



Daniel Duque Estrada Fernandes de Melo

**Modelo analítico 3D de corte e sua aplicação
na obtenção de propriedades de rocha a
partir de testes de cortador simples**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Arthur Martins Barbosa Braga
Co-orientador: Prof. Sérgio Augusto Barreto da Fontoura

Rio de Janeiro
Abril de 2014



Daniel Duque Estrada Fernandes de Melo

**Modelo analítico 3D de corte e sua aplicação
na obtenção de propriedades de rocha a
partir de testes de cortador simples**

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

Prof. Arthur Martins Barbosa Braga

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Sérgio Augusto Barreto da Fontoura

Co-orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. João Carlos Ribeiro Plácido

Petrobrás/PUC-Rio

Dr. Affonso Marcelo Fernandes Lourenço

Baker-Hughes

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do

Centro Técnico-Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 8 de Abril 2014

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

Daniel Duque Estrada Fernandes de Melo

Graduou-se em Engenharia de Petróleo na PUC-Rio em Dezembro de 2011. Durante a graduação foi bolsista de pesquisa do programa PRH-ANP. Em 2012 ingressou no curso de Mestrado em Engenharia Mecânica com ênfase em Petróleo e Gás na PUC-Rio desenvolvendo dissertação de mestrado na linha de pesquisa de Perfuração em Engenharia de Petróleo.

Ficha Catalográfica

Melo, Daniel Duque Estrada Fernandes de

Modelo analítico 3D de corte e sua aplicação na obtenção de propriedades de rocha a partir de testes de cortador simples / Daniel Duque Estrada Fernandes de Melo ; orientador: Arthur Martins Barbosa Braga ; co-orientador: Sérgio Augusto Barreto da Fontoura. – 2014.

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

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2014.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Corte em rocha. 3. Ângulos de falha. 4. Angulos de corte. I. Braga, Arthur Martins Barbosa. II. Fontoura, Sérgio Augusto Barreto da. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Dedico aos meus familiares pelo
apoio e incentivo.

Agradecimentos

Agradeço a meus familiares pelo apoio e incentivo durante a dissertação;

Agradeço ao meu orientador, Arthur Braga, e ao meu co-orientador, Sérgio Fontoura, pela orientação e transferência de conhecimento;

Agradeço a CNPq e à PUC-Rio pelos auxílios concedidos, sem os quais essa dissertação não seria possível.

Agradeço aos meus amigos da PUC-Rio pela parceria nos momentos de estudo;

Agradeço aos doutores que participaram da Comissão Examinadora.

Resumo

Melo, Daniel Duque Estrada Fernandes; Braga, Arthur Martins Barbosa (Orientador); Fontoura, Sergio Augusto Barreto (Co-Orientador). **Modelo analítico 3D de corte e sua aplicação na obtenção de propriedades de rocha a partir de testes de cortador simples**, Rio De Janeiro, 2014, 108p, Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A mecânica do corte de rochas vem sendo estudada a fim de proporcionar um melhor entendimento do processo de perfuração. A energia de corte é principalmente dependente da orientação do cortador e das propriedades da rocha. Foi previamente relatado na literatura que a energia específica de corte é fortemente dependente dos ângulos de inclinação posterior (*backrake*) e lateral (*siderake*) da broca. Embora existam boas tentativas de desenvolver uma solução analítica para descrever o processo de corte da rocha, os efeitos do ângulo de inclinação lateral não são levados em conta na maioria dos modelos. Esta dissertação propõe uma solução analítica para o corte de rocha considerando ambos os ângulos de inclinação relevantes, tanto o *backrake* quanto o *siderake*. Um modelo de corte é proposto considerando cortadores afiados e desgastados, e as soluções obtidas são corroboradas através de uma investigação experimental com base no corte de argilas. Um estudo paramétrico para duas rochas hipotéticas é realizado empregando o novo modelo proposto, mostrando que *backrakes* e/ou *siderakes* maiores tendem a aumentar exponencialmente a energia específica de corte. Todavia, a influência do *backrake* é fortemente dependente do ângulo de atrito interno da rocha. Os efeitos da profundidade de corte e pressão de confinamento também são investigados. Além disso, os efeitos do desgaste do cortador são apresentados através do diagrama de E-S.

Palavras-Chave

Corte em Rochas; Ângulos de corte; Propriedades de rochas.

Abstract

Melo, Daniel Duque Estrada Fernandes; Braga, Arthur Martins Barbosa (Advisor); Fontoura, Sergio Augusto Barreto (Co-Advisor). **3D Analytical Model for Cutting Applied in the Determination of Rock Properties Through Simple Cutting Tests**, Rio de Janeiro, 2014, 108p, MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Rock cutting mechanics has been studied in order to better understand drilling process in cutter scale. The cutting energy is mainly dependent of cutter orientation and rock properties. It was previously reported in the literature that specific energy is strongly dependent of *backrake* and *siderake*. Although there have been good attempts to develop an analytical solution to describe the cutting process, the *siderake* effects are not taken into account. This Thesis proposes an analytical solution for the rock cutting considering both *backrake* and *siderake*. The proposed model is considered for sharp and blunt cutters and the solution agrees with preliminary experimental investigation based on the cutting action of clays. With the new model, a parametric study for two hypothetical rocks is made, showing that higher *backrakes* and/or *siderakes* increase the specific energy in an exponential-like trend. The *backrake* effect is strongly dependent of the rock internal friction angle though. The effects depth of cut and confining pressure were also investigated. Moreover, the effects of cutter bluntness are presented through the E-S diagram.

Keywords

Rock Cutting; Siderake and Backrake Angles, Rock Properties.

Sumário

1 Introdução	16
1.1 Definição do problema	16
1.2 Objetivo do trabalho	17
1.3 Escopo do trabalho	18
2 Revisão Bibliográfica	19
2.1 Corte ortogonal em metais	20
2.2 Corte oblíquo em metais	24
2.3 Corte em rocha 2D	27
2.4 Corte em rocha 3D	35
2.5 Experimentos de single cutter no corte de rochas	38
2.6 Estimativa de propriedades de rocha a partir de testes de cortador simples	48
3 Modelo analítico 3D para corte em rocha	54
3.1 Cortador afiado a pressão atmosférica	54
3.2 Cortador afiado com pressão confinante e pressão de poros	64
3.3 Cortador desgastado	66
3.4 Solução para o caso 3D	68
4 Efeitos dos parâmetros de teste na energia específica	72
4.1. Efeitos do <i>backrake</i>	72
4.2. Efeitos do <i>siderake</i>	77
4.3. Efeitos da profundidade de corte	81
4.4. Efeitos da pressão confinante	84
4.5. Efeitos do desgaste	85
5 Metodologia para obtenção de propriedades de rocha	89
6 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	91
6.1 Conclusões	91
6.2 Sugestões para trabalhos futuros	92
Referência Bibliográfica	94
Apêndice A	97
Apêndice B	102

Lista de Figuras

Figura 2.1: Bandas de cisalhamento geradas pelo corte ortogonal em metais. Extraído de Atkins (2003).	21
Figura 2.2: Análise de forças no corte ortogonal em metais proposta por Merchant (1945).	23
Figura 2.3: Tipos de corte em metais: a) Corte ortogonal; b) Corte oblíquo.	24
Figura 2.4: Esquema de corte oblíquo em metal proposto por Shamoto e Altintas (1999) com base nas velocidades.	26
Figura 2.5: Diagrama de velocidades para análise do ângulo de deslocamento do chip proposto por Shamoto e Altintas (1999).	26
Figura 2.6: Esquema de corte ortogonal em rocha proposto por Evans (1962).	27
Figura 2.7: Força de corte em função da exposição do cortador para diferentes regimes de corte. Extraído de Detournay <i>et. al.</i> (1998).	28
Figura 2.8: Forças atuantes em um cortador desgastado. Extraído de Detournay e Defourny (1992).	29
Figura 2.9: Diagrama E-S proposto por Adachi <i>et. al.</i> para o corte 2D em rocha.	31
Figura 2.10: Esquema de tensões atuantes no bloco de rocha falhado proposto por Gerbaud <i>et. al.</i> (2006).	32
Figura 2.11: Esquema de forças para o corte 2D em rocha quando há pressão confinante. Extraído de Rahmani <i>et. al.</i> (2012).	34
Figura 2.12: Esquema de forças para o corte 2D em rocha quando há aglomeração de material na frente do cortador. Extraído de Rahmani <i>et. al.</i> (2012).	35
Figura 2.13: Esquema de forças, suas direções e definição dos ângulos de fricção apresentados por Coudyzer e Richard (2005).	36
Figura 2.14: Esquema de forças 3D proposto por Rajabov (2012).	37
Figura 2.15: Ângulo de fricção axial em função do <i>backrake</i> para diferentes <i>siderakes</i> obtido por Coudyzer e Richard (2005).	39
Figura 2.16: Ângulo de fricção lateral em função do <i>siderake</i> para diferentes <i>backrakes</i> obtido por Coudyzer e Richard (2005)	39
Figura 2.17: Energia específica de corte em função do <i>backrake</i> obtida por Rajabov (2012).	39
Figura 2.18: Energia específica em função do <i>backrake</i> , adimensionalizada pela energia de um cortador a 15° <i>backrake</i> , obtida por Jianyong (2012).	40

Figura 2.19: Energia específica em função do <i>siderake</i> para diferentes pressões de confinamento, obtida por Rajabov (2012).	40
Figura 2.20: Força tangencial em função da força axial de corte obtida por Rajabov (2012).	41
Figura 2.21: Energia específica em função da profundidade de corte para diferentes <i>backrakes</i> obtida por Rajabov (2012).	42
Figura 2.22: Energia de corte (expressa por em função da força dividida pela área) em função da profundidade de corte, obtida por Jianyong (2012).	42
Figura 2.23: Força de corte em função da exposição do cortador para diferentes rochas. Extraído de Richard <i>et. al.</i> (2012).	43
Figura 2.24: Energia de corte em função da área do cortador para diferentes geometrias de cortador. Extraído de Richard <i>et. al.</i> (2010).	43
Figura 2.25: Energia específica associada ao corte em diferentes pressões confinantes e comparação com a Resistência Confinada da rocha para Mármore de Cartago. Extraído de Rafatian <i>et. al.</i> (2009).	44
Figura 2.26: Aglomeração de material a frente do cortador após o experimento. Extraído de Rafatian <i>et. al.</i> (2009).	45
Figura 2.27: Efeitos da pressão confinante na energia específica para Folhelho Mancos. (Extraído de Detournay e Tan (2002).	45
Figura 2.28: Plano contendo todas as soluções possíveis para o caso 2D de corte em rocha. Extraído de Adachi <i>et. al.</i> (1996).	46
Figura 2.29: Resultados obtidos para Arenitos Red Wildmoor representados através do diagrama E-S para cortadores afiados e desgastados. Extraído de Adachi <i>et. al.</i> (1996).	47
Figura 2.30: Resultados para a determinação da linha de corte para diferentes tipos de rocha. Extraído de Adachi <i>et. al.</i> (1996).	47
Figura 2.31: Relação entre energia intrínseca de corte a 20° <i>backrake</i> e a resistência não confinada da rocha. Extraído de Richard <i>et. al.</i> (1998).	49
Figura 2.32: Comparação entre resistência não confinada da rocha e energia específica de corte para Arenitos não saturados. Extraído de Schei <i>et. al.</i> (2000).	50
Figura 2.33: Comparação entre resistência não confinada da rocha e energia específica de corte para Carbonatos não saturados. Extraído de Schei <i>et. al.</i> (2000).	50
Figura 2.34: Relação entre energia intrínseca a um <i>backrake</i> de 15° e resistência não confinada da rocha para diferentes tipos de rocha. Extraído de Richard <i>et. al.</i> (2012).	51
Figura 2.35: Relação entre força e área exposta do cortador para um cortador circular de 13mm e 20° <i>backrake</i> . Ambas	

adimensionalizadas pelo comprimento de cortador em contato com a rocha. Extraído de Jianyoung (2012).	52
Figura 2.36: Relação entre força e área exposta do cortador para um cortador circular de 8mm e 15° <i>backrake</i> . Ambas adimensionalizadas pelo comprimento de cortador em contato com a rocha. Extraído de Jianyoung (2012).	53
Figura 3.1: Esquema de forças 3D (forças normal, de fricção axial e de fricção lateral) para corte em rocha.	55
Figura 3.2: Esquema de forças 3D (forças normal, de fricção total) para corte em rocha.	59
Figura 3.3: Esquema de forças 3D no plano de falha da rocha (forças normal e de cisalhamento).	62
Figura 3.4: Diagrama de forças que atuam no plano de falha da rocha e suas relações com a força resultante de corte.	62
Figura 3.5: Representação 2D das direções da pressão de fundo de poço e pressão de poros atuantes na falha da rocha.	65
Figura 3.6: Comparação entre a solução 3D e a solução 2D do ângulo normal de falha para diferentes <i>backrakes</i> e diferentes ângulos de fricção interno da rocha.	70
Figura 3.7: Representação do bloco falhado durante o corte oblíquo em rocha a partir das soluções analíticas.	71
Figura 4.1: Efeitos do <i>backrake</i> na energia específica para cortadores com diferentes <i>siderakes</i> no corte da rocha 1.	74
Figura 4.2: Efeitos do <i>backrake</i> na energia específica para cortadores com diferentes <i>siderakes</i> no corte da rocha 2.	74
Figura 4.3: Efeitos do <i>backrake</i> na energia específica para cortadores com diferentes <i>siderakes</i> no corte da rocha 1. Energia Adimensionalizada em função da energia para <i>backrake</i> de 20°.	76
Figura 4.4: Efeitos do <i>backrake</i> na energia específica para cortadores com diferentes <i>siderakes</i> no corte da rocha 2. Energia Adimensionalizada em função da energia para <i>backrake</i> de 20°.	76
Figura 4.5: Efeitos do <i>siderake</i> na energia específica para cortadores com diferentes <i>backrakes</i> no corte da rocha 1.	78
Figura 4.6: Efeitos do <i>siderake</i> na energia específica para cortadores com diferentes <i>backrakes</i> no corte da rocha 2.	78
Figura 4.7: Efeitos do <i>siderake</i> na energia específica para cortadores com diferentes <i>backrakes</i> no corte da rocha 1. Energia Adimensionalizada em função da energia para <i>siderake</i> de 0°.	80
Figura 4.8: Efeitos do <i>siderake</i> na energia específica para cortadores com diferentes <i>backrakes</i> no corte da rocha 2. Energia Adimensionalizada em função da energia para <i>siderake</i> de 0°.	80
Figura 4.9: Efeitos da exposição do cortador na força de corte para o corte da rocha 1 e rocha 2.	82

Figura 4.10: Efeitos da exposição do cortador na energia específica para o corte da rocha 1 e rocha 2.	83
Figura 4.11: Efeitos da pressão confinante na energia específica para o corte da rocha 1 e rocha 2.	85
Figura 4.12: Efeitos do <i>backrake</i> no diagrama E-S para o corte da rocha 1.	86
Figura 4.13: Efeitos do <i>siderake</i> no diagrama E-S para o corte da rocha 1.	87
Figura 4.14: Efeitos do <i>backrake</i> no diagrama E-S para o corte da rocha 2.	88
Figura 4.15: Efeitos do <i>siderake</i> no diagrama E-S para o corte da rocha 2.	88
Figura 5.1: Fluxograma para obtenção de propriedades de rocha a partir de dados experimentais de teste de cortador simples.	90
Figura A.1: Esquema de forças 2D no corte ortogonal em rocha.	97
Figura B.1: 'Máquina experimental de corte' montada para validar a solução do ângulo lateral de falha obtido.	102
Figura B.2: Foto da régua que representa o cortador acoplada ao suporte de cortador.	103
Figura B.3: Pinos de segurança para evitar a rotação do suporte de cortador e furos que determinam a direção do <i>siderake</i> .	104
Figura B.4: Demonstração do teste de cortador a ser realizado em argila.	104
Figura B.5: Formação do chip e estrias na superfície da argila no início do corte para um cortador com 30° <i>siderake</i> .	105
Figura B.6: Direção da falha da rocha no meio do corte para um cortador com 30° <i>siderake</i> .	105
Figura B.7: Direção da falha da rocha no início do corte e sua direção com relação à direção do movimento para um cortador com 30° <i>siderake</i> .	106
Figura B.8: Vista superior da falha da rocha no meio do corte e sua direção para um cortador com 30° <i>siderake</i> .	106
Figura B.9: Final do corte e direção da falha da argila para um cortador com 30° <i>siderake</i> .	107
Figura B.10: Vista de trás do corte demonstrando a cunha formada pelo cortador com 30° <i>siderake</i> .	107
Figura B.11: Início do corte para um cortador com 60° <i>siderake</i> e orientação da falha da argila.	108
Figura B.12: Início do corte para um cortador com 60° <i>siderake</i> e orientação da falha da argila em relação a direção de movimento.	108

Lista de tabelas

Tabela 4.1: Efeitos do <i>backrake</i> na energia específica para a rocha 1.	73
Tabela 4.2: Efeitos do <i>backrake</i> na energia específica para a rocha 2.	75
Tabela 4.3: Efeitos do <i>siderake</i> na energia específica para a rocha 1.	77
Tabela 4.4: Efeitos do <i>siderake</i> na energia específica para a rocha 2.	79
Tabela 4.5: Efeitos da profundidade de corte na força tangencial e na energia específica.	83
Tabela 4.6: Efeitos da pressão de confinamento na energia específica.	84

Lista de símbolos

A lista de símbolos que se segue é válida apenas após o Capítulo 2 (Revisão Bibliográfica).

θ	<i>Backrake</i>
β	<i>Siderake</i>
φ	Ângulo de fricção interno da rocha
α_n	Ângulo de falha normal
α_s	Ângulo de falha lateral
α^*	Ângulo entre as forças normal e cisalhante atuantes no plano de falha
γ	Ângulo entre força normal no plano de falha e vetor normal do plano de falha
ψ_n	Ângulo de fricção normal (axial)
ψ_s	Ângulo de fricção lateral
λ_n	Ângulo de fricção axial proposto por Coudyzer e Richard (2005)
λ_s	Ângulo de fricção lateral proposto por Coudyzer e Richard (2005)
ζ_n	Ângulo entre as forças axial e tangencial
ζ_s	Ângulo entre as forças radial e tangencial
ϵ	Energia específica de corte
E	Energia total de corte
S	Energia de penetração
k	Coefficiente de fricção de Mohr-Coulomb, equivalente a $\tan \varphi$
k_w	Coefficiente de fricção entre a zona desgastada do cortador e a superfície da rocha
k_f	Coefficiente de fricção entre o chip e a face do cortador
η	Ângulo de direção do chip

P_b	Pressão de confinamento ou pressão de fundo de poço
P_p	Pressão de poros
τ_0	Coesão da rocha
τ	Tensão cisalhante no plano de falha da rocha
σ	Tensão normal no plano de falha da rocha
F_c^H	Força tangencial ou horizontal na face do cortador
F_c^V	Força axial ou vertical na face do cortador
F_c^S	Força radial ou lateral na face do cortador
F_c^N	Força normal na face do cortador
F_c^{FA}	Força de fricção axial na face do cortador
F_c^{FS}	Força de fricção lateral na face do cortador
F_c^F	Força de fricção total na face do cortador
F_r^N	Força normal no plano de falha da rocha
F_r^S	Força cisalhante no plano de falha da rocha
F_w^H	Força de horizontal no desgaste do cortador
F_w^V	Força de vertical no desgaste do cortador
$\sum F^H$	Força tangencial total
$\sum F^V$	Força axial total
A_r	Área do plano de falha da rocha
A_t	Área transversal do plano de falha da rocha
R_c	Força resultante no cortador
R_w	Força resultante no desgaste