

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Lenin Alberto Mora Guerrero

**Uso de Parâmetros de Perfuração para Estimar a
Resistência Não Confinada das Rochas**

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: Sérgio A. B. da Fontoura

Rio de Janeiro, setembro de 2008



Lenin Alberto Mora Guerrero

Uso de Parâmetros de Perfuração para Estimar a Resistência Não Confinada das Rochas

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. Sérgio A. B. da Fontoura
Orientador

Prof. Paulo Couto
UFRJ

Dr. Eudes Muniz
GTEP- PUC-RIO

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

Rio de Janeiro, setembro de 2008

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

Lenin Alberto Mora Guerrero

Graduou-se em Engenharia de Petróleos na UIS - Universidade Industrial de Santander – Colômbia em 2005. Trabalhou com o ICP-ECOPETROL (2005 – 2006) em diferentes Projetos de Análise e Acompanhamento de Estabilidade de Poços Petróleo.

Ficha Catalográfica

Mora, Lenin A. Guerrero

Uso de Parâmetros de Perfuração para Estimar a Resistência Não Confinada das Rochas / Lenin A. Mora Guerrero; orientador: Sérgio Augusto B. da Fontoura. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2008.

v., 80 f.: il. ; 29,7 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Perfuração de Poços de Petróleo ou gás. 3. Resistência das Rochas. 4. Mecânica de Rochas. 5. Mecânica dos Solos. I. Fontoura, Sérgio Augusto B. da. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD 624

Agradeço a Deus este logro e dedico o mesmo a meu filho e a minha esposa.

Agradecimentos

À CAPES e à PUC-Rio pelo apoio financeiro concedido durante o meu mestrado.

Ao professor Sérgio Fontoura, pela orientação e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho. Obrigado pela estrutura oferecida através do GTEP.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Civil pelos ensinamentos transmitidos.

Ao Eng. Luiz Felipe B. Rego que disponibilizou os dados utilizados nesta pesquisa, e aos colegas Bruna Silveira e João Paulo pela colaboração na procura desta informação em tempo hábil.

Aos funcionários da biblioteca por todas as vezes que solicitei artigos fora da PUC-Rio e os recebi em tempo ágil.

A minha esposa Paola Fontalvo, por todo o amor, carinho e apoio proporcionado sempre, ao meu filho Jesus Alberto, minha fonte de inspiração.

Aos meus pais, por todo amor e constante apoio. Aos meus irmãos: Liud, Irina e César pela força, apoio e presença apesar da distância.

A Paul Richard pela amizade e apoio, Nelly Piedad pela amizade e os conselhos, Aos amigos do GTEP, especialmente Nelson, Shelly, Vivian, Evania e Olga pela amizade e ótima convivência.

Aos amigos do mestrado em especial: Redy, Kathia, Carolina, Flavia, El Cubano e Gustavo pela amizade e vivências.

Resumo

Mora, Lenin Alberto Guerrero. **Uso de Parâmetros de Perfuração para Estimar a Resistência Não Confinada das Rochas**. Rio de Janeiro, 2008 80p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A resistência não confinada (UCS) é um parâmetro de interesse na análise de problemas geomecânicos: estabilidade de poços, restrição quantitativa das magnitudes das tensões in situ, determinação do potencial de produção de areia e seleção de brocas. É intuitivo que a resposta da broca de perfuração deveria refletir as propriedades de resistência da rocha sob as condições reais no fundo do poço. Porém a taxa de perfuração (ROP) é dependente de um número de outros parâmetros (desenho e tipo da broca, parâmetros de operação). Têm sido propostos, avaliados e verificados vários modelos de perfuração para os diferentes tipos de brocas em poços no Mar do Norte e no Canadá. Esses modelos, quando usados numa metodologia inversa, permitem estimar a resistência da rocha à perfuração, S . Esta pesquisa tem como objetivo correlacionar as resistências S e UCS. Uma vez alcançado esse objetivo a UCS pode ser calculada somente com base em parâmetros de perfuração (WOB, RPM, ROP). Foram encontradas duas correlações para as litologias folhelhos e arenitos do campo de estudo da bacia de Campos. Estas foram avaliadas e comparadas com a UCS estimada de perfis de poço obtendo-se resultados bastante satisfatórios. O espaço UCS/ S vs. WOB/RPM usado para correlacionar as resistências mostra-se muito promissor para outras aplicações: planejamento/otimização de um novo poço (selecionando a melhor combinação de WOB e RPM), avaliação/diagnóstico da perfuração em Tempo Real.

Palavras-chave

Resistência das rochas, UCS, Modelos ROP, perfuração de poços.

Abstract

Mora, Lenin Alberto Guerrero. **Use of the Drilling Parameters for Assessment the Unconfined Compressive Strength.** Rio de Janeiro, 2008 80p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Unconfined Compressive Strength (UCS) is a parameter of interest in geomechanics problems analysis: Wellbore Stability, quantitative constrains stresses in situ magnitudes, assessment sanding potential and selection of bit drilling. It is intuitive that the drilling would have to reflect the strength rock properties under the real conditions in the bottomhole. However rate of penetration (ROP) is dependent of a number of other parameters. ROP models have been proposed for the different types of drilling bits and evaluated and verified in wells in North Sea and Canada. These models when used in an inverse methodology they allow estimate the drilling strength, S. This work was addressed to correlate drilling strength (S) and UCS. When this objective was reached the UCS can only be calculated of drilling parameters (WOB, RPM, ROP). Two correlations for shale and sandstone lithologies are proposal by the study field in Campos basin. Satisfactory results were obtain when these correlations were evaluated and compared with estimated UCS profiles from geophysical well logs. Space UCS/S vs. WOB/RPM used to correlate the strengths seems very promissory for other applications such as: planning/optimization of a new well (selecting the best combination of WOB and RPM), diagnostic and evaluation of the drilling in Real Time TR.

Keys-Word

UCS, drilling strength, ROP Models, drilling wells.

Sumário

1	Introdução	16
1.1.	Motivação da Pesquisa	18
1.2.	Objetivos da Pesquisa	21
1.2.1	Objetivo Geral	21
1.2.2	Objetivo Específicos	21
1.3.	Contribuição da Pesquisa	21
1.4.	Estrutura da dissertação	22
2	Modelos ROP	23
	Revisão da Literatura	23
2.1.	Modelos ROP para as brocas com parte móveis.	23
2.1.1	Modelos ROP: Warren (1987), Winters et al. (1987).	24
2.1.2	Modelo ROP de Hareland	33
2.2.	Modelos ROP para brocas sem parte móveis.	36
2.2.1	Modelo ROP para Brocas de Diamante Natural.	38
2.2.2	Modelo ROP para brocas PDC.	42
2.3.	Conclusões acerca dos Modelos ROP.	44
3	Estimativa da Resistência Não Confinada da Rocha (UCS) a partir de Perfis Geofísicos de Poço.	46
3.1.	Algumas Considerações acerca das Correlações Utilizadas na Estimativa da UCS com Dados de Perfis Geofísicos de Poço	46
3.2.	Correlações para a Estimativa da UCS com Dados de Perfis Geofísicos de Poços	51
4	Metodologia para Determinar a Resistência das Rochas à Perfuração	54
4.1.	Breve Descrição do Poço PUC-1 e Cálculo da Resistência da Rocha à Perfuração.	54
4.2.	Breve descrição do poço PUC-2 e Cálculo da Resistência da Rocha à Perfuração.	58
4.3.	Comparação dos Parâmetros Operacionais e dos Perfis de Resistência à Perfuração Calculados para os Poços PUC-1 e PUC-2.	62

5	Correlação Entre a Resistência Compressiva Não Confinada (UCS) da Rocha e a Resistência à Perfuração	64
5.1.	Estimativa da UCS com Perfis Geofísicos de Poço para o PUC-1.	64
5.2.	Correlação da UCS com a Resistência à Perfuração para o PUC-1.	69
5.3.	Considerações do Potencial Uso das Correlações entre a UCS/S e WOB/RPM	74
6	Conclusões e sugestões	76
7	Referências bibliográficas	78

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Principais elementos de um sistema de perfuração para poços de petróleo e/ou gás. (Modificado Manual de perfuração da Halliburton, 2000).	17
Figura 1.2. Brocas de perfuração: a) broca de rabo de peixe (Bourgoyne et al., 1991) b) broca de insertos tricônica c) broca PDC (catalogo da Baker Hughes).	19
Figura 1.3. Histórico do desempenho das brocas PDC, as flechas indicam as datas da publicação de artigos específicos. (Modificado de Sinor et al., 1998).	19
Figura 2.1 – Comparação da ROP predita por alguns modelos de perfuração e dados experimentais (Warren, 1981).	26
Figura 2.2 – Efeito da diferença da pressão do fluido de perfuração e a pressão de poros para um arenito permeável (Cunningham 1959).	27
Figura 2.3. Diferencial de pressão induzido em 2,8mm (0,11in) abaixo da superfície do fundo do poço para uma formação impermeável. (Warren & Smith 1985).	28
Figura 2.4. Efeito da pressão de poros anormalmente alta no diferencial de pressão induzido a 2,8mm (0.11in) abaixo da superfície do fundo do poço para uma formação impermeável. (Warren & Smith, 1985).	29
Figura 2.5. Ilustração de uma broca tricônica com e sem cone offset. (Plácido, 2007).	30
(a) (b)	31
Figura 2.6. ROP para uma broca de inserto (427) com alto grau de cone offset. a) resposta do ROP no folhelho brando e dúctil. b) dolomito frágil e duro. (Winters et al., 1987).	31
Figura 2.7. ROP em função do WOB para uma broca de inserto (737) com baixo grau de cone offset, a) para 80 RPM b) para 100 RPM. (Winters et al., 1987).	32
Figura 2.8. Efeito da pressão de fundo de poço (diferencial de pressão) na ROP, pressão de poros a condição atmosférica (modificado de Jorden et al., (1966)).	34

Figura 2.9. Esquema que ilustra um cortador PDC no processo de corte da rocha (modificado de Sellami et al., (1989).	37
Figura 2.10. Resultado e interpretação de um ensaio de drilloff para determinar a área de bombeamento efetiva (Modificada de Winters & Warren, 1986)....	39
Figura 2.11. Ilustração do cortador de diamante onde se observa: A_p a área projetada e A_v a área da rocha comprimida. (Hareland & Rampersad, 1994).	40
Figura 2.12. Ilustração do volume removido por diamante por revolução. (Hareland & Rampersad, 1994).....	42
Figura 2.13. Esquema do volume removido por diamante por revolução. (Modificado Bourgoyne et al., 1991).....	43
Figura 2.14. Ilustração de um cortador de uma broca PDC (Modificado de Hareland & Rampersad 1994).	44
Figura 3.1. Dados de UCS de ensaios de laboratório para folhelhos como função: a) Tempo de transito Δt , b) modulo de Young, E c) Porosidade, ϕ ; sobrepostas com algumas das correlações empíricas listadas na Tabela 3.1. (Chandong, 2004).....	48
Figura 3.2. Dados de UCS para arenitos como função: a) Tempo de transito Δt , b) modulo de Young, E c) Porosidade, ϕ ; sobrepostas com algumas das correlações empíricas listadas na Tabela 3.2. (Chandong, 2004).....	49
Figura 3.3. Dados de UCS para carbonatos (calcários e dolomitos) como função: a) Tempo de transito Δt , b) modulo de Young, E c) Porosidade, ϕ ; sobrepostas com algumas das correlações empíricas listadas na Tabela 3.3. (Chandong, 2004).....	50
Figura 4.1. Trajetória do poço PUC-1. (Tirada do SEST Software do GTEP-PETROBRAS).....	54
Figura 4.2. Parâmetros operacionais medidos na perfuração da fase 12 ¼” do poço PUC-1.	55
Figura 4.3. Tipo de broca utilizada para perfurar o poço PUC-1.	56
Figura 4.4. Fluxograma de trabalho para a geração do perfil de resistência à perfuração.....	57
Figura 4.5. Perfil de resistência (MPa) aparente da rocha calculado para PUC-1.	58

Figura 4.6. Trajetória do poço PUC-2 (Tirada do SEST Software do GTEP-PETROBRAS).....	59
Figura 4.7. Parâmetros operacionais do poço PUC-2	60
Figura 4.8. Perfil de resistência aparente da rocha (MPa) calculado com os parâmetros operacionais do poço PUC-2.....	61
Figura 4.9. Comparação dos parâmetros operacionais dos poços PUC-1 e PUC-2.....	62
Figura 4.10. Comparação dos perfis de resistência aparente da rocha calculados para os poços PUC-1 e PUC-2, os quais são do mesmo campo.	63
Figura 5.1. Dados de perfis medidos no poço PUC-1: GR, Densidade, Tempo de transito compressional e de cisalhante.....	65
Figura 5.2 – Perfis de UCS calculados para os folhelhos do poço PUC-1. a). Lal (eq. 4.5) b). Chandong (eq. 4.2). c). Horsrud (eq. 4.9).	66
Figura 5.3. Comparação dos perfis de resistência à perfuração e a UCS para o poço PUC-1 e os pontos de calibração.	68
Figura 5.4. Resultado de um ensaio triaxial não drenado para o folhelho sob estudo a uma pressão de confinamento de 9MPa (fase de cisalhamento) (Muniz, 1998).....	69
Figura 5.5. Resultado de um ensaio triaxial não drenado para o folhelho sob estudo a uma pressão de confinamento de 20MPa (fase de cisalhamento) (Muniz, 1998).....	70
Figura 5.6. Correlação da relação da UCS/S e a relação da WOB/RPM para folhelhos do poço PUC-1.....	71
Figura 5.7. Correlação da relação da UCS/S e a relação da WOB/RPM para arenitos do poço PUC-1.	72
Figura 5.8. Fluxo de trabalho proposto nesta pesquisa para o calculo da UCS a partir dos parâmetros da perfuração.....	73
Figura 5.9. (à direita) Comparação dos perfis de UCS estimados de dados de perfuração e de perfis (azul) para o poço PUC-1. (à esquerda) Comparação dos perfis de UCS de dados de perfuração (vermelho) e de perfis (azul) para o poço PUC-2.	74

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Comparação das constantes da broca a,b,c devido ao diferencial de pressão de fluido usado no ensaio de perfuração. (adaptado de Warren, 1987).....	29
Tabela 2.2. Constantes de desenho da broca determinadas a um diferencial de pressão de poço de 8.28 MPa (1200 psi) (Winters et al., 1987).....	30
Tabela 2.3 – Coeficientes litológicos da função chip hold down para dois tipos litológicos avaliados pelo Hareland et al. (tomado do Hareland, 1991).....	34
Tabela 2.4 – Coeficientes litológicos da resistência da rocha obtidos de ensaios triaxiais convencionais. (tomado Hareland, 1991).....	36
Tabela 2.5. Coeficientes litológicos para as litologias citadas abaixo para brocas de diamante (tomado do Hareland & Rampersad, 1994).	42
Tabela 3.1. Relações empíricas entre UCS e outras propriedades físicas para Folhehos, unidades Δt : $\mu\text{s}/\text{ft}$, E: GPa e ϕ : fração. (Chandong, 2004).....	51
Tabela 3.2. Relações empíricas entre UCS e outras propriedades físicas para Arenitos, unidades Δt : $\mu\text{s}/\text{ft}$, E: GPa e ϕ : fração. (adaptado de Chandong, 2004).....	52
Tabela 3.3. Relações empíricas entre UCS e outras propriedades físicas para carbonatos, unidades Δt : $\mu\text{s}/\text{ft}$, E: GPa e ϕ : fração. (adaptado de Chandong, 2004).....	53
Tabela 5.1. Correlações selecionadas para estimar a UCS com os dados do perfil.....	65
Tabela 5.2. Dados de resistência de folhelhos da bacia de Campos (Muniz, 1998).....	67
Tabela 5.3. Dados de resistência de arenitos da bacia de Campos (Nicolino & Soares, 1997).	67
Onde:	67
Tabela 5.4. Dados de UCS de folhelhos e arenitos da bacia de Campos.....	67

Lista de símbolos

a, b, c = Constantes adimensionais da broca

a_d, b_d, s_d = coeficientes litológicos para as brocas de diamante

A_e = Área de bombeamento efetiva

A_{abr} = Abrasividade da formação

a_s, b_s = Constantes litológicas

A_p = Área inferior projetada da rocha comprimida pelo cortador

A_v = Área projetada da rocha comprimida ao frente do cortador

c' = coesão

Corr = Fator de correção litológico para brocas de diamante

cp = centipoise

Cr = Compressibilidade da matriz da rocha

D = Diâmetro da broca

d_s = diâmetro dos cortadores

E = modulo de Young

$f(P_e)$ = Função do efeito de diferencial de pressão no fundo do poço

ft = pé

GPM = taxa de fluxo do fluido de perfuração

KA = área aparente dos jatos

Im = Força de impacto modificado

In = polegadas

m = metros

MD = profundidade medida

N_c = Número de cortadores

P = Penetração do cortador na rocha

P_e = Diferencial de pressão função da litologia

P_w = Penetração perdida devido ao desgaste do cortador

P_p = Pressão de poros da formação

ppg = libras por galão

psi = libras por polegadas quadradas

P_w = Pressão do fluido de perfuração

q = Taxa de fluxo

ROP = Taxa de perfuração

R_e = Raio equivalente de rocha cortada em cada rotação

RPM = Taxa de rotação da coluna de perfuração
S = Resistência da rocha à perfuração
So = resistência à compressão simples
UCS = resistência à compressão simples
 V_D = Volume de rocha removida em cada rotação
 V_p = velocidade compressional medido da formação
 W_c = Coeficiente de desgaste da broca
 W_f = Função do desgaste dos dentes da broca
 W_{mech} = Peso real aplicado às brocas de diamante natural
WOB = Peso aplicada à broca
 α = ângulo de side rake
 β = ângulo de back rake
 σ_h = Tensão principal horizontal
 σ_v = Tensão principal vertical
 ΔBG = desgaste da broca reportado após a perfuração
 ΔP = Diferencial de pressão
 Δt = tempo de transito
 ε = Ductibilidade
 θ = ângulo atrito
 ϕ = porosidade
 λ = constante de desenho relacionada ao grau de cone offset
 μ = Viscosidade plástica do fluido
 ν = Relação de Poisson
 ρ = Densidade da lama ou fluido de perfuração