



Ingrid Milena Reyes Martinez

**Modelagem Numérica do Processo de Corte em Rocha
para Perfuração de Poços de Petróleo**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Sergio Augusto Barreto da Fontoura
Co-orientador: Prof. Nelson Inoue

Rio de Janeiro

Fevereiro de 2012



Ingrid Milena Reyes Martinez

**Modelagem Numérica do Processo de Corte em Rocha
para Perfuração de Poços de Petróleo**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Sergio Augusto Barreto da Fontoura
Orientador
Departamento de Engenharia Civil / PUC-Rio

Prof. Nelson Inoue
Co-orientador
GTEP / PUC-Rio

Prof. Celso Romanel
Departamento de Engenharia Civil / PUC-Rio

Prof. Paulo Couto
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 28 de fevereiro de 2012

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

Ingrid Milena Reyes Martinez

Graduou-se em Engenharia Civil na Universidad de Nariño (Colômbia, 2008). Atualmente atua como pesquisadora em Geomecânica Computacional do Grupo de Tecnologia em Engenharia do Petróleo (GTEP) da PUC-Rio na área de Modelagem Numérica de Perfuração de Evaporitos.

Ficha Catalográfica

Martinez, Ingrid Milena Reyes

Modelagem Numérica do Processo de Corte em Rocha para Perfuração de Poços de Petróleo / Ingrid Milena Reyes Martinez; orientador: Sergio Augusto Barreto da Fontoura. – 2012.

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

Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2012.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Energia Específica Mecânica. 3. Perfuração. 4. Método dos Elementos Finitos. 5. Ensaio de Cortador Único. I. Fontoura, Sérgio Augusto Barreto da. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Dedico esta dissertação ao meu avô Campo Martinez (*in memorium*).

Agradecimentos

Agradeço a Deus por me demonstrar seu infinito amor a cada dia.

Agradeço ao professor Sergio Fontoura pela confiança depositada e pela sua excelente orientação deste trabalho.

Agradeço ao Nelson Inoue pela sua colaboração e incentivo no desenvolvimento desta dissertação, pelo seu exemplo de trabalho e pela amizade gerada durante este último ano.

Agradeço aos professores Celso Romanel e Paulo Couto por aceitarem prontamente em participar da banca da minha defesa.

Agradeço ao professor Luiz Eloy Vaz e a sua esposa Regina Ottoni por me acolher na sua casa durante estes dois anos de mestrado e me fazer sentir parte da sua família.

Agradeço ao meu namorado Mairon por estar ao meu lado e ser o principal motivo de minha felicidade durante este último ano, pelo seu amor, sua compreensão e por sempre se preocupar pelo meu bem-estar.

Agradeço aos meus queridos amigos Carlos Emmanuel Lautenschläger e Guilherme Righetto, pela sua amizade incondicional e pelas longas jornadas de estudo e trabalho, pelos momentos de alegria e pela luta conjunta para atingir um sonho que compartilhamos.

Agradeço à minha família por me apoiar na realização deste objetivo e entender que a distância só fortalece o amor que sinto por eles.

Agradeço à minha mãe por me escutar sempre, por me animar quando estive triste e preocupada e por demonstrar que faria qualquer coisa por mim: obrigada por me visitar aqui no Rio.

Agradeço à minha irmã Mônica por sempre estar atenta comigo, por ser mais

que uma irmã, minha melhor amiga, aquela que confia e compartilha todos meus sonhos. Obrigada Moni também por fazer que a Luciana saiba que tem uma tia que a ama e por querer que eu seja exemplo de sua vida.

Agradeço ao meu irmão Alex e ao meu pai por acreditarem em mim sempre.

Agradeço a todos os meus amigos colombianos por compreenderem que este mestrado precisou de muita dedicação. Por isso, mesmo que sempre me lembrasse deles, não consegui me comunicar com a frequência que eu queria. Mas agora posso dizer que valeu a pena a saudade que senti por eles.

Agradeço a todos os professores da área de Geotecnia pelos conhecimentos transmitidos, em especial aos professores Sérgio Fontoura, Alberto Sayão e Michéle Casagrande pela indicação para ingressar no Doutorado.

Agradeço à CAPES pela concessão da bolsa de mestrado e à Baker-Hughes pela bolsa de complementação e por permitir que minha dissertação faça parte de seus projetos de pesquisa.

Resumo

Martinez, Ingrid Milena Reyes; Fontoura, Sergio Augusto Barreto da. **Modelagem Numérica do Processo de Corte em Rocha para Perfuração de Poços de Petróleo**. Rio de Janeiro, 2012. 101p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O mecanismo de corte em rocha é determinante na eficiência do processo de perfuração de poços de petróleo. Este mecanismo tem sido estudado através de ensaios de corte com um único cortador. Neste trabalho foram desenvolvidos modelos com o método dos elementos finitos para simular o processo de corte em rocha realizado por um cortador único. Este trabalho está vinculado ao Projeto de Modelagem de Perfuração de Evaporitos sob Altas Pressões desenvolvido pela Baker-Hughes e o Grupo de Tecnologia em Engenharia de Petróleo (GTEP) da PUC-Rio. As simulações numéricas foram feitas utilizando-se o programa ABAQUS. O modelo constitutivo de Drucker-Prager foi descrito e usado para modelar o comportamento da rocha. O modelo de dano isotrópico foi usado para modelar a erosão do material produzida na interação rocha-cortador. Os resultados das simulações com modelos bidimensionais e tridimensionais permitiram analisar a influência da variação da profundidade de corte e da pressão de confinamento na energia específica necessária para realizar o corte em rocha. Observou-se que, até certo limite, quanto mais profundo estiver o cortador menor energia específica será necessária para o corte. A análise da influência da pressão de confinamento mostrou que o corte de rocha em condições atmosféricas fornece valores de energia específica muito próximos à resistência à compressão não confinada da rocha, enquanto que a aplicação de pressão confinante causa incrementos da energia específica.

Palavras-chave

Energia Específica Mecânica; Perfuração; Método dos Elementos Finitos; Ensaio de Cortador Único.

Abstract

Martinez, Ingrid Milena Reyes; Fontoura, Sergio Augusto Barreto da (Advisor). **Numerical Modeling of Rock Cutting Process for Drilling Oil Wells**. Rio de Janeiro, 2012. 101p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The understanding of rock cutting mechanism is critical to the efficiency of borehole drilling process. This mechanism is studied through single cutter tests. In this work were developed models with the Finite Element Method to simulate the rock cutting process by a single cutter. This work is connected to the project Modeling of Evaporite Drilling Under High Pressure, sponsored by Baker Hughes in partnership with the Group of Technology and Petroleum Engineering (GTEP) of the Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro. The numerical simulations were performed using the program ABAQUS. The Drucker-Prager constitutive relationship was used to model the rock behavior. Also, an isotropic model of damage was described and employed for modeling the erosion mechanism that represents the rock-cutter interaction. Two and three-dimensional simulations allowed the analysis of the influence of the variation of cutting depth and confining pressure on the mechanical specific energy required to cut the rock. To certain depth limit, it was observed that for larger depths of cut, less specific energy is required to cut the rock. The analysis of experiments under confining pressure showed that cutting process under atmospheric conditions produced specific energy close to the unconfined compressive strength of rock, while the application of confining pressure showed a remarkable increase in specific energy required for cutting.

Keywords

Mechanical Specific Energy; Drilling; Finite Element Method; Single Cutter Test.

Sumário

1	Introdução	20
1.1.	Relevância e motivação do estudo	20
1.2.	Objetivo e metodologia	21
1.3.	Organização da dissertação	21
2	Revisão bibliográfica	23
2.1.	Cortadores das brocas PDC e o conceito da energia específica mecânica.	23
2.2.	Abordagem experimental do processo de corte em rocha	25
2.2.1.	Resultados experimentais e formulações analíticas do processo de corte em rocha com cortador único	26
2.3.	Abordagem numérica da interação rocha-cortador	36
2.3.1.	Corte da rocha por indentação	37
2.3.2.	Corte de rocha por cisalhamento	38
3	Modelagem de corte através do método dos elementos finitos	42
3.1.	Método de integração	42
3.2.	Formulação da malha	43
3.3.	Interação rocha-cortador	44
3.3.1.	Discretização das superfícies de contato	45
3.3.2.	Propriedade do contato – Modelo de Erosão	46
4	Modelo Constitutivo de Drucker-Prager para materiais rochosos	47
4.1.	Descrição do modelo constitutivo	47
4.1.1.	Superfície de plastificação	47
4.1.2.	Lei de endurecimento	49
4.1.3.	Lei de fluxo	50
4.2.	Modelagem de um ensaio triaxial para validação do comportamento mecânico da rocha	51
5	Mecanismo de dano para modelagem de corte em rocha por erosão	55

5.1. Mecânica do dano	55
5.2. Conceitos fundamentais e representação mecânica do dano	56
5.2.1. Variável unidimensional de dano	57
5.2.2. Conceito de tensão efetiva	57
5.2.3. Princípio de deformação equivalente	58
5.3. Modelo constitutivo de dano isotrópico	59
5.3.1. Critério de iniciação de dano para rochas	61
5.3.2. Critério de evolução de dano	65
5.4. Validação da modelagem do mecanismo de dano	65
6 Modelagem bidimensional do processo de corte em rocha	67
6.1. Geometria do modelo	67
6.2. Condições de contorno	67
6.3. Definição dos materiais	68
6.4. Malha	69
6.5. Resultados e Análises	70
6.5.1. Análise de sensibilidade ao refinamento da malha de elementos finitos	70
6.5.2. Análise da influência da variação da profundidade de corte	73
6.5.3. Análise da variação da pressão confinante	78
7 Modelagem tridimensional do processo de corte em rocha	83
7.1. Geometria do modelo	83
7.2. Condições de contorno	84
7.3. Definição dos materiais.	84
7.4. Malha	85
7.5. Resultados e Análises	85
7.5.1. Análise da influência da variação da profundidade de corte	85
7.5.2. Análise da variação da pressão confinante	90
8 Conclusões	95
8.1. Trabalhos Futuros	96
9 Referências Bibliográficas	97

Lista de figuras

Figura 2.1 – Exemplo de uma broca PDC de 8 ½” de diâmetro. (Hareland <i>et al</i> , 2007).	24
Figura 2.2 – Esboço da trajetória circular de um cortador e uma vista vertical do processo de corte. (Modificado de Hareland <i>et al</i> , 2009).	24
Figura 2.3 – Ensaio de corte com um cortador único: (a) Forças no cortador e (b) amostras de rocha submetidas ao ensaio de cortador único. (Modificado de Rafatian <i>et al</i> , 2009).	25
Figura 2.4 – Modos de falha para diferentes profundidades de corte. (Richard, 1998).	26
Figura 2.5 – Variação da energia específica mecânica com a profundidade de corte (Modificado de Zhang <i>et al</i> , 2011).	27
Figura 2.6 – Esquema de forças para (a) um cortador perfeitamente afiado e (b) para um cortador com superfície de desgaste (Detournay & Defournay, 1992).	28
Figura 2.7 – Diagrama MSE-S para um arenito. (Adachi <i>et al</i> , 1996).	30
Figura 2.8 – Relação linear entre as forças e a profundidade de corte. Ensaio realizado com um cortador afiado em um Arenito Red Wildmoor. (Richard <i>et al</i> , 1998).	31
Figura 2.9 – Variação das forças de corte para ensaio de cortador único em diferentes condições de pressão de confinamento. (Modificado de Kaitkay & Lei, 2005).	33
Figura 2.10 – Energia específica mecânica em função da pressão de confinamento para ensaios sobre mármore de Cartago. (Modificado de Rafatian <i>et al</i> , 2009).	33
Figura 2.11 – Morfologia do material cortado com pressão de confinamento nos experimentos de Rafatian <i>et al</i> . (2009).	34
Figura 2.12 – Correlação entre a resistência a compressão uniaxial (q) e a energia específica intrínseca (ϵ) de várias rochas. (Detournay <i>et al</i> , 1995).	35
Figura 2.13 – Modelo de corte por indentação (Modificado de Abd Al-Jalil, 2006).	37
Figura 2.14 – Resultados de um processo de indentação em rocha para	

diferentes pressões de confinamento. (Modificado de Liu <i>et al</i> , 2002).	38
Figura 2.15 – Formação de fissuras usando o critério de Drucker-Prager: (a) Modelo de corte sob tração; (b) Modelo de corte sob compressão. (Modificado de Podgórski, 2002).	39
Figura 2.16 – Comparação entre resultados numéricos e observações experimentais de corte em rocha. (Modificado de Jaime <i>et al</i> , 2010).	40
Figura 2.17 – Evolução da energia específica com a profundidade de corte. (Modificado de Zhou <i>et al</i> , 2011).	41
Figura 3.1 – Malha com formulação Lagrangeana Modificada.	43
Figura 3.2 – Malha com formulação Euleriana	44
Figura 3.3 – Interação entre superfícies de contato.	45
Figura 3.4 – Topologia de superfície de contato com contato tipo Erosão (Modificado de ABAQUS, 2010).	46
Figura 4.1 – Superfície de plastificação do modelo linear de Drucker-Prager. (ABAQUS, 2010).	48
Figura 4.2 – Comparação entre os modelos: perfeitamente plástico, com endurecimento e amolecimento.	49
Figura 4.3 – Superfície de plastificação e direção do fluxo plástico no plano p-t.	51
Figura 4.4 – Curvas tensão-deformação do arenito para diferentes pressões de confinamento (σ_3) e definição da tensão de plastificação (σ_y) e da tensão máxima (σ_m). Todos os dados estão em MPa. (Baseado em Gowd & Rummel, 1980).	52
Figura 4.5 – Malha utilizada para simulação de um ensaio triaxial.	53
Figura 4.6 – Curvas tensão-deformação para a rocha simulada no programa ABAQUS.	53
Figura 5.1 – Definição de dano (Pedrini, 2008).	57
Figura 5.2 - Descrição da tensão efetiva. (Modificado de Chaves, 2009).	58
Figura 5.3 – Diagrama de tensão deformação uniaxial com modelo de dano. (Pedrini, 2008).	60
Figura 5.4 – Etapas de deformação de uma amostra de rocha testada em compressão. (Modificado de Aubertin	

& Simon, 1997)	61
Figura 5.5 – Determinação da deformação plástica. (Modificado de Chaves, 2009).	63
Figura 5.6 – Evolução do dano para uma simulação de uma amostra submetida a um ensaio de compressão axial.	66
Figura 6.1 – Geometria dos modelos bidimensionais de corte.	67
Figura 6.2 – Condições de contorno dos modelos bidimensionais de corte.	68
Figura 6.3 – Elemento finito tipo CPE4R usado nas malhas dos modelos bidimensionais.	69
Figura 6.4 – Modelo 2D com malha grossa na amostra de rocha. Profundidade de corte variável e sem pressão de confinamento.	71
Figura 6.5 – Modelo 2D com malha fina na amostra de rocha. Profundidade de corte variável e sem pressão de confinamento.	71
Figura 6.6 – Histórico de forças horizontais para modelo 2D de malha grossa, com profundidade de corte variável e sem pressão de confinamento.	72
Figura 6.7 – Histórico de forças horizontais para modelo 2D de malha fina, com profundidade de corte variável e sem pressão de confinamento.	72
Figura 6.8 – Trabalho mecânico acumulado para dois tipos de malha. Modelo 2D sem pressão de confinamento e com profundidade de corte variável.	73
Figura 6.9 – Modelo de corte 2D com profundidade de corte 0.18mm e sem pressão de confinamento.	74
Figura 6.10 – Modelo de corte 2D com profundidade de corte 0.37mm e sem pressão de confinamento.	74
Figura 6.11 – Modelo 2D com profundidade de corte 0.55mm e sem pressão de confinamento.	74
Figura 6.12 – Histórico de forças horizontais para uma profundidade de corte de 0.18mm. Modelo 2D sem pressão de confinamento.	75
Figura 6.13 – Histórico de forças horizontais para uma profundidade de corte de 0.37mm. Modelo 2D sem pressão de confinamento.	75

Figura 6.14 – Histórico de forças horizontais para uma profundidade de corte de 0.55mm. Modelo 2D sem pressão de confinamento.	76
Figura 6.15 – Trabalho mecânico acumulado para diferentes profundidades de corte. Modelo 2D sem pressão de confinamento.	76
Figura 6.16 – Volume de corte acumulado para diferentes profundidades de corte. Modelo 2D sem pressão de confinamento.	77
Figura 6.17 – Energia específica mecânica para diferentes profundidade de corte. Modelo 2D sem pressão de confinamento.	77
Figura 6.18 – Diagrama de Energia Específica versus Resistência à Perfuração para diferentes profundidades de corte (d). Modelo 2D sem pressão de confinamento.	78
Figura 6.19 – Modelo 2D sem pressão de confinamento (0 MPa) e com profundidade de corte 0.55mm.	79
Figura 6.20 - Modelo 2D com pressão de confinamento (5 MPa) e com profundidade de corte 0.55mm.	79
Figura 6.21 - Modelo 2D com pressão de confinamento (10 MPa) e com profundidade de corte 0.55mm.	80
Figura 6.22 – Variação do trabalho mecânico com a pressão de confinamento para diferentes profundidades de corte. Modelos 2D.	80
Figura 6.23 – Variação da força média de corte com pressão de confinamento para diferentes profundidades de corte em modelos 2D.	81
Figura 6.24 – Relação linear entre a energia específica (ϵ) e a pressão de confinamento (P_m) para diferentes profundidades de corte. Modelos 2D.	82
Figura 7.1 – Geometria dos modelos tridimensionais de corte.	83
Figura 7.2 – Condições de contorno dos modelos tridimensionais de corte.	84
Figura 7.3 – Elementos finitos utilizados nos modelos tridimensionais: (a) prismático triangular C3D6; (b) hexaédrico C3D8.	85
Figura 7.4 – Modelo de corte 3D com profundidade de corte 0.53mm e sem pressão de confinamento.	86
Figura 7.5 – Modelo de corte 3D com profundidade de corte 0.67mm e sem pressão de confinamento.	86
Figura 7.6 – Modelo de corte 3D com profundidade de corte	

0.80mm e sem pressão de confinamento.	86
Figura 7.7 – Histórico de forças de corte para uma profundidade de 0.53mm. Modelo 3D sem pressão de confinamento.	87
Figura 7.8 – Histórico de forças de corte para uma profundidade de 0.67mm. Modelo 3D sem pressão de confinamento.	87
Figura 7.9 – Histórico de forças de corte para uma profundidade de 0.80mm. Modelo 3D sem pressão de confinamento.	88
Figura 7.10 – Trabalho mecânico acumulado para diferentes profundidades de corte. Modelos 3D sem pressão de confinamento.	88
Figura 7.11 – Área transversal de corte para os modelos 3D.	89
Figura 7.12 – Volume de corte acumulado para diferentes profundidades. Modelo 3D sem pressão de confinamento.	90
Figura 7.13 - Energia específica mecânica para diferentes profundidade de corte. Modelo 3D sem pressão de confinamento.	90
Figura 7.14 – Modelo 3D sem pressão de confinamento (0 MPa) e com profundidade de corte 0.80mm.	91
Figura 7.15 – Modelo 3D com pressão de confinamento (5 MPa) e com profundidade de corte 0.80mm.	91
Figura 7.16 – Modelo 3D com pressão de confinamento (10 MPa) e com profundidade de corte 0.80mm.	91
Figura 7.17 – Histórico de forças de corte para modelo 3D sem pressão de confinamento e profundidade de corte 0.80mm.	92
Figura 7.18 – Histórico de forças de corte para modelo 3D com pressão de confinamento 5 MPa e profundidade de corte 0.80mm.	92
Figura 7.19 – Histórico de forças de corte para modelo 3D com pressão de confinamento 10 MPa e profundidade de corte 0.80mm.	92
Figura 7.20 – Variação da força média de corte com a pressão de confinamento para diferentes profundidades de corte. Modelos 3D.	93
Figura 7.21 – Variação do trabalho mecânico com a pressão de confinamento para diferentes profundidades de corte. Modelos 3D.	93
Figura 7.22 – Relação linear entre a energia específica (ϵ) e a pressão de confinamento (P_m) para diferentes profundidades de corte. Modelos 3D.	94

Lista de quadros

Quadro 2.1 – Correlação entre a resistência a compressão uniaxial (q) e a energia específica intrínseca (ϵ) de várias rochas. (Modificado de Detournay <i>et al</i> , 1995).	35
Quadro 6.1 – Propriedades dos materiais.	68
Quadro 6.2 – Parâmetros plásticos da amostra de rocha.	69
Quadro 6.3 – Graus de discretização das malhas para os modelos 2D.	70

Lista de tabelas

Tabela 4.1 – Parâmetros elásticos de arenito. (Gowd & Rummel, 1980).	51
Tabela 5.1 – Deformação plástica no início de dano e triaxialidade para um arenito em diferentes pressões de confinamento.	64
Tabela 7.1 – Áreas transversais e volumes totais de cortes para diferentes profundidades.	89

Lista de símbolos

A	Área nominal do volume representativo
\bar{A}	Área efetiva do volume representativo
A_c	Área do cortador
A_D	Área com defeitos do volume representativo
β	Ângulo de inclinação da superfície linear de plastificação para o critério de Drucker-Prager
c	Coesão do material
d	Profundidade de corte
d^*	Profundidade crítica de transição de modo dúctil para frágil
D	Variável de dano
ε	Energia específica intrínseca
ε_0	Energia específica em condições atmosféricas
ε^e	Deformação elástica
ε^p	Deformação plástica
ε_{ij}^p	Componentes do tensor de deformações plásticas
E	Módulo de elasticidade
\bar{E}	Módulo de elasticidade degradado
ζ	Razão entre a força normal e a força tangencial agindo na face do cortador
η	Eficiência do corte
f	Função de plastificação
F_s^c	Componente tangencial da força de corte
F_s^f	Componente tangencial da força de atrito
F_n^c	Componente normal da força de corte
F_n^f	Componente normal da força de atrito
F_x	Força de corte horizontal
F_y	Força de corte vertical
g	Função de potencial plástico
K	Relação da resistência à tração e a resistência à compressão triaxial
K_{IC}	Tenacidade da rocha
L	Comprimento característico do elemento

θ	Ângulo de ataque do cortador
μ	Coeficiente de atrito
m	Coeficiente de variação da energia específica com a pressão de confinamento
MSE	Energia específica total
p	Tensão octaédrica
P_m	Pressão de confinamento
q	Resistência à compressão simples
S	Resistência à perfuração
$\bar{\sigma}$	Tensão efetiva
σ_1	Tensão principal maior
σ_2	Tensão principal intermediária
σ_3	Tensão principal menor
σ_m	Tensão máxima
σ_y	Tensão de escoamento
t	Terceiro invariante da tensão de desvio
T	Triaxialidade
φ	Ângulo de atrito interno da rocha
ψ	Ângulo de atrito na interface rocha/cortador
Ψ	Ângulo de dilatância
\bar{u}_f^{pl}	Deslocamento plástico efetivo na falha
w	Largura do cortador