



Laura Yarick Barragán Rodríguez

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

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Sergio Augusto Barreto da Fontoura

Rio de Janeiro
Novembro de 2015



Laura Yarick Barragán Rodríguez

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

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Sergio Augusto Barreto da Fontoura

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Celso Romanel

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Dr. Affonso Marcelo Fernandes Lourenço

Baker Hughes

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do
Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 26 de Novembro de 2015

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Laura Yarick Barragán Rodríguez

Gradou-se em Engenharia Civil na Universidade Industrial de Santander (Colômbia) em 2008. Realizou a Especialização em Gerenciamento e Supervisão de Projetos Cíveis na Universidade Pontifícia Bolivariana (Colômbia) em 2012. Trabalhou em projetos do setor saúde, educação e comércio. Ingressou no mestrado de engenharia civil em 2013, na Pontifícia Universidade Católica do Rio, desenvolvendo Dissertação na linha de pesquisa de Modelagem Analítica em rochas evaporíticas.

Ficha Catalográfica

Barragan Rodriguez, Laura Yarick

Análise de modelos analíticos para estimativa de forças de corte no ensaio de cortador único em rochas evaporíticas / Laura Yarick Barragan Rodriguez ; orientador: Sergio Augusto Barreto da Fontoura. – 2015.

94 f. : il.(color.); 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2015.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Forças de corte. 3. Ensaio de cortador único. 4. Evaporitos. 5. Halita. I. Fountoura, Sergio Augusto Barreto da. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

*Para minha Mãe pelo apoio e confiança
Para meus sobrinhos Laura Sofia e Hansel David*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por todas as oportunidades e bênçãos que sempre me brinda, por me fazer lembrar que eu posso, que eu tenho a força e meu limite sou eu mesma.

À minha mãe pelo seu esforço constante para brindar-me melhores oportunidades, pelo seu amor e conselhos sábios. Porque você é a inspiração para todos os meus logros.

A meu orientador, Sergio A. B. da Fontoura, obrigada pela oportunidade de trabalhar com você, pelo apoio oferecido durante todo o tempo do mestrado.

Aos professores da pós-graduação da PUC-Rio, pelos conhecimentos e ampla experiência que oferecem nas aulas. Obrigada por tudo o ensinado nesses anos. A os funcionários do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, à Rita Leite pela sua orientação em todos os processos e pela paciência.

Ao pessoal do GTEP especialmente Carla Carrapatoso, muito agradecida por sua orientação e ajuda incondicional. Aos colegas Daniel Melo, Guilherme, Emmanuel, Danilo Jimenez, Nelson, Ronald Macazana, Dalma Cerro, Dilia Lopez, Juan David Velilla, Michel, Rosi Silva; por estarem sempre dispostos a ajudar-me na realização deste trabalho.

Aos amigos que viraram parte da família que fiz em Brasil, por seu apoio, carinho e amizade, especialmente a Juan Manuel Girão por brindar-me mais que uma amizade. A Marcela Tarazona por sua acolhida na cidade maravilhosa; Lorena Chamorro, Rhaissa Rodrigues, José Moreno, Edison Polo, Sergio Alvares, Rossio García, Jimmy Vásquez, Holger Freddy, David Pabón, Gustavo Cuzma, por tantas boas lembranças. A minha amiga Yelenith Becerra pela amizade infinita e por sua grata visita com a que virou partícipe de este sonho.

Aos professores Jaime Suarez Diaz e Silvia Tijo pelas suas indicações e conselhos para ingressar ao mestrado de engenharia civil na PUC-Rio.

Agradecimento a CAPES e à PUC-Rio por serem os apoiadores e financiadores das bolsas que tornaram possível a realização de este trabalho.

Finalmente a todos os que passaram por esta história. Ela é parte de vocês também. A vocês meu tributo e carinho.

Resumo

Rodríguez, Laura Yarick Barragán; Fontoura, Sergio Augusto Barreto da. **Análise de Modelos Analíticos para Estimativa de Forças de Corte no Ensaio de Cortador Único para Rochas Evaporíticas.** Rio de Janeiro, 2015. 94p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

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 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 obtendo estimativas concordantes com resultados experimentais. No entanto, os ensaios experimentais geram altos custos de investimento, e por sua vez, as simulações numéricas demandam tempo muito alto para realizar análises de boa qualidade. Modelos analíticos procuram eliminar o fator custo e tempo, gerando resultados confiáveis da simulação do processo de corte, similares aos resultados das análises experimentais e numéricas. 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 deste 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 dois dos modelos avaliados nas condições de pressões atmosféricas e altas pressões de confinamento.

Palavras-chave

Forças de corte; Ensaio de cortador único; Evaporitos; Halita.

Abstract

Rodríguez, Laura Yarick Barragán; Fontoura, Sergio Augusto Barreto da. **Analysis of Analytical Models for Estimation of Cut Forces of Single Cutter Test Applied to Evaporite Rocks.** Rio de Janeiro, 2015. 94p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The oil industry carries out continuous research to improve drilling operations, to increase the penetration rate and to reduce non-productive time. Several studies analyze the rock cutting process using PDC bits (Polycrystalline Diamond Compact). Experiments with a single cutter machine measure the interaction between the rock and the cutter. Furthermore, numerical models aim to simulate the physical process and calculate results as possible consistent with experimental data. However, experimental tests are expensive and robust and numerical simulations are time consuming. Analytical models aim to reduce both cost and time factor, while providing reliable results for simulation of cutting process. The analytical models presented here allow us to estimate the forces measured on the cutter in the rock cutting process. The models take into account the balance of forces acting on the cutter face and these forces are calculated based on geometry and material properties of both cutter and rock. The rock evaluated in this work is an evaporite. The application of such type of methodology to simulate the salt rock drilling requires the analytical model to consider the increase of forces due to rock ductile behavior and the existence of plastic deformation and agglomeration of material on the cutter's face in order to obtain adequate estimation of the cutting forces. Two of the evaluated models in this work presented agreement with experimental results, both under atmospheric and high pressure conditions.

Keywords

Shear Forces; Single cutter test; Evaporite; Halite.

Sumário

1 . Introdução	17
1.1. Relevância e motivação do estudo	17
1.2. Objetivos	19
1.2.1. Objetivo geral	19
1.2.2. Objetivo específico	19
1.3. Metodologia	19
1.4. Organização da tese	20
2 . Revisão bibliográfica	21
2.1. Processo de corte em rocha	21
2.1.1. Brocas PDC	21
2.1.2. Ensaio de cortador único	23
2.1.3. Forças no processo de corte e conceito de energia específica	26
2.1.4. Observações experimentais	27
2.2. Abordagem analítica do processo de corte em metais	36
2.2.1. Corte ortogonal	37
2.2.2. Corte oblíquo	41
2.3. Modelos analíticos do processo de corte em rocha	43
2.3.1. Modelo analítico Detournay e Defourny (1992)	43
2.3.2. Modelo analítico Gerbaud et al. (2006)	46
2.3.3. Modelo analítico Jianyong (2012)	48
2.3.4. Modelo analítico Rahmani et al. (2012)	49
2.3.5. Modelo analítico Coudyzer e Richard (2005)	51
2.3.6. Modelo analítico Melo (2014)	53
3 . Experimentos de laboratório em halita	55
3.1. Obtenção das propriedades dos evaporitos	55
3.2. Ensaio de cortador único	58

3.2.1. Resultados das forças de corte	59
4 . Metodologia	61
4.1. Modelos utilizados	61
4.2. Área de corte	63
4.3. Ângulo de atrito interfacial	64
4.4. Ângulo de falha da rocha	66
5 . Resultados	67
5.1. Estimativas das forças de corte dos modelos analíticos versus força de corte experimental – halita pressão atmosférica	67
5.2. Estimativas das forças de corte dos modelos versus força de corte experimental – halita pressão confinante 2.1 MPa	70
5.3. Estimativas das forças de corte dos modelos versus força de corte experimental – halita pressão confinante 21 MPa	73
5.4. Análise paramétrica	80
6 . Conclusões e trabalhos futuros	85
6.1. Conclusões	85
6.2. Trabalhos futuros	87
7 . Referências bibliográficas	89

Lista de figuras

Figura 2.1-Brocas PDC (Plácido, 2014)	22
Figura 2.2-Exposição, ângulos de ataque e inclinação lateral de um cortador (Plácido, 2014)	22
Figura 2.3-Célula de pressão do ensaio do cortador único	25
Figura 2.4-Forças sob o cortador e suas direções	25
Figura 2.5-Modos de falha	28
Figura 2.6-Forças de corte linear e não linear em função da profundidade de corte (Richard e al., 1998)	28
Figura 2.7- Força de corte horizontal com duas profundidades de corte diferentes – arenito Wildmoor Red	29
Figura 2.8-Variação das forças de corte com a profundidade de corte para diferentes materiais (Richard et al., 2012)	29
Figura 2.9-Variação da energia específica mecânica com a profundidade de corte (Zhang et al., 2011)	30
Figura 2.10-Correlação entre a resistência à compressão simples (UCS) e a energia específica intrínseca (ε) de diferentes rochas	31
Figura 2.11-Variação da energia específica mecânica com a profundidade de corte para diferentes materiais sob pressão confinante de 250PSI	31
Figura 2.12 -Correlação entre a energia específica e a pressão confinante (Rafatian et al., 2009)	32
Figura 2.13-Mecanismo de corte sob condições atmosféricas e sob pressão confinante (Rafatian et al., 2010)	33
Figura 2.14-Vistas do lado plano e rugoso do material cortado	33
Figura 2.15 -Força de corte do mármore de Carthago sob incrementos de pressão confinante a) pressão atmosférica	34
Figura 2.16-Influência do ângulo de ataque na energia específica – mármore de Cartago (Rajabov et al., 2012)	35
Figura 2.17-Influência do ângulo de inclinação lateral na energia específica – mármore de Cartago (Rajabov et al., 2012)	35

Figura 2.18-Influência do ângulo de ataque na energia específica	36
Figura 2.19-Representação da deformação cisalhante natural do material (Merchant, 1945)	37
Figura 2.20-Análise do equilíbrio de forças	38
Figura 2.21- Corte ortogonal e oblíquo em metais	41
Figura 2.22 - Diagrama do corte oblíquo	42
Figura 2.23 - Diagrama de forças para a análise do ângulo de deslocamento de lasca (Shamoto e Altintas, 1999)	42
Figura 2.24-Forças atuando em um cortador afiado	44
Figura 2.25-Modelo de forças de corte na face do cortador com presença de material aglomerado na sua borda	46
Figura 2.26-Modelo de corte por meio de pilha de lâminas	48
Figura 2.27-Esquema de forças para o corte em rocha sob pressão confinante. (Rahmani et al., 2012)	50
Figura 2.28-Representação gráfica das forças de corte, suas direções e ângulos de atrito (Coudyzer e Richard, 2005)	51
Figura 2.29-Ângulo de atrito normal em função do ângulo de ataque para diferentes ângulos de inclinação lateral	52
Figura 2.30-Ângulo de atrito lateral em função do ângulo de inclinação lateral para diferentes ângulo de ataque	52
Figura 2.31-Esquema de forças normal, de atrito axial e de atrito lateral para corte em rocha (Melo, 2014)	53
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)	54
Figura 3.1-Curvas de tensão versus deformação	56
Figura 3.2 – Diagrama p-q para obtenção parâmetros	57
Figura 3.3-Forças de corte no ensaio de cortador único 0 MPa	59
Figura 3.4- Forças de corte no ensaio de cortador único 2.1 MPa	59
Figura 3.5- Forças de corte no ensaio de cortador único 21 MPa	60
Figura 4.1-Cálculo da área na primeira revolução no processo de corte	64
Figura 4.2- Cálculo da área nas revoluções posteriores à primeira no processo de corte (Modificado de Rade e	

Westergren, 2004)	64
Figura 4.3-Linha de tendência para obtenção do ângulo de atrito normal em função do ângulo de ataque	65
Figura 4.4- Linha de tendência para obtenção do ângulo de atrito lateral em função do ângulo de inclinação lateral	65
Figura 5.1-Estimativa das forças de corte horizontal e força de corte experimental em condições de pressão atmosférica	67
Figura 5.2- Estimativas das forças de corte vertical e força de corte experimental em condições de pressão atmosférica	68
Figura 5.3- Melhores estimativas das forças de corte horizontal versus forças medidas experimentalmente em halita sob pressão atmosférica	69
Figura 5.4- Melhores estimativas das forças de corte vertical versus forças medidas experimentalmente em halita sob pressão atmosférica	70
Figura 5.5- Estimativas das forças de corte horizontal e força de corte experimental sob pressão confinante 2.1 Mpa	71
Figura 5.6-Estimativas das forças de corte vertical e força de corte experimental sob pressão confinante 2.1 MPa	71
Figura 5.7- Melhores estimativas das forças de corte horizontal versus forças medidas experimentalmente em halita sob pressão confinante 2.1 MPa	72
Figura 5.8- Melhores estimativas das forças de corte vertical versus forças medidas experimentalmente em halita sob pressão confinante 2.1 MPa	72
Figura 5.9- Estimativas das forças de corte horizontal e força de corte experimental sob pressão confinante 21 MPa	73
Figura 5.10-Estimativas das forças de corte vertical e força de corte experimental sob pressão confinante 21 MPa	74
Figura 5.11- Melhores estimativas das forças de corte horizontal versus forças medidas experimentalmente em halita sob pressão confinante 21 MPa	75
Figura 5.12- Melhores estimativas das forças de corte vertical versus forças medidas experimentalmente em halita sob pressão	

confinante 21 MPa	75
Figura 5.13- Comportamento das estimativas de Gerbaud et al. (2006) para diferentes condições de pressão confinante	77
Figura 5.14- Comportamento das estimativas de Jianyong (2012) para diferentes condições de pressão confinante	77
Figura 5.15-Comportamento das estimativas de Rahmani et al. (2012) para diferentes condições de pressão confinante	78
Figura 5.16 -Comparação entre as forças de corte horizontais estimadas com modelos analíticos e o resultado experimental na halita - Pressão atmosférica	79
Figura 5.17-Comparações entre as forças de corte verticais estimadas com modelos analíticos e o resultado experimental na halita - Pressão atmosférica	79
Figura 5.18-Comparações entre as forças de corte laterais estimadas com modelos analíticos e o resultado experimental na halita - Pressão Atmosférica	80
Figura 5.19- Forças de corte horizontal estimadas (Melo, 2014) e medições experimentais na halita - Pressão Atmosférica	80
Figura 5.20- Variação da força de corte horizontal em função da profundidade de corte - Pressão Atmosférica	81
Figura 5.21- Variação da força de corte horizontal em função da profundidade de corte - Pressão confinante 2.1MPa	82
Figura 5.22- Variação da força de corte horizontal em função da profundidade de corte - Pressão confinante 21MPa	82
Figura 5.23- Influência do fator λ na estimativa de forças de corte no modelo de Gerbaud (2006)	83
Figura 5.24- Variação da força de corte horizontal em função da pressão confinante	84
Figura 5.25- Variação da força de corte horizontal em função do ângulo de ataque	84

Lista de Siglas e Símbolos

A_t	Área transversal de corte
b	Intercepto da linha de tensão com o eixo Y
c	Coesão da rocha
CCS	Resistência à compressão confinada da rocha
d	Profundidade de corte
d^*	Profundidade de corte crítica
F_b	Forças atuando na superfície posterior do cortador
F_c	Força de corte resultante no cortador
F_c'	Força de corte resultante na rocha
F_{ch}	Forças atuando na superfície do chanfro
F_c^H	Força de corte horizontal
F_c^R	Força de corte radial
F_c^V	Força de corte vertical
F_r^S	Força resultante cisalhante no plano da falha
Hz	Hertz
J/cm^3	Unidades de energia (Joules/cm ³)
k	Relação entre a resistência cisalhante e a tensão normal do material
lx	Distância horizontal percorrida pelo cortador
m	Coeficiente de variação da energia específica segundo o tipo de cortador
MPa	Unidades de energia (Megapascal)
MSE	Energia mecânica específica
m/s	Unidades deslocamento angular
$Pend$	Pendente da linha de tendência
p_b	Pressão de confinamento
p_p	Pressão de poros
PDC	Brocas de compacto de diamante policristal no
PSI	Unidades de força (Libra por polegada quadrada)
pol/s	Polegadas por segundo

<i>RAD</i>	Radianos
<i>ROP</i>	Taxa de penetração de rocha
<i>RPM</i>	Velocidade angular da broca dada em revoluções por minuto
<i>rot/s</i>	Rotações por segundo
<i>S</i>	Energia gasta no processo de penetração da rocha
<i>S_n</i>	Tensão normal
<i>S₀</i>	Resistência cisalhante do metal
<i>S_s</i>	Tensão cisalhante no plano de corte do metal
<i>T</i>	Torque aplicado
<i>t₁</i>	Espessura da lasca antes de cortada
<i>t₂</i>	Espessura da lasca depois de cortada
<i>UCS</i>	Resistência à compressão simples da rocha
<i>V</i>	Volume de rocha cortada
<i>WOB</i>	Peso sobre a broca
<i>w</i>	Largura do cortador
<i>α</i>	Ângulo de falha da rocha
<i>α_n</i>	Ângulo de falha normal
<i>α_s</i>	Ângulo de falha lateral
<i>β</i>	Ângulo de inclinação lateral
<i>γ_{xy}</i>	Deformação cisalhante
<i>ΔS</i>	Deslocamento das bandas em relação ao plano de falha
<i>ΔX</i>	Espessura da banda
<i>ε</i>	Energia específica intrínseca (não considera desgaste no cortador)
<i>ε₀</i>	Energia específica em condições atmosféricas
<i>ζ</i>	Relação entre as forças vertical e horizontal atuando na face do cortador
<i>λ</i>	Razão entre superfície horizontal do material esmagado relacionada com o ângulo de ataque
<i>θ</i>	Ângulo de ataque do cortador
<i>μ</i>	Coeficiente de atrito no desgaste
<i>μ_c</i>	Coeficiente de atrito entre as bandas de cisalhamento e a rocha intacta

τ_c	Tensão cisalhante
ρ	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	Tensão hidrostática no material aglomerado
φ	Ângulo de atrito interna da roca
φ'	Ângulo de atrito entre a rocha esmagada e a rocha intacta
ψ	Ângulo de atrito interfacial entre a rocha e a face do cortador
ψ_n	Ângulo de atrito interfacial normal
ψ_s	Ângulo de atrito interfacial lateral
°	Graus