartago, folhelho Mancos e arenito Buff), variando a profundidade de corte em diferentes condições de pressão confinante. Na Figura 2.11 pode-se apreciar, para uma pressão confinante de 250 PSI, que a energia específica decresce com o incremento da profundidade de corte. Este comportamento independe da rocha que está sendo cortada.

Rafatian et al. (2009), apresentaram trabalhos do comportamento do corte das rochas submetidas a diferentes condições de pressão confinante. Estes trabalhos foram feitos no mármore de Cartago obtendo incrementos na energia específica com o aumento na pressão confinante, como mostra a Figura 2.12. Em condições de pressão confinante, a rocha intacta tem um fortalecimento devido à pressão exercida sobre ela.

A linha tracejada na Figura 2.12 mostra o comportamento da resistência à compressão confinada (CCS) da rocha. Percebe-se que a MSE é drasticamente maior do que a resistência à compressão confinada da rocha e a diferença entre as duas variáveis aumenta com o aumento da pressão confinante.

Cabe ressaltar que os resultados de Rafatian et al. (2009), indicam que a energia aumenta de forma bi-linear, diferentemente do que é observado nos trabalhos de outros autores. Em seus resultados, a energia aumenta mais significativamente em cortes feitos a baixas pressões de confinamento.

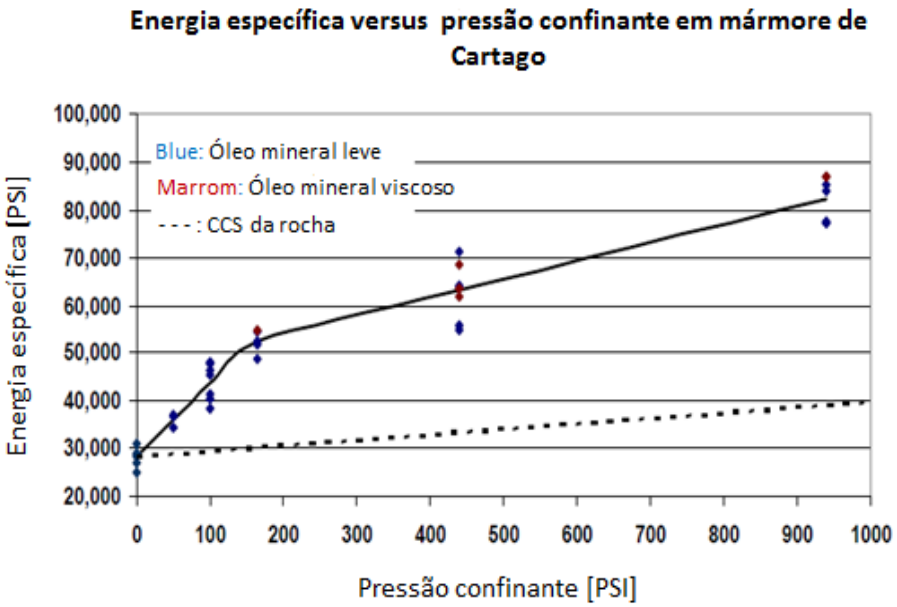

Figura 2.12 -Correlação entre a energia específica e a pressão confinante (Rafatian et al., 2009)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

A ação de corte produz quebra do material em condições atmosféricas, mas, em condições de pressão confinante, é gerado um acúmulo de material aglomerado na frente do cortador, como mostra a Figura 2.13.

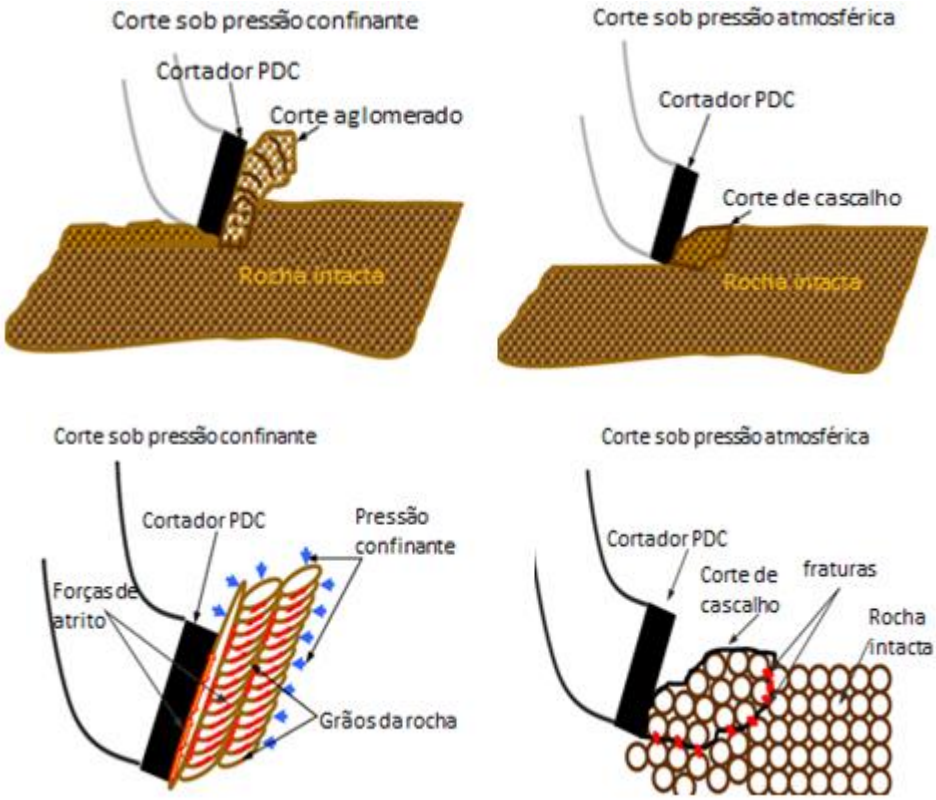

Figura 2.13-Mecanismo de corte sob condições atmosféricas e sob pressão confinante (Rafatian et al., 2010)

No material aglomerado, as ligações entre os grãos são destruídas pela ação cisalhante do corte, porém, os grãos continuam apresentando força de atrito entre si. Estas forças de atrito são as responsáveis pelo incremento na força de corte. (Rafatian et al., 2010).

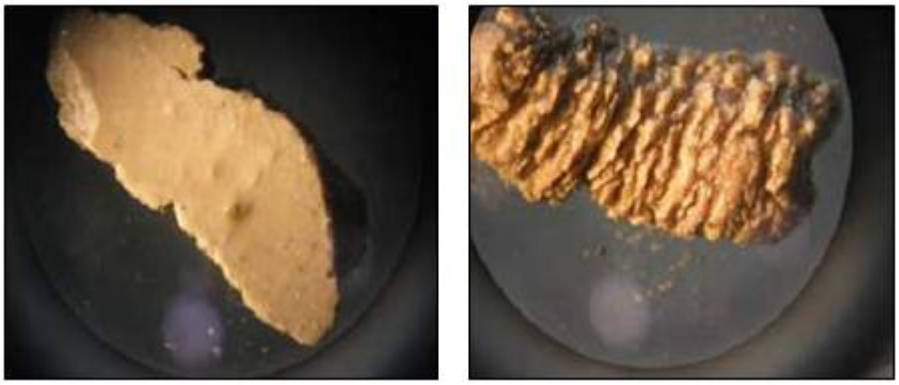

Figura 2.14-Vistas do lado plano e rugoso do material cortado (Rafatian et al., 2010)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

Segundo Rafatian et al. (2009), a morfologia das lascas é caracterizada por ter um lado plano e outro lado dentado, como se pode apreciar na Figura 2.14. O lado plano da lasca é gerado porque os grãos estão em contato com a face do cortador, sofrendo maiores deslocamentos e produzindo grande atrito que envolve a distorção dos grãos para uma forma plana.

Rafatian et al. (2010) mostra na Figura 2.15 os incrementos da força horizontal com o incremento na pressão de confinamento nos processos de corte no mármore de Carthago.

Além disso, uma maior frequência na oscilação da magnitude da força se apresenta na presença de confinamento, indicando um comportamento dúctil no material cortado.

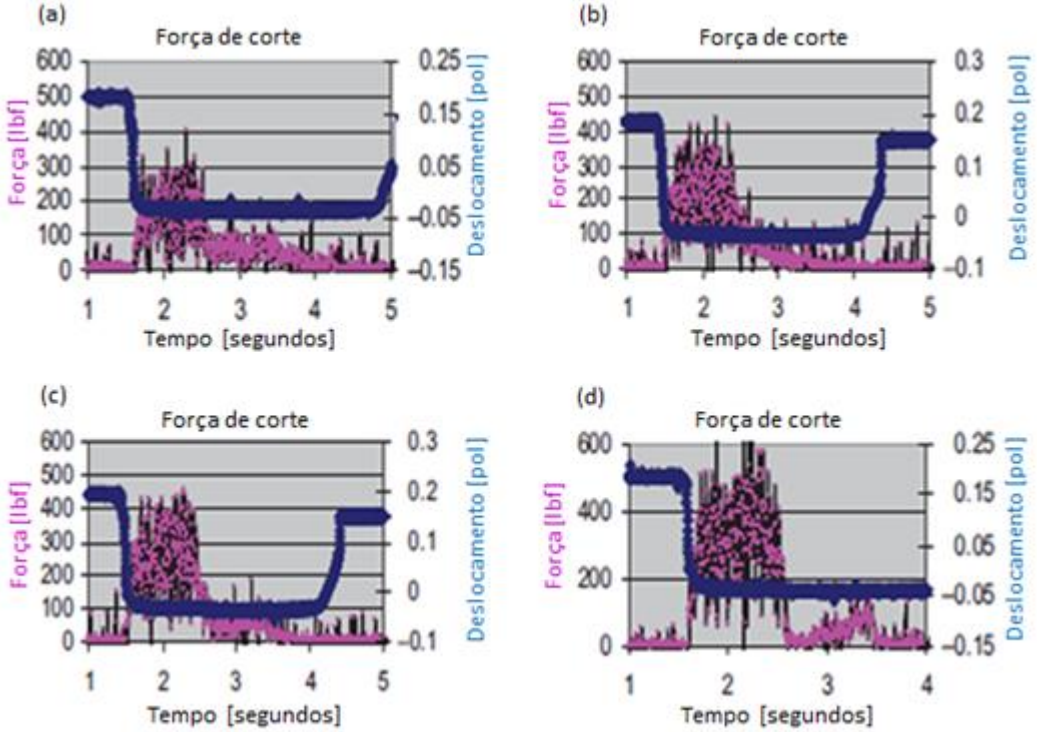

Figura 2.15 -Força de corte do mármore de Carthago sob incrementos de pressão confinante a) pressão atmosférica pressão confinante b) 50PSI c) 100PSI d) 440PSI (Rafatian et al., 2010)

Para analisar a variação dos parâmetros geométricos do cortador e sua influência na energia específica e obtenção das forças de corte, Rajabov et al. (2012) apresentam alguns experimentos. Os autores realizaram ensaios onde os ângulos de ataque e inclinação lateral, foram variados num intervalo de 10° a 40°, e 0° a 60° respectivamente. Os resultados mostraram, para condições de pressão

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

atmosférica e pressão confinante, que a energia varia de forma linear como mostra a Figura 2.16.

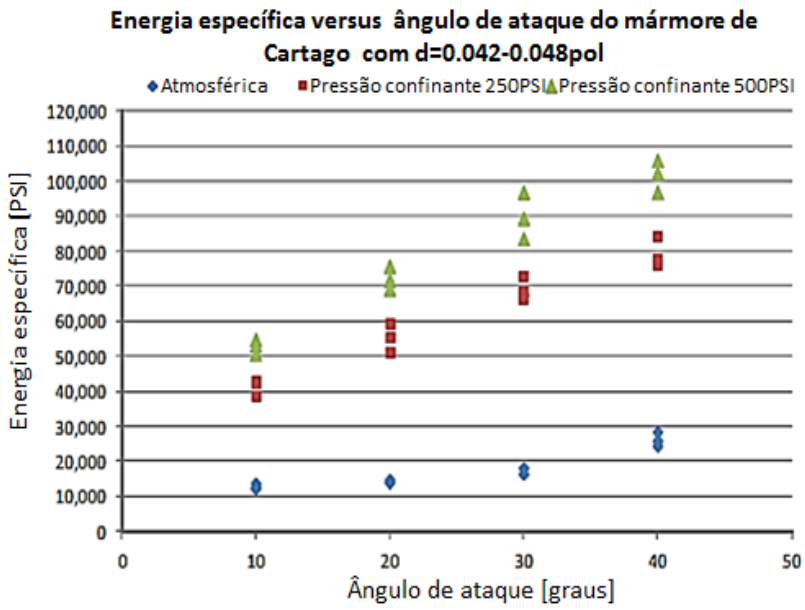

Figura 2.16-Influência do ângulo de ataque na energia específica – mármore de Cartago (Rajabov et al., 2012)

A energia aumentou em quase o dobro com o incremento do ângulo de ataque, porém, para variações do ângulo de inclinação lateral de 0° a 30°, não apresentou aumento significativo. No entanto, para o aumento de 30° a 60°, a energia duplicou seu valor para pressão atmosférica e quase triplicou seu valor para cortes em pressão confinante de 250PSI. (Figura 2.17).

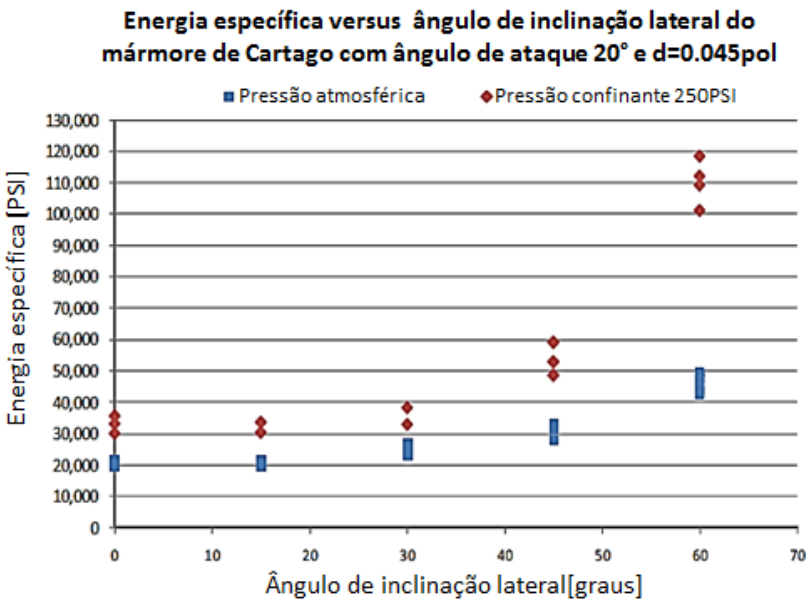

Figura 2.17-Influência do ângulo de inclinação lateral na energia específica – mármore de Cartago (Rajabov et al., 2012)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

Com relação às forças, os autores afirmam que, para ângulo de inclinação lateral de até 30°, não ocorrem grandes variações nas forças de corte e penetração, mas elas aumentam 50% quando o ângulo de inclinação lateral aumenta de 30° para 60°. Tal comportamento é associado pelos autores com a mudança na área de corte e no volume de corte para valores do ângulo de inclinação lateral muito alto.

Jianyong (2012) também estudou a influência do ângulo de ataque usando diferentes profundidades de corte no arenito Vosges e no calcário Lens. Nas suas análises reportou um comportamento exponencial conforme apresentado na Figura 2.18.

A energia específica é normalizada em relação à energia específica num cortador padrão com 20° de ângulo de ataque e 0° de ângulo de inclinação lateral.

Pode-se perceber que um aumento de ângulo de ataque de 20° para 60° ocasiona um aumento de energia de quase 4.5 vezes. Isto foi verificado também nos estudos de Detournay e Tan (2002) e Coudyzer e Richard (2005).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

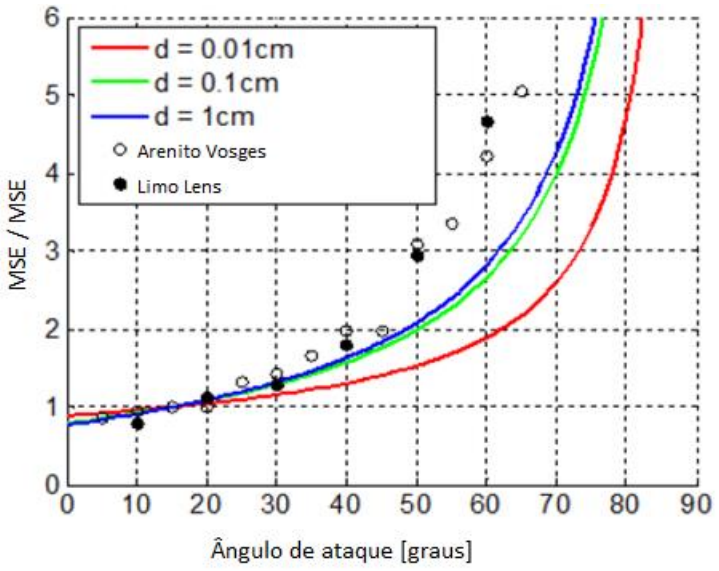

Figura 2.18-Influência do ângulo de ataque na energia específica (Jianyong, 2012)

2.2. Abordagem analítica do processo de corte em metais

O processo de corte nos metais é um dos mais estudados na indústria. O processo de corte foi analisado em termos das forças, tensões e deformações.

Parâmetros associados com a ferramenta de corte na formação da lasca (material cortado) permitem que ela seja classificada quanto à sua plasticidade.

Existem três tipos de lasca: lasca descontínua ou do tipo 1; Lasca contínua ou do tipo 2; Lasca contínua com material aglomerado na borda do cortador ou do tipo 3.

2.2.1. Corte ortogonal

Merchant (1945) analisou analiticamente o processo de corte ortogonal considerando o equilíbrio limite representando um corte dúctil onde o material cortado forma uma lasca contínua (tipo 2) na face do cortador. O corte ortogonal do metal está baseado na condição de que o cortador gera uma superfície de corte paralela à superfície original do material que está sendo cortado e a borda do cortador é perpendicular na direção do movimento.

No material cortado ou lasca, observa-se a presença da formação de bandas de cisalhamento que deslizam no plano de corte como um deslocamento sucessivo de placas em pilha que avançam continuamente com o movimento do cortador, como mostra a Figura 2.19. A partir do princípio de empilhamento de bandas de cisalhamento, pode-se obter o parâmetro de deformação cisalhante natural do material a partir da análise do deslocamento das bandas em relação ao plano de falha ΔS, para uma dada espessura da banda, ΔX.

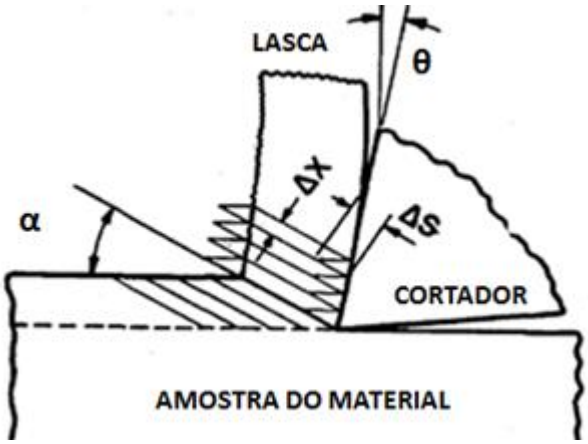

Figura 2.19-Representação da deformação cisalhante natural do material (Merchant, 1945)

Assim, é possível obter a deformação cisalhante da relação de cada banda como:

$$\gamma_{xy} = cot\alpha + tan(\alpha - \theta) \tag{2.4}$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

Onde θ é o ângulo de ataque e α é o ângulo de falha das bandas de cisalhamento.

Para o relacionamento das forças no corte ortogonal, é essencial uma análise do sistema associado com o processo de corte, onde a lasca é analisada como um corpo em equilíbrio estável sob a ação de duas forças resultantes iguais e opostas na mesma direção. O sistema das forças resultantes é mostrado na Figura 2.20.

Onde F_C, representa duas forças F_C e $F_C{}'$ iguais e opostas que mantem o material em equilíbrio.

A força F_C exercida pelo cortador é resolvida nas componentes de atrito F e normal N na face do cortador e ψ é o ângulo de atrito entre a força F_C e sua componente N.

A força $F_C{}'$ exercida sobre o material é resolvida ao longo do plano de falha nas componentes cisalhante F_S e a normal F_N, que exerce uma tensão à compressão no plano de falha; A força $F_C{}'$ também pode ser resolvida nas coordenadas do movimento como força de corte F_C^H, na horizontal do movimento (que é a responsável pelo trabalho realizado no corte do material), e a força F_C^V perpendicular à força horizontal.

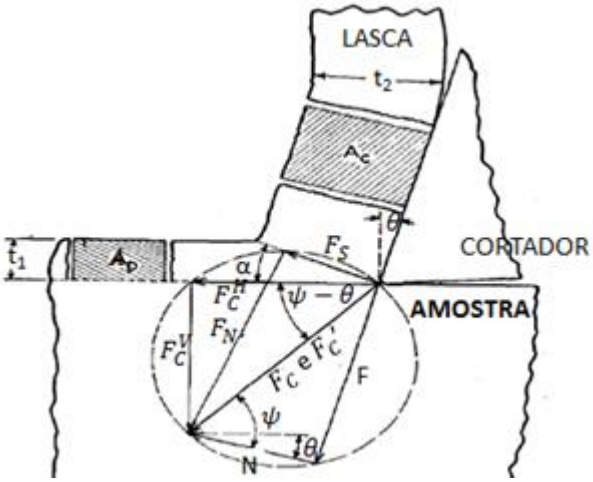

Figura 2.20-Análise do equilíbrio de forças (Merchant, 1945)

O trabalho feito para cortar o material é associado com a componente de força F_C^H que é a única responsável pelo trabalho total feito no corte por unidade de distancia percorrido pela ferramenta. Merchant (1945) deduz a força F_C^H da geometria das forças apresentada na Figura 2.20 e sua formulação é expressa na Equação 2.5.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

$$F_C^H = \frac{S_s\, A_t\, cos(\psi - \theta)}{sen\alpha cos(\alpha + \psi - \theta)} \tag{2.5}$$

Onde S_s é a tensão cisalhante no plano de corte, A_t é a área de corte transversal, ψ é o ângulo de atrito interfacial na face do cortador, θ o ângulo de ataque e α é o ângulo de falha no plano de corte.

A tensão cisalhante no plano de corte S_s é analisada para dois casos. O primeiro caso é onde a tensão cisalhante é dada como uma constante e no segundo caso a tensão cisalhante no plano de corte é função da tensão normal que atua no comprimento do plano da falha. A relação entre as tensões cisalhante e normal foi estudada por Bridgman (1935), para uma simulação das condições no processo de corte do metal, confirmando uma relação linear entre a tensão cisalhante e normal com uma deformação cisalhante de dimensão unitária.

$$S_s = S_0 + \mathrm{k}S_n \tag{2.6}$$

Onde S_0 e S_n são constantes do metal, S_n é a tensão normal e S_0 é a resistência cisalhante do metal sob tensão normal zero, e é aproximadamente igual à metade da resistência à tração em altos valores de deformação e k é a relação entre a resistência cisalhante e a tensão normal. A tensão normal atuando no plano de falha é dada por:

$$S_n = S_s \tan(\alpha + \psi - \theta) \tag{2.7}$$

Então, a partir das Equações 2.6 e 2.7 resolve-se para a tensão cisalhante como segue na Equação 2.8.

$$S_s = \frac{S_0}{1 - \mathrm{k}tan(\alpha + \psi - \theta)} \tag{2.8}$$

As propriedades físicas do material que regem o comportamento plástico no corte do material determinam o ângulo de falha que é calculado baseado no princípio da mínima energia. Este princípio consiste em que a derivação da força de corte com respeito à variação com o ângulo de falha tem que ser igual à zero, e, portanto, a expressão para o ângulo de falha α tem que ser tal que o trabalho total no corte seja minimizado.

Merchant (1945) utiliza este princípio da mínima energia para definição do ângulo de falha, onde a tensão de cisalhamento depende da tensão normal no plano de falha. A expressão da aplicação do princípio é dada na Equação 2.9.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

$$\frac{\partial F_C^H}{\partial \alpha} = \frac{\partial \dfrac{S_0\, A_t co\, s(\psi - \theta)}{sen\alpha cos(\alpha + \psi - \theta) - \mathrm{k} sen\alpha sen(\alpha + \psi - \theta)}}{\partial \alpha} = 0 \tag{2.9}$$

A solução desta expressão é reduzida com trigonometria à seguinte expressão:

$$cot(2\alpha + \psi - \theta) \ = \mathrm{k} \tag{2.10}$$

Simplificando esta solução, o ângulo de falha do material que minimiza a energia gasta no processo de corte da rocha é dado na Equação 2.11.

$$\alpha = \frac{\pi}{4} - \frac{(\psi - \theta)}{2} \tag{2.11}$$

Atkins (2003) considera a energia necessária para se formar novas bandas de cisalhamento, negligenciada por Merchant (1945), e associa esta energia com a formação de micro trincas, representando-a pela tenacidade da fratura do material, R, e expressando a relevância que tem esta componente principalmente no corte de materiais dúcteis.

Uma análise da potência no processo de corte, afirma que toda esta potência é consumida pela força de corte horizontal que é resolvida tendo em conta a deformação cisalhante, a energia de distorção por cisalhamento ou plasticidade, o atrito no contato rocha-cortador e a formação de novas bandas de cisalhamento (Equação 2.12).

$$F_C^H \ = \frac{cos(\psi - \theta)}{sen\alpha cos(\alpha + \psi - \theta)} \left[S_0 t_2 w + Rw \frac{cos(\theta - \alpha) sen\alpha}{cos\theta} \right] \tag{2.12}$$

Onde F_C^H é a força horizontal de corte, S_0 é a resistência ao cisalhamento, t_2 é a espessura da lasca, w é a largura de corte, ψ é o ângulo de atrito interfacial na face do cortador, θ é o ângulo de ataque, α é o ângulo de falha e R é a tenacidade à fratura do material que representa o trabalho especifico na geração de novas frentes de falha.

Assim, pode-se resolver a Equação 2.12 pelo princípio da energia mínima (mencionado acima), para determinar o ângulo de falha para a maioria dos materiais, independentemente de suas propriedades mecânicas.

A expressão para o ângulo de falha foi adotado por Merchant como apresentado na Equação 2.11.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

2.1.2.
Corte oblíquo

Para a análise do corte oblíquo em metais, o cortador além de ter a orientação no eixo axial, agora possui um ângulo de inclinação lateral.

A mudança de orientação do cortador pode ser vista na Figura 2.21, onde à esquerda está representando o corte ortogonal e à direita o corte oblíquo. Pode-se perceber que, no corte oblíquo a base de corte não é orientada perpendicularmente ao movimento, mas sim inclinada em relação a ele.

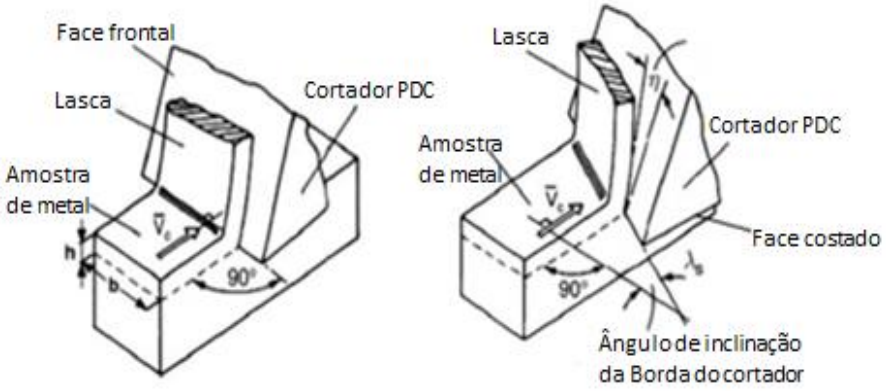

Figura 2.21- Corte ortogonal e oblíquo em metais (Shamoto e Altintas,1999)

Shamoto e Altintas (1999) apresentaram avanços referentes ao corte oblíquo para a definição de uma solução analítica. Eles analisaram o processo de corte em termos de diagrama de forças e diagrama de velocidades para tentar prever a direção de falha do material. Baseados na Figura 2.22, eles mostram a borda do cortador e o plano normal ao corte. A partir de uma dada força resultante de corte, pode-se dizer que ela está inclinada um ângulo ψ_n do plano horizontal e ψ_s do plano vertical. O deslocamento do lasca é dado paralelo à face do cortador, porém com inclinação em relação ao plano normal de corte, assim, são dados os ângulos normal e lateral de falha, representados por α_n e α_s. Analisando o diagrama e sabendo que a velocidade com a qual o cortador se desloca é decomposta na velocidade de cisalhamento e na velocidade da lasca, é obtido o ângulo de deslocamento da lasca, η, dado na Equação 2.13.

$$tan\,\eta = \frac{tan\beta\ cos(\alpha_n - \theta) - cos\theta\ tan\alpha_s}{sen\alpha_n} \qquad (2.13)$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

Onde β é o ângulo de inclinação lateral, α_n é o ângulo de falha normal, θ é o ângulo de ataque e α_s é o ângulo de falha lateral.

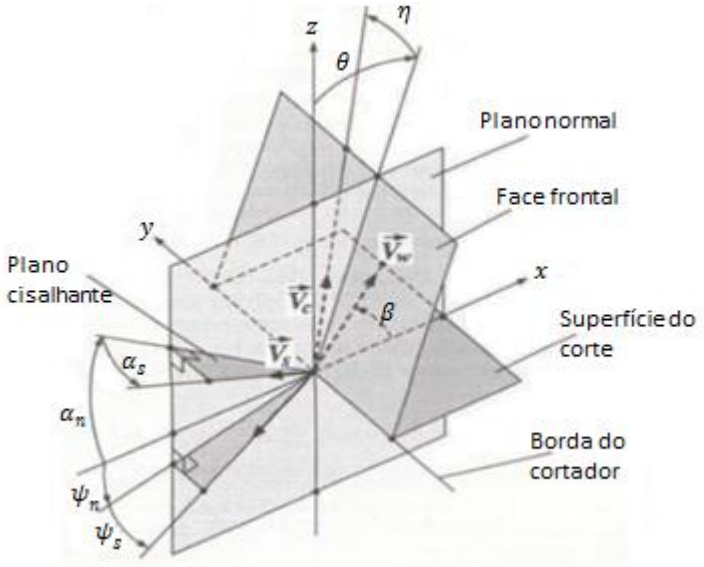

Figura 2.22 - Diagrama do corte oblíquo (Shamoto e Altintas,1999)

O problema resolvido pelo princípio da mínima energia define primeiro a força de cisalhamento em função da força resultante da geometria da Figura 2.23.

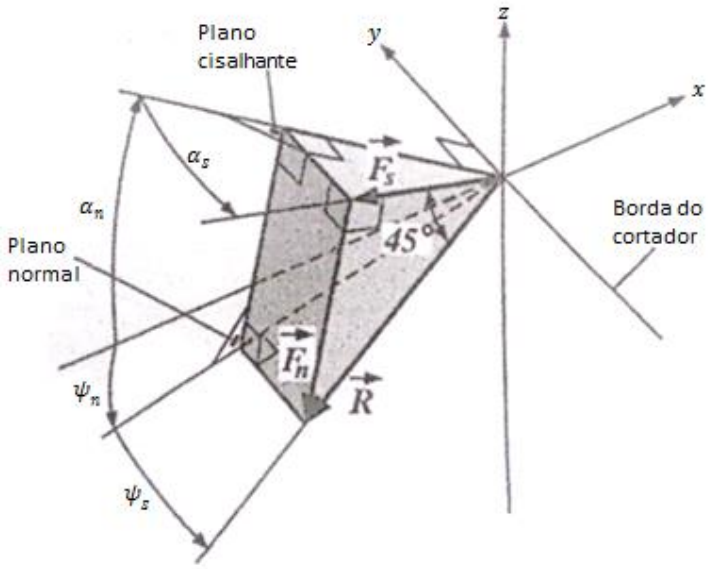

Figura 2.23 - Diagrama de forças para a análise do ângulo de deslocamento de lasca (Shamoto e Altintas, 1999)

A partir das relações entre força de cisalhamento e tensão de cisalhamento, relaciona-se a força resultante com a força de corte horizontal.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

$$F_C^H = \frac{\tau wd[cos(\psi_n + \alpha_n)cos\psi_s cos\alpha_s + sen\psi_s sen\alpha_s]}{[cos(\psi_n + \alpha_s)cos\psi_s cos\alpha_s + sen\psi_s sen\alpha_s]cos\beta sen\alpha_n} \quad (2.14)$$

Onde τ é a tensão cisalhante, $w\ e\ d$ são a largura e a profundidade de corte respectivamente, α_n é o ângulo de falha axial menos o ângulo de ataque e ψ_n é o ângulo de atrito normal menos o ângulo de ataque.

2.3. Modelos analíticos do processo de corte em rocha

Na literatura têm sido apresentados modelos analíticos para entender o mecanismo de interação entre a rocha e o cortador.

Os modelos simulam o processo de corte, onde é aplicada uma força na rocha exercida pelo cortador, fazendo uma ranhura na superfície da amostra da rocha, numa profundidade de corte constante.

Os modelos têm sido aplicados para aperfeiçoar a eficiência de corte e a taxa de penetração.

Neste item apresentam-se os modelos analíticos de maior relevância na estimativa de forças de corte.

2.3.1. Modelo analítico Detournay e Defourny (1992)

Um dos modelos analíticos de corte em rocha que analisam a ação de um cortador único foi desenvolvido por Detournay e Defourny (1992). Neste modelo, a interação entre a rocha e o cortador é caraterizada pelas propriedades do material cortado e pelo atrito no plano de desgaste do cortador com a rocha.

O modelo analítico é baseado em três parâmetros: energia específica intrínseca (ε), a relação entre as forças vertical e horizontal atuando na face do cortador (ζ), e o coeficiente de atrito da interface rocha/cortador (μ). As forças são definidas por:

$$F_c^H = \varepsilon A_t \quad (2.15)$$

$$F_c^V = \zeta \varepsilon A_t \quad (2.16)$$

Onde F_c^H é a força de corte horizontal na direção do corte e F_c^V é a força vertical, A_t é a área transversal do corte.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

A relação entre as forças vertical e horizontal que atuam na face do cortador é expressa como sendo a inclinação da força de corte com referência à direção do movimento do corte, conforme mostra a Equação 2.17.

$$\zeta = tan(\psi + \theta) \tag{2.17}$$

Onde ψ é o ângulo de atrito interfacial entre a rocha e o cortador, e θ é o ângulo de ataque do cortador.

A força de corte aplicada na face do cortador é proporcional à secção transversal da área de corte. Esta área é obtida através da profundidade de corte e da largura do cortador, para cortadores retangulares, e é obtida através da profundidade de corte e do diâmetro do cortador, para cortadores circulares. Na Figura 2.24 são representadas as forças em um cortador afiado.

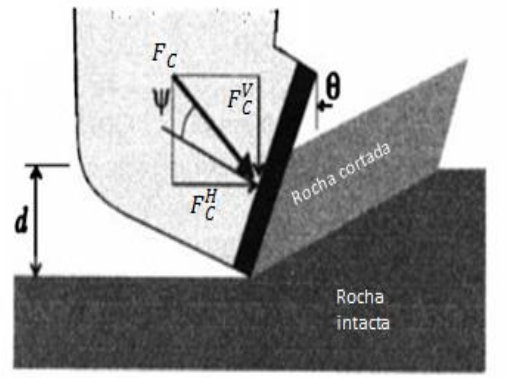

Figura 2.24-Forças atuando em um cortador afiado (Detournay e Defourny, 1992)

Detournay e Atkinson (1991) estudaram analiticamente o comportamento de um cortador afiado e definiram a energia específica intrínseca no corte.

Eles assumiram que o material é caraterizado pela coesão e que o plano de falha é controlado pelas tensões efetivas de Terzagui. A energia específica intrínseca é expressa na Equação 2.18.

$$\varepsilon = \frac{2cos\varphi\cos(\theta + \psi)}{1 - sen(\theta + \psi + \varphi)}\left[c + \left(p_b - p_p\right)tan\varphi\right] \tag{2.18}$$

Onde φ é o ângulo de atrito interno da rocha, c é a coesão da rocha, p_b é a pressão confinante e p_p é a pressão de poros.

Além disso, Detournay e Atkinson (1991 e 2000) mostram que a Equação 2.18 deve ser analisada para o regime não drenado. Como na perfuração de poços

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

as velocidades de corte são muito altas, a velocidade de propagação do cortador é maior que a taxa de manutenção de fluido no plano cisalhado, definindo o corte no regime não drenado, conforme observado por Zijsling (1987) e Detournay e Tan (2002). Neste caso o fluido da formação não é capaz de deslocar-se para a zona falhada, levando a considerar a pressão de poros como zero. Entretanto, deve-se ressaltar que, se a permeabilidade da rocha for muito alta, a componente de pressão de poros não pode ser desprezada, pois haverá manutenção de fluido no plano de falha.

Caso se considere o contato do atrito entre o cortador e a rocha no plano de desgaste, haverá também uma componente da força relativa ao atrito entre a zona de desgaste e a superfície da rocha, que não pode ser desprezada. Detournay e Defourny (1992) analisaram os efeitos da zona desgastada na energia. Então, a energia é expressa por:

$$E = \big(1 - \mu tan(\theta + \psi)\big)\varepsilon + \mu S \tag{2.19}$$

Onde E é a energia gasta total no processo de corte, ε é a energia intrínseca da rocha, S é a energia gasta no processo de penetração da rocha, μ é o coeficiente de atrito no desgaste.

Detournay e Tan (2002), concluíram que a energia específica intrínseca pode ser relacionada com a pressão confinante como mostra a Equação 2.20.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + mp_b \tag{2.20}$$

Onde, ε_0, é a energia específica em condições atmosféricas, p_b, é a pressão confinante e m é o coeficiente de variação da energia específica com configurações de cortadores típicos, que é expresso pela Equação 2.21.

$$m = \frac{2sen\varphi \cos(\theta + \psi)}{1 - sen(\varphi + \theta + \psi)} \tag{2.21}$$

O ângulo de atrito interfacial entre a rocha e a face do cortador, ψ, pode ser determinado experimentalmente através das medições das componentes das forças de corte horizontal (F_c^H) e vertical (F_c^V) como mostra a Equação 2.22 (Detournay e Atkinson, 1991).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

$$\psi = -atan\left(\frac{F_c^V}{F_c^H}\right) - \theta \qquad (2.22)$$

Detournay e Defourny (1992), também apresentam o modelo para o caso de o cortador ter desgaste, mas este modelo não será aqui apresentado porque o efeito do desgaste não será considerado no desenvolvimento deste trabalho.

2.3.2. Modelo analítico Gerbaud et al. (2006)

Gerbaud et al. (2006) apresentaram um modelo analítico mais refinado da interação da rocha com o cortador, onde consideram a presença de material cortado aglomerado na borda da face do cortador (*build up edge)*. Além disso, eles consideraram, no processo de corte, a utilização de cortadores com chanfro e a variação da orientação do cortador. O chanfro é um corte feito na ponta do cortador (geralmente de 45°) para proteger do dano quando são perfuradas formações de alta resistência.

No modelo apresentado, a força total atuando no cortador PDC está dividida em três grupos:

1. Forças atuando na face do cortador F_C
2. Forças atuando na superfície do chanfro F_{ch}
3. Forças atuando na superfície posterior do cortador F_b

Considerando que o cortador em estudo não apresenta chanfro, as forças que destroem a rocha são aquelas atuantes na face do cortador (grupo 1).

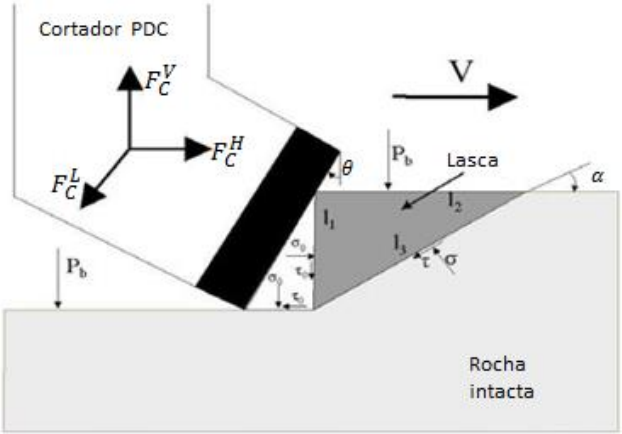

Figura 2.25-Modelo de forças de corte na face do cortador com presença de material aglomerado na sua borda (Gerbaud et al., 2006)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

Observações experimentais mostraram que a força aplicada na face do cortador é transmitida à rocha intacta por meio do material cortado, aglomerado na borda do cortador.

Conforme o cortador avança, um plano de falha é formado ao longo da lasca de material, que posteriormente será desprendida como mostra a Figura 2.25.

Considerando que a largura do cortador é maior quando comparada com a profundidade de corte, e, usando o critério de Mohr-Coulomb, as forças de corte na face do cortador são expressas pelas Equações 2.23 e 2.24.

$$F_c^H = \sigma_0 A(1 + \lambda\, tan\varphi'\, tan\theta) \tag{2.23}$$

$$F_c^V = \sigma_0 A(ta\psi + \lambda\ tan\theta) \tag{2.24}$$

Onde λ é a razão entre a superfície de contato horizontal da zona do material aglomerada e o produto entre a área de secção transversal do cortador com a tangente do ângulo de ataque (A*tanθ), σ_0 é a tensão hidrostática no material aglomerado e φ' é o ângulo de atrito entre a rocha esmagada e a rocha intacta, ψ é o ângulo de atrito interfacial entre a rocha e o cortador.

A tensão hidrostática foi obtida a partir do equilíbrio de forças atuantes na lasca e é definida por:

$$\sigma_0 = \frac{c + P_b[sen\alpha cos\alpha + tan\varphi cos^2\alpha]}{(1 - tan\psi tan\varphi)[sen\alpha cos\alpha - tan(\psi + \varphi)sen^2\alpha]} \tag{2.25}$$

Onde c é a coesão da rocha, P_b é a pressão de confinamento exercida pela lama, α é o ângulo de falha da rocha, φ é o ângulo de atrito interno da rocha.

O ângulo de atrito φ' entre a rocha esmagada e a rocha intacta é definido por:

$$tan\varphi' = \frac{\pi}{2} * tan\varphi \tag{2.26}$$

O modelo foi avaliado com resultados experimentais de ensaios de cortador único realizados no arenito Vosges com cortador afiado e variando a sua orientação.

Quando o ângulo de ataque é incrementado nos ensaios, as forças estimadas pelo modelo fornecem uma boa aproximação com os resultados experimentais.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

2.3.3.
Modelo analítico Jianyong (2012)

Jianyong (2012) apresenta mais um modelo onde descreve a contribuição do efeito da geometria do cortador e as propriedades intrínsecas da rocha na estimativa das forças de corte.

O modelo proposto é derivado do enfoque de Atkins (2003) para o corte em metais. No modelo é assumido que o corte da rocha ocorre por meio de uma pilha de lâminas, e cada lâmina desliza sob um plano cisalhante conforme avança o cortador. Não é considerada a deformação das espessuras de cada lâmina.

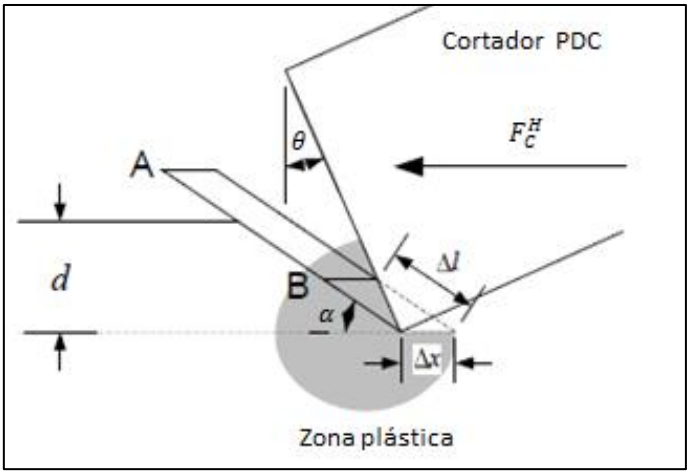

Figura 2.26-Modelo de corte por meio de pilha de lâminas (Jianyong, 2012)

O autor trabalha com cortadores afiados, ou seja, a dissipação de energia referente ao atrito entre a base desgastada do cortador e a rocha é nula. Além disso, assume que as dissipações da energia gerada pelo cortador são devido ao atrito entre o material cortado e o cortador e a formação de novos planos de cisalhamento. Existem outras dissipações, como geração de calor, pressão de fluido, energia cinética do material cortado, etc., que são desprezíveis.

Cada lâmina desliza no plano cisalhante AB ou plano de falha, até ser separada totalmente da rocha. A energia necessária para criar um novo plano cisalhante é representado pela tenacidade à fratura do material R e a resistência ao cisalhamento no plano cisalhante AB, onde desliza, é representada por S.

Partindo-se da conservação de energia e do relacionamento geométrico entre o movimento do cortador e o movimento das lâminas, assumindo também os

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

parâmetros R e S como sendo equivalentes às propriedades intrínsecas da rocha, é apresentada uma expressão da força de corte na Equação 2.27.

$$F_c^H = \left[S\frac{cos\theta}{sen\alpha cos(\theta+\alpha)}A_t + RL\right] \tag{2.27}$$

Onde θ é o ângulo de ataque, α é o ângulo do plano de falha, A_t é a área transversal de corte e L é o comprimento da borda inferior do cortador (contato entre cortador e a superfície da rocha).

O modelo proposto é validado por resultados de ensaios de cortador único em amostras de calcário de Cartago, oferecendo resultados concordantes com as observações experimentais. O modelo tinha a finalidade de obter as propriedades mecânicas da rocha baseado nas forças medidas em um ensaio de cortador único.

2.3.4. Modelo analítico Rahmani et al. (2012)

Rahmani et al. (2012) apresentam um modelo de corte sob pressão de confinamento adaptado do modelo de corte em metal. O modelo estima as forças de corte, baseado na resistência cisalhante da rocha, ângulo de ataque do cortador, profundidade de corte e nas forças de atrito interfacial na face do cortador.

Os autores consideraram o efeito da aglomeração do material na frente do cortador conservando o modelo de empilhamento de bandas de cisalhamento apresentado por Merchant (1945). Rahmani et al. (2012), definiram o efeito da pressão confinante como sendo uma força atuante perpendicular às bandas de cisalhamento.

Esta força é o produto da pressão no fundo do poço pela área no plano de corte e isto é multiplicado pelo coeficiente de atrito no plano de corte, que gera uma força de atrito no plano de falha (Figura 2.27).

A expressão apresentada para a força horizontal e para a força de corte vertical são expressas nas Equações 2.28 e 2.29.

$$F_c^H = \frac{A_t}{sen\alpha}(\tau_c + \mu_c P_c)\left(\frac{cos(\psi+\theta)}{cos(\alpha+\psi+\theta)}\right) \tag{2.28}$$

$$F_c^V = F_c^H \tan(\psi+\theta) \tag{2.29}$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

Onde A_t, é a área transversal de corte, α é o ângulo de inclinação do plano de falha, τ_c é a tensão cisalhante, μ_c é o coeficiente de atrito entre as bandas de cisalhamento e a rocha intacta, P_c é a pressão confinante, ψ é o ângulo de atrito interfacial na face do cortador e θ é o ângulo de ataque.

A tensão cisalhante da rocha τ_c é expressa na Equação 2.30.

$$\tau_c = c + P_c \tan \varphi \tag{2.30}$$

Onde c é a coesão da rocha, φ é o ângulo de atrito; propriedades de resistência da rocha.

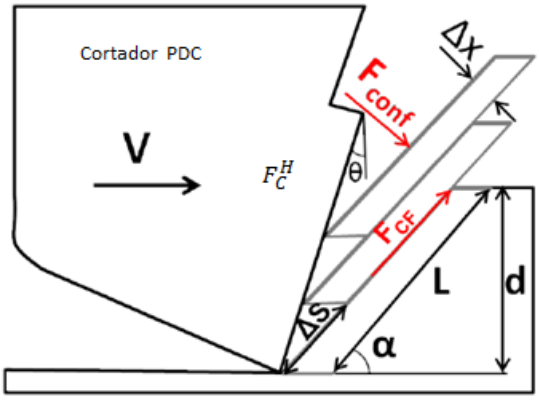

Figura 2.27-Esquema de forças para o corte em rocha sob pressão confinante. (Rahmani et al., 2012)

Os autores consideram também no modelo o efeito de cerramento do cortador pelo material esmagado acumulado na face do cortador.

Neste caso o cortador precisa uma força adicional para superar a força de atrito entre o material acumulado no cortador e o fundo do poço. Esta força adicional será considerada como F_{CF2} e é expressa como segue:

$$F_{CF2} = \mu_c P_c A_b \tag{2.31}$$

Onde A_bé a projeção da área do material acumulado na face do cortador na superfície horizontal do corte.

O modelo foi avaliado com resultados de ensaios de cortador único em amostras de folhelhos, obtendo resultados aceitáveis.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

2.3.5.
Modelo analítico Coudyzer e Richard (2005)

Para abordar a análise do processo de corte, Coudyzer e Richard (2005) estudaram a influência da variação da inclinação lateral e além do ângulo de ataque do cortador nas forças de corte na rocha.

Os autores associaram com o cortador uma referência do tipo triedro como mostra a Figura 2.28 e mostraram a direção das forças e definição dos ângulos de atrito.

Através das análises dos resultados experimentais é possível ver que as três componentes da força de corte incrementam quase linearmente com a área transversal de corte, representadas por:

$$F_c^H = \varepsilon A_c; \quad F_c^V = \zeta_n F_c^H; \quad F_c^L = \zeta_t F_c^H \tag{2.32}$$

$$\zeta_n = tan(\psi_n + \theta), \quad \zeta_t = tan(\beta - \psi_s) \tag{2.33}$$

Onde F_c^H, é a força horizontal de corte, F_c^V é a força vertical de corte, F_c^L é a força lateral de corte, ψ_n é o ângulo de atrito normal entre a face do cortador e o material, ψ_s é o ângulo de atrito lateral entre a face do cortador e o material, θ o ângulo de ataque e β é o ângulo de inclinação lateral.

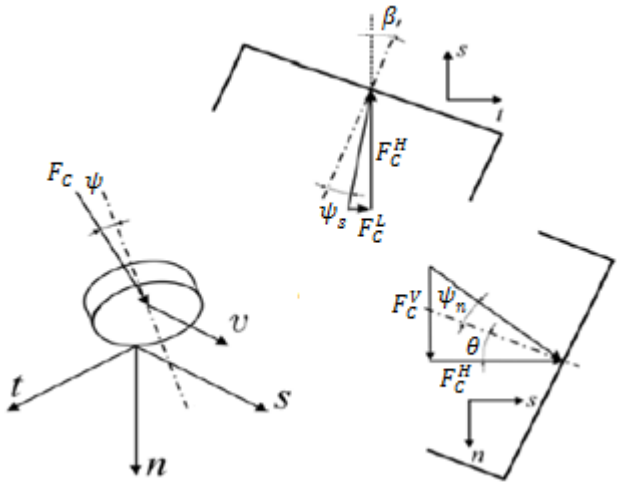

Figura 2.28-Representação gráfica das forças de corte, suas direções e ângulos de atrito (Coudyzer e Richard, 2005)

Coudyzer e Richard (2005) realizaram experimentos no calcário Lens, onde se percebeu que o ângulo de atrito axial somente depende do ângulo de ataque, e o

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

ângulo de atrito lateral somente depende do ângulo de inclinação lateral, conforme pode ser visto nas Figuras 2.29 e 2.30 respectivamente.

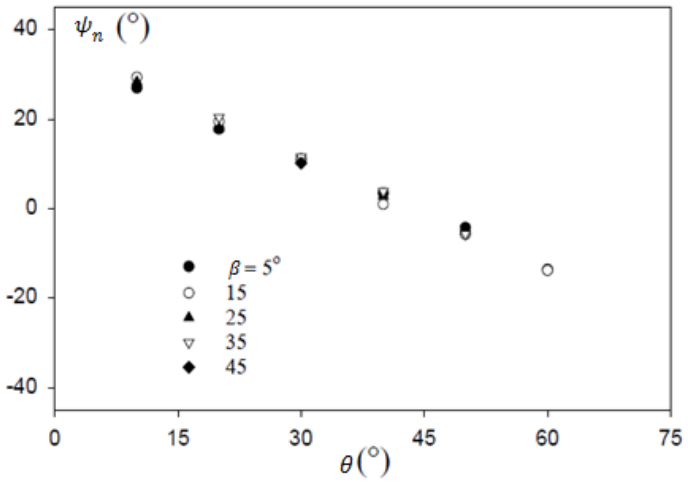

Figura 2.29-Ângulo de atrito normal em função do ângulo de ataque para diferentes ângulos de inclinação lateral (Coudyzer e Richard, 2005)

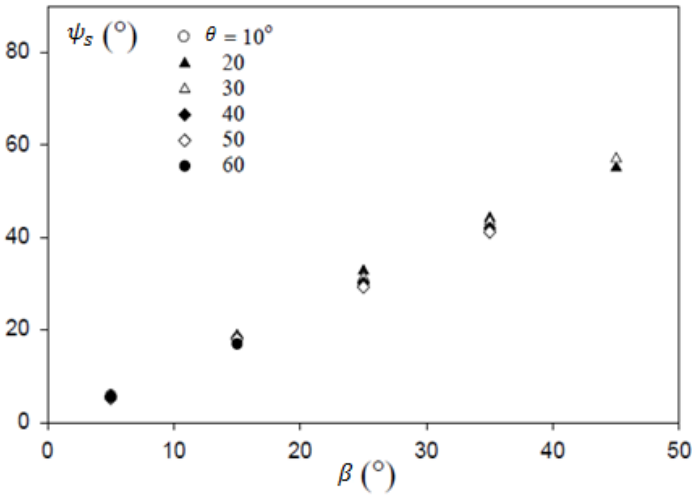

Figura 2.30-Ângulo de atrito lateral em função do ângulo de inclinação lateral para diferentes ângulo de ataque (Coudyzer e Richard, 2005)

Porém, Coudyzer e Richard (2005), assumiram na aplicação do modelo que a energia específica é obtida a partir do relacionamento de forças de corte medidas a partir de ensaios experimentais. A área de corte também é medida a partir da lasca obtida após do processo de corte.

Os experimentos feitos pelos autores permitem unificar os parâmetros dos ângulos de atrito normal e lateral para aplicar em todos os modelos a serem avaliados.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

2.3.6.
Modelo analítico Melo (2014)

Melo (2014), apresenta um modelo de corte em rocha que foi desenvolvido a partir dos modelos do processo de corte ortogonal e oblíquo em metais, apresentados por Merchant (1945) e Shamoto (1999).

O modelo de Melo (2014) permite obter o valor das forças de corte na direção do movimento partindo das propriedades do material, da geometria do cortador e da interação entre a rocha e a face do cortador.

Na Figura 2.31 dois eixos podem ser percebidos: 1) o eixo relativo ao movimento instantâneo e 2) o eixo relativo à face do cortador (forças em verde).

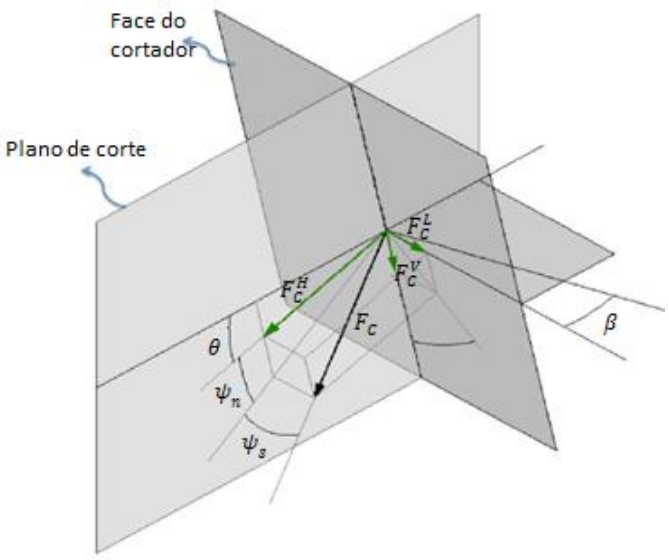

Figura 2.31-Esquema de forças normal, de atrito axial e de atrito lateral para corte em rocha (Melo, 2014)

As forças medidas nas coordenadas do movimento são deduzidas da geometria da Figura 2.31 em função das forças que atuam na face do cortador quando este está em contato com o material cortado.

$$F_c^H = F_r^S \frac{cos\alpha_s\, cos\beta[\cos(\theta + \psi_n) + tan\beta\, tan\psi_s]}{cos(\alpha_n + \theta + \psi_n)} \tag{2.34}$$

$$F_c^V = F_c^H \frac{sen(\theta + \psi_n)}{\cos(\theta + \psi_n)\, cos\beta + sen\beta tan\psi_s} \tag{2.35}$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA

$$F_c^L = F_c \ \frac{[tan\psi_s - tan\beta \cos(\theta + \psi_n)]}{[cos(\theta + \psi_n) + tan\beta tan\psi_s]} \tag{2.36}$$

Onde F_c^H, F_c^V e F_c^L são as forças de corte nas coordenadas do movimento, F_r^Sé a força resultante cisalhante no plano da falha, α_n e α_s são os ângulos de falha normal e lateral, ψ_n e ψ_s são os ângulos de atrito interfacial, θ o ângulo de ataque e β o ângulo de inclinação lateral.

Na análise do mecanismo de corte em rocha da Figura 2.32 estão representadas em verde, as forças normal e cisalhante atuantes no plano de falha da rocha.

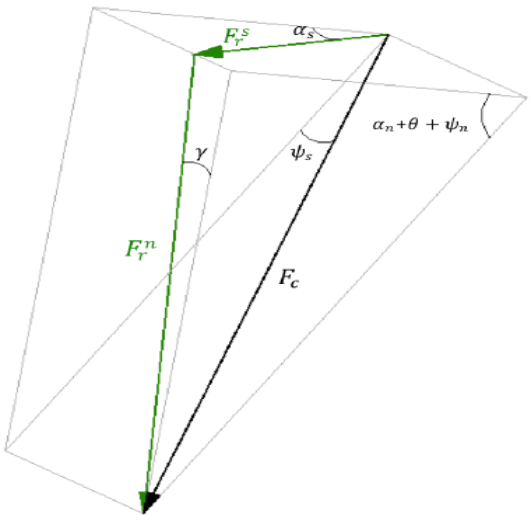

Figura 2.32-Diagrama de forças que atuam no plano de falha da rocha e suas relações com a força resultante de corte (Melo, 2014)

Assumindo o critério de falha de Mohr – Coulomb, e, assumindo que as forças possuem direções representadas pelos cossenos diretores de α_n e α_s, (que representam os ângulos de falha normal e lateral à direção onde fratura a rocha), a força resultante de cisalhamento no plano de falha em função da força normal é expressa na Equação 2.37.

$$F_r^S = \frac{c\ A_t}{sen\alpha_n cos\beta[1 - kcos\alpha_s \tan(\alpha_n + \theta + \psi_n)]} \tag{2.37}$$

E por último, substituindo-se a Equação 2.37 na Equação 2.34, obtêm-se a relação entre a força de corte horizontal e as propriedades da rocha:

$$F_c^H = \frac{cA_t cos\alpha_s\ [\cos(\theta + \psi_n) + tan\beta\ tan\psi_s]}{sen\alpha_n cos(\alpha_n + \theta + \psi_n)[1 - kcos\alpha_s\ tan(\alpha_n + \theta + \psi_n)]} \tag{2.38}$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313553/CA