

5. Resultados

A metodologia apresentada no Capítulo 4 foi utilizada para determinar os parâmetros de entrada de cada modelo a fim de estimar as forças de corte a partir das propriedades da rocha. Neste capítulo, os resultados obtidos a partir dos modelos são comparados com os resultados dos ensaios de cortador único realizados na halita.

5.1. Estimativas das forças de corte dos modelos analíticos versus força de corte experimental – halita pressão atmosférica

Nas Figuras 5.1 e 5.2 são apresentadas as estimativas das forças de corte horizontal e vertical de cada modelo para condições atmosféricas e são comparadas com os resultados experimentais. As curvas são realizadas com uma quantidade reduzida de dados para simplificação visual.

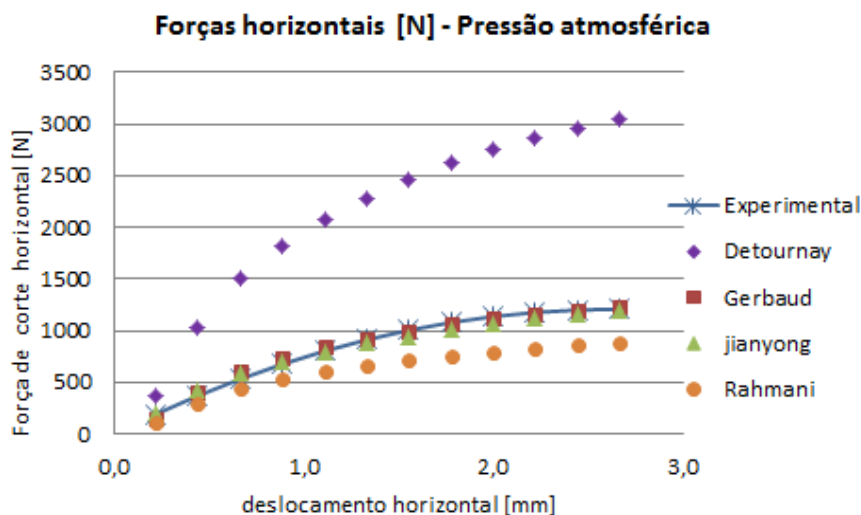


Figura 5.1-Estimativa das forças de corte horizontal e força de corte experimental em condições de pressão atmosférica

A partir dos resultados das estimativas das forças pelo modelo de Detournay e Defourny (1992), pode-se perceber que este modelo superestima o valor das forças de corte horizontal e vertical. Este resultado pode ser devido a que não foi

considerada a redução na coesão da rocha ocasionada pela alta deformação gerada durante o cisalhamento no corte da halita (Detournay e Atkinson, 1991).

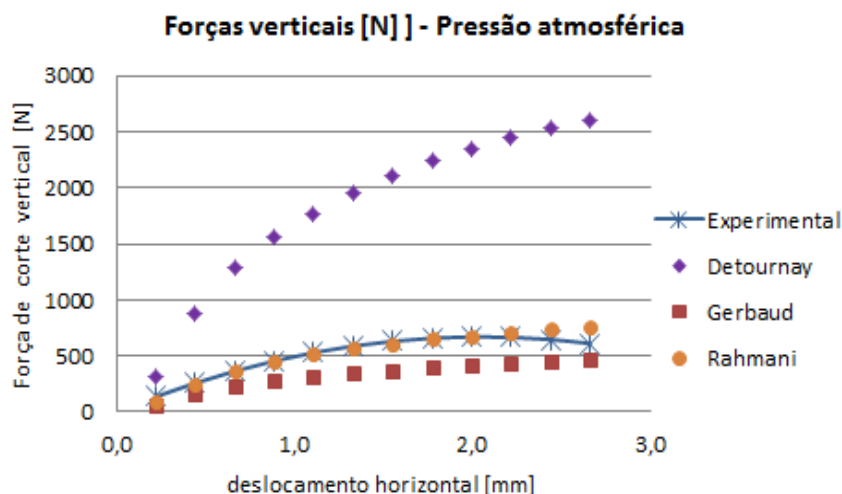


Figura 5.2- Estimativas das forças de corte vertical e força de corte experimental em condições de pressão atmosférica

O parâmetro c , na formulação desse modelo deve ser tratado como uma coesão aparente que poderia ser consideravelmente menor do que a coesão deduzida a partir do pico de intensidade medido em um experimento triaxial. A estimativa da força de corte vertical também é superestimada por este modelo.

A força horizontal de corte estimada através do modelo analítico de Rahmani et al. (2012) se aproxima às do experimento para o trecho inicial do corte (em torno de 0,67 mm de deslocamento horizontal).

A partir do trecho inicial, as estimativas de força horizontal se afastam daquelas obtidas no ensaio de referência com uma porcentagem de erro de 37,28%. Este modelo subestima as forças horizontais na condição de pressão atmosférica, ao contrário do modelo de Detournay e Defourny (1992) e, portanto, o modelo de Rahmani et al. (2012) também não é uma boa opção para o cálculo das forças de corte. Já na estimativa da força de corte vertical o erro médio foi de 3,43%, aproximadamente. Esta previsão se ajusta ao ensaio de referência, mas é importante lembrar que a força vertical não contribui diretamente para o trabalho realizado ao longo do corte. A força vertical teria mais relevância se as análises levassem em conta o desgaste da ferramenta de corte. Neste trabalho será dada maior importância à força de corte horizontal, já que ela é diretamente proporcional à energia específica e, é possível estimar a eficiência do corte a partir dela.

Gerbaud et al. (2006) nas suas estimativas das forças horizontais para a condição de pressão atmosférica apresenta uma percentagem média de erro menor do que os modelos analisados anteriormente. Com 3.25%, o modelo estima bem as forças horizontais, com relação àquelas medidas no ensaio. A força vertical estimada pelo modelo é subestimada em 65.96% (erro médio). As estimativas do modelo de Jianyong (2012) fornecem resultados concordantes com os resultados experimentais da análise em condição atmosférica. No caso da força horizontal de corte ele apresenta percentagem de erro médio de aproximadamente 4.46%. Porém, para a estimativa da força de corte vertical o modelo não apresenta uma formulação que seja confiável para utilizar, conforme explicado no item 4.1 do Capítulo 4.

As Figuras 5.3 e 5.4 apresentam o comparativo entre a totalidade das medições do ensaio e os resultados dos modelos que forneceram as melhores estimativas. Considerando-se as estimativas de força para o trecho inicial do corte (até um deslocamento horizontal ao redor de 1.5 mm), a percentagem de erro dos modelos tende a diminuir.

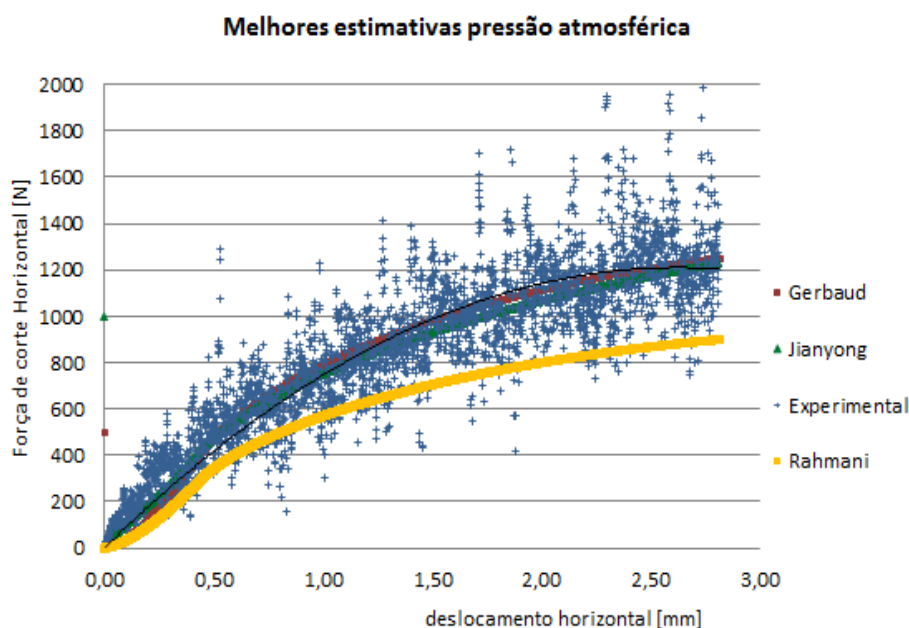


Figura 5.3- Melhores estimativas das forças de corte horizontal versus forças medidas experimentalmente em halita sob pressão atmosférica

Na Tabela 5.1 é apresentado um resumo da primeira análise feita a partir da estimativa das forças de corte horizontal e vertical dos modelos considerados. Os valores aqui apresentados são valores médios das forças de corte horizontal e vertical para cada trecho do deslocamento (0-1.55mm e 1.55-2.81mm). A partir

das tendências das curvas de força de corte versus deslocamento horizontal são obtidas as porcentagens de erro para cada caso.

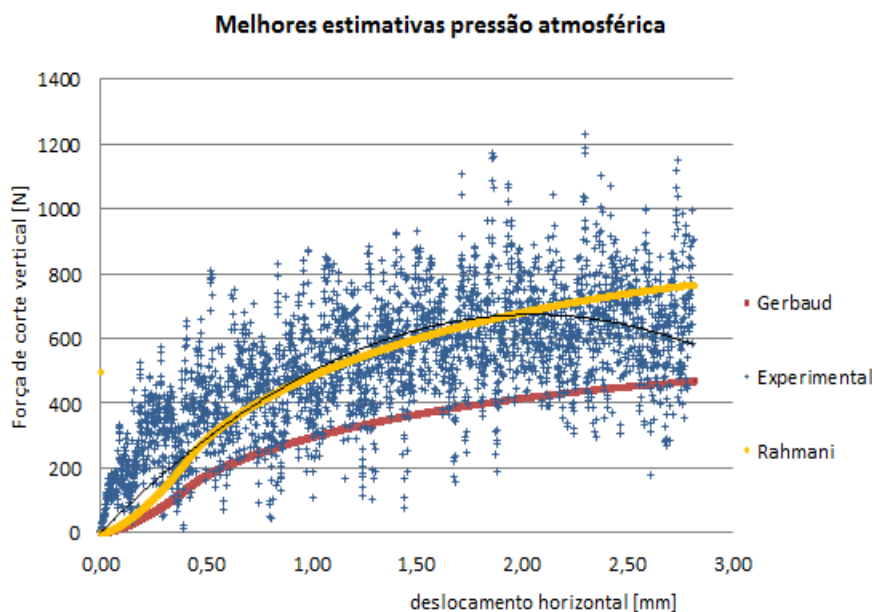


Figura 5.4- Melhores estimativas das forças de corte vertical versus forças medidas experimentalmente em halita sob pressão atmosférica

Tabela 5.1- Comparativo das forças de corte horizontal e vertical estimadas pelos modelos analíticos e resultados experimentais em condições atmosféricas

Análise da força de corte horizontal	1.55mm deslocamento		2.81mm deslocamento	
	Força de corte média [N]	% erro	Força de corte média [N]	% erro
Experimental	679.49		1192.08	
Gerbaud et al. (2006)	738.97	8.75	1181.48	2.05
Jianyong (2012)	701.43	4.46	1138.93	4.69
Rahmani et al. (2012)	529.27	33.68	846.20	40.89

Análise da força de corte vertical	1.55mm deslocamento		2.81mm deslocamento	
	Força de corte média [N]	% erro	Força de corte média [N]	% erro
Experimental	456.9		654.91	
Gerbaud et al. (2006)	276.29	68.88	441.74	49.18
Rahmani et al. (2012)	452.04	3.22	722.73	9.79

5.2. Estimativas das forças de corte dos modelos versus força de corte experimental – halita pressão confinante 2.1 MPa

Nas Figuras 5.5 e 5.6 são apresentadas as variações das estimativas das forças de corte com um incremento na pressão confinante de 2.1 MPa.

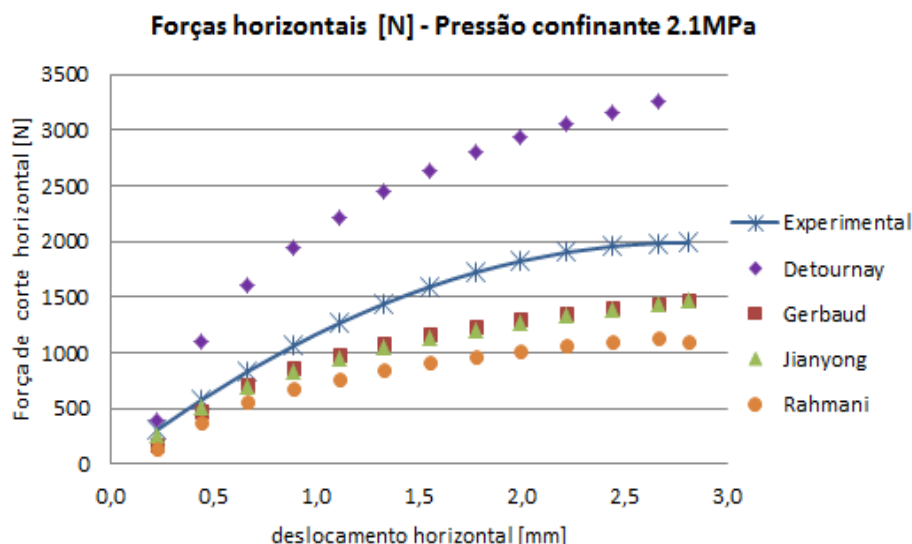


Figura 5.5- Estimativas das forças de corte horizontal e força de corte experimental sob pressão confinante 2.1 MPa

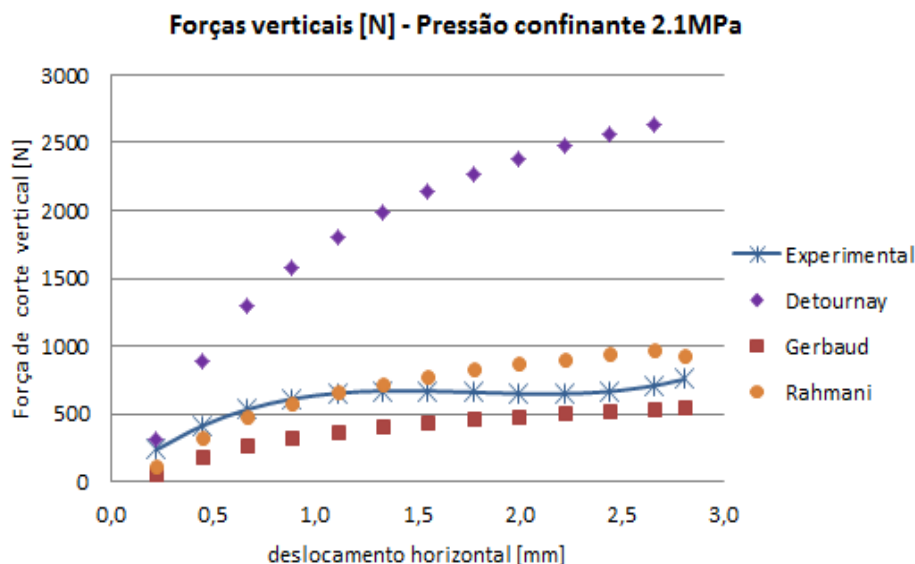


Figura 5.6-Estimativas das forças de corte vertical e força de corte experimental sob pressão confinante 2.1 MPa

Para as condições de pressão confinante de 2.1 MPa, o modelo de Detournay e Defourny (1992) continua superestimando os resultados das forças de corte horizontal e vertical. Já os modelos de Jianyong (2012) e Rahmani et al. (2012) oferecem resultados que subestimam as forças de corte horizontal em aproximadamente 37.67% de erro médio para o primeiro modelo e 75.47% de erro no segundo modelo. O modelo de Gerbaud et al. (2006) também subestima a força de corte horizontal em condições de pouca pressão confinante, apresentando erro médio de 36.50%.

Na estimativa da força de corte vertical, os modelos de Rahmani et al. (2012) e Gerbaud et al. (2006) apresentaram erros médios de 25.99% e 53.18% respectivamente. O comparativo entre a totalidade das medições do ensaio e os resultados dos modelos que forneceram as melhores estimativas é apresentado nas Figuras 5.7 e 5.8. Na Tabela 5.2 apresenta-se o resumo desta segunda análise.

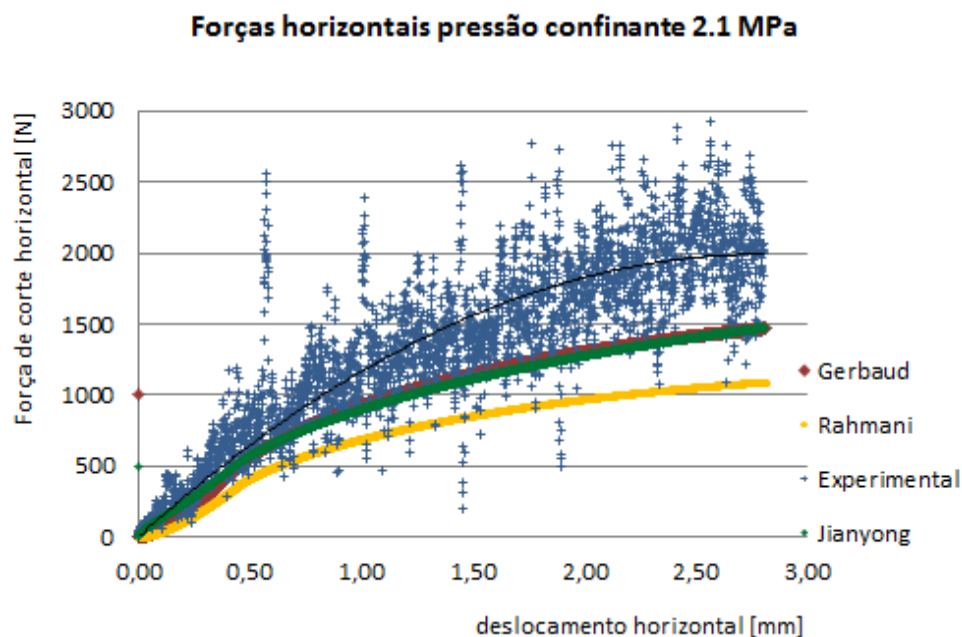


Figura 5.7- Melhores estimativas das forças de corte horizontal versus forças medidas experimentalmente em halita sob pressão confinante 2.1 MPa

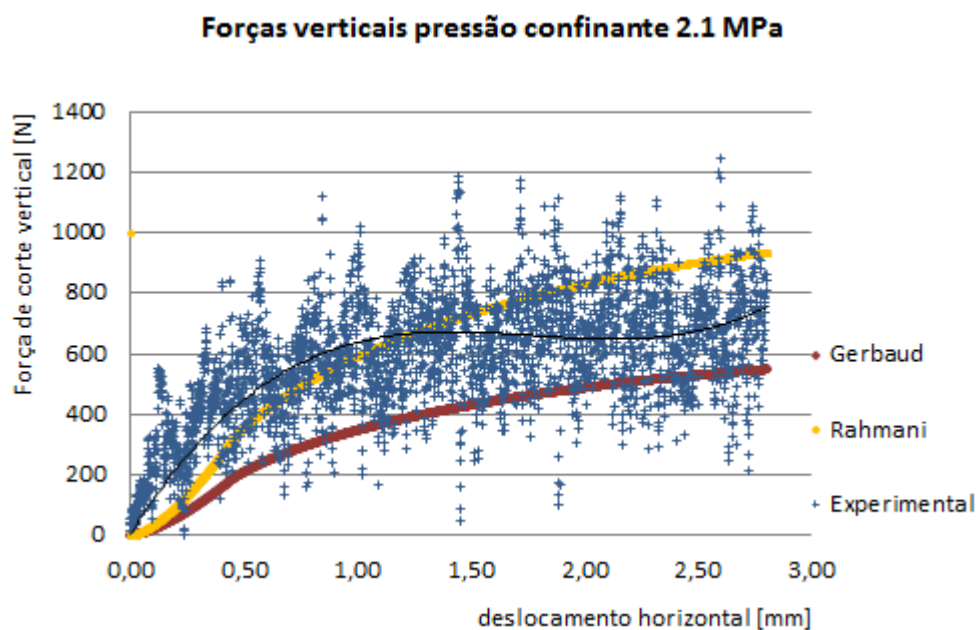


Figura 5.8- Melhores estimativas das forças de corte vertical versus forças medidas experimentalmente em halita sob pressão confinante 2.1 MPa

Tabela 5.2- Comparativo das forças de corte horizontal e vertical estimadas a partir dos modelos analíticos e resultados experimentais sob pressão confinante 2.1 MPa

Análise da força de corte horizontal	1.55mm deslocamento		2.81mm deslocamento	
	Força de corte média [N]	% erro	Força de corte média [N]	% erro
Experimental	1061.35		1931.41	
Gerbaud et al. (2006)	863.92	28.44	1381.25	39.12
Jianyong (2012)	838.78	26.54	1364.25	41.59
Rahmani et al. (2012)	677.20	63.85	1079.98	78.28

Análise da força de corte vertical	1.55mm deslocamento		2.81mm deslocamento	
	Força de corte média [N]	% erro	Força de corte média [N]	% erro
Experimental	611.11		662.89	
Gerbaud et al. (2006)	323.01	89.19	516.43	32.37
Rahmani et al. (2012)	578.38	11.94	922.39	35.28

5.3.

Estimativas das forças de corte dos modelos versus força de corte experimental – halita pressão confinante 21 MPa

Nas Figuras 5.9 e 5.10 são apresentadas as variações das estimativas das forças de corte com um incremento nas condições de pressão confinante de 21 MPa.

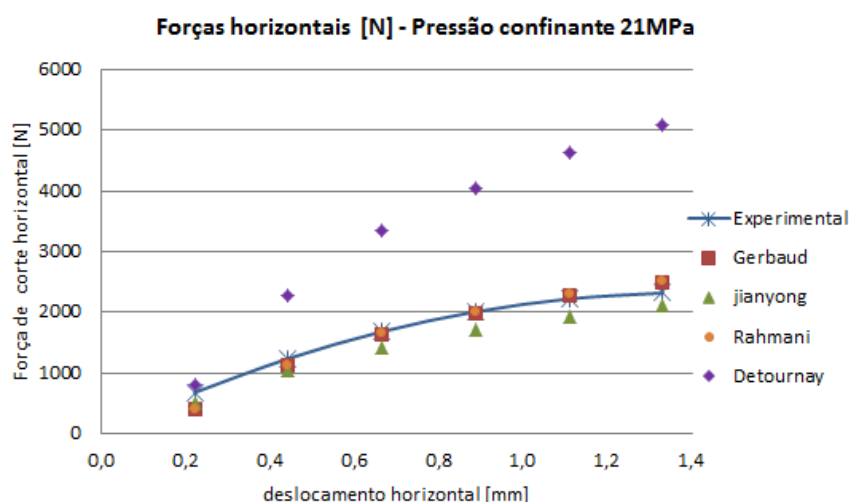


Figura 5.9- Estimativas das forças de corte horizontal e força de corte experimental sob pressão confinante 21 MPa

O ensaio experimental para esta condição de confinamento foi executado somente até aproximadamente 1.5mm de deslocamento horizontal ou 3 segundos

de tempo no ensaio. Portanto, as estimativas das forças de corte são calculadas para deslocamentos de mesma magnitude.

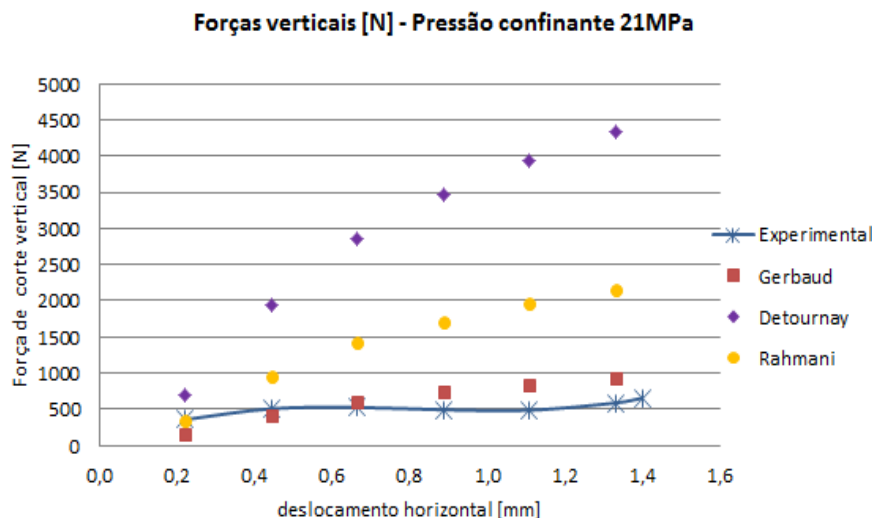


Figura 5.10-Estimativas das forças de corte vertical e força de corte experimental sob pressão confinante 21 MPa

O modelo de Detournay e Defourny (1992) para altas pressões confinantes continua superestimando os resultados das forças de corte horizontal e vertical.

Para o modelo de Gerbaud et al. (2006) as estimativas das forças de corte horizontal apresentam erro médio de aproximadamente 7.18% quando comparadas com os resultados experimentais. Observa-se que a previsão superestima os resultados (apesar de apresentar uma porcentagem de erro baixa).

Os modelos de Jianyong (2012) e Rahmani et al. (2012), para o caso de altas pressões, também se ajustam muito bem com o experimento, apresentando uma porcentagem de erro médio para as forças horizontais de 18.05% e 8.87% respectivamente.

No caso das estimativas das forças de corte vertical, o modelo de Gerbaud et al. (2006) superestima os resultados com erro médio de 50.40%, enquanto que o modelo de Rahmani et al. (2012) apresenta estimativas muito distantes dos resultados do ensaio de referência.

Nas Figuras 5.11 e 5.12 apresenta-se o comparativo entre a totalidade das medições do ensaio e os resultados dos modelos que forneceram as melhores estimativas para esta última condição de pressão confinante. O resumo da terceira análise é apresentado na Tabela 5.3.

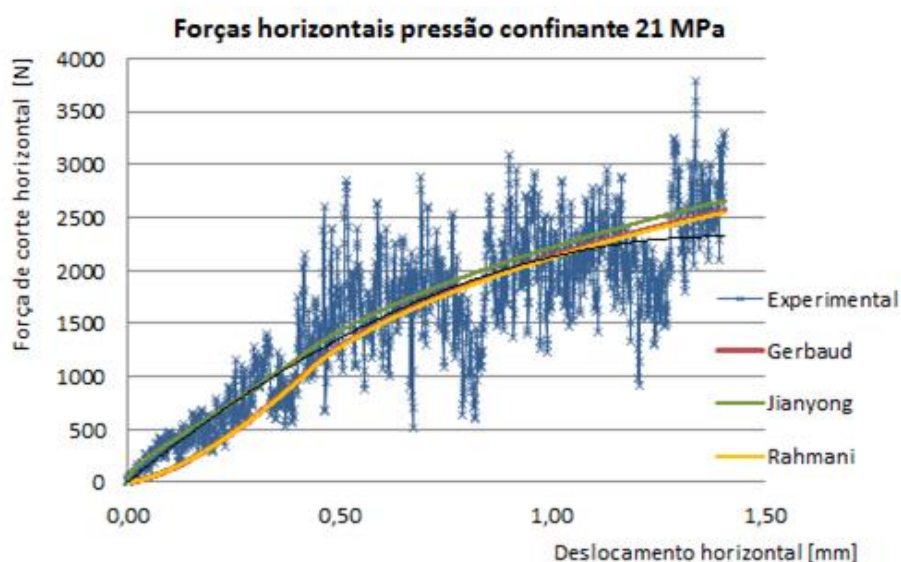


Figura 5.11- Melhores estimativas das forças de corte horizontal versus forças medidas experimentalmente em halita sob pressão confinante 21 MPa

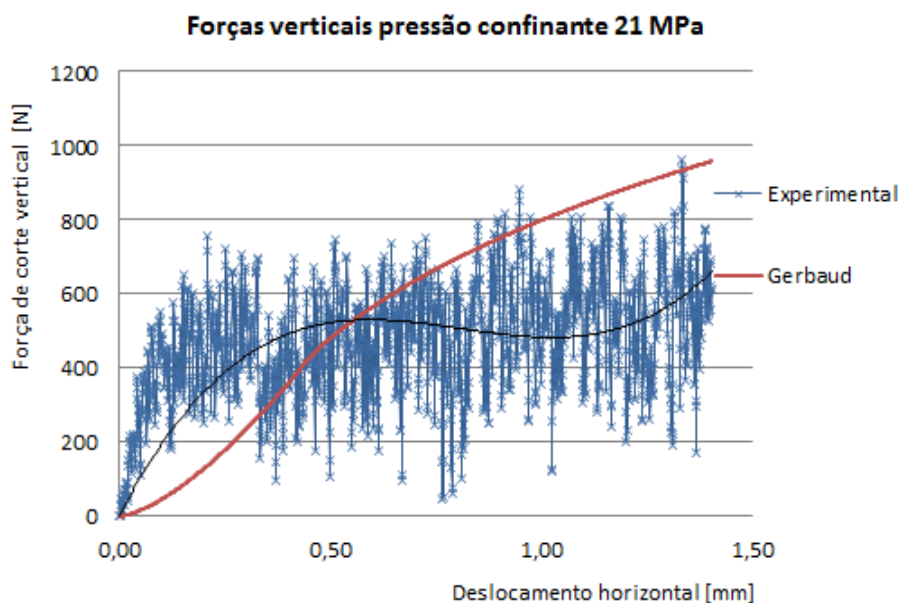


Figura 5.12- Melhores estimativas das forças de corte vertical versus forças medidas experimentalmente em halita sob pressão confinante 21 MPa

Tabela 5.3- Comparativo entre as forças de corte horizontal e vertical estimadas a partir dos modelos analíticos e os resultados experimentais sob pressão confinante 21 MPa

Análise da força de corte horizontal	1.55mm deslocamento		2.81mm deslocamento	
	Força de corte média [N]	% erro	Força de corte média [N]	% erro
Experimental	1458		2315.26	
Gerbaud et al. (2006)	1377.73	6.58	2495.51	7.79
Jianyong (2012)	1227.26	18.92	2124.84	14.61
Rahmani et al. (2012)	1391.64	5.51	2520.71	8.87

Análise da força de corte vertical	1.55mm deslocamento		2.81mm deslocamento	
	Força de corte média [N]	% erro	Força de corte média [N]	% erro
Experimental	501.47		590.18	
Gerbaud et al. (2006)	515.11	36.03	933.03	58.09
Rahmani et al. (2012)	1188.57	+ 100	2152.89	+ 100

Uma análise mais detalhada do comportamento de cada modelo nas estimativas das forças de corte horizontal é apresentada nas Figuras 5.13 a 5.15. Nestas Figuras são comparadas as estimativas de cada modelo com a linha de tendência dos resultados de referência (experimentos em halita) nas três condições de pressão confinante que foram trabalhadas.

Os modelos de Gerbaud et al. (2006) e de Jianyong (2012), apresentados nas Figuras 5.13 e 5.14, mostram estimativas aceitáveis nos casos de pressão atmosférica e sob condições de pressão confinante de 21Mpa. Já na condição de baixas pressões (2.1 MPa), as forças de corte horizontal foram subestimadas.

A grande margem de erro observada para as curvas de corte com confinamento de 2.1 MPa poderia ser explicada considerando-se uma observação experimental feita por Rafatian et al. (2009). Ele descreve a existência de um comportamento bi-linear na curva energia específica versus confinamento para seus resultados de ensaio de cortador único.

A Figura 2.12 do item 2.1.4 (Capítulo 2) apresenta esta curva. Nesse comportamento sugerido pelos autores, o incremento na energia e, portanto, nas forças de corte, aumenta mais significativamente em cortes feitos a baixas pressões de confinamento. Este poderia ser um comportamento experimental do corte da rocha que evidentemente os modelos analíticos não conseguem estimar.

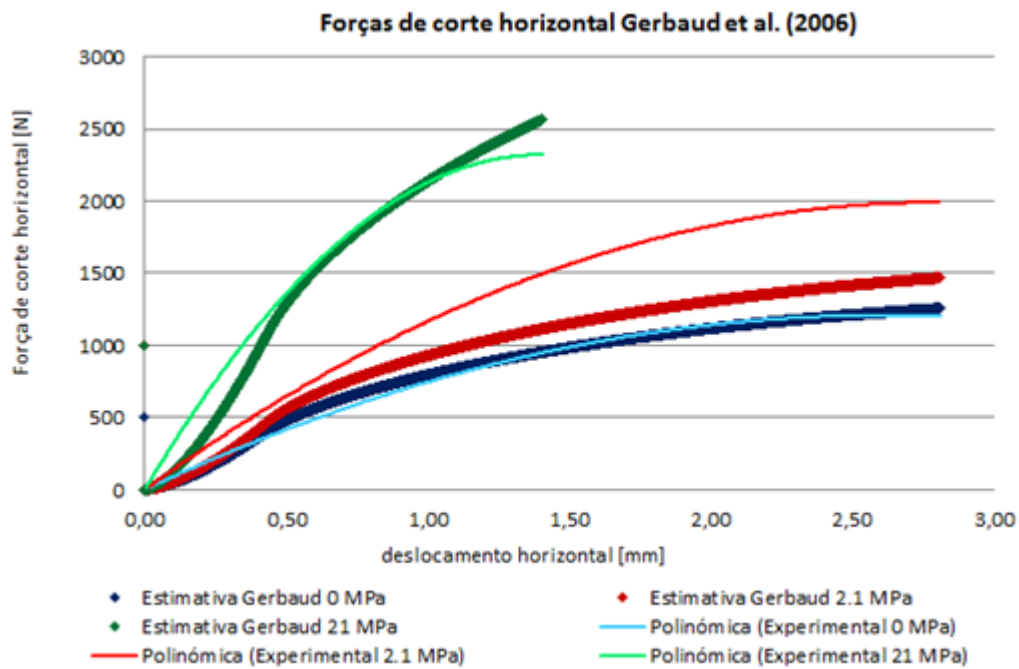


Figura 5.13- Comportamento das estimativas de Gerbaud et al. (2006) para diferentes condições de pressão confinante

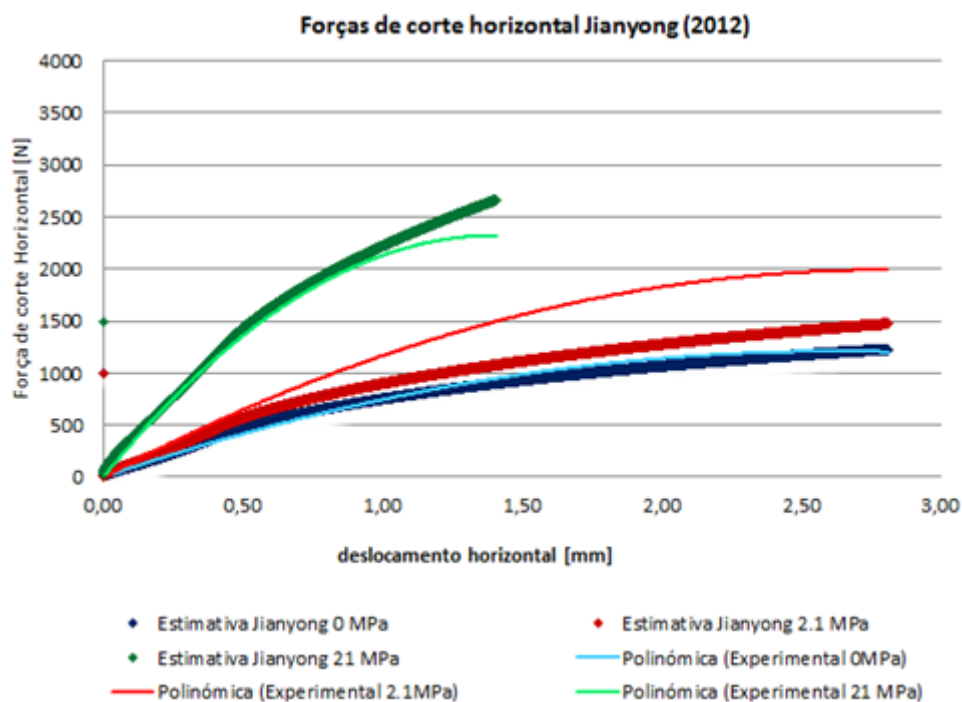


Figura 5.14- Comportamento das estimativas de Jianyong (2012) para diferentes condições de pressão confinante

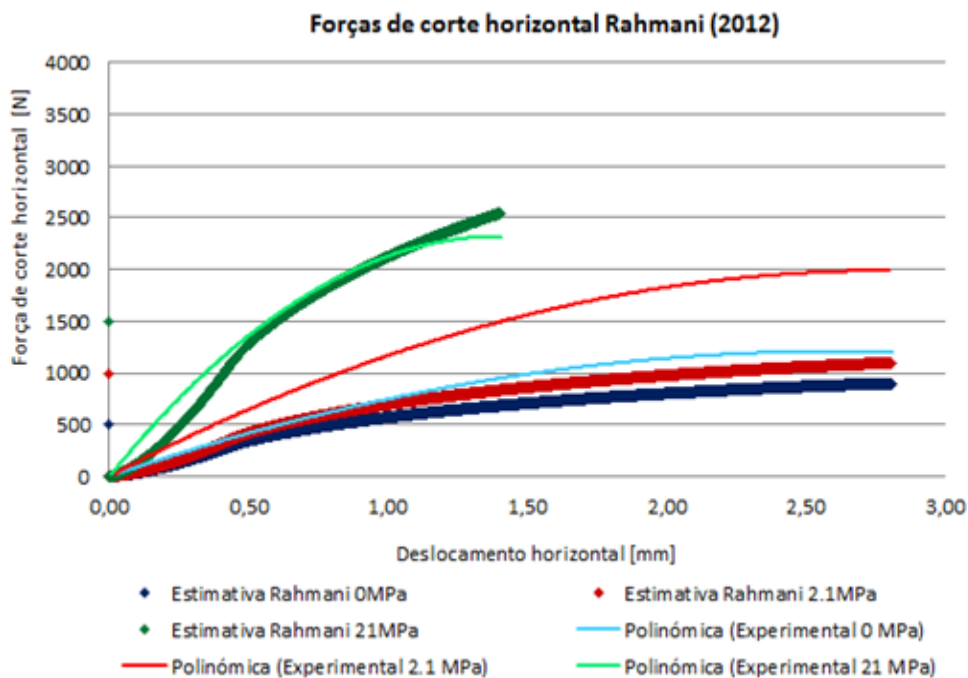


Figura 5.15-Comportamento das estimativas de Rahmani et al. (2012) para diferentes condições de pressão confinante

Nas Figuras 5.13 a 5.15, as estimativas dos modelos apreciam-se como linhas grossas na figura, dada a quantidade de pontos que compõem a curva.

Outra possível explicação para a discrepância de resultados para o caso de confinamento de 2.1 MPa seria o experimento estar fornecendo forças de corte superiores às esperadas tipicamente. Para esclarecer esta dúvida, seria importante ter outro resultado experimental para o mesmo confinamento ou ter acesso à resultados experimentais para algum confinamento intermediário, entre 0 MPa e 21 MPa.

No caso do comportamento do modelo de Rahmani (2012), (Figura 5.15), ele apresenta as melhores estimativas da força de corte horizontal para o caso de altas pressões de confinamento. Nas estimativas das outras condições de pressão o modelo não se ajusta muito bem com os resultados experimentais.

As estimativas por meio do modelo de Melo (2014) foram comparadas com os resultados do ensaio de cortador único utilizando o ângulo de inclinação lateral de 0°. O modelo foi comparado também com as estimativas das forças obtidas por Coudyzer e Richard (2005). Estes modelos consideram em sua formulação a influência do ângulo de inclinação lateral.

Melo (2014) apresenta resultados concordantes com os obtidos por Detournay e Defourny (1992) (modelo que não considera a inclinação lateral) para

o caso de ângulo de inclinação lateral 0° , mas os dois superestimam os resultados experimentais do ensaio do cortador único na halita.

O modelo de Coudyzer e Richard (2005) poderia ser utilizado na comparação, se a energia específica (que é um dado de entrada para estimativa das forças) fosse calculada de modo equivalente ao calculado por Detournay e Atkinson (1991).

As curvas destes modelos para as forças horizontal, vertical e lateral podem ser apreciadas nas Figuras 5.16, 5.17 e 5.18.

A partir destas figuras, percebe-se que os modelos de Melo (2014) e de Coudyzer (2005) não fornecem uma estimativa aproximada das forças de corte experimentais na halita. Os modelos poderiam ajustar-se considerando a existência da perda de coesão na rocha pelo efeito da deformação existente pela formação das novas superfícies cisalhantes, efeito que poderia ser considerado mais evidente na halita devido ao seu comportamento dúctil.

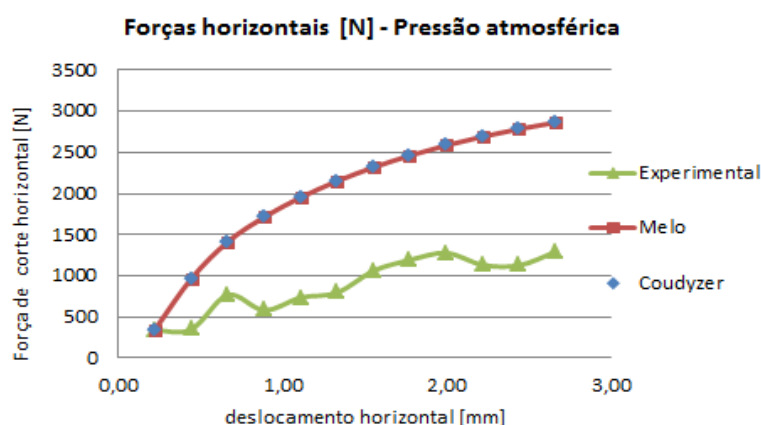


Figura 5.16 - Comparação entre as forças de corte horizontais estimadas com modelos analíticos e o resultado experimental na halita - Pressão atmosférica

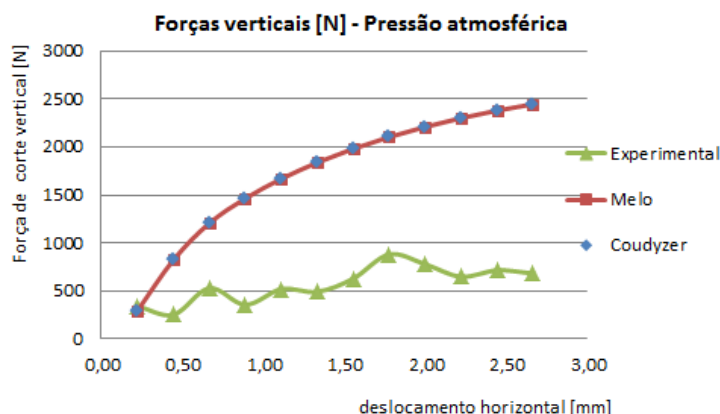


Figura 5.17 - Comparações entre as forças de corte verticais estimadas com modelos analíticos e o resultado experimental na halita - Pressão atmosférica

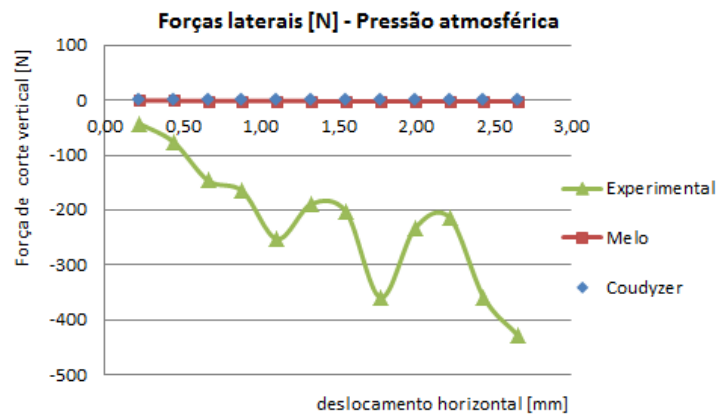


Figura 5.18-Comparações entre as forças de corte laterais estimadas com modelos analíticos e o resultado experimental na halita - Pressão Atmosférica

Se o fator de redução da coesão apresentado por Melo (2014) fosse considerado para o estudo de caso deste trabalho (evaporitos), os resultados das forças seriam subestimados, conforme apresenta a Figura 5.19.

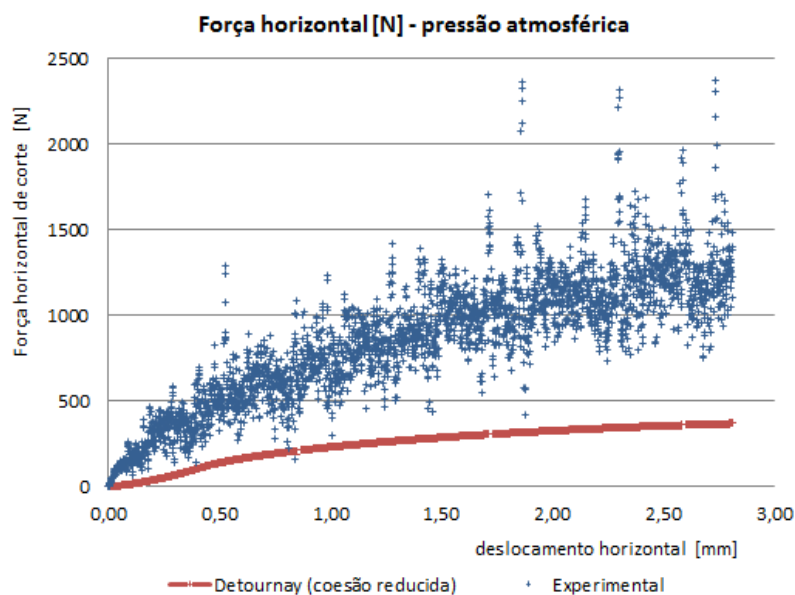


Figura 5.19- Forças de corte horizontal estimadas (Melo, 2014) e medições experimentais na halita - Pressão Atmosférica

5.4. Análise paramétrica

Para a análise paramétrica, em que será avaliada a variação do ângulo de ataque com a pressão confinante e com a profundidade de corte, serão utilizados os modelos de Rahmani et al. (2012), Gerbaud (2006) e Jianyong (2012).

Na análise da estimativa das forças de corte pelos modelos analíticos de Gerbaud (2006) e Jianyong (2012) obtiveram-se resultados aceitáveis para as

condições de pressão atmosférica e altas pressões de confinamento. Agora será apresentada uma análise com a variação dos parâmetros que mais influenciam o cálculo das forças geradas no processo de corte da rocha evaporítica. Como o modelo de Rahmani apresentou boas estimativas no caso de altas pressões de confinamento, também será incluído na análise paramétrica dos modelos.

Esta análise pode ser comparada com as tendências apresentadas na literatura por outros autores, trabalhos que estudam a variação de alguns parâmetros durante o corte. Os parâmetros a analisar neste trabalho serão a variação da profundidade de corte, a variação dos ângulos de orientação do cortador e a variação da pressão de confinamento sob a rocha. Os efeitos serão apresentados em curvas de variação da força horizontal (força mais representativa) versus a variação de cada parâmetro.

Dado que as estimativas dos modelos analíticos Coudyzer e Richard (2005) e Melo (2014) não foram concordantes com os resultados experimentais, fazer uma análise paramétrica da variação da força de corte com o incremento do ângulo de inclinação lateral não gerará resultados confiáveis para o material evaporito.

Nas Figuras 5.20 a 5.22 apresenta-se a variação da força horizontal em função da profundidade de corte para condições atmosféricas e sob pressão confinante.

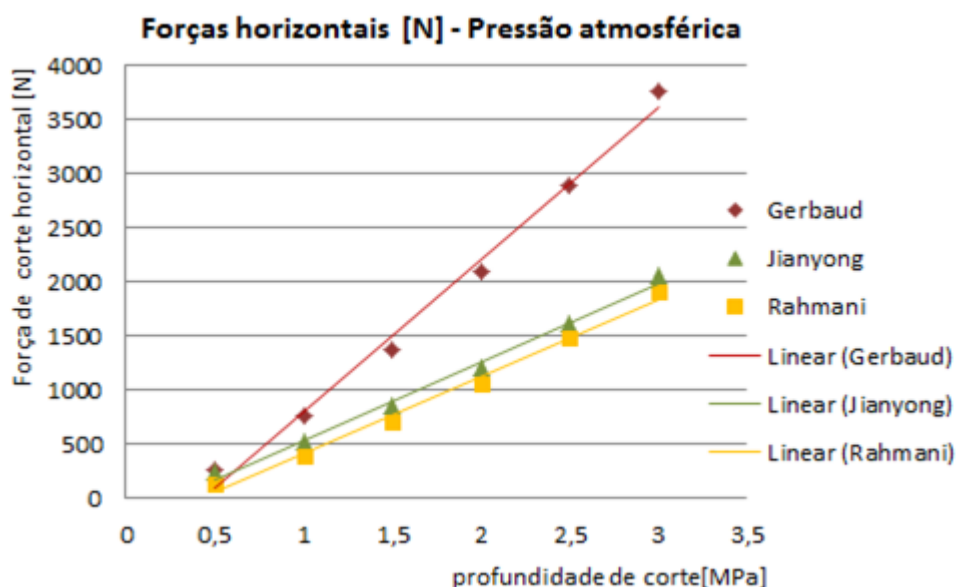


Figura 5.20- Variação da força de corte horizontal em função da profundidade de corte - Pressão Atmosférica

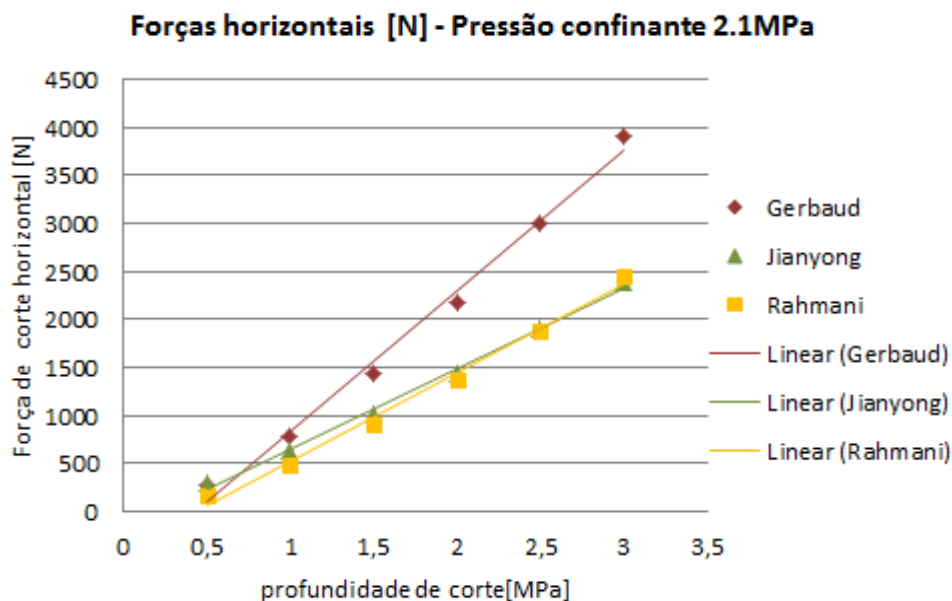


Figura 5.21- Variação da força de corte horizontal em função da profundidade de corte - Pressão confinante 2.1MPa

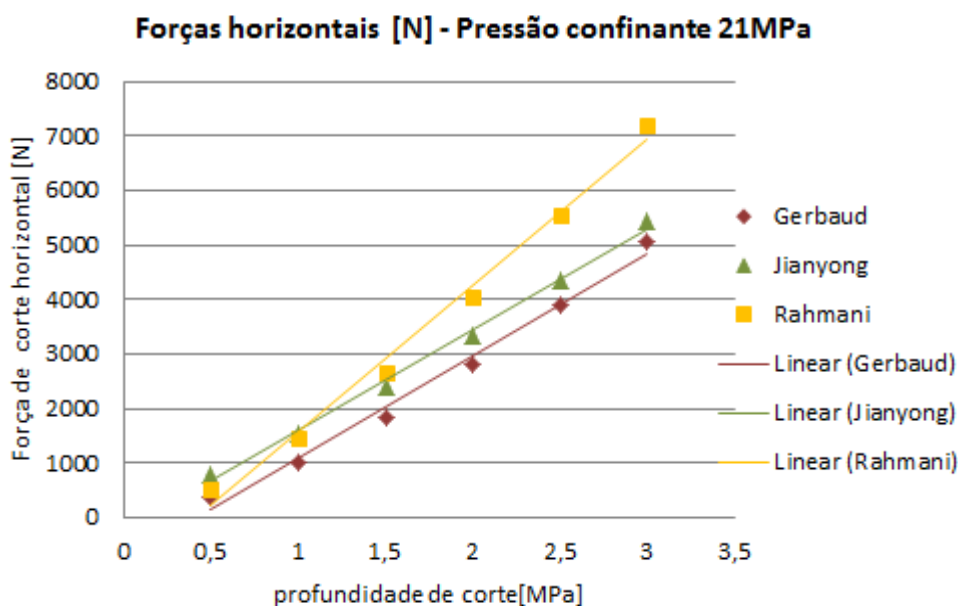


Figura 5.22- Variação da força de corte horizontal em função da profundidade de corte - Pressão confinante 21MPa

É possível ver nas figuras que a tendência da força com respeito à profundidade de corte tende a crescer linearmente, como foi mostrado também por outros autores (Richard et al., 2012 e Gerbaud, 2006). O incremento da profundidade de corte afeta diretamente o cálculo da área de corte transversal entre o contato do cortador e a rocha. Esta área transversal é um dado de entrada em todos os modelos analíticos.

Uma análise adicional pode ser realizada para o modelo de Gerbaud (2006). O modelo considera um fator λ como dado de entrada que leva em conta a existência de material acumulado na face do cortador para a estimativa de forças. Este fator é função de uma superfície horizontal que surge devido à presença de material esmagado na face do cortador dividida entre a área transversal de corte vezes a tangente do ângulo de ataque (λ é definido no item 2.3.2 do Capítulo 2). No entanto, é difícil estimar analiticamente a magnitude daquela superfície horizontal, já que poderiam estar envolvidos outros fatores no incremento do material aglomerado na face do cortador. Na Figura 5.23 é apresentado o incremento da força de corte para diferentes valores de λ (ou seja, a superfície horizontal relativa ao material acumulado, varia).

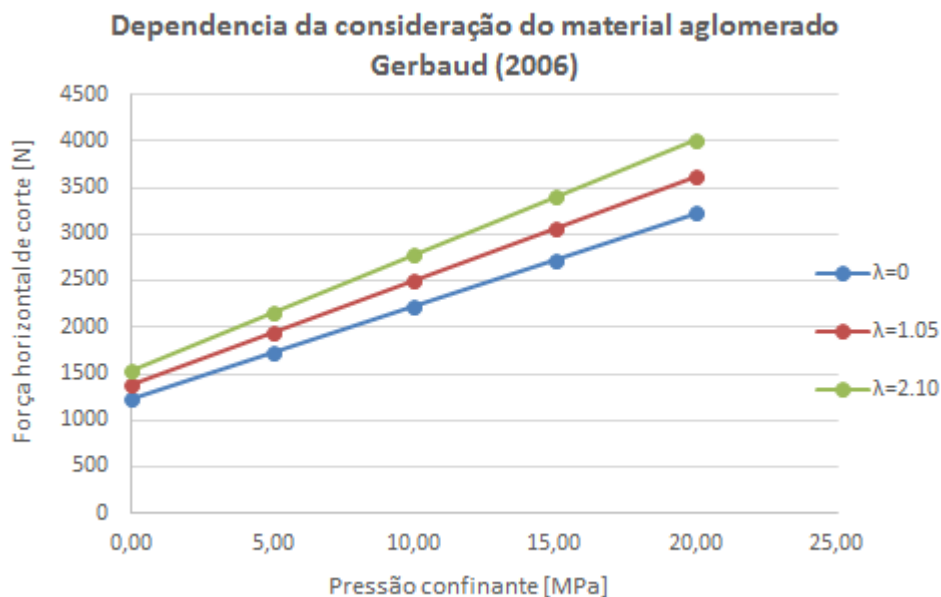


Figura 5.23- Influência do fator λ na estimativa de forças de corte no modelo de Gerbaud (2006)

Como apresenta a Figura 5.23, é evidente o incremento nas forças de corte por causa da aglomeração do material na face do cortador, que dificulta o processo.

A variação da força de corte horizontal em função da pressão confinante é expressa na Figura 5.24. Nos três modelos percebe-se que o comportamento da estimativa das forças com o incremento da pressão confinante é concordante com o observado na literatura.

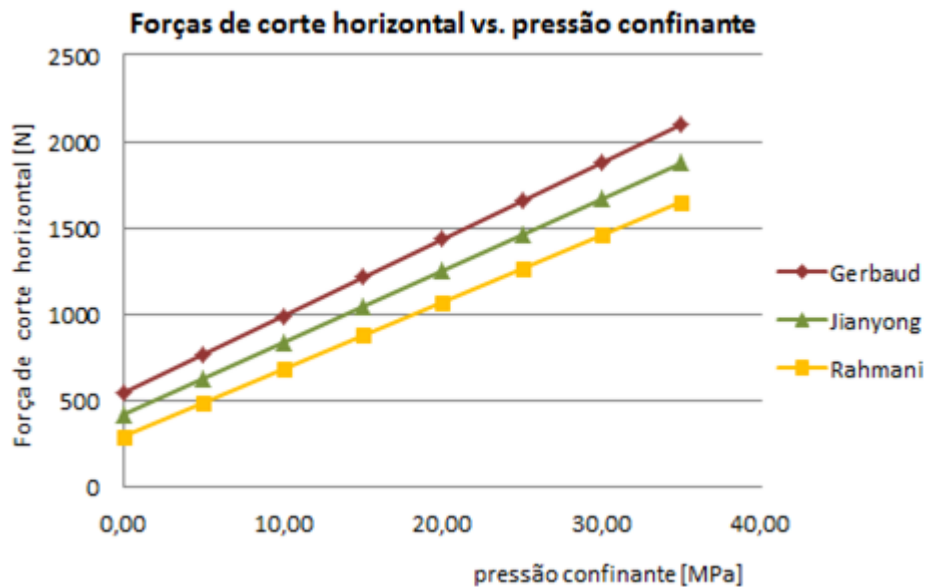


Figura 5.24- Variação da força de corte horizontal em função da pressão confinante

Na Figura 5.25 é apresentada a variação das estimativas das forças de corte horizontal nos três modelos analíticos com o incremento do ângulo de ataque do cortador. Observa-se que a força aumenta para maiores inclinações do ângulo de ataque, resultado concordante com os obtidos na literatura (Jianyong, 2012 e Rajabov et al., 2012). É importante enfatizar que, para a aplicação do modelo de Gerbaud (2006) na análise paramétrica, o parâmetro λ foi incluído no cálculo, a fim de contabilizar a contribuição da variação do ângulo de ataque na geração das forças.

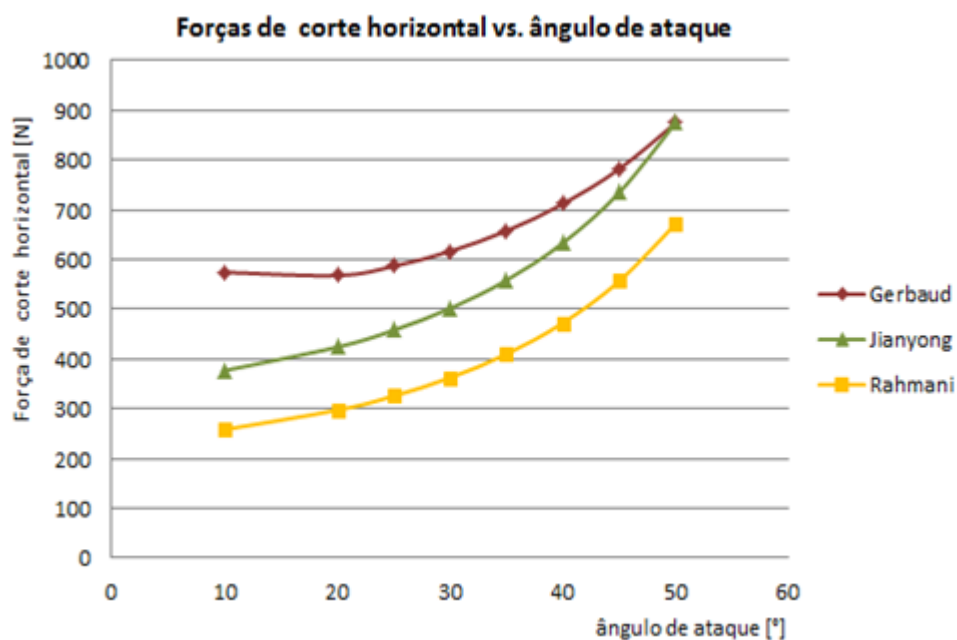


Figura 5.25- Variação da força de corte horizontal em função do ângulo de ataque