

Análise de Modelos Analíticos para Estimativa de Forças de Corte no Ensaio de Cortador Único para Rochas Evaporíticas

Rodríguez, Laura Yarick Barragán

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil, layarick@hotmail.com

Fontoura, Sergio Augusto Barreto da

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil, fontoura@puc-rio.br

Carrapatoso, Carla

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil, carlacarrapatoso@puc-rio.br

RESUMO: A indústria do petróleo realiza contínuas pesquisas para aperfeiçoar as operações de perfuração, aumentando a taxa de penetração e reduzindo o tempo não produtivo. Diversos estudos analisam o processo de corte em rocha utilizando brocas PDC (*Polycrystalline Diamond Compact*). Experimentos de laboratório como o ensaio de cortador único simulam a interação existente entre a rocha e o cortador. Além disso, modelos numéricos têm sido criados para fazer o mesmo tipo de análise com estimativas concordantes com resultados obtidos experimentalmente. No entanto, os ensaios experimentais geram altos custos de investimento, e por sua vez, as simulações numéricas, demandam um tempo muito alto para realizar análises de boa qualidade. Os modelos analíticos procuram eliminar o fator custo e tempo, obtendo resultados confiáveis da simulação do processo de corte, aproximando-se dos resultados obtidos experimentalmente e numericamente. Os modelos analíticos aqui apresentados permitem estimar as forças medidas pelo cortador no processo de corte, partindo das propriedades mecânicas da rocha. Os modelos levam em conta o equilíbrio de forças no instante do corte e consideram, para o cálculo das forças, a sua geometria e as propriedades de resistência do material. A rocha utilizada no presente trabalho é um evaporito. A aplicação desse tipo de metodologia para corte em halita obriga a considerar no modelo analítico o incremento nas forças devido ao comportamento dúctil do material, à existência de deformações plásticas e à aglomeração de material na face do cortador a fim de obter uma melhor estimativa das forças de corte. Conseguem-se estimativas aceitáveis com os modelos de Jianyong (2012) e Gerbaud et al. (2006) sob condições de pressões atmosféricas e altas pressões de confinamento. A pesquisa permite perceber um aumento nas forças de corte quando o ensaio é feito em diferentes pressões de confinamento, estabelecendo um comportamento bi linear das forças de corte em função da pressão confinante.

PALAVRAS-CHAVE: Forças de corte, Ensaio de cortador único, Evaporitos, Halita

1 INTRODUÇÃO

Na otimização da operação de perfuração de poços, a indústria do petróleo tem feito diversos estudos referentes à interação entre rocha e broca, baseados nos ensaios de laboratório existentes que simulam o processo de perfuração em campo. As brocas PDC

(*Polycrystalline Diamond Compact*), são consideradas uma das mais eficientes ferramentas no processo de perfuração e são amplamente utilizadas nos mais diversos tipos de rocha.

A motivação para este tipo de estudo está relacionada com os problemas de perfuração encontrados durante o corte das rochas do pré-

sal e de sal ou evaporito. É um grande desafio atravessar essa formação mantendo a integridade da coluna de perfuração já que, entre outros possíveis problemas de perfuração, há a tendência de fechamento das paredes do poço devido à fluência do sal. Em um ambiente com tais características, é fundamental otimizar as características da broca para equilibrar desempenho e durabilidade. A fim de aumentar a taxa de penetração realizam-se experimentos como o ensaio de cortador único, que simula o efeito gerado por um cortador que compõe a broca PDC. As características de cada cortador são os ângulos de orientação do cortador (ângulo de ataque e ângulo de inclinação lateral), pressão de confinamento, área de corte transversal, material aglomerado na face do cortador. Com estes parâmetros busca-se estabelecer o modelo mais adequado para trabalhar com halita.

São desenvolvidos modelos numéricos e analíticos que vem apresentando resultados aceitáveis validados com base em resultados experimentais, que ajudam a entender os mecanismos de interação entre rocha e broca.

No artigo, optou-se por estudar o mecanismo de corte através de modelos analíticos. Estes modelos simulam a interação entre a rocha e o cortador, 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 estudados são os apresentados por Gerbaud et al. (2006), Jianyong (2012) e Rahmani et al. (2012), que levam em conta o equilíbrio de forças no instante do corte. Eles permitem estimar as forças medidas pelo cortador no processo de corte da rocha, partindo das propriedades mecânicas dos materiais envolvidos e a sua geometria.

A validação desses modelos nos evaporitos será feita através de comparações dos resultados das forças de corte já obtidas experimentalmente pelo ensaio de cortador único em amostras de halita. Assim será uma opção mais no aperfeiçoamento na eficiência de corte e a taxa de penetração.

2 DADOS EXPERIMENTAIS

Os dados experimentais para a realização do projeto foram fornecidos pela empresa Baker Hughes (Hoffman, 2012). As propriedades mecânicas da halita são obtidas a partir dos resultados experimentais de ensaios triaxiais e de compressão simples na rocha.

2.1 Propriedades mecânicas dos evaporitos

Para conhecer as propriedades mecânicas das rochas salinas foram realizados ensaios de compressão axial (uniaxial e triaxial) em amostras desse material. As medições fornecem os valores necessários para determinar a envoltória de resistência e assim determinar as propriedades mecânicas. Os parâmetros obtidos são o ângulo de atrito interno (ϕ) e a coesão (c).

Na Figura 1 são apresentadas as curvas de tensão *versus* deformação para confinamentos de 0, 300, 3000, 5000, 10000, 15000 PSI (0, 2.1, 21, 34, 69 e 103MPa).

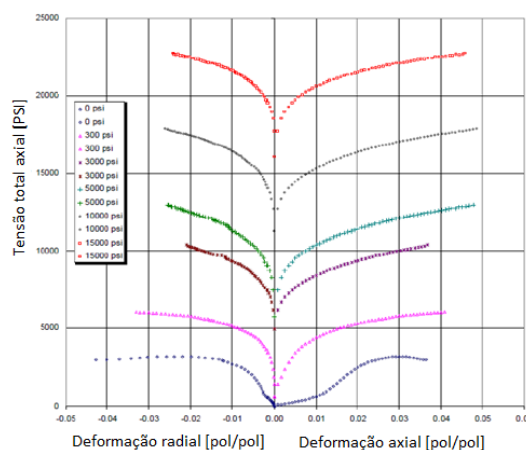


Figura 1-Curvas de tensão *versus* deformação (Hoffman, 2012)

Nas curvas pode ser visto o comportamento dúctil na tendência côncava no início da curva. Este comportamento pode ser relacionado com o começo das fissuras e o fechamento dos poros. Na halita este intervalo é maior quando comparado com outras rochas devido à rocha salina apresentar grande deformação quando submetida a carregamento.

Para obtenção dos parâmetros da resistência da halita foi utilizado o diagrama p-q para calcular a coesão e ângulo de atrito. Os valores

de tensão total axial foram tomados numa deformação axial de 0,03 pol/pol, dado que as curvas apresentam comportamentos dúcteis e não mostram um pico máximo.

Os parâmetros da resistência mecânica da halita obtidos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros de resistência da halita

Parâmetros da resistência		
Ângulo de atrito interno	ϕ [°]	31.02
Coesão	c [MPa]	9.24
Resistência à compressão simples	UCS [MPa]	19.76

2.2 Ensaio experimental na halita

O ensaio de cortador único foi realizado com um cortador PDC de forma circular e afiado. O ensaio foi realizado com velocidade constante e profundidade de corte constante de 0.44mm/s e 0.8382mm, respectivamente. As pressões de confinamento para cada ensaio correspondem à pressão atmosférica, e pressões confinantes de 2.1 MPa e 21 MPa. O ângulo de ataque e o ângulo de inclinação lateral são mantidos constantes em 20° e 0°, respectivamente.

3 METODOLOGIA

Os modelos analíticos utilizados neste comparativo foram validados com resultados de ensaios de cortador único para diferentes materiais (arenito Vosges, calcário Cartago, entre outros). Buscou-se determinar qual destes modelos estima melhor as forças de corte em evaporitos comparando com as obtidas através dos ensaios realizados de cortador único.

Na aplicação do modelo de Gerbaud et al. (2006), a largura do cortador é considerada maior quando comparada com a profundidade de corte, e a força de corte na face do cortador é expressa na Equação 1.

$$F_c^H = \sigma_0 A (1 + k \tan \phi' \tan \theta) \quad (1)$$

Onde k é considerada como 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 ($A \cdot \tan \theta$). σ_0 é a tensão hidrostática no material aglomerado que é obtida a partir do equilíbrio de forças atuantes na lasca.

Existe uma grande incerteza quanto ao cálculo do parâmetro k , já que o valor da superfície de contato pode variar com o volume de material acumulado ao longo do ensaio dependendo do confinamento utilizado.

O modelo de Jianyong (2012), também utilizado nas análises deste trabalho, foi desenvolvido para a obtenção das propriedades de resistência da rocha a partir da medição das forças no ensaio do cortador único. Porém, nas análises deste trabalho busca-se o processo inverso. Segundo o nosso objetivo, conhecendo as propriedades do material, procura-se obter a estimativa das forças de corte e, portanto, o modelo foi utilizado dentro desta premissa. Na formulação do modelo de Jianyong (2012) o parâmetro R representa a energia específica necessária para cortar a rocha. Para a condição atmosférica foi aplicada a relação de equivalência entre a energia específica e a resistência à compressão simples. ($UCS = SE$) (Rafatian et al., 2009). Para as condições de pressão confinante, foram adotadas as observações feitas por Pessier e Fear (1992). Estes autores realizaram ensaios em rocha submetidos a pressões hidrostáticas e sugeriram a utilização da energia específica mínima como sendo equivalente à resistência à compressão confinada (CCS). Partindo-se da conservação de energia e do relacionamento geométrico entre o movimento do cortador e o movimento das lamina, assumindo também os parâmetros R e S (resistência ao cisalhamento na superfície de deslizamento do cortador) como sendo as propriedades intrínsecas da rocha, é apresentada uma expressão da força de corte na Equação 2.

$$F_c^H = \left[S \frac{\cos \theta}{\sin \alpha \cos(\theta + \alpha)} A_t + RL \right] \quad (2)$$

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 terceiro modelo analítico aplicado nesta pesquisa é o do Rahmani et al. (2012). A expressão apresentada neste modelo para a força horizontal é expressa na Equação 3.

$$F_c^H = \frac{A_t}{\sin \alpha} (\tau_c + \mu_c P_c) \left(\frac{\cos(\psi + \theta)}{\cos(\alpha + \psi + \theta)} \right) \quad (3)$$

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 4.

$$\tau_c = c + P_c \tan \varphi \quad (4)$$

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

A determinação da área transversal de corte é determinante para contabilizar o cálculo das forças, sendo ela proporcional ao valor da força de corte. Para um cortador PDC circular, o cálculo da área de corte da face do cortador em contato com a rocha, considera-se a área como um segmento circular dada por:

$$A_c = \left(\frac{R^2}{2} \right) (\alpha - \sin(\alpha)) \quad (5)$$

$$\alpha = 2 \text{ACOS} \left(1 - \left(\frac{d}{R} * \cos \theta \right) \right) \quad (6)$$

Onde A_c é a área de corte do cortador em contato com a rocha, R é o raio do cortador, α é o ângulo que indica o incremento da largura e profundidade de corte em contato com a rocha, d é a profundidade de corte e θ é o ângulo de ataque.

As áreas de corte calculadas para cada revolução são projetadas para obter a área transversal de corte, que é o contato entre a rocha e o material num plano vertical. Esta projeção é função da orientação do cortador

(ângulo de ataque e ângulo de inclinação lateral).

O ângulo de atrito interfacial entre a face do cortador e a rocha pode ser relacionado com o ângulo de ataque do cortador. A partir dos experimentos realizados por Coudyzer e Richard (2005), foram feitas regressões lineares com obtendo a seguinte relação.

$$\psi_n \cong 37,5^\circ - 0,85\theta \quad (7)$$

A inclinação do plano de falha em relação à direção do cortador corresponde à solução do princípio de energia mínima. O princípio de mínima energia para o corte em rocha foi adotado por Detournay e Atkinson, (1991). Neste caso, a força horizontal de corte deve ser minimizada com relação aos ângulos de falha da rocha.

Assim é possível trabalhar com o ângulo de falha expresso na seguinte Equação:

$$\alpha = \frac{\pi}{4} - \frac{\theta + \psi + \varphi}{2} \quad (8)$$

4 RESULTADOS

4.1 Estimativa das forças de corte para pressão atmosférica

A força horizontal de corte estimada através do modelo analítico de Rahmani et al. (2012) coincide no trecho inicial do corte. Para os demais trechos, a estimativa da força se afasta do resultado obtido no ensaio de referência com uma porcentagem de erro de 37.28%.

Gerbaud et al. (2006) e Jianyong (2012) nas suas estimativas das forças horizontais para a condição de pressão atmosférica apresentam uma porcentagem média de erro de 3.25% e 4.46%, respectivamente. Assim, os modelos estimam bem as forças horizontais, com relação àquelas medidas no ensaio.

Considerando-se as estimativas de força para o trecho inicial do corte (até um deslocamento horizontal ao redor de 1.5 mm), a porcentagem de erro dos modelos tende a diminuir.

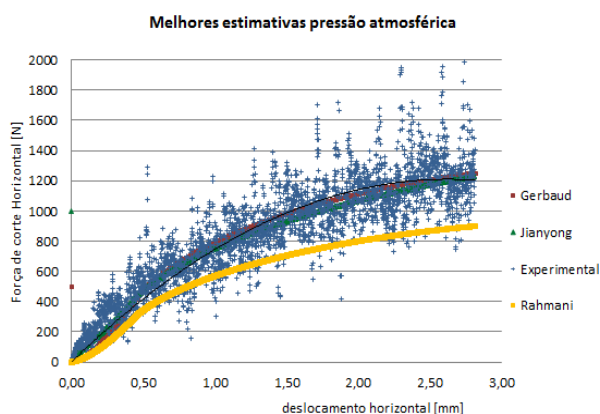


Figura 2 - Comparativo das forças de corte horizontal em halita sob pressão atmosférica

4.2 Estimativa das forças de corte para pressão confinante 2.1 MPa

Para as condições de pressão confinante de 2.1 MPa os modelos de Jianyong (2012) e Gerbaud et al. (2006) subestimam as forças de corte horizontal em aproximadamente 37.67% de erro médio para o primeiro modelo e 36.50% de erro no segundo modelo. Já Rahmani et al. (2012) oferecem resultados que subestimam ainda mais as forças de corte horizontal com erro médio de 75.47% (Figura 3).

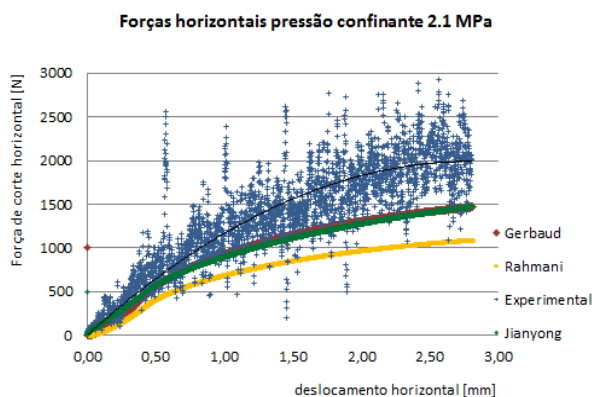


Figura 3 - Comparativo das forças de corte horizontal em halita sob pressão confinante 2.1 MPa

4.3 Estimativa das forças de corte para pressão confinante 21 MPa

O ensaio experimental para essa 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.

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.

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 (Figura 4).

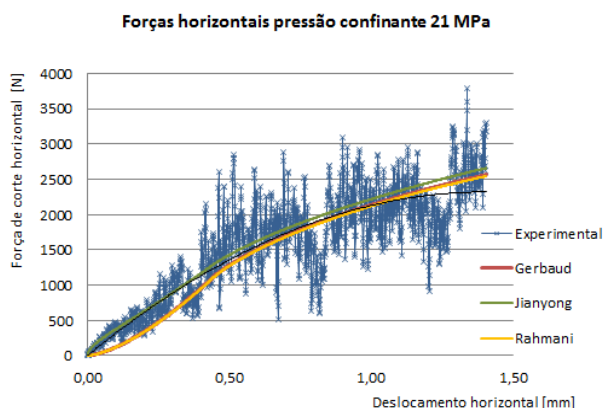


Figura 4 - Comparativo das forças de corte horizontal em halita sob pressão confinante 21 MPa

Uma análise mais detalhada do comportamento de cada modelo nas estimativas das forças de corte horizontal é apresentada nas Figuras 5 a 7. Nelas são comparadas as estimativas de cada modelo com a linha de tendência dos resultados experimentais nas três condições de pressão confinante.

Os modelos de Gerbaud et al. (2006) e de Jianyong (2012) mostram estimativas aceitáveis nos casos de pressão atmosférica e condições de pressão de confinante de 21MPa. Já na condição de baixas pressões (2.1 MPa) as forças de corte horizontal foram subestimadas (Figuras 5 e 6).

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* pressão de confinamento para seus resultados de ensaio de cortador único. 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.

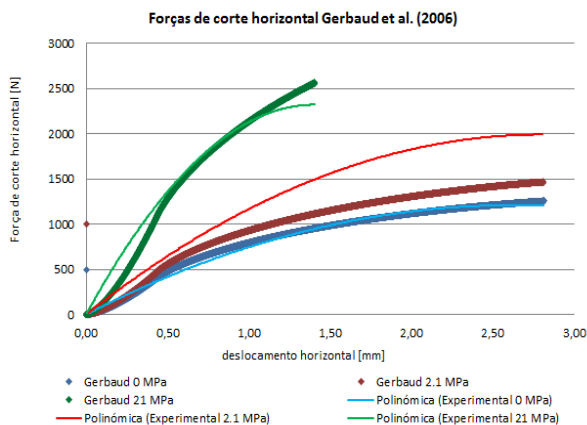


Figura 5 - Comportamento das estimativas de Gerbaud et al. (2006) para diferentes condições de pressão confinante

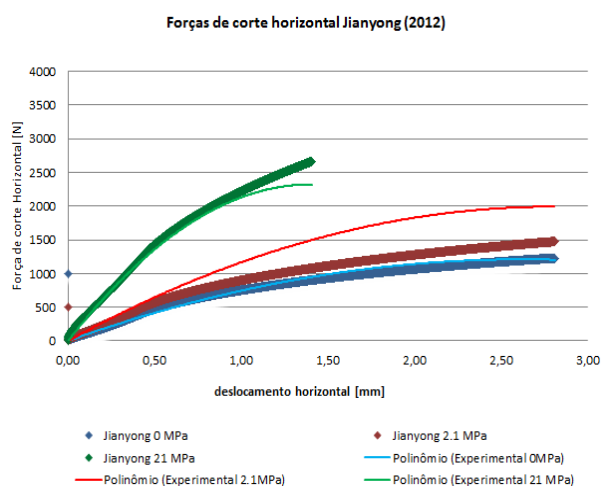


Figura 6 - Comportamento das estimativas de Jianyong (2012) para diferentes condições de pressão confinante

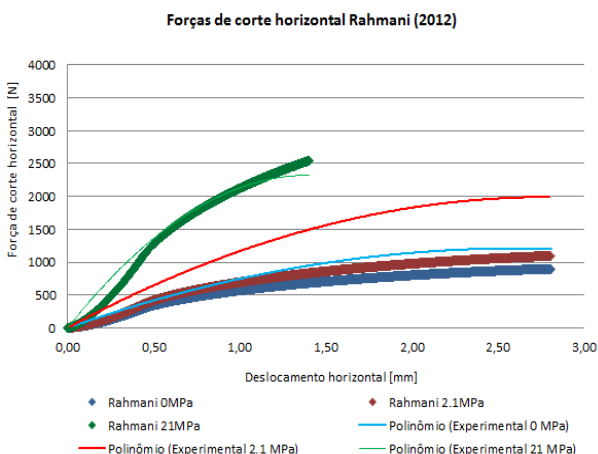


Figura 7 - Comportamento das estimativas de Rahmani et al. (2012) para diferentes condições de pressão confinante

No caso do comportamento do modelo de Rahmani (2012), (Figura 7), ele apresenta as melhores estimativas da força de corte horizontal para o caso de altas pressões de confinamento. Nas estimativas em condições de pressão atmosférica e baixas pressões o modelo não se ajusta muito bem com os resultados experimentais.

5 CONCLUSÕES

Os modelos analíticos para estimar as forças de corte geradas no processo de raspagem da rocha podem ser uma alternativa para diminuir os altos custos de investimento e de tempo que são gastos na execução de ensaios experimentais e modelos numéricos.

O evaporito composto pelo mineral halita é uma rocha conhecida por resultar em problemas de perfuração que podem ocasionar fechamento do poço e perturbações nas rochas adjacentes. A validação da modelagem analítica do processo mecânico de corte em halita é uma etapa importante desse tipo de estudo.

Este trabalho visa aplicar os modelos analíticos que relacionam as propriedades mecânicas intrínsecas da rocha com a geometria do cortador para a rocha do tipo evaporito (halita).

Os modelos apresentados por Jianyong (2012) e Rahmani et al. (2012) levam em conta o efeito da deformação do material cortado na face do cortador durante a formação de novas bandas cisalhantes. As estimativas das forças através desses modelos foram concordantes com o experimento de referência para condições de altas pressões confinantes. No entanto o modelo de Rahmani et al. (2012) não conseguiu estimar adequadamente as forças nas condições de baixas pressões (2.1 MPa) e de pressão atmosférica.

Os modelos de Jianyong (2012) e Gerbaud (2006) apresentam estimativas de forças muito semelhantes entre si. Nas condições de pressão atmosférica e altas pressões elas concordam com os resultados experimentais do ensaio do cortador único. No entanto, nas estimativas de forças sob a condição de baixas pressões confinantes, os dois modelos subestimam as

forças. Essa diferença entre a curva modelada e a experimental para condições de baixa pressão poderia ser explicada através de uma observação feita por Rafatian et al., 2009, que descreve um aumento significativo na energia e as forças de corte experimental, para baixas pressões de confinamento. Este incremento seria responsável pela obtenção de forças acima do esperado nos ensaios experimentais.

A influência da profundidade de corte na geração das forças também foi avaliada e observou-se que, conforme este parâmetro aumenta, as forças de corte incrementam linearmente. Resultado semelhante foi observado experimentalmente por Richard et al. (2012).

Os modelos de Gerbaud (2006), Jianyong (2012) poderiam ser sugeridos para a estimativa das forças de corte nos evaporitos (halita) sob condições de pressão atmosférica e altas pressões de confinamento.

REFERÊNCIAS

- Atkins, A.G. (2003). *Modelling metal cutting using modern ductile fracture mechanics: quantitative explanations for some longstanding problems*. Department of Engineering University of Reading International Journal of Mechanical Sciences. 45: 373-396.
- Carrapatoso, C. M. (2011) *Análise dos Modelos Analíticos de Otimização de Perfuração baseados em Energia Específica para Formações Evaporíticas*. Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil. Brasil.
- Gerbaud, L., Menand, S., Sellami, H. (2006) *PDC Bits: All Comes From the Cutter/Rock Interaction*. Society of Petroleum Engineers Journal, No. 98988, École des Mines de Paris. IADC/SPE Drilling Conference, 21-23 February, Miami, Florida, USA.
- Hoffman, O.: (2012) *Strain Rate Dependent Mechanical Properties of Quarried Salt*. T-11-02-0184 Geomechanics. Relatório Interno da Baker Hughes. The Woodlands, Texas.
- Jianyong, Pei. (2012) *Interpretation of Single Cutter Tests for Rock Mechanical Properties*. Baker Hughes, Houston, TX USA. American Rock Mechanics Association 12-142. 46th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, Chicago, Illinois.
- Merchant, M.E.: (1945) *Mechanics of the metal cutting process I. Orthogonal cutting and a type 2 lasca*. Research Department, The Cincinnati Milling Machine Company. Journal of Applied Physics. Vol.16, No.5 pag: 267-275. Cincinnati Ohio.
- Merchant, M.E.: (1945) *Mechanics of the metal cutting process II. Plasticity conditions in orthogonal cutting*. Research Department, The Cincinnati Milling Machine Company. Journal of Applied Physics. Vol.16, No.6 pag: 318-324. Cincinnati Ohio.
- Rahmani, R., Smith, J. R., Dahi taleghani, A. (2012) *Analytical modeling of PDC single cutter-rock interaction under confining pressure*. Louisiana State University, Baton Rouge, LA, USA. American rock mechanics association. 46th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, June 24-27, Chicago, Illinois.