4 Efeitos dos parâmetros de teste na energia específica

Conforme apresentado na seção anterior, o corte em rocha tridimensional é descrito pelas Eq.(3.53) e Eq.(3.67). Em um teste de cortador simples convencional, uma célula de carga é acoplada acima do cortador a fim de se medir as forças atuantes no cortador. A orientação do cortador, representado pelos ângulos *siderake* e *backrake*, é conhecida, bem como a profundidade de corte.

Conforme citado por Adachi *et. al.* (1996) e Kuru e Wojtanowicz (1995), os ângulos de fricção são, aparentemente, independentes da rocha que está sendo cortada. Sendo assim, pode-se assumir que as Eq.(3.72) e Eq.(3.73) são válidas para qualquer tipo de rocha.

Nesta seção, analisar-se-ão os efeitos do *backrake*, *siderake*, profundidade de corte, pressão de confinamento e desgaste do cortador. Para tal, utilizou-se o modelo proposto pelas Eq.(3.53), Eq.(3.67), Eq.(3.74) e Eq.(3.75), considerando que os ângulos de fricção axial e lateral respeitam as Eq.(3.72) e Eq.(3.73).

Para a análise, tomaram-se duas rochas hipotéticas, com base nos resultados de Adachi *et. al.* (1996), e definidas como: 1) Rocha 1, com coesão de 0.58 MPa e ângulo de fricção interno da rocha de 39°, representando um Arenito Berea; e 2) Rocha 2, com coesão de 0.28 MPa e ângulo de fricção interno da rocha de 31°, representando um Arenito Red Wildmoor.

4.1 Efeitos do backrake

Nesta análise, analisar-se-á a influência do *backrake* na energia específica para diferentes combinações de *siderake*. Após análise da influência do *backrake*, os resultados obtidos no caso 3D são comparados com os resultados para a solução do caso 2D.

A Figura 4.1 mostra os efeitos do *backrake* na energia específica para diferentes configurações de *siderake* na Rocha 1. É evidente que, quanto maior o

backrake, maior a energia específica. Os resultados podem ser comparados a partir da Tabela 4.1. Para um cortador padrão com 20° backrake e 0° siderake, a energia específica é 32 MPa, valor semelhante ao resultado de Adachi et. al. (1996) para Arenitos Berea. Um aumento de 20° para 60° backrake aumenta a energia de 32 MPa para 252,4 MPa.

O mesmo pode ser visto na Figura 4.2 e Tabela 4.2 para a Rocha 2. Para esta rocha, um cortador padrão apresenta 15.9 MPa de energia específica, enquanto que no corte a 60° *backrake* essa energia sobe para 38,5 MPa. Vale ressaltar, porém, que os efeitos do *backrake* na rocha 2 são menores que os efeitos do *backrake* para a rocha 1. Isso se deve ao fato do *backrake* estar diretamente ligado à área de cortador em contato com a rocha, que modificam as componentes de força atuantes na face do cortador. Em outras palavras, o *backrake* afeta significativamente o ângulo de falha normal da rocha (seção 4.6), que é função das propriedades de rocha.

Deve-se notar, também, que, para maiores *backrakes* (parte direita do gráfico), mais as isolinhas de *siderake* se afastam uma das outras. Isso nos dá a previsão de que o *siderake* influencia o corte de forma não linear, semelhante aos efeitos do *backrake*, como será visto na próxima seção.

Tabela 4.1: Efeitos do backrake na energia específica para a rocha 1.

Rock 1			
backrake [°]	Specific energy [Mpa]		
	$\beta = 0^{\circ}$	$\beta = 20^{\circ}$	$\beta = 40^{\circ}$
0	19.0627	22.9406	41.6848
10	24.2376	29.2949	53.7399
20	32.06	38.9345	72.1629
30	44.7835	54.6717	102.4671
40	67.7468	83.1829	157.7951
50	116.3631	143.7855	276.3351
60	252.392	314.0611	612.1463

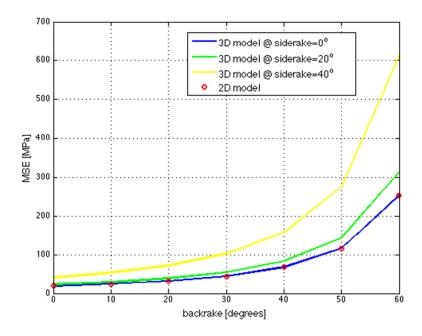


Figura 4.1: Efeitos do *backrake* na energia específica para cortadores com diferentes *siderakes* no corte da rocha 1.

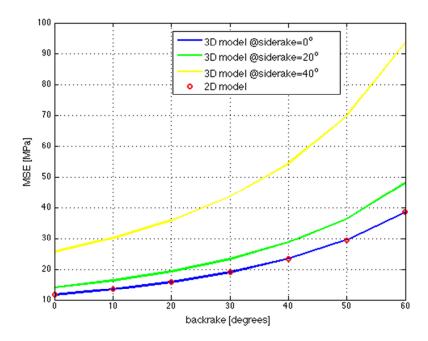


Figura 4.2: Efeitos do *backrake* na energia específica para cortadores com diferentes *siderakes* no corte da rocha 2.

Tabela 4.2: Efeitos do backrake na energia específica para a rocha 2.

Rock 2			
backrake [°]	Specific energy [Mpa]		
	$\beta = 0^{\circ}$	$\beta = 20^{\circ}$	$\beta = 40^{\circ}$
0	11.6951	14.0742	25.574
10	13.5378	16.3626	30.0162
20	15.906	19.3166	35.8022
30	19.0333	23.2358	43.5491
40	23.3032	28.6128	54.2774
50	29.3829	36.3073	69.7774
60	38.5223	47.9348	93.4312

Os efeitos do *backrake* são melhores vistos em uma análise adimensional. Para tal análise, a energia específica é adimensionalizada de acordo com a energia padrão de um cortador com *backrake* de 20° e 0° *siderake*, comumente utilizado em experimentos de corte em rocha.

A partir da análise adimensional, pode-se perceber que os incrementos da energia específica não são influenciados pelo *siderake*. Isto é, o aumento de energia específica é praticamente igual para qualquer *siderake*, conforme pode ser visto nas Figura 4.3 e Figura 4.4 para a rocha 1 e rocha 2, respectivamente.

Pode-se perceber, para a rocha 1, que um aumento de *backrake* de 0° para 20° aumenta a energia específica em torno de 60%, enquanto um aumento de 20° para 60° aumenta a energia em cerca de 8 vezes. Já para a rocha 2, o aumento é menos significativo. Variando o *backrake* de 0° a 20° há um aumento de cerca de 40%, enquanto o aumento de 20° para 60° aumenta a energia em cerca de 2.5 vezes. Isso indica que os efeitos do *backrake* são altamente dependentes da rocha sendo cortada.

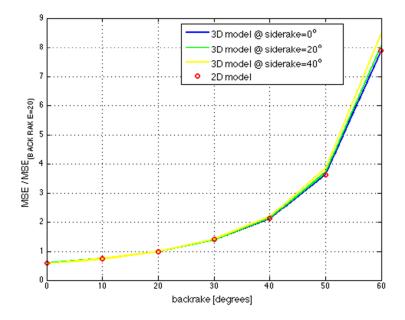


Figura 4.3: Efeitos do *backrake* na energia específica para cortadores com diferentes *siderakes* no corte da rocha 1. Energia Adimensionalizada em função da energia para *backrake* de 20°.

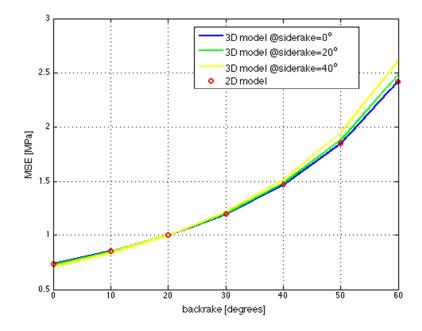


Figura 4.4: Efeitos do *backrake* na energia específica para cortadores com diferentes *siderakes* no corte da rocha 2. Energia Adimensionalizada em função da energia para *backrake* de 20°.

4.2 Efeitos do siderake

A variação da energia específica em função do *siderake* é realizada, também, para diferentes configurações de *backrake*, e seus resultados comparados com o caso 2D e com a literatura.

A Figura 4.5 mostra os efeitos do *siderake* na energia específica para diferentes configurações de *backrake* na Rocha 1. Esses valores podem ser vistos na Tabela 4.3. Para a Rocha 2, os resultados são apresentados na Figura 4.6 e na Tabela 4.4. Pode-se perceber que, para valores de *siderake* abaixo de 30°, a variação da energia específica é pequena, enquanto que seu aumento é significativamente maior para ângulos acima deste valor.

Assim como os efeitos do *siderake* na análise do *backrake*, nota-se que, quanto maior o *backrake*, maior a distância entre as isolinhas (para valores de *backrake* constantes). Em outras palavras, para *siderakes* pequenos (parte esquerda do gráfico), a distância entre as isolinhas de *backrake* é menor que a distância entre estas isolinhas para altos valores de *siderake* (parte direita do gráfico), indicando a não linearidade dos efeitos do *backrake*, como visto na seção anterior.

Tabela 4.3: Efeitos do siderake na energia específica para a rocha 1.

Rock 1			
siderake [°]	Specific energy [Mpa]		
	$\theta=0^{\circ}$	$\theta = 20^{\circ}$	$\theta = 40^{\circ}$
0	19.0627	32.0600	67.7468
10	19.9574	33.6461	71.3081
20	22.9406	38.9345	83.1829
30	29.1505	49.9429	107.9016
40	41.6848	72.1629	157.7951
50	70.1417	122.6090	271.0685
60	157.8003	278.0038	619.9970

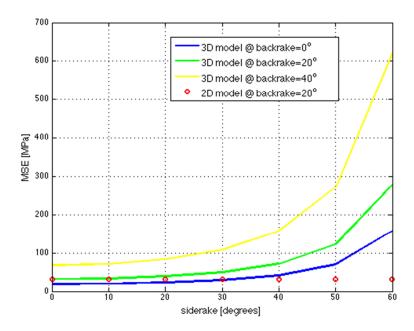


Figura 4.5: Efeitos do *siderake* na energia específica para cortadores com diferentes *backrakes* no corte da rocha 1.

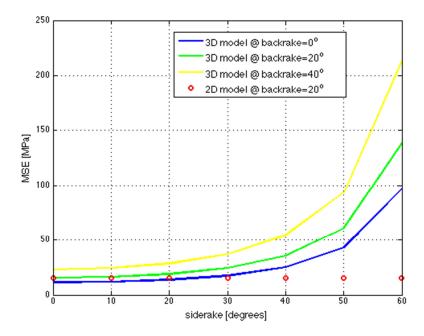


Figura 4.6: Efeitos do *siderake* na energia específica para cortadores com diferentes *backrakes* no corte da rocha 2.

Tabela 4.4: Efeitos do siderake na energia específica para a rocha 2.

Rock 2			
siderake [°]	Specific energy [Mpa]		
	$\theta = 0^{\circ}$	$\theta = 20^{\circ}$	$\theta = 40^{\circ}$
0	11.6951	15.9060	23.3032
10	12.2440	16.6928	24.5282
20	14.0742	19.3166	28.6128
30	17.8841	24.7782	37.1154
40	25.5740	35.8022	54.2774
50	43.0325	60.8301	93.2406
60	96.8118	137.9262	213.2630

Os efeitos do *siderake* podem ser mais bem vistos em uma análise adimensional. Para tal análise, a energia específica é adimensionalizada de acordo com a energia padrão para um *siderake* de 0° e *backrake* de 20°, comumente utilizado em experimentos de corte em rocha, uma vez que a solução 2D é conhecida.

A partir da análise adimensional, pode-se perceber que os incrementos da energia específica não dependem do *backrake*. Isto é, o aumento de energia específica é praticamente igual para qualquer configuração de *backrake*, conforme pode ser visto nas Figura 4.7 e Figura 4.8 para a rocha 1 e rocha 2, respectivamente.

Além disso, pode-se perceber que a influência do *siderake* na energia é semelhante para ambas às rochas. Para as duas rochas, um aumento de *siderake* de 0° para 30° aumenta a energia específica em torno de 60%, enquanto um aumento de 0° para 60° aumenta a energia em cerca de 8.5 vezes.

Isso indica que a fricção lateral na face do cortador, oriunda da variação do *siderake*, é apenas dependente da natureza do PDC, isto é, não sendo afetada pelas propriedades de rocha. Isso é um indício de que a fricção lateral é gerada apenas pelo contato chip-face do cortador. Em outras palavras, significa dizer que a fricção lateral não afeta a falha da rocha.

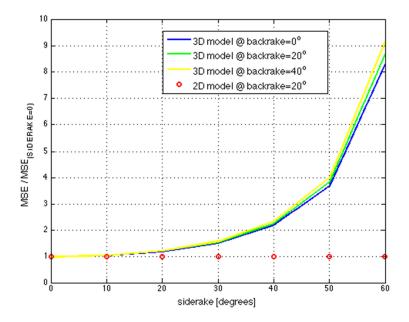


Figura 4.7: Efeitos do *siderake* na energia específica para cortadores com diferentes *backrakes* no corte da rocha 1. Energia Adimensionalizada em função da energia para *siderake* de 0° .

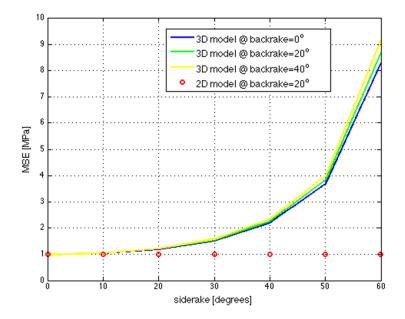


Figura 4.8: Efeitos do *siderake* na energia específica para cortadores com diferentes *backrakes* no corte da rocha 2. Energia Adimensionalizada em função da energia para *siderake* de 0° .

Comparando-se os resultados obtidos com as tendências reportadas por Rajabov *et. al.* (2012), pode-se perceber uma grande diferença no percentual de incremento de energia a medida que se aumenta o *siderake*. Enquanto Rajabov *et. al.* (2012) obtêm uma energia 3 vezes maior para cortadores com 60° *siderake* (comparados com cortadores ortogonalmente orientados), os resultados obtidos no presente estudo indicam um aumento de 8,5 vezes.

Esse aumento está diretamente associado as premissas assumidas no trabalho. No presente trabalho, foram utilizados os ângulos de fricção segundo Coudyzer e Richard (2005) para a análise da energia específica. Uma vez que estes ângulos de fricção são definidos como funções da orientação do cortador, pequenas variações nestas funções acarretariam em uma grande influência no comportamento da energia de corte.

É importante lembrar, também, que estas constantes de fricção são função direta do polimento do cortador. Por esse motivo, as comparações entre os resultados obtidos com os resultados reportados por Rajabov *et. al.* (2012) ficam limitadas. Isto acontece pois os cortadores utilizados nos experimentos de Coudyzer e Richard (2005) não necessariamente são as mesmas dos cortadores utilizados nos experimentos de Rajabov *et. al.* (2012).

4.3 Efeitos da profundidade de corte

Os efeitos da profundidade de corte são estudados tanto no que diz respeito a força tangencial de corte como na energia específica. Para tal análise, um cortador retangular de 12 mm de largura com *backrake* de 20° e *siderake* de 20° foi considerado.

A Figura 4.9 mostra a relação entre a força tangencial e a profundidade de corte tanto para a rocha 1 como para a rocha 2. Pela análise dos resultados, apresentados na Tabela 4.5, é evidente uma relação linear entre exposição do cortador e força de corte, de forma que maiores profundidades de corte resultam em maiores forças. Deve-se notar, também, que o coeficiente angular das retas são diferentes. Para a rocha com ângulo de fricção interno maior (rocha 1), a variação da força tangencial com a profundidade de corte é mais evidente que para a rocha 2, que apresenta menor ângulo de fricção interno. Tais resultados estão de acordo

com os resultados obtidos por Cheatham e Daniels (1979), Schei et. al. (2000), Richard et. al. (1998 e 2012).

Já o efeito da profundidade de corte na energia específica é nulo, ou seja, a energia específica é constante para qualquer profundidade de corte (Figura 4.10 e Tabela 4.5). Teoricamente, está em perfeita concordância com o sentido físico do problema, uma vez que a energia para se remover um mesmo material deve ser fixa.

Porém, na prática, a energia só é constante para profundidades de corte a partir de certo valor (Figura 2.22). Isso ocorre, pois, para profundidades de corte muito pequenas, o corte acontece em escala dos grãos da rocha. Na escala de grãos, as direções preferenciais de falha, isto é, discordâncias, são mais difíceis de ser encontradas. Assim, a coesão entre grãos é maior que a coesão em um volume maior de rocha, e por isso, a energia associada ao cisalhamento dessas discordâncias é maior.

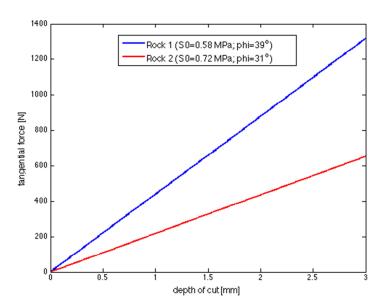


Figura 4.9: Efeitos da exposição do cortador na força de corte para o corte da rocha 1 e rocha 2.

Tabela 4.5: Efeitos da profundidade de corte na força tangencial e na energia específica.

	Rock 1		Rock 2	
Depth of cut [mm]	Cutting Force [KN]	Specific Energy [Mpa]	Cutting Force [KN]	Specific Energy [Mpa]
0	0	0	0	0
0.5	0.2195	38.9345	0.1089	19.3166
1	0.439	38.9345	0.2178	19.3166
1.5	0.6586	38.9345	0.3267	19.3166
2	0.8781	38.9345	0.4356	19.3166
2.5	1.0976	38.9345	0.5445	19.3166
3	1.3171	38.9345	0.6535	19.3166

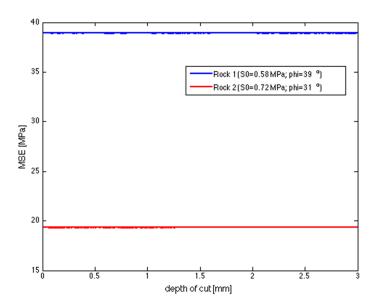


Figura 4.10: Efeitos da exposição do cortador na energia específica para o corte da rocha 1 e rocha 2.

4.4 Efeitos da pressão confinante

Os efeitos da pressão confinante foram estudados para as duas rochas, considerando um cortador com 20° *backrake* e 20° *siderake*. Na análise, foi analisada a variação da energia especifica com relação ao aumento da pressão de fundo de poço (pressão de confinamento). Conforme pode ser visto na Figura 4.11 e Tabela 4.6, à medida que a pressão de confinamento cresce, a energia específica aumenta de forma linear. Deve-se notar, porém, que o aumento também depende da rocha que está sendo cortada. Para a rocha com ângulo de fricção interno menor (Rocha 2) a taxa de aumento em função do confinamento é menos evidente (menor coeficiente angular da reta).

A relação é em parte semelhante ao resultado obtido por Zijsling (1987), Detournay e Atkinson (2000), Detournay e Tan (2002), uma vez que a relação é quase linear entre energia específica e pressão confinante. Porém, Detournay e Tan (2002) apresentam que para pressões confinantes muito altas (acima de 30 MPa), o aumento na energia tende a diminuir. Isso se dá ao fato de que a pressão de confinamento mantém o material grudado, evitando a dilatância da rocha. Por isso há diferença entre os resultados teóricos obtidos e os resultados apresentados na literatura (os efeitos da pressão na resistência da rocha são desprezados).

Tabela 4.6: Efeitos da pressão de confinamento na energia específica.

Confining Pressure [Mpa]	Specific Energy [Mpa]		
	Rock 1	Rock 2	
0	38.9345	19.3166	
2	147.6535	51.5571	
20	1.13E+03	341.7216	
40	2.21E+03	664.1265	

Deve-se ressaltar que, assim como a solução teórica, as soluções apresentadas por Zijsling (1987), Detournay e Atkinson (2000), Detournay e Tan (2002) divergem da solução obtida por Rafatian *et. al.* (2010), que indica que a energia cresce mais para baixas pressões confinantes (vide Figura 2.25). Uma possível explicação para essa redução da taxa de crescimento é o enceramento do

cortador, que evita que o cortador corte o material, acarretando em menores valores de energia.

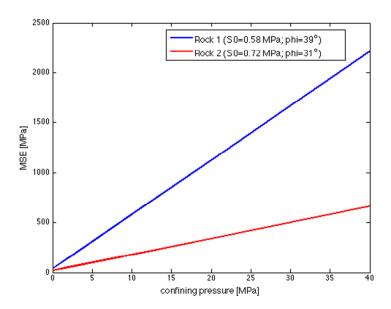


Figura 4.11: Efeitos da pressão confinante na energia específica para o corte da rocha 1 e rocha 2.

4.5 Efeitos do desgaste

Caso o cortador seja desgastado, haverá uma área de desgaste em contato com a rocha, conforme foi apresentado na Figura 2.8. Essa área, no entanto, possui características diferentes que a face do cortador, uma vez que o material em contato com a rocha é o substrato (Carbeto de Tungstênio).

Uma grande característica desse contato é o fato de que o Carbeto de Tungstênio possui maior rugosidade que a face de diamante sintético do cortador. Assim, normalmente o ângulo de fricção entre o substrato e a rocha é maior que o ângulo de fricção interno da rocha. Desta forma, o contato que falhará é o contato rocha-rocha, enquanto a rocha em contato com o substrato irá se plastificar. Por este motivo o ângulo de fricção no desgaste é um indício do ângulo de fricção interno da rocha, como visto na seção 2.3.

Para o estudo do efeito do desgaste, será analisado o diagrama E-S apresentado primeiramente por Detournay e Defourny (1992). Esse diagrama

compara a energia necessária para se cotar a rocha (E) com a energia associada a compressão vertical na rocha (S).

Os efeitos do *backrake* no diagrama E-S para a rocha 1 são mostrados na Figura 4.12. Na figura, a linha pontilhada representa a linha de corte (*cutting line*), enquanto a linha cheia representa a linha de fricção (*friction line*). É evidente que o aumento do *backrake* afeta mais a energia de compressão vertical do que a energia de corte, o que é refletido na diminuição da inclinação da linha de corte. Pela figura, pode-se ver que um aumento de 20° para 40° no *backrake* aumenta a energia de corte de 32 MPa para 66 MPa, quase a duplicando. Porém o mesmo aumento faz a energia associada ao esmagamento da rocha por compressão crescer cerca de 2,5 vezes (de 26 MPa para 62 MPa). Esse maior aumento na energia de compressão está diretamente associado ao aumento da área do cortador em contato com a rocha, uma vez que a projeção horizontal da área do cortador é mais afetada que a sua projeção vertical.

Outro ponto importante é que as linhas de fricção se mantêm com coeficientes angulares constantes, como de fato assumidos. Essa inclinação nada mais é que uma medida do coeficiente de atrito da rocha, determinado pelo ângulo de fricção interno da rocha, que é constante.

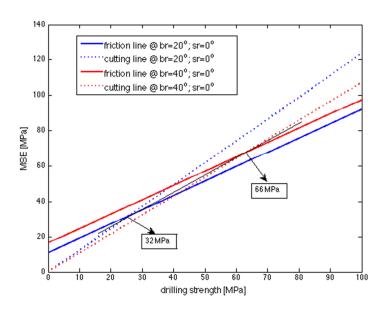


Figura 4.12: Efeitos do backrake no diagrama E-S para o corte da rocha 1.

Já o efeito do *siderake* é diferente. Como pode ser visto na Figura 4.13, o aumento de *siderake* de 0° para 30° quase duplica a energia de corte da rocha (de 32 MPa para 50 MPa), porém pouco afeta a energia associada a compressão da rocha (de 26 MPa para 30 MPa).

Assim como no caso do *backrake*, o *siderake* também afeta a linha de corte, porém no sentido oposto. O coeficiente angular da linha é maior para maiores *siderakes*, indicando que o *siderake* afeta mais a energia de corte que a energia associada à compressão do material.

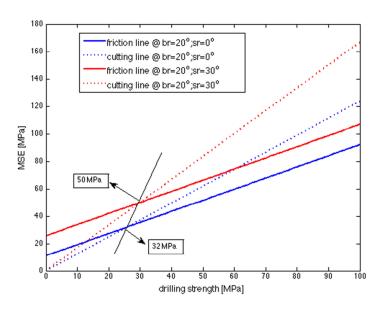


Figura 4.13: Efeitos do siderake no diagrama E-S para o corte da rocha 1.

Para a rocha 2, o comportamento dos diagramas E-S em função dos *backrake* e *siderake* são bem semelhantes, como pode ser visto nas Figura 4.14 e Figura 4.15, respectivamente. Pode-se perceber que, da mesma forma que para a rocha 1, o *siderake* aumenta o coeficiente angular da linha de corte, enquanto o *backrake* diminui a inclinação da linha de corte.

Para um aumento de 20° para 40° no *backrake*, a energia específica aumenta de 16 MPa para 23.5 MPa, enquanto a energia de esmagamento da rocha aumenta de 13 MPa para 22 MPa. Deve-se notar que o efeito do *backrake* é menos evidente na rocha 2. Isso se deve ao fato do *backrake* estar diretamente relacionado com o ângulo de fricção interno da rocha, e ambos estarem relacionados ao plano de falha da rocha, como visto na (Eq.(3.75)).

Para um aumento de 0° para 30° *siderake*, a energia específica aumenta de 16 MPa para 25 MPa, enquanto a energia de compressão aumenta de 13MPa para 15 MPa. Como esperado, os efeitos do *siderake* na energia de compressão da rocha são muito pouco evidentes.

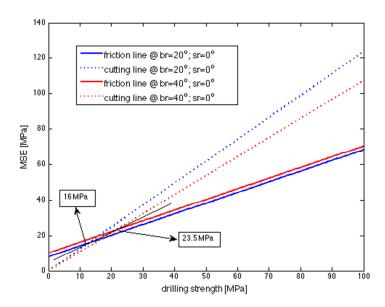


Figura 4.14: Efeitos do backrake no diagrama E-S para o corte da rocha 2.

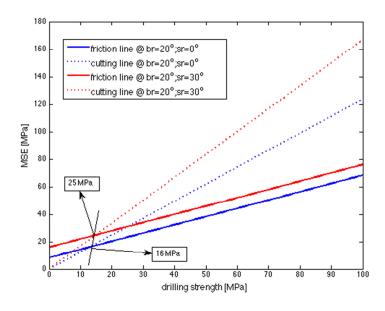


Figura 4.15: Efeitos do siderake no diagrama E-S para o corte da rocha 2.