

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
S_o = 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

1 Introdução

A perfuração de poços para produção de petróleo e/ou gás tem como objetivo a construção de um furo estável que permita colocar em comunicação o reservatório com a superfície para a produção do(s) fluido(s) de interesse. Para se alcançar esse objetivo é necessário atravessar diferentes formações rochosas submetidas a complexos estados de geopressões e diferentes propriedades de resistência que podem acarretar severos problemas e, portanto, altos custos de perfuração.

A tecnologia MWD-LWD (a confiabilidade de suas medições) usada na Indústria do Petróleo permite não só fazer medições em Tempo Real (TR) durante a perfuração do poço, mas também a transmissão da mesma do sitio de perfuração a centros de monitoramento/suporte de operações. Esses centros, desde sua criação no final dos anos noventa para o suporte das operações no golfo de México (GOM) em águas profundas pela Shell e Halliburton (Kaminiske et al., 2002; van Oort et al., 2005), têm mostrado grande sucesso visto que não só prestam suporte para a solução de problemas, mas também atuam de forma proativa, permitindo prever situações, auxiliando a tomada de decisões e a redução de custos.

Tornou-se hoje quase convencional para as diversas fases da perfuração o suporte/monitoração das operações utilizando MWD-LWD. A literatura mostra diversas aplicações tais como: (i) navegação pelo subsolo para a construção da trajetória do poço e posicionamento (geosteering) do mesmo dentro do reservatório para incrementar a produção e a recuperação final do campo como também previsão de potenciais problemas como o cone de água, (ii) sísmica durante a perfuração (SWD) a qual permite obter informações à frente da broca (Vincké & Mabile 2004; Borland et al., 1997), (iii) acompanhamento e previsão da pressão de poros, (iv) análise de estabilidade de poços (Greenwood et al., 2005), como também a simulação da perfuração (Rommetveit et al., 2007; Hareland et al., 2007a). Em função destas aplicações, hoje fala-se em perfuração em TR.

Os avanços na tecnológica direcional para perfurar os poços horizontais e/ou de grande alcance estão se tornando tecnologias convencionais devido ao grande benefício que traz a produção e recuperação dos fluidos de interesse.

Segundo Warren (2006), os motores de fundo (steerable motor) ainda comandam 80% da demanda do mercado da perfuração direcional, a principal razão para isto é ainda o alto custo dos sistemas Rotary Steerable.

A Figura 1 mostra os principais componentes de um sistema de perfuração rotativa para a perfuração de poços de petróleo e/ou gás. A broca de perfuração constitui-se no último elemento da coluna de perfuração e é a ferramenta utilizada para cortar ou triturar a rocha. A tecnologia no desenvolvimento de brocas também tem evoluído muito. Hoje se desenham brocas que alcançam um maior rendimento (maior ROP) e uma maior vida útil (menor desgaste). Isto tem grande impacto quando se perfura em lâminas de água ultraprofundas, poços direcionais e de longo alcance, onde o tempo de manobra acaba se tornando excessivamente alto, influenciando de maneira direta o custo total da operação de perfuração. Dentro deste contexto, fica evidente a preocupação e a necessidade da correta escolha e operação das brocas de perfuração (Plácido, 2007).

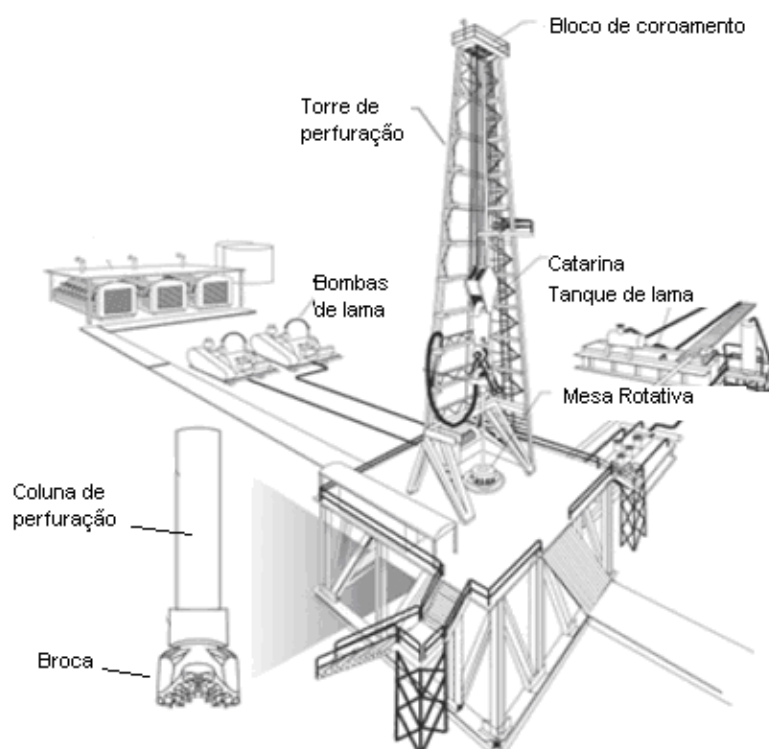


Figura 1.1 – Principais elementos de um sistema de perfuração para poços de petróleo e/ou gás. (Modificado Manual de perfuração da Halliburton, 2000).

1.1. Motivação da Pesquisa

Neste contexto é importante estabelecer metodologias que aproveitem a informação disponível/transmitida em TR, tanto no sitio da perfuração como nos centros de suporte/monitoramento ajudando dessa forma à toma de decisões em TR proporcionando uma redução de custos e segurança das operações. Dentro dessas informações disponíveis encontram-se os parâmetros operacionais da perfuração (peso sobre a broca WOB), revoluções por minuto da broca (RPM), taxa de fluxo (GPM) e taxa de perfuração (ROP), os quais são informações permanentes e de baixo custo.

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, segundo Winters et al. (1987); e Fjaer et al. (2008) a perfuração de poços é uma operação que envolve uma complexa interação de grande quantidade de grandezas entre as quais se destacam o tipo e o desenho da broca, as condições de operação e a mecânica das rochas.

O grande avanço na tecnologia das brocas como se deixa entrever ao longo desta pesquisa e no breve histórico apresentado na continuação, se deve em grande parte à grande pesquisa feita na procura de entender a interação de um só cortador - rocha, os modelos de perfuração (ou modelos ROP) propostos para a previsão da taxa da perfuração e o grande avanço na tecnologia dos materiais.

As primeiras brocas utilizadas na perfuração rotativa foram brocas de arraste, tipo rabo de peixe (Figura 1.2a) as quais não possuem partes móveis e seu principal mecanismo de corte é pela raspagem. No principio do século XX apareceram as primeiras brocas de cones rotativos de dois e três cones (Figura 1.2b) que apresentavam como mecanismo de corte o esmagamento da rocha (Bourgoyne et al., 1991; Plácido, 2007).



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).

Na década de setenta foram introduzidas brocas de diamantes sintéticos PDC (Figura 1.3c) as quais nos ensaios de laboratório apresentaram altas taxas de perfuração criando uma grande expectativa, mas tiveram muitos problemas quando foram utilizadas em campo. A partir dos anos noventa com a identificação e superação de alguns problemas, como as altas taxas de desgaste sofridas pelos cortadores devido às altas temperaturas geradas no processo de corte da rocha e a identificação da causa do rompimento/falha dos cortadores devido às vibrações (whirl) geradas durante a perfuração (Warren & Sinor, 1994), tem-se conseguido uma melhora significativa de desempenho com altas taxas de perfuração em folhelhos, evaporitos, etc. e longos intervalos perfurados (Sinor et al., 1998, ver Figura 1.3). Isso têm tornado seu uso viável economicamente apesar de terem preço bem mais elevado que as brocas tricônicas.

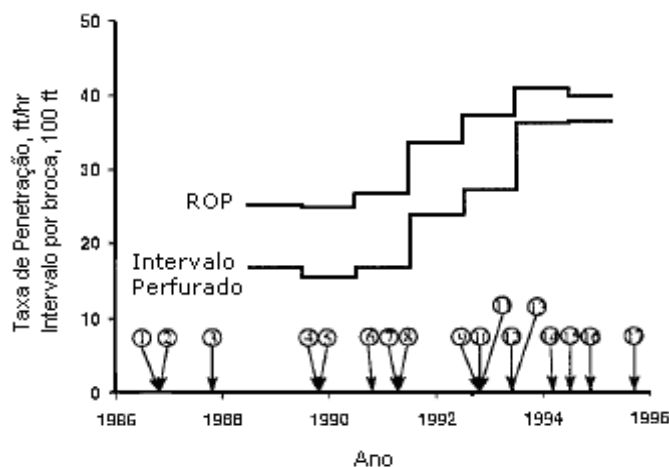


Figura 1.3. Histórico do desempenho das brocas PDC, as flechas indicam as datas da publicação de artigos específicos. (Modificado de Sinor et al., 1998).

A indústria do petróleo nas últimas quatro décadas tem realizado muitas pesquisas com a finalidade de entender a interação broca-rocha, com o objetivo de realizar uma melhor seleção das brocas e dos parâmetros operacionais e, assim, otimizar o processo da perfuração dos poços diminuindo o tempo de perfuração e permitindo perfurar com maior segurança e menores custos.

O processo de geração e remoção de cortes da rocha é um processo complexo, razão pela qual os modelos de perfuração (Modelos ROP) propostos têm sido empíricos ou semi-empíricos para os vários tipos de brocas. O maior modelamento tem sido dedicado às brocas com partes moveis (tricônicas) devido a seu extenso uso. Porém, como foi mencionado, nas últimas décadas as brocas PDC tem tido um grande uso devido ao melhor entendimento e desenhos que reduzem os efeitos das vibrações e aumento da vida de uso das mesmas (Sinor et al., 1998).

Modelos altamente sofisticados e confiáveis têm sido desenvolvidos para a predição da taxa de perfuração para todos os tipos de brocas (Winters et al., 1987; Hareland et al., 1994). Esses modelos são atualmente usados para a simulação de diversos cenários antes da perfuração de um novo poço tendo como objetivo escolher as melhores combinações dos parâmetros para a otimização da operação da perfuração. Os modelos de perfuração podem ser utilizados numa metodologia inversa para obter um perfil de resistência da rocha in situ à perfuração. Esses modelos têm sido verificados na perfuração de poços no Mar do Norte (Bratli et al., 1998) e no Canadá (Hareland & Nygaard 2007), reduzindo de maneira sensível os custos de seções dos poços.

Segundo Fjaer et al., (2008) não há métodos diretos disponíveis para a determinação da resistência da rocha in situ, sendo a maioria das pesquisas e esforços focadas no desenvolvimento de correlações empíricas, especialmente baseadas em velocidades acústicas e/ou densidade e UCS, e porosidade e UCS, tendo uma grande desvantagem, visto que freqüentemente, precisam ser calibradas para um novo poço ou uma nova área.

A resistência não confinada (UCS, Unconfined Compressive Strength) das rochas é um parâmetro de grande relevância na análise de problemas geomecânicos tais como: análise de estabilidade de poços, na restrição quantitativa das magnitudes das tensões in situ usando as falhas observadas no poço (Zoback et al., 2003), na determinação do potencial de produção de areia (Santarelli et al., 1989), na seleção de brocas, entre outras.

Daí a importância do estudo dos modelos ROP como dos estudos da interação cortador-rocha no aproveitamento da disponibilidade dos parâmetros operacionais na procura de estimar a resistência não confinada das rochas.

1.2. Objetivos da Pesquisa

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa envolve o estudo dos modelos ROP mostrados na literatura para os diferentes tipos de brocas usados na perfuração rotativa de poços de petróleo e/ou gás, com a finalidade de estimar a UCS em tempo real a partir dos parâmetros de perfuração. Isso se justifica visto a utilidade/relevância desse parâmetro para avaliações relacionadas a problemas geomecânicos.

1.2.2 Objetivo Específicos

Estimar perfis de resistência da rocha à perfuração usando o modelo de ROP de broca PDC (Hareland & Rampersad, 1994) para dois poços de uma bacia brasileira.

Correlacionar a resistência da rocha à perfuração (S) e a UCS de maneira que esta última possa ser estimada mediante o uso dos parâmetros da perfuração. Para isto, se estimará a UCS a partir de perfis geofísicos de poços (tempo de trânsito compressional e cisalhante e densidade) com correlações publicadas na literatura e se calibrará a mesma com dados de ensaios de resistência (para a bacia sedimentar de interesse) publicados na literatura.

1.3. Contribuição da Pesquisa

A principal contribuição desta dissertação é a apresentação de uma nova metodologia para a estimativa da UCS a partir de dados de perfuração que pode ser aplicada em Tempo Real durante a perfuração. Também, a utilização do espaço da análise UCS/S vs. WOB/RPM se mostra muito promissor nas análises relacionadas ao planejamento/otimização da perfuração e avaliação da perfuração em Tempo Real.

Outra contribuição deste trabalho é apresentar uma bibliografia cronológica dos modelos ROP e algumas pesquisas da interação de ensaios de laboratórios de um só cortador com a rocha, para um melhor entendimento do processo da perfuração.

1.4. Estrutura da dissertação

Este item aborda uma descrição dos capítulos componentes da estrutura desta dissertação. Este trabalho está estruturado em seis capítulos, incluindo essa introdução, que caracteriza o Capítulo 1, e uma seção de referências bibliográficas.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica onde é apresentado o desenvolvimento dos modelos de ROP, e os diversos parâmetros e/ou propriedades envolvidas na perfuração de um poço de petróleo.

O capítulo 3 apresenta a metodologia e correlações usualmente usadas para a estimativa da UCS a partir de perfis geofísicos de poços.

No Capítulo 4 é apresentada a metodologia e uma aplicação da mesma para determinar os perfis de resistência de dois poços de uma bacia brasileira que serão usados posteriormente no objetivo desta pesquisa na correlação com a UCS.

No Capítulo 5 é mostrada a metodologia proposta para a estimativa da UCS a partir de dados de perfuração e aplicada aos dois poços sob estudo. Também se apresentam algumas considerações do uso desta correlação no planejamento/otimização de um novo poço e na avaliação em TR da perfuração.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros. Ao final do volume, se apresenta a seção de referências bibliográficas utilizadas para a elaboração dessa dissertação.

2 Modelos ROP

Revisão da Literatura

Este capítulo apresenta uma revisão dos modelos ROP mostrados na literatura e dos estudos de ensaios de um só contador rocha-broca.

A indústria do petróleo tem dedicado muitos anos de pesquisa no entendimento e modelamento do desempenho das brocas de perfuração; (Winters et al, 1987). O contínuo objetivo tem sido desenhar, selecionar e operar as brocas para um melhor desempenho da mesma e uma maior eficiência da perfuração. A atenção tem sido focada na predição e interpretação da taxa de perfuração (ROP).

Os chamados modelos ROP são equações empíricas ou semi-empíricas mostrados na literatura com a finalidade de prever a taxa de perfuração em função de parâmetros operacionais (WOB, RPM, GPM entre outros), tipo e/ou desenho da broca e propriedades da formação perfurada.

As brocas usadas na perfuração rotativa são classificadas como brocas com partes móveis e brocas sem partes móveis, sendo esta mesma classificação adotada para apresentação no desenvolvimento dos modelos.

2.1. Modelos ROP para as brocas com parte móveis.

O tipo de broca mais conhecida desta categoria é a broca tricônica. Essas brocas são disponíveis numa grande variedade de tipo de dentes e insertos (tamanho e formas variáveis), e tipos de rolamentos (selados ou não selados, de esferas ou mancais). São adequadas praticamente para todos os tipos de formações.

Os mecanismos de corte básicos das brocas são: acunhamento, raspagem, esmerilhamento, esmagamento e erosão por ação de jato de fluido. Normalmente um deles é predominante para determinados tipos de brocas (Bourgoyne et al., 1991; Plácido, 2007).

Para as brocas tricônicas com dentes de aço o mecanismo de corte associado é o de acunhamento e arrancamento (wedging). Para as tricônicas

com insertos de carbureto de tungstênio o mecanismo associado é o de esmagamento (crushing). (Plácido, 2007)

A literatura mostra que o processo de perfuração envolve uma complexa interação de mais de 20 variáveis independentes, das quais a mecânica das rochas, o desenho das brocas e a condição de operação das mesmas são as mais destacadas. A maioria dos modelos ROP publicados na literatura usam hipóteses muito simplificadas acerca do desenho da broca junto com indicadores empíricos da resistência da rocha tais como: índice de perfurabilidade, energia específica, entre outros. Porém Winters et al. (1987), assinalam que esses métodos quando calibrados para uma área podem prover previsões aceitáveis. Métodos práticos para quantificar a cinemática das brocas tricônicas e descrever a interação broca-rocha não tem tido sucesso. Isto se deve em parte à dificuldade de escolher um conjunto de dimensões características que possam caracterizar o desenho destas brocas.

Caicedo et al., (2005); e Guerrero & Kull (2007) apresentaram uma metodologia para a otimização da perfuração baseada no método da energia específica. Essa metodologia tem sido aplicada em diferentes poços pela Shell com bons resultados em diferentes bacias de Leste da África e no Brasil. Este modelo precisa muito parâmetros não fácil de obter ou calibrar como a eficiência da perfuração e o coeficiente de atrito ao deslizamento específico da broca, nesta pesquisa esta metodologia não será apresentada.

Na continuação, são apresentados os aspectos mais destacados dos modelos ROP mais robustos publicados na literatura.

2.1.1

Modelos ROP: Warren (1987), Winters et al. (1987).

O modelo apresentado na equação 2.1 foi o produto de um grande projeto de pesquisa financiado pela antiga AMOCO. Fizeram parte desse projeto Warren, T.M., Winters, W.J. e Onyia, E.C., Essa pesquisa começou com uma avaliação dos modelos existentes até então (1981). A Figura 2.1 apresenta uma comparação desses modelos ROP com dados experimentais obtidos em laboratório de perfuração a grande escala (Warren T., 1981). Esta Figura mostrou a necessidade de uma grande pesquisa nesta área, devido que os modelos existentes não apresentaram previsões satisfatórias quando comparadas a dados reais experimentais de campo.

$$ROP = \left(\frac{aS^2D^3}{RPM * WOB^2} + \frac{b}{RPM * D} + \frac{cD\mu\rho}{I_m} \right)^{-1} \quad (2.1)$$

Onde:

ROP = Taxa de perfuração (ft/hr).

S = Resistência à perfuração da rocha (psi).

WOB = Peso aplicado sobre a broca (lbs).

RPM = Taxa de rotação da coluna de perfuração (RPM).

D = Diâmetro da broca (in).

a, b, c = constantes da broca obtidas de ensaios no laboratório.

μ = viscosidade plástica do fluido de perfuração, cp.

ρ = densidade específica do fluido, adimensional.

I_m = força de impacto modificada, lbs.

Cada termo do modelo representado pela equação 2.1 tem associada uma concepção física do processo de perfuração e é descrito a seguir:

$\frac{aS^2D^3}{RPM * WOB^2}$ o primeiro termo está associado ao processo de indentação da rocha que descreve a taxa de geração de cascalhos.

$\frac{b}{RPM * D}$ o segundo termo, corrige o efeito de se incrementar o peso sobre a broca (W) devido que os dentes penetram mais e mais dentes estarão em contacto com a rocha reduzindo a taxa de perfuração.

$\frac{cD\mu\rho}{I_m}$ o terceiro termo está relacionado à hidráulica e limpeza do poço na remoção dos cascalhos.

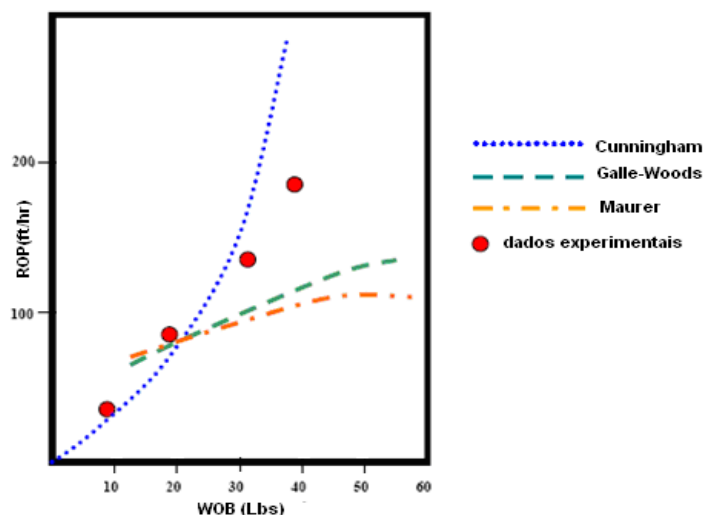


Figura 2.1 – Comparação da ROP predita por alguns modelos de perfuração e dados experimentais (Warren, 1981).

Warren & Smith (1985) avaliaram a influência da variação do estado de tensões no fundo do poço sobre a taxa de perfuração mediante um programa em elementos finitos. Concluíram que devido à perfuração (remoção da sobrecarga e troca pelo fluido de perfuração) a tensão média sofre uma diminuição no fundo do poço que causa um incremento de volume da rocha na proximidade do mesmo. Isto reduz significativamente a pressão de poros no caso de formações impermeáveis (catalogadas assim quando o tempo transcorrido até ocorrer a perfuração não é suficiente para restabelecer o campo de pressão de poros inicial) tais como os folhelhos, mas não afeta o campo de pressões nas formações permeáveis, conservando-se, desta forma o diferencial de pressão imposto pela pressão do fluido de perfuração e a pressão da formação.

Cunningham (1959) obteve resultados experimentais onde a ROP para arenitos foi fortemente afetada pela diferença entre a pressão do fluido de perfuração e a pressão de poros (Figura 2.2).

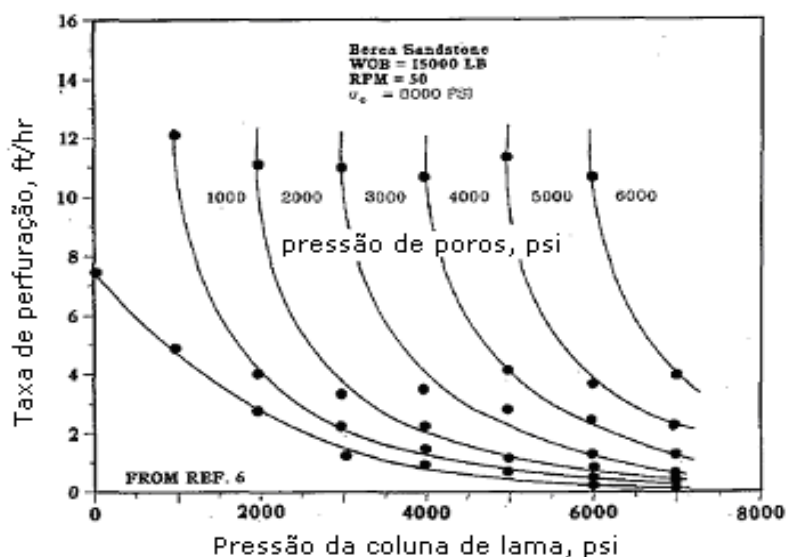


Figura 2.2 – Efeito da diferença da pressão do fluido de perfuração e a pressão de poros para um arenito permeável (Cunningham 1959).

A Figura 2.3 do estudo de Warren & Smith (1985) apresenta que para rochas de baixa permeabilidade devido aos efeitos poroelásticos se induz um diferencial de pressão mesmo que o diferencial de pressão imposto pelo fluido de perfuração e pressão de poros da formação seja nulo (pressão do fluido de perfuração igual à pressão de poros), para o caso do estudo a uma profundidade de aproximadamente 2,8mm (0,11in) abaixo do fundo do poço a rocha será afetada por um diferencial de 1400psi (9,67MPa) no centro do poço trazendo consigo a diminuição da ROP.

Na mesma Figura 2.3 se observa que para casos de condição sobrebalanceada, isto é, onde é imposto um diferencial de pressão pelo fluido de perfuração e a pressão de poros a rocha será afetada por um diferencial de pressão maior devido aos efeitos antes mencionados. Isto traz um incremento da resistência da rocha à perfuração e a redução da taxa da perfuração.

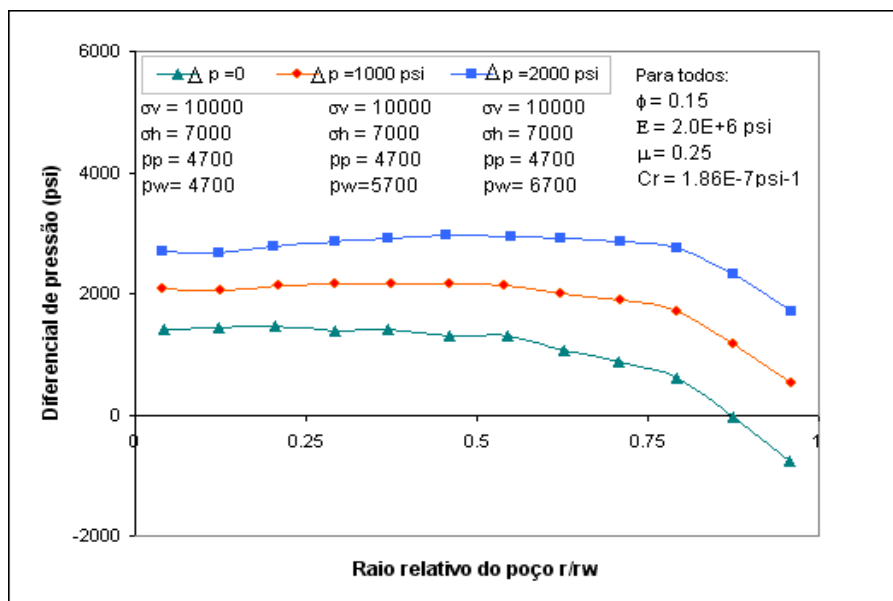


Figura 2.3. Diferencial de pressão induzido em 2,8mm (0,11in) abaixo da superfície do fundo do poço para uma formação impermeável. (Warren & Smith 1985).

Na Figura 2.4 é apresentado um caso de condição sub-balanceada onde observa-se que é possível que a rocha esteja submetida em estado de tração, o que explica o efeito de aumento anormal da ROP (drilling break) em formações de folhelhos pressionadas anormalmente.

Warren (1987) recomenda para a utilização do modelo expresso pela equação 2.1 que as constantes adimensionais do modelo a, b, e c (de ensaios no laboratório) deveriam ser obtidas às pressões representativas da situação dinâmica esperada durante a perfuração. A Tabela 2.1 mostra os parâmetros a, b e c para uma broca de 8 ½" (21,59cm) serie IADC 617 a um diferencial de pressão a 0,69MPa (100psi) e a 8,96MPa (1300psi).

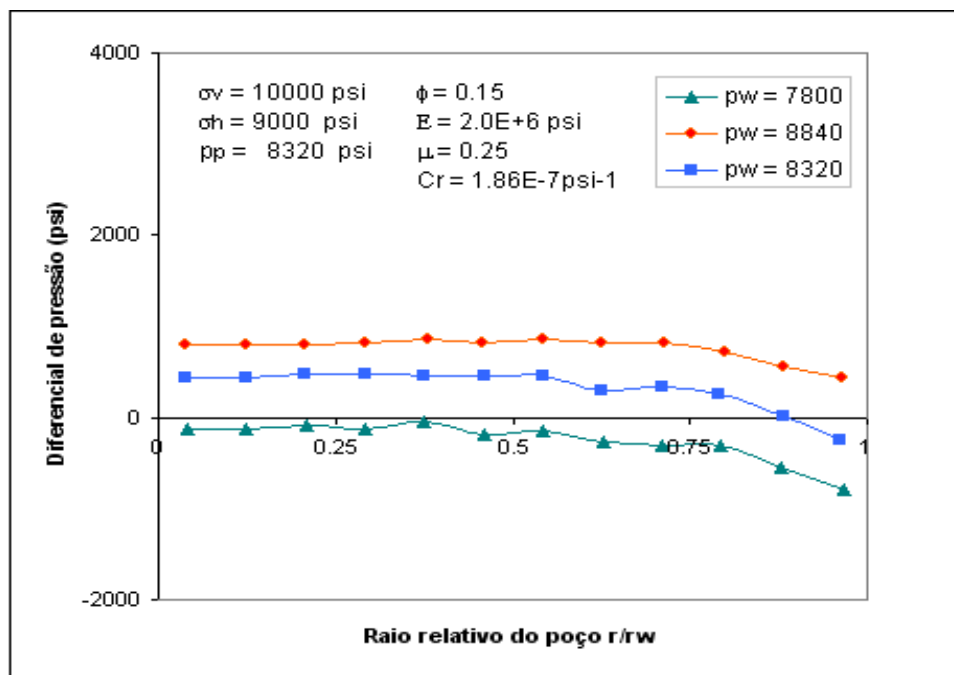


Figura 2.4. Efeito da pressão de poros anormalmente alta no diferencial de pressão induzido a 2,8mm (0.11 in) abaixo da superfície do fundo do poço para uma formação impermeável. (Warren & Smith, 1985).

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).

	A	b	c
617 ($\Delta p = 100\text{psi}$)	0,473	3,519	0,000504
617 ($\Delta p = 1300\text{psi}$)	0,642	7,33	0,004

No mesmo ano, Winters et al., (1987) publicaram uma modificação do modelo de Warren (1987), que incluía dois novos parâmetros no modelo: a ductibilidade (ε) da rocha e ϕ relacionado ao grau de cone offset ficando o modelo de acordo mostrado na equação 2.2. Na Tabela 2.2 se ilustram para duas brocas 211 e 427 na classificação IADC as constantes do modelo avaliadas a uma pressão diferencial de 1200psi (8.28MPa).

$$ROP = \left(\frac{aS^2D^3\varepsilon}{RPM * WOB^2} + \frac{\lambda SD^2}{RPM * WOB * \varepsilon} + \frac{b}{RPM * D} + \frac{c\rho\mu D}{I_m} \right)^{-1} \quad (2.2)$$

Onde:

ε = ductibilidade ou deformação axial da rocha, adimensional (ε)

λ = parâmetro relacionado ao grau de cone offset (1/longitude).

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).

IADC código	A	b	c	λ
2-1-1	0,0083	8,763	0,0023	0,0248
4-2-7	0,0101	1,303	0,0020	0,0123

A inclusão do parâmetro de grau de cone offset (ϕ) no modelo de Warren tem como finalidade expandir o modelo para desenhos de brocas mais eficientes em formações mais dúcteis como os folhelhos.

A geometria dos cones afeta a forma como os dentes cortam a formação. Um cone que tenha uma superfície cônica única com seu eixo no centro de rotação da broca, ou seja, sem offset, rodará no fundo do poço sem nenhuma ação de deslizamento ou arraste. Os cones das brocas para formação moles possuem dois ou mais ângulos básicos no cone, nenhum dos quais tem seu centro no centro de rotação da broca, ou seja, com offset. Com isso, a superfície exterior do cone tende a rodar ao redor de seu eixo teórico e as fileiras interiores, perto do centro, em seu próprio eixo, como mostrado esquematicamente na Figura 2.5 (Plácido, 2007).

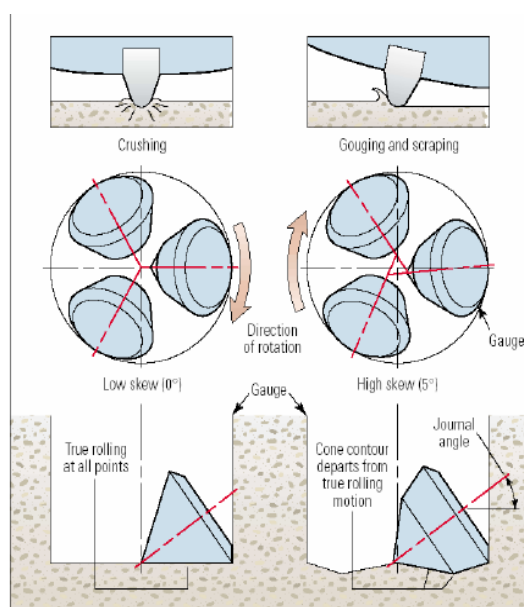


Figura 2.5. Ilustração de uma broca tricônica com e sem cone offset. (Plácido, 2007).

Os cones são forçados a rodar ao redor do centro da broca. Como possuem ângulos de ataque diferentes produzem maior taxa de raspagem (melhor maneira de perfurar de forma efetiva as rochas brandas). Portanto, uma

ação mais efetiva para incrementar a taxa de penetração em formações moles é aumentando o offset dos eixos dos cones. (Plácido, 2007; Bourgoyne et al., 1991).

A Figura 2.6 mostra um exemplo para uma broca de inserto (IADC 427) de diâmetro 20 cm (7 7/8") com características de alto grau de cone offset (ver Tabela 2.2) o que lhe permitiria perfurar eficientemente em folhelhos. Na Figura se observa o comportamento esperado para este tipo de broca obtendo-se taxas de perfuração mais altas no folhelho (dúctil e brando) comparadas às do dolomito (frágil e duro). Também se apresenta uma boa previsão do modelo quando comparado aos dados experimentais para a broca nas duas litológicas.

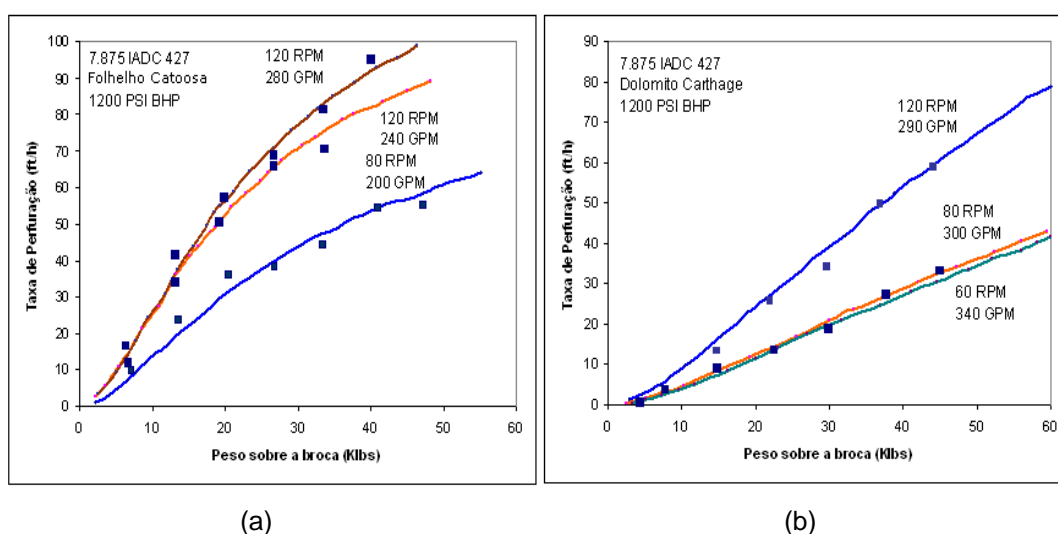


Figura 2.6. ROP para uma broca de inserto (427) com alto grau de cone offset. a) resposta do ROP no folhelho brando e dúctil. b) dolomito frágil e duro. (Winters et al., 1987).

Na Figura 2.7 são mostradas as taxas de perfuração para as mesmas litologias da Figura 2.6. Neste caso se perfurou com uma broca de inserto (IADC 737) para formações duras (com baixo grau de cone offset). Observam-se satisfatórias previsões do modelo quando comparadas aos dados experimentais. Apesar do folhelho ($UCS=55,2MPa$, 8000psi) possuir menor resistência que o dolomito ($UCS=96,5MPa$, 14000psi), esta broca perfurou mais rápido nesta última litologia devido ao efeito do grau de cone offset. Este folhelho é mais dúctil ($\epsilon=0,8$) que o carbonato ($\epsilon=0,3$) assim limitando o volume da cratera que é gerada durante a indentação do dente explicando a menor ROP no folhelho.

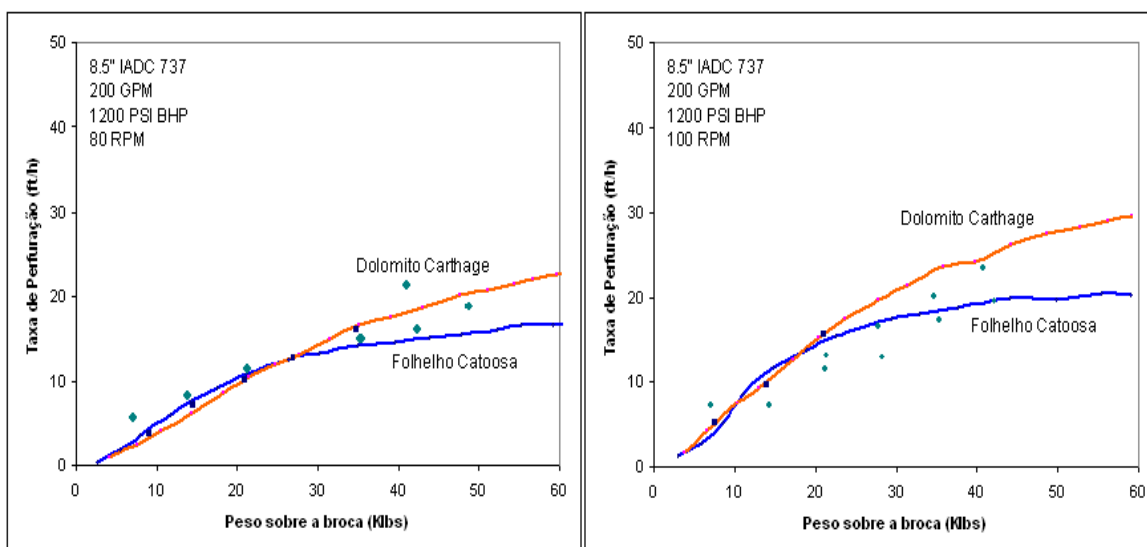


Figura 2.7. ROP em função do WOB para uma broca de inserto (737) com baixo grau de cone offset, a) para 80 RPM b) para 100 RPM. (Winters et al., 1987).

O parâmetro de cone offset apesar de ter um caráter físico conhecido é bem difícil ter uma noção de sua grandeza no modelo como também quando uma broca tem um alto grau ou um baixo grau a partir do mesmo.

Devido aos bons resultados quando compararam as previsões do modelo ROP com os dados de laboratório, Winters et al., (1987) pensaram inverter o modelo uma vez perfurado um poço para obter o perfil da resistência das rochas, para o qual o modelo seria usado de acordo a equação 2.3.

$$S = \left(\frac{WOB^2}{aD^2 \varepsilon} \left[\frac{RPM}{ROP} - \frac{b}{D} - \frac{c\rho\mu D * RPM}{I_m} - \frac{\lambda WOB}{2a\varepsilon^2} \right] \right)^{0.5} - \frac{\lambda * WOB}{2aD\varepsilon^2} \quad (2.3)$$

Para o propósito de avaliação do modelo em campo, foi perfurado um poço designado DM-2 (Drilling Mechanics). Foram registrados os parâmetros da perfuração num intervalo de 3000 ft e usadas três brocas 21,59cm (8 ½ in) com códigos IADC 437, 537 e 627. Essas brocas tinham sido avaliadas previamente no laboratório. Calcularam-se o perfil de resistência obtendo valores num range de 20,7 a 207 MPa (3000 a 30.000 psi) para uma coluna geológica desde o Pennsylvaniano ao Pré-cambriano. Um segundo poço adjacente ao anterior a 91,4m (100 jardas) e de 579m (1900ft) de comprimento foi perfurado. Foram recuperados testemunhos para ser ensaiados em células triaxiais com pressões de confinamento numa faixa de 0,69 a 34,5MPa (100 a 5000 psi). Os valores de

resistência estimados se ajustaram muito bem quando comparadas com os ensaios triaxiais a pressão de confinamento similar à pressão diferencial da perfuração.

Um terceiro poço foi perfurado com um diâmetro de broca diferente (9 7/8 in IADC 114) e operado com taxas de fluxo e taxas de rotação da coluna maiores e com níveis menores de peso sobre a broca. Os resultados do perfil calculados conferiram que o modelo ROP com ductibilidade e cone offset podia ser usado para determinar a resistência da rocha a partir de parâmetros de perfuração.

2.1.2 Modelo ROP de Hareland

Hareland (1991), apresentou uma metodologia usando os parâmetros de perfuração para prever limites da tensão principal mínima in situ para cada pé de rocha perfurado utilizando o modelo de Warren (eq. 2.1) após modificá-lo.

Segundo ele o modelo de Winters et al. (eq. 2.2) pode envolver algo de subjetividade ao incluir a ductibilidade da rocha (ϵ) como também uma fonte de erro devido a dificuldade para medir dito parâmetro e disponibilidade ao ser este dependente da pressão de confinamento, razão pela qual decidiu partir su análise do modelo de Warren (eq. 2.1). Ele também assinalou que os efeitos de diferencial de pressão atuante sobre os cortes de rocha (chip hold down) não tinham sido modelados dentro dos efeitos que influenciavam a previsão da ROP. Ele considerava que esse efeito podia ser relevante para poços profundos tais como sugeriam os trabalhos publicados por Cheatham et al., (1965), Garnier et al., (1959) e Jorden et al., (1966) (ver Figura 2.8). Porém não existe ainda um modelo publicado que modele adequadamente este efeito. A equação 2.4 que mostra o modelo modificado foi obtida de forma a levar em conta o efeito de chip hold down encontrado que é função da litologia e da pressão de poço para formações de baixa permeabilidade (folhelhos) e o diferencial de pressão para formações de altas permeabilidades. Essa função foi determinada de um conjunto de ensaios de perfuração a grande escala em laboratório a diferentes pressões de fundo de poço.

$$f(P_e) = c_c + a_c (P_e - 120)^{b_c} \quad (2.4)$$

Onde:

P_e = diferencial de pressão; sendo para litologias permeáveis igual à pressão do fluido de perfuração menos a pressão de poros; e para as litologias impermeáveis o diferencial é dado pela pressão do fluido de perfuração.

a_c, b_c, c_c = constantes dependentes da litologia.

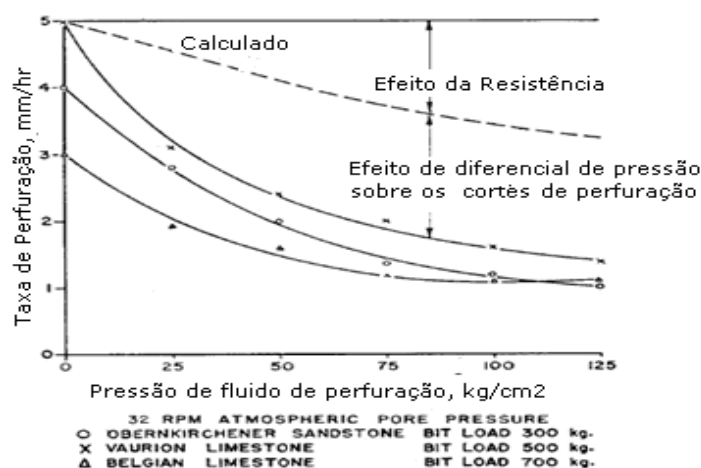


Figura 2.8. Efeito da pressão de fundo de poço (diferencial de pressão) na ROP, pressão de poros a condição atmosférica (modificado de Jorden et al., (1966)).

Na Tabela 2.3 se apresentam alguns valores obtidos por Hareland (1991) para as formações litológicas: folhelho Catoosa e dolomito Carthage. O modelo ROP desenvolvido se mostra na equação 2.5.

Tabela 2.3 – Coeficientes litológicos da função chip hold down para dois tipos litológicos avaliados pelo Hareland et al. (tomado do Hareland, 1991).

Litológica	a_c	b_c	c_c
Catoosa Folhelho	0,004966	0,75721	0,10254
Carthage Carbonato	0,014132	0,47016	0,56948

$$ROP = \left(f(P_e) \left[\frac{aS^2D^3}{RPM * WOB^2} + \frac{b}{RPM * D} \right] + \frac{c\rho\mu D}{I_m} \right)^{-1} \quad (2.5)$$

O modelo invertido para determinar o perfil de resistência à perfuração é mostrado na equação 2.6.

$$S = \left[\frac{RPM * WOB^2}{af(P_e)ROP * D^3} - \frac{bWOB^2}{aD^4} - \frac{c\rho\mu * RPM * WOB^2}{af(P_e)I_m D^2} \right]^{0.5} \quad (2.6)$$

Durante a perfuração a broca sofre o desgaste dos dentes, ou rompimento dos mesmos; sendo esses efeitos não contemplados nos modelos apresentados até aqui. Rampersad et al., (1994), apresentaram uma metodologia para incluir o efeito do desgaste nas previsões do modelo com base nas equações 2.6.

$$ROP = W_f \left(f(P_e) \left[\frac{aS^2 D^3}{RPM * WOB^2} + \frac{b}{RPM * D} \right] + \frac{c\rho\mu D}{I_m} \right)^{-1} \quad (2.6a)$$

$$\Delta BG = W_c \sum_{i=1}^n WOB_i RPM_i Ar_{abr_i} S_i \quad (2.6b)$$

$$W_f = 1 - \frac{\Delta BG}{8} \quad (2.6c)$$

Onde:

W_c = coeficiente de desgaste da broca determinado a partir de uma retroanálise de um intervalo perfurado pela broca;

Ar_{abr} = Abrasividade relativa da rocha dada pela porcentagem de quartzo presente na formação;

W_f = função de desgaste;

ΔBG = avaliação dos dentes da broca ao desgaste após a perfuração sendo este valor variável de 0 a 8.

A resistência da rocha não pode ser estimada de maneira direta das equações 2.6, isto devido que o coeficiente de desgaste é função da resistência da rocha, portanto, deve ser utilizado num método por teste e erro para determinar esses parâmetros para o intervalo perfurado sob análise quando a broca a sofrido desgaste da estrutura cortante.

Hareland (1991) também apresentou uma correlação dada pela equação 2.7 para a estimativa da resistência não confinada da rocha (UCS) uma vez que se conta com a resistência à perfuração estimada do modelo ROP.

$$S = UCS(1 + a_s P e^{b_s}) \quad (2.7)$$

Onde:

S = Resistência da rocha obtida da inversão do modelo ROP.

UCS = Resistência da rocha não confinada

a_s , b_s = coeficientes litológicos da resistência da rocha (Tabela 2.4 mostra alguns exemplos).

P_e = diferencial de pressão; sendo para litologias permeáveis igual à pressão do fluido de perfuração menos a pressão de poros; e para as litologias impermeáveis o diferencial é dado pela pressão do fluido de perfuração.

Tabela 2.4 – Coeficientes litológicos da resistência da rocha obtidos de ensaios triaxiais convencionais. (tomado Hareland, 1991).

Litológica	a_s	b_s
Folhelho (geral)	0,0043188	0,74191
Arenito (geral)	0,01331	0,57106
Folhelho Mancos	0,0033110	0,649783
Carbonato Carthage	0,0041415	0,678632
Folhelho Catoosa	0,0029602	0,969629

2.2.

Modelos ROP para brocas sem parte móveis.

Neste grupo de brocas se agrupam as brocas que têm como principal mecanismo de corte da rocha o esmerilhamento e o cisalhamento, por exemplo, as brocas de diamante naturais e as brocas de diamante sintético PDC. Nesta seção se apresenta um breve histórico de estudos sobre interação cortador de broca PDC/rocha, e na seqüência os modelos ROP para brocas de diamantes naturais e PDC.

Sellami et al., (1989), apresentaram um estudo numérico da influência das tensões in situ no fundo do poço sobre a taxa de perfuração para as brocas PDC. Concluindo que, o efeito das tensões in situ é depreciável devido ao mecanismo de cisalhamento destas brocas ao cortar a rocha (ver Figura 2.9), ele assinala que apesar de que regiões de tração podem ser criadas favorecendo a perfuração. Porém, quando se perfura com fluido de perfuração (pressão em fundo do poço) e devido ao desenho da broca (ângulo de back rake negativo) a rocha a ser cortada é colocada sob compressão, tirando importância ao efeito das tensões (regiões de tração geradas). Segundo Sellami este efeito explicaria

a diminuição da taxa de perfuração (ROP) na perfuração de poços de grande profundidade.

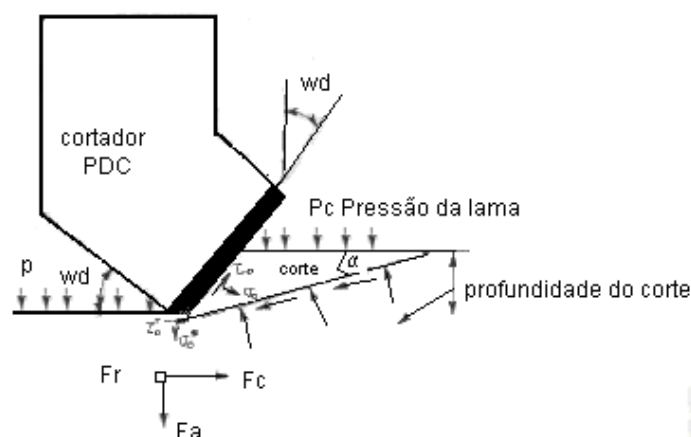


Figura 2.9. Esquema que ilustra um cortador PDC no processo de corte da rocha (modificado de Sellami et al., (1989).

Kolle (1996) concluiu que durante a perfuração com brocas de PDC os folhelhos que apresentam um caráter dilatante sob cisalhamento em formações a grande profundidade podem sofrer uma pressão de confinamento dinâmica que iguala à pressão de fundo de poço dada pela pressão de fluido de perfuração no fundo. Segundo Kolle, esse diferencial de pressão incrementa a resistência da rocha à perfuração trazendo consigo a diminuição da ROP. Segundo Zijsling (1987) e Detournay & Atkinson (1991), a cavitação do fluido dos poros pode acontecer nas rochas impermeáveis durante a deformação de cisalhamento sob a ação de um cortador de arraste. Segundo eles este efeito de cavitação limitaria o diferencial de confinamento dinâmico a um valor máximo e igual à pressão de fundo de poço (devido que a pressão de poro se reduz a zero). Kolle (1996) obteve resultados onde a resistência da rocha à perfuração se incrementou em até seis vezes o valor da UCS para o folhelho Mancos sob pressão de poço de 70MPa (devido ao efeito antes mencionado).

Zijsling (1987) obteve para formações de baixa permeabilidade como o folhelho Pierre que não apresenta notáveis características dilatantes sob cisalhamento, resultados que lhe permitiram concluir que para este tipo de folhelho o processo de corte era influenciado tanto pelas pressões impostas pela pressão de fluido de perfuração no fundo do poço como pela pressão de poros. Para o folhelho Mancos os resultados que obteve foram similares aos obtidos posteriormente por Kolle.

Segundo Detournay & Tan (2002), os folhelhos representam aproximadamente 75% das rochas encontradas (em termos de intervalo vertical) durante a perfuração de poços para petróleo e/ou gás. Taxas de perfuração ROP tão altas como 60m/h quando perfurando um folhelho podem ser alcançadas sem um desgaste severo dos cortadores, ainda depois de milhares de pés perfurados. Porém, taxas tão baixa como 1m/hr são freqüentemente reportadas também quando perfurando em folhelhos. Detournay & Tan (2002) assinalam que as razões por detrás das quais baixas taxas de perfuração se apresentam parecem depender se o folhelho é brando ou duro. Em folhelhos brandos as baixas taxas de perfuração são geralmente associadas com o enceramento da broca, problema que pode ser mitigado por uma combinação do desenho da broca (dentes muito longos), melhorando a hidráulica da broca e tratamento superficial da broca (efeitos eletroquímicos). Enquanto em folhelhos duros, o pobre desempenho parece ser devido à grande energia específica (energia requerida para cortar/destruir um volume de rocha) que é encontrada a grandes profundidades. Esta é função da pressão de fundo do poço. Experimentos de laboratórios confirmaram que esta energia específica é independente da pressão de poros.

2.2.1 Modelo ROP para Brocas de Diamante Natural.

O mecanismo de corte associado a este tipo de broca é o esmerilhamento. Estas brocas são recomendadas para formações de resistência média a dura e abrasivas. O tamanho e quantidade (densidade) dos elementos cortadores são função da dureza da formação a ser perfurada.

Este modelo proposto por Hareland & Rampersad (1994) esta baseado em considerações teóricas da interação um só cortador - rocha. O modelo considera que a profundidade à qual penetra cada cortador na rocha é função do número de cortadores da broca, da resistência da rocha, do peso mecânico aplicado e da área de contacto projetada de cada cortador.

Winters & Warren (1986) apresentaram que o peso sobre a broca medido na superfície não atua realmente para este tipo de broca no processo de perfuração. Isto devido ao efeito do levantamento hidráulico criado pela caída de pressão. Eles sugerem para medir o peso mecânico (peso realmente sobre a broca) a realização dos ensaios de drilloff ou de slackoff em campo para a determinação da área de bombeamento efetiva e o cálculo do peso mecânico

usando as seguintes equações dadas em 2.8 e 2.9. Na Figura 2.10 se mostra uma ilustração do ensaio e sua interpretação.

$$W_{mech} = WOB - \Delta P * A_e \quad (2.8)$$

$$\Delta P = \frac{GPM^2 * \rho}{12031(KA)^2} \quad (2.9)$$

W_{mech} = peso verdadeiro sobre a broca devido à pressão de levantamento hidráulico.

A_e = Área de bombeamento efetiva

GPM = taxa de bombeamento do fluido de perfuração.

ρ = densidade da lama de perfuração.

KA = área aparente dos jatos.

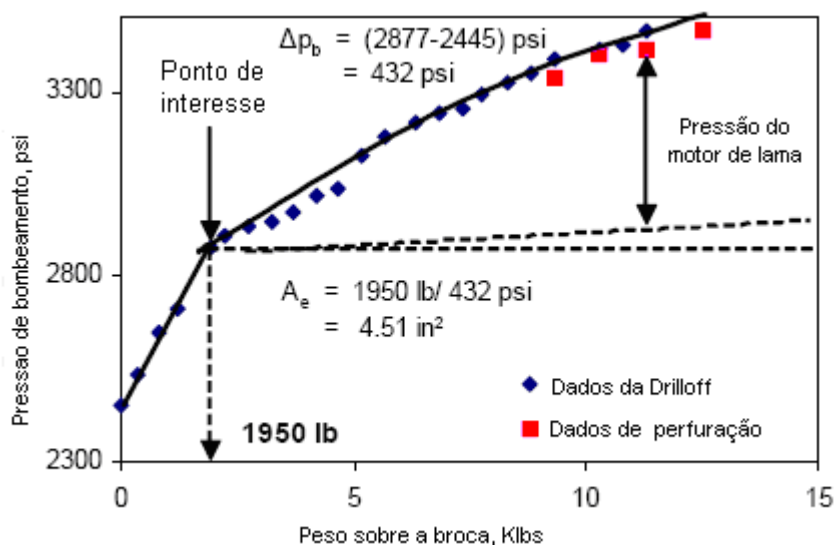


Figura 2.10. Resultado e interpretação de um ensaio de drilloff para determinar a área de bombeamento efetiva (Modificada de Winters & Warren, 1986).

O modelo considera que o critério para a ruptura da rocha é definida pela resistência da rocha como uma função do peso mecânico sobre a broca e a área de contacto projetada (A_p) dos cortadores; relacionada pela equação 2.10, (ver Figura 2.11).

$$S = \frac{W_{mech}}{N_c A_p} \quad (2.10)$$

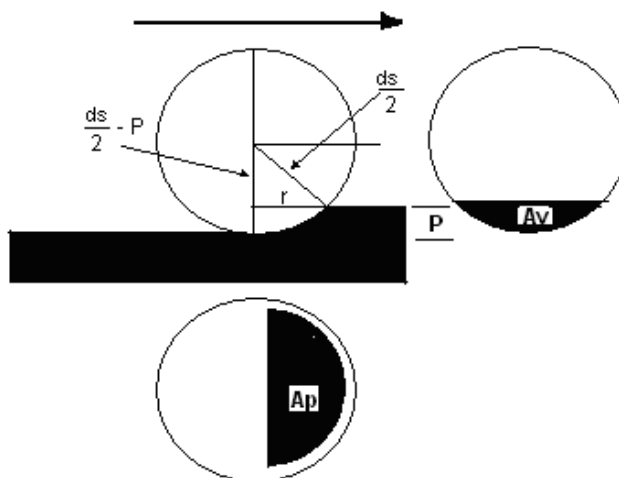


Figura 2.11. Ilustração do cortador de diamante onde se observa: A_p a área projetada e A_v a área da rocha comprimida. (Hareland & Rampersad, 1994).

O conceito de raio equivalente (R_e) é introduzido com o fim de ter em conta a ação conjunta de todos os cortadores, este é definido pela expressão 2.11.

$$R_e = \frac{D}{2\sqrt{2}} \quad (2.11)$$

A equação 2.12 apresenta a expressão para estimar o volume desgastado dos cortadores que é função dos parâmetros operacionais, das características da formação e da broca.

$$V_D = W_c \sum_{i=1}^n \frac{W_{mech_i} RPM_i Ar_{abr_i} S_i}{N_s R_e} \quad (2.12)$$

A profundidade de penetração do cortador pode ser obtida da área do cortador projetada na equação 2.10 e pode ser calculado pela seguinte expressão de acordo a 2.13:

$$P = \frac{2}{\pi d_s} \left(\frac{W_{mech}}{SN_s} - \frac{\pi P_w d_s}{2} \right) \quad (2.13)$$

A equação 2.14 apresenta P_w a penetração perdida devido ao desgaste dos cortadores.

$$P_w = \sqrt{\frac{2V_D}{\pi d_s}} \quad (2.14)$$

A área para a rocha comprimida à frente do cortador para uma penetração P é dada pela expressão 2.15:

$$A_v = \left(\frac{d_s}{2}\right)^2 \cos^{-1}\left(1 - \frac{2P}{d_s}\right) - (d_s P - P^2)^{1/2} \left(\frac{d_s}{2} - P\right) \quad (2.15)$$

A área para a rocha comprimida ao frente do cortador para a secção desgastada para uma penetração P_w é dada pela expressão 2.16:

$$A_{v_w} = \left(\frac{d_s}{2}\right)^2 \cos^{-1}\left(1 - \frac{2P_w}{d_s}\right) - (d_s P_w - P_w^2)^{1/2} \left(\frac{d_s}{2} - P_w\right) \quad (2.16)$$

A equação 2.17 apresenta o modelo final para prever a ROP em unidades de campo (ft/hr), utilizando as expressões 2.14 e 2.15 junto com o conceito de raio equivalente para ter em conta o volume removido por rotação da broca (Figura 2.12)

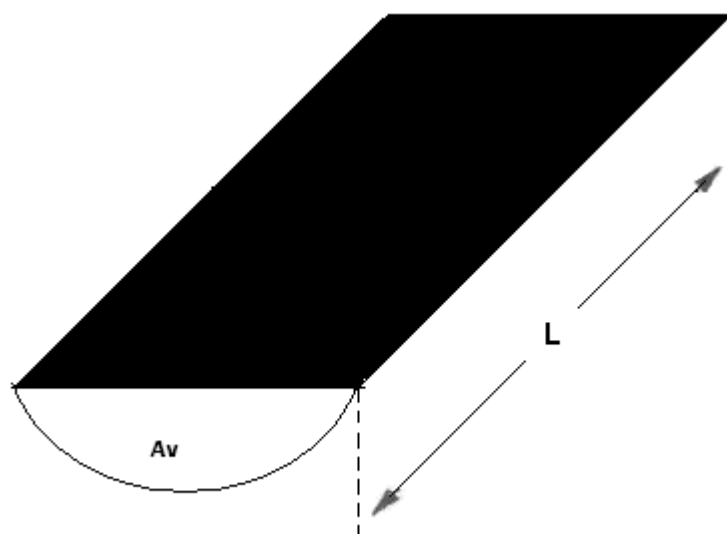


Figura 2.12. Ilustração do volume removido por diamante por revolução. (Hareland & Rampersad, 1994).

$$ROP = \frac{14.14 N_s RPM (A_v - A_{v_w})}{D} Corr \quad (2.17)$$

$$Corr = \frac{a_d}{RPM^{b_d} W^{c_d}} \quad (2.18)$$

Onde:

Corr = uma correção a previsão do modelo dependente da litologia.

a_d , b_d , c_d = coeficientes litológicos não dependente da serie da broca de diamante.

A Tabela 2.5 apresenta para as formações folhelho Catoosa e dolomito Carthage os coeficientes litológicos a, b e c. Hareland & Rampersad (1994), assinalam que esses parâmetros podem ser determinados de ensaios em laboratório ou ensaios drilloff em campo.

Tabela 2.5. Coeficientes litológicos para as litologias citadas abaixo para brocas de diamante (tomado do Hareland & Rampersad, 1994).

Litológica	Folhelho Catoosa	Dolomito Carthage
a	185.4	63.6
b	0.825	0.5397
c	0819	0.585

2.2.2

Modelo ROP para brocas PDC.

Estas brocas foram introduzidas na indústria do petróleo em meados dos anos 70s. Durante os passados 30 anos, as numerosas melhorias tecnológicas têm permitido às brocas PDC ter um importante crescimento no mercado de perfuração (50% do total do intervalo perfurado em 2003 foi perfurado com essas brocas comparado ao 26% no ano de 2000). As melhorias na hidráulica destas brocas, cortadores mais tenazes e mais resistentes à abrasão tem resultado num importante incremento na ROP e na vida útil das brocas PDC estendendo seu uso a formações mais duras e mais abrasivas (Menand & Dourfaye, 2005).

O mecanismo de corte para as brocas PDC é de raspagem ou de cisalhamento. Estas brocas são mais adequadas para formações moles a meio duras, formações não abrasivas e não plásticas (Bourgoyne et al., 1991).

A posição dos elementos na broca depende da finalidade da mesma, para a qual o tamanho, a forma, número de cortadores e a posição deles é importante. Com referência à posição dois ângulos são muito importantes; o side rake relacionado à orientação dos cortadores e o back rake ou de ataque a rocha (Figura 2.13), esses são usados no modelo de interesse.

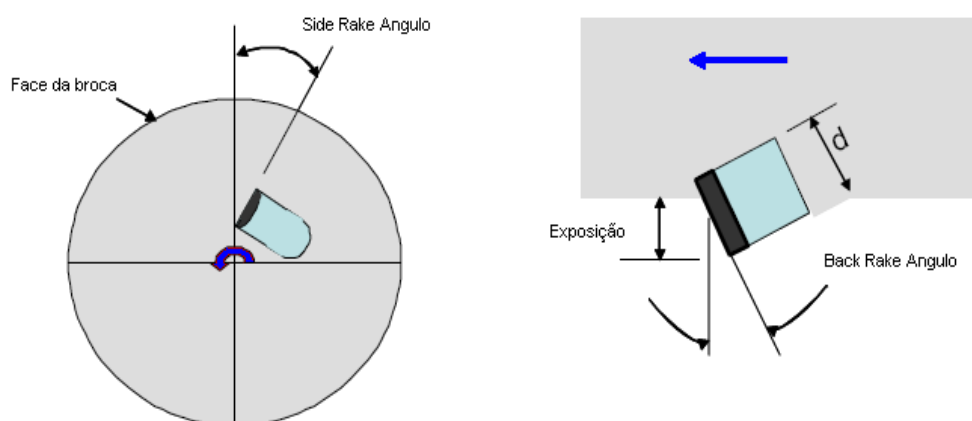


Figura 2.13. Esquema do volume removido por diamante por revolução. (Modificado Bourgoyne et al., 1991).

Hareland & Rampersad (1994) propuseram uma metodologia similar à apresentada para as brocas de diamante natural na derivação do modelo para as brocas PDC. Com relação à resistência da rocha a equação 2.19 é usada; a partir da geometria do cortador e a posição do mesmo são determinadas as equações 2.20 para as áreas projetadas inferior A_p e a área projetada à frente A_v da rocha a ser removida (ver Figura 2.14). A equação 2.21 apresenta a expressão usada para prever a taxa de perfuração para este tipo de broca.

$$S = \frac{WOB}{N_c A_p} \quad (2.19)$$

Onde:

N_c = número de cortadores

$$A_p = \sin \beta \left[\left(\frac{d_s}{2} \right)^2 \cos^{-1} \left(1 - \frac{2P}{\cos \beta d_c} \right) - \left(\frac{d_c P}{\cos \beta} - \frac{P^2}{\cos^2 \beta} \right)^{1/2} \left(\frac{d_c}{2} - \frac{P}{\cos \beta} \right) \right] \quad (2.20a)$$

$$A_v = \cos \alpha \cos \beta \left[\left(\frac{d_c}{2} \right)^2 \cos^{-1} \left(1 - \frac{2P}{\cos \beta d_c} \right) - \left(\frac{d_c P}{\cos \beta} - \frac{P^2}{\cos^2 \beta} \right)^{1/2} \left(\frac{d_c}{2} - \frac{P}{\cos \beta} \right) \right] \quad (2.20b)$$

Onde:

β = ângulo back rake (graus)

α = ângulo side rake (graus)

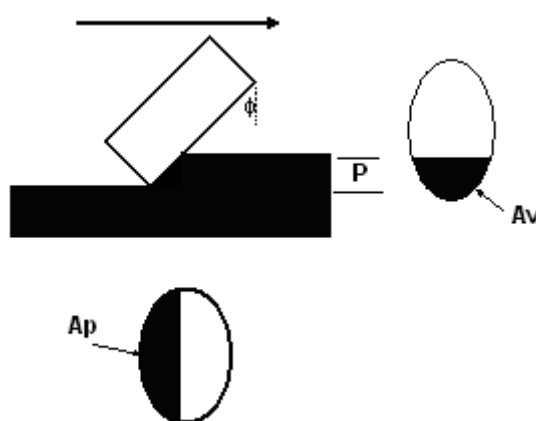


Figura 2.14. Ilustração de um cortador de uma broca PDC (Modificado de Hareland & Rampersad 1994).

$$ROP = \frac{14.14 N_s RPM * A_v}{D} \quad (2.21)$$

Uma metodologia similar à apresentada para as brocas tricônicas enquanto a consideração do desgaste dos cortadores foi proposta pelo Hareland et al. (1996) para as brocas PDC. W_f é definida como antes (equação 2.6).

$$ROP = \frac{14.14 N_s RPM * A_v}{D} W_f \quad (2.22)$$

2.3.

Conclusões acerca dos Modelos ROP.

Como se apresentou os modelos ROP de brocas tricônicas para sua aplicação precisam de uma prévia caracterização das constantes de desenho da broca. Isto como proposto por Winters et al., (1987) e Hareland (1991) em seus respectivos modelos é feito através de ensaios de laboratório. A determinação

das constantes de desenho para as brocas tricônicas tem sido talvez a principal dificuldade para seu emprego massivo, pelo tanto quando determinadas se convertem em tecnologia das companhias que utilizam esses modelos tais como: Drilling Simulator, DROPS.

O modelo de broca PDC será aplicado para todas as análises apresentadas neste trabalho. Isto devido à grande importância e extenso uso destas brocas hoje em dia. Mesmo porque as informações disponibilizadas pela PETROBRAS para os poços sob estudo foram obtidas a partir de poços perfurados com brocas PDC.

Por fim, é importante ressaltar que a literatura mostra vários casos de estudos que têm avaliado e verificado os modelos ROP para o planejamento/otimização da perfuração reduzindo os custos em seções de poços do Mar do Norte (Hareland et al., 1997, Hareland et al., 2007) e no Canadá (Hareland & Nygaard, 2007).

3 Estimativa da Resistência Não Confinada da Rocha (UCS) a partir de Perfis Geofísicos de Poço.

Este capítulo visa apresentar a metodologia geralmente seguida para a estimativa da UCS a partir dos perfis geofísicos de poço. Apresenta-se também um conjunto de correlações mostradas na literatura para o cálculo da UCS para as diferentes litologias sedimentares.

3.1. Algumas Considerações acerca das Correlações Utilizadas na Estimativa da UCS com Dados de Perfis Geofísicos de Poço

A resistência de um material é dependente do nível de tensões ao qual este é submetido. O critério de ruptura que o descreve normalmente tem ao menos dois a três parâmetros ajustáveis. A carência de medições no fundo do poço da resistência da rocha e/ou de teorias aplicáveis que relacionem a resistência da rocha a grandezas mensuráveis tem motivado um considerável esforço na geração de correlações empíricas para a predição da resistência da rocha (Fjaer et al, 2008).

A resistência da rocha pode ser medida de testemunhos recuperados da perfuração do poço, porém esses são escassos devido ao alto custo operacional que se tem ao realizar as operações como também ao alto risco de problemas que podem acontecer durante as operações de amostragem.

A maioria das correlações para a determinação da resistência das rochas baseadas em perfis geofísicos utiliza um (ou mais) dos seguintes parâmetros: velocidade compressional ou primaria V_p (ou tempo de transito Δt), módulo de Young (E) e porosidade (ϕ). V_p ou Δt são diretamente obtidos nos perfis e E pode ser derivado de medições de velocidades e densidade, e ϕ é usualmente derivado de medidas da densidade assumindo a matriz da rocha e a densidade do fluido. A literatura mostra diversos trabalhos neste aspecto tais como: Edlan et al. (1988), Onyia (1988), Lal (1999), Horsrud (2001).

Chandong (2004) compilou e agrupou dados de UCS e de propriedades físicas publicados na literatura junto a dados próprios para os arenitos, folhelhos e carbonatos. Esses dados de UCS provinham dos trabalhos de Lama e Vutukuri, 1978; Carmichael, 1982; Kwasniewski, 1989; Jizba, 1991; Wong et al., 1997; Bradford et al., 1998; Horsrud, 2001, constituindo numa base de dados com aproximadamente 260 dados para arenitos, 100 para folhelhos e 140 de carbonatos de diversas bacias do mundo.

Na Figura 3.1 se mostram os dados de UCS em função de Δt , E e ϕ para os folhelhos. Apesar da grande dispersão observada nos dados, no gráfico há um decréscimo característico da resistência com o Δt e ϕ , e um incremento da mesma com E . Observam-se similares comportamentos para os arenitos e carbonatos como se indica nas Figuras 3.2 e 3.3, respectivamente.

Fjaer et al., (2008) fazem uma serie de comentários que deveriam ser considerados quando se pretende fazer uso das correlações empíricas.

- As correlações são normalmente baseadas em um tipo específico de litologia ou tipo de rocha, portanto a correlação desenvolvida para arenito pode não ser válida para folhelho isto é, correlações baseadas empiricamente não são universalmente aplicáveis.
- As medidas de resistência podem ser muito escassas para algumas litologias, tais como folhelhos, devido a que normalmente não são amostrados.
- A carência de testemunhos tem promovido o uso de material de afloramentos o qual pode não ser relevante para rochas sedimentares no subsolo devido às diferenças na historia de sedimentação, historia de tensões, diagênese, etc.
- Ainda se as correlações são baseadas em testemunhos reais de uma área, pode não ser aplicáveis a outras áreas geográficas. É sempre recomendado checar a validade das correlações quando se entram em novas áreas e calibrá-las quando for necessário.
- As correlações publicadas são geralmente tendenciosas a rochas competentes, assim reduzindo sua acurácia com respeito a rochas mais fracas as quais são a principal preocupação em todos os tipos de avaliações de estabilidade.

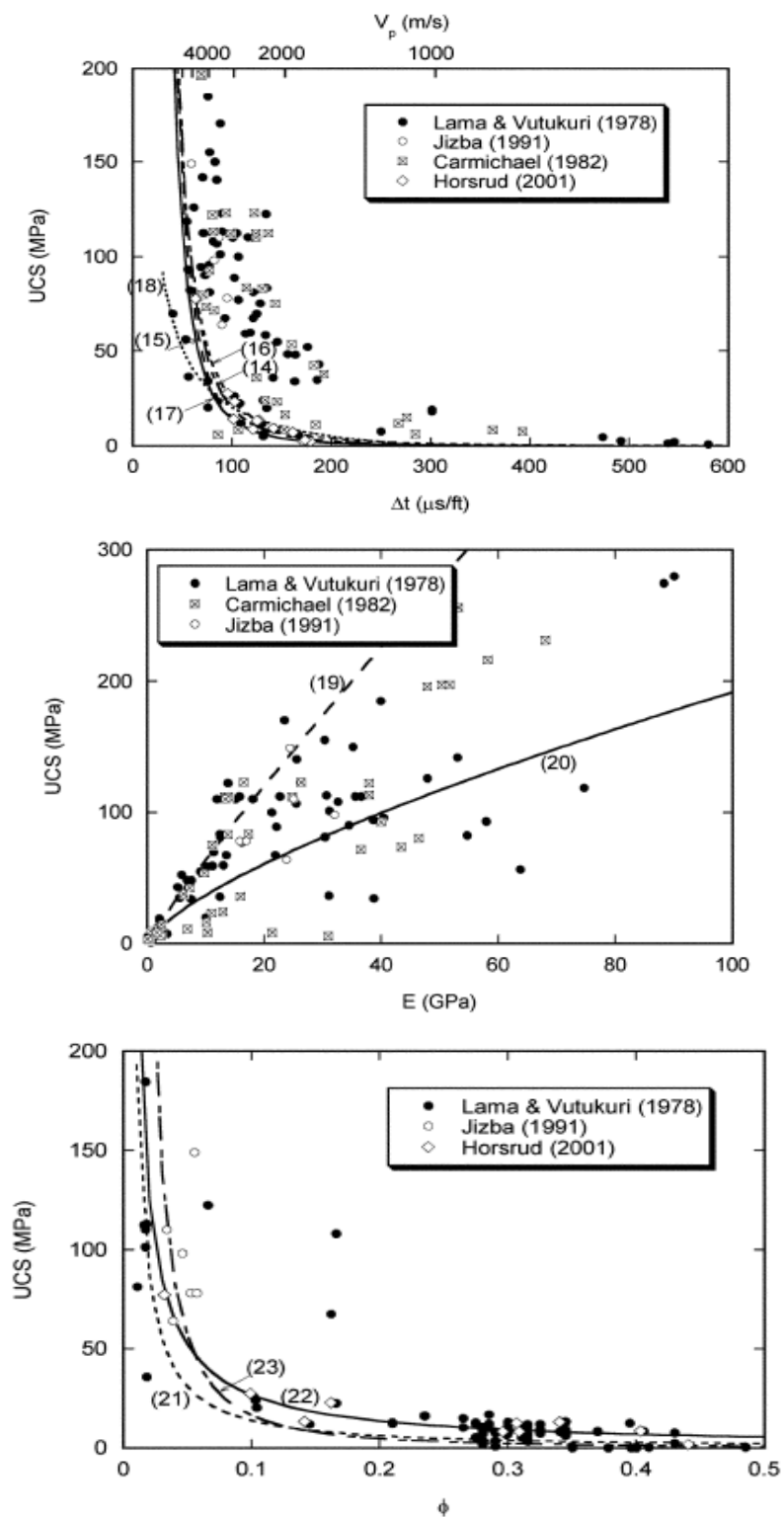


Figura 3.1. Dados de UCS de ensaios de laboratório para folhelhos como função: a) Tempo de transito Δt , b) modulo de Young, E c) Porosidade, ϕ ; sobrepostas com algumas das correlações empíricas listadas na Tabela 3.1. (Chandong, 2004).

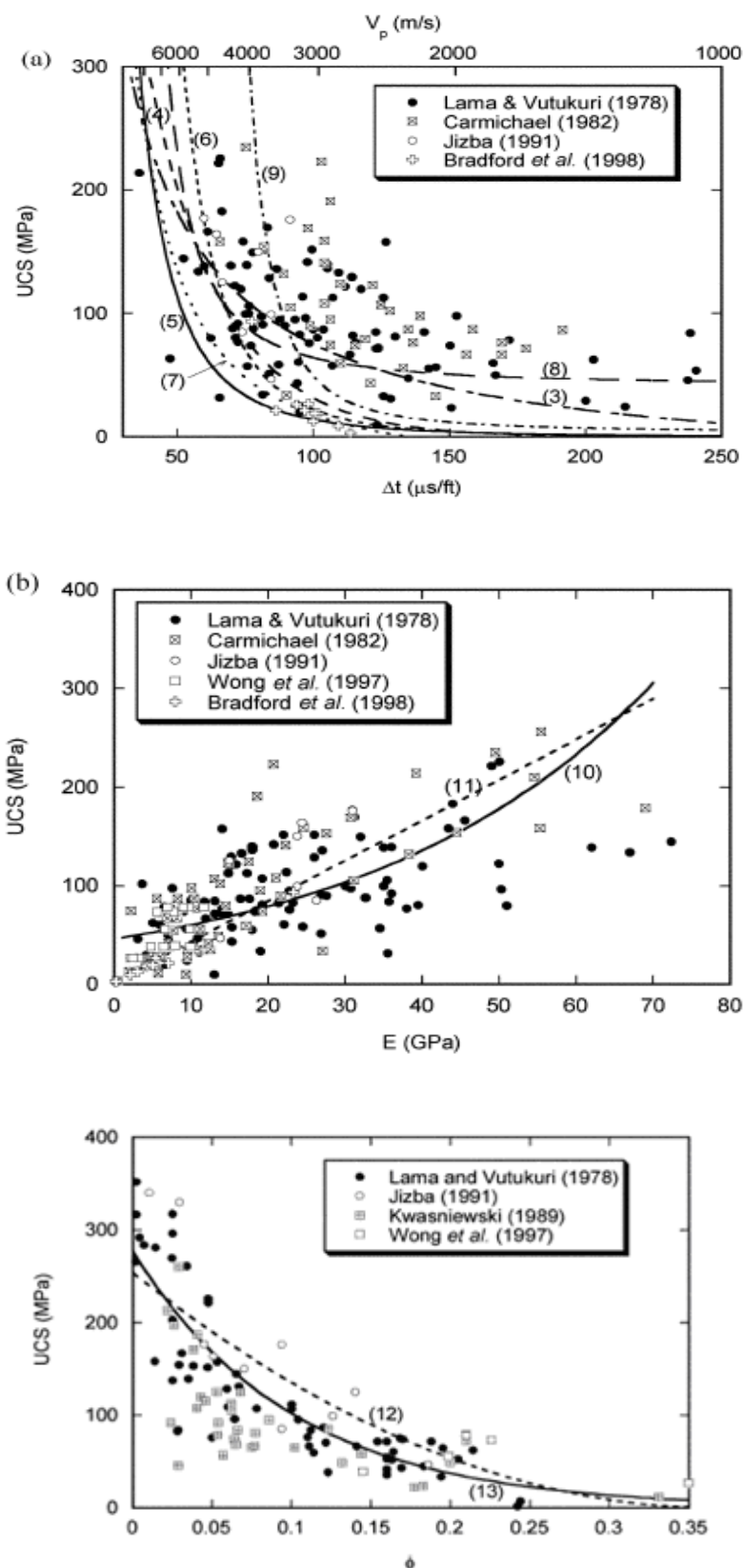


Figura 3.2. Dados de UCS para arenitos como função: a) Tempo de transitio Δt , b) modulo de Young, E c) Porosidade, ϕ ; sobrepostas com algumas das correlações empíricas listadas na Tabela 3.2. (Chandong, 2004).

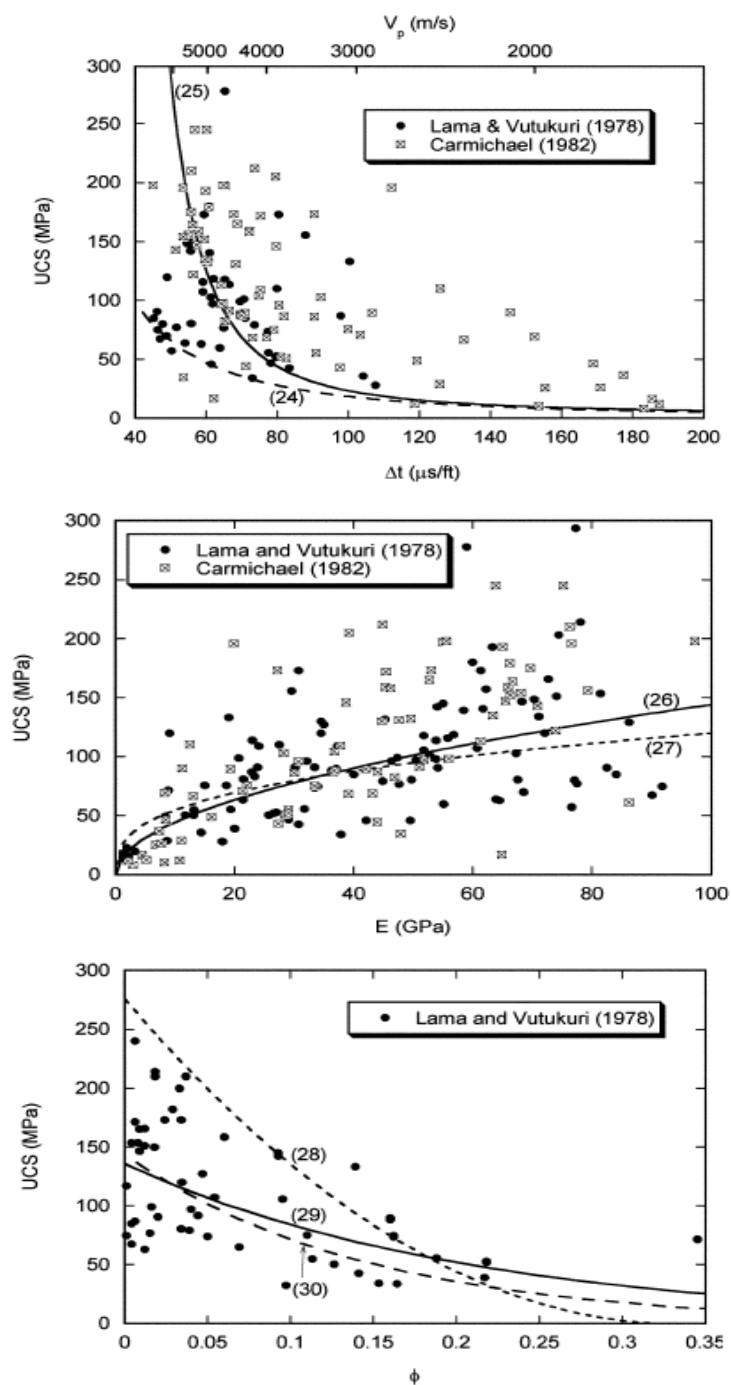


Figura 3.3. Dados de UCS para carbonatos (calcários e dolomitos) como função: a) Tempo de transitio Δt , b) modulo de Young, E c) Porosidade, ϕ ; sobrepostas com algumas das correlações empíricas listadas na Tabela 3.3. (Chandong, 2004).

De modo geral se encontra que a resistência da rocha aumenta quando a rocha é mais densa e cimentada, isto é, quando a profundidade, a idade e as tensões efetivas se incrementam. O anterior é refletido na tendência natural de redução da porosidade e ao incremento da velocidade acústica (Fjaer et al., 2008).

3.2.

Correlações para a Estimativa da UCS com Dados de Perfis Geofísicos de Poços.

A resistência não confinada UCS das rochas é um parâmetro relevante na análise de problemas geomecânicos tais como: análise de estabilidade de poços, restrição quantitativa das magnitudes das tensões in situ usando as falhas observadas no poço (Zoback et al., 2003), avaliação do potencial de produção de areia (Santarelli, et al. 1989) e na seleção de brocas.

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).

Eq. No.	UCS (MPa)	Região onde foi desenvolvida	Principais características	Referência
1	$0,77\left(\frac{304,8}{\Delta t}\right)^{2,93}$	Mar do norte	De alta porosidade do Terciário	Horsrud (2001)
2	$0,43\left(\frac{304,8}{\Delta t}\right)^{3,2}$	Golfo de México, USA	Plioceno e mais jovem	Chandong (2004)
3	$1,35\left(\frac{304,8}{\Delta t}\right)^{2,6}$	Dados de tudo mundo		Chandong (2004)
4	$0,5\left(\frac{304,8}{\Delta t}\right)^3$	Golfo de México, USA		Chandong (2004)
5	$10\left(\frac{304,8}{\Delta t} - 1\right)$	Mar do Norte	De alta porosidade do Terciário	Lal, 1999
6	$7,97E^{0,97}$	Mar do norte	De alta porosidade do Terciário	Horsrud (2001)
7	$7,22E^{0,712}$		duro e compacto	Chandong (2004)
8	$1,001\phi^{-1,143}$		Baixa porosidade ($\Phi < 0,1$) de alta resistência (~79MPa)	Lashkaripour e Dusseault (1993)
9	$2,922\phi^{-0,96}$	Mar do norte	de alta porosidade do Terciário	Horsrud (2001)
10	$0,286\phi^{-1,762}$		Alta porosidade ($\Phi < 0,27$)	Chandong (2004)

Atualmente para a análise desses problemas são utilizadas correlações para fazer as previsões/estimativas da UCS, como as apresentadas nas Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3 para a litologia de interesse quando houver informação de perfis geofísicos. Porém essas previsões precisam ser calibradas com dados de ensaios de laboratório da região ou local de interesse.

Tabela 3.2. Relações empíricas entre UCS e outras propriedades físicas para Arenitos, unidades Δt : $\mu\text{s/ft}$, E: GPa e ϕ : fração. (adaptado de Chandong, 2004).

Eq. No.	UCS (MPa)	Região onde foi desenvolvida	Principais características	Referência
11	$0,035V_p - 32,5$	Thuringia, Alemanha		Freyburg (1972)
12	$1200\exp(-0,036\Delta t)$	Bacia de Bowen, Austrália	De grão fino, tantos consolidados como não consolidados para todo range de porosidade	McNally (1987)
13	$1,4138 * 10^7 \left(\frac{1}{\Delta t}\right)^3$	Costa do Golfo, USA	brandos e não consolidados	Chandong (2004)
14	$3,3 * 10^{-20} \rho^2 V_p^4 \left(\frac{1+\nu}{1-\nu}\right)^2 (1-2\nu) \left(1 + 0,78V_{arg\ ila}\right)$	Golfo do Golfo, USA	Aplicável aos arenitos com UCS > 30MPa (4350psi)	Fjaer et al. (1992)
15	$1,74 * 10^{-9} \rho V_p^2 - 21$	Cook Intlet, Alaska, USA	De grãos grossos e conglomerados	Moos et al. (1999)
16	$42,1\exp(1,9 * 10^{-11} \rho V_p^2)$	Austrália	consolidados com $0,05 < \phi < 0,12$ e UCS > 80MPa (11600psi)	Chandong (2004)
17	$3,87\exp(1,14 * 10^{-10} \rho V_p^2)$	Golfo de México, USA		Chandong (2004)
18	$46,2\exp(0,027E)$			Chandong (2004)
19	$2,28 + 4,1089E$	Dados de todo o mundo		Bradford et al. (1998)
20	$254(1 - 2,7\phi)^2$	Bacias sedimentarias de todo o mundo	bem consolidados e limpos com $\phi < 0,3$	Vernik et al. (1993)
21	$277\exp(-10\phi)$		com $2 < \text{UCS} < 360$ e $0,002 < \phi < 0,33$	Chandong (2004)

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).

Eq. No.	UCS (MPa)	Região onde foi desenvolvida	Principais características	Referência
22	$\left(\frac{7682}{\Delta t}\right)^{1.82} / 145$			Militzer e Stoll (1973)
23	$10^{2,44+109,14/\Delta t} / 145$			Golubev e Rabinovich (1976)
24	$13,8 E^{0,51}$		Calcário com $10 < \text{UCS} < 300 \text{MPa}$	Chandong (2004)
25	$25,1 E^{0,34}$		Dolomito com $60 < \text{UCS} < 100 \text{MPa}$	Chandong (2004)
26	$276(1-3\phi)^2$	Deposito de Korobcheyev, leste médio, Rússia		Rzhevsky e Novick (1971)
27	$143,8 \exp(-6,95\phi)$		$0,05 < \phi < 0,2$ e $30 < \text{UCS} < 150 \text{MPa}$	Chandong (2004)
28	$135,9 \exp(-4,8\phi)$		$0 < \phi < 0,2$ e $10 < \text{UCS} < 300 \text{MPa}$	Chandong (2004)

Seguindo as considerações e sugestões assinaladas pelo Chang (2004) e Fjaer et al., (2008) para o uso das correlações apresentadas neste capítulo foram selecionadas correlações com características similares às de estudo tanto para os folhelhos como para os arenitos.

Os folhelhos de campo sob estudo são folhelhos brandos e de alta porosidade (isto concluído dos perfis porosidade nêutron e porosidade-densidade) por tanto serão avaliadas as correlações de Lal, Chang (Eq. 2) e Horsrud (Eq. 9) da Tabela 3.1. Essas correlações escolhidas são para folhelhos jovens, brandos e de alta porosidade.

Os arenitos de interesse são descritos como não consolidados e friáveis, portanto, as correlações: Fjaer (Eq. 14), Chang (Eq. 2) e Chang (Eq. 13) serão avaliadas. Destas correlações Chang (Eq. 2) e (Eq. 13) tem sido recomendadas para os arenitos tipo sob estudo nesta pesquisa. Já a correlação Fjaer (Eq. 14) será avaliada para analisar sua resposta, isto devido que inclui mais de uma propriedade física, apesar de ser sugerida para formações de mais de 30MPa.

4 Metodologia para Determinar a Resistência das Rochas à Perfuração

Este capítulo tem por finalidade apresentar a metodologia usada com o modelo ROP de broca PDC para determinar a resistência das rochas à perfuração e mostrar uma aplicação para dois poços de uma bacia sedimentar brasileira.

Informações referentes aos nomes e profundidades dos poços e das formações atravessadas durante a perfuração são de caráter confidencial e não são divulgados neste trabalho.

4.1. Breve Descrição do Poço PUC-1 e Cálculo da Resistência da Rocha à Perfuração.

Como se observa na Figura 4.1 o poço-1 (PUC-1) apresenta uma trajetória direcional. Este poço foi perfurado com um sistema Rotary Steerable (Geopilot da Halliburton).

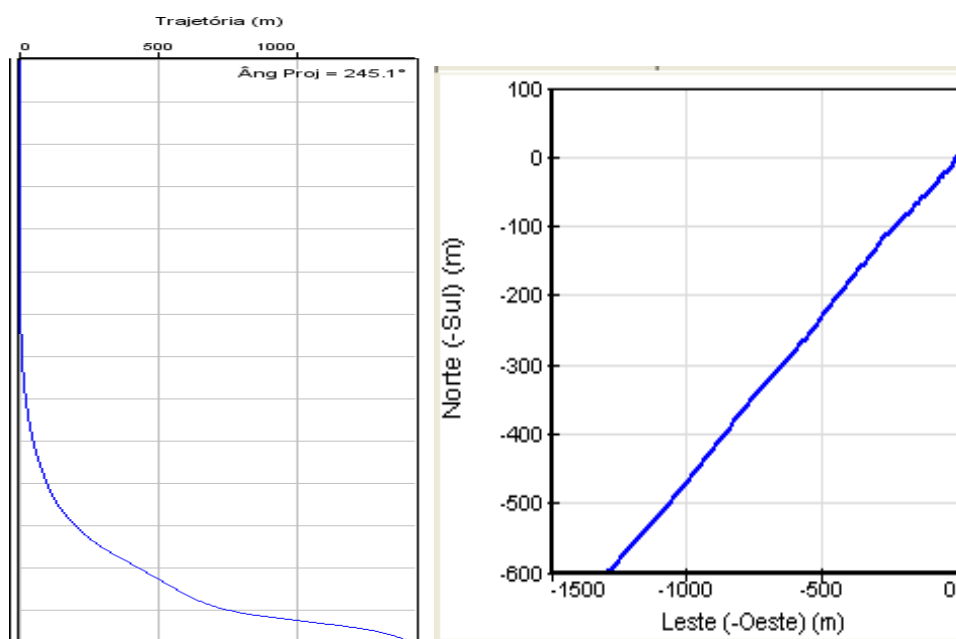


Figura 4.1. Trajetória do poço PUC-1. (Tirada do SEST Software do GTEP-PETROBRAS).

Na Figura 4.2 se apresentam: a taxa de perfuração (ROP) em metros por hora (m/hr), o peso sobre a broca (WOB) em kilolibras (klbs), a taxa de rotação da coluna (RPM) em revoluções por minuto (rpm), e o torque em libras por pés (lbs-ft), para a seção de 12 ¼" (31,115cm) registrados metro a metro:

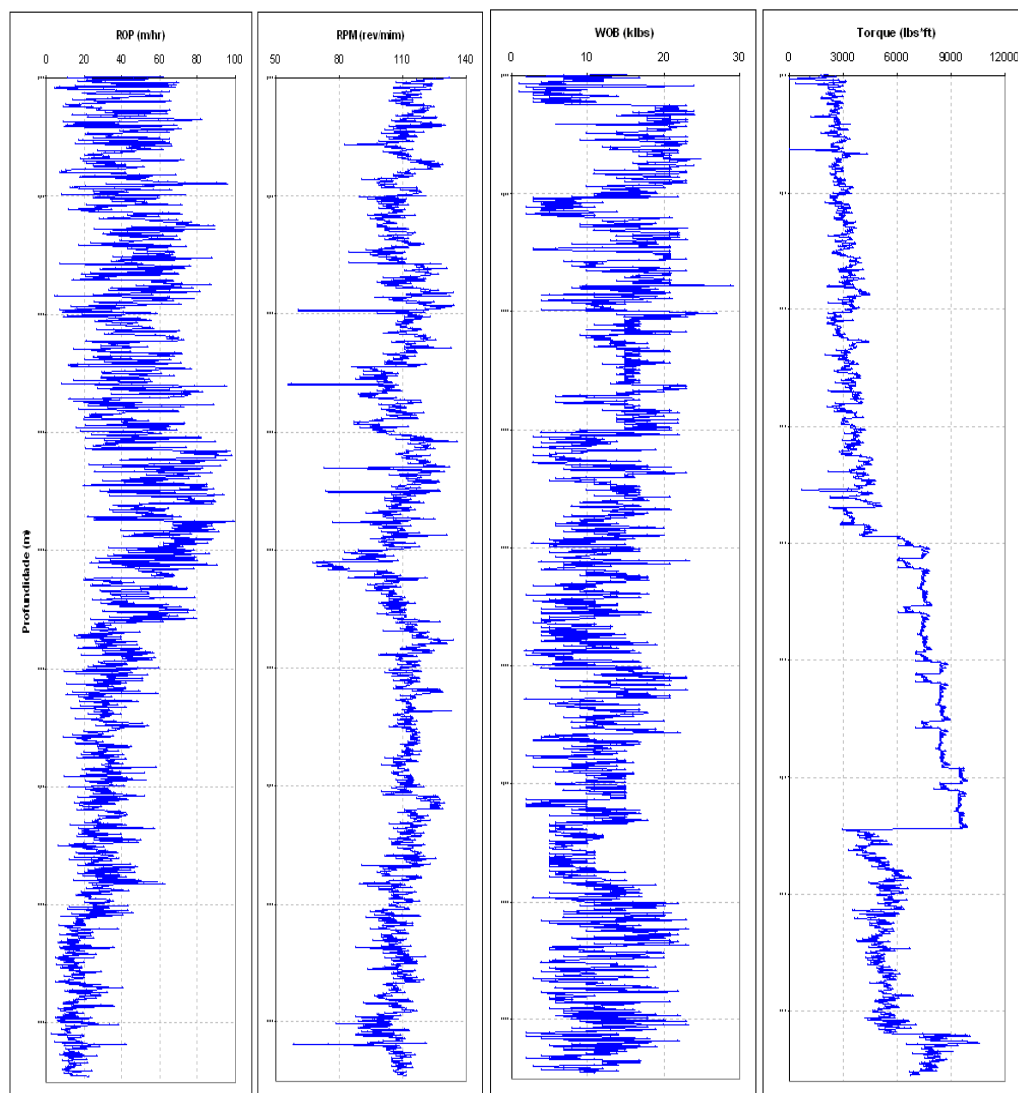


Figura 4.2. Parâmetros operacionais medidos na perfuração da fase 12 ¼" do poço PUC-1.

A avaliação da broca em termo de desgaste ao perfurar todo o intervalo foi qualificada como reutilizável (RR) e sem desgaste na estrutura dos cortadores (0-0). Desta forma, o modelo da broca PDC (equação 2.21) pode ser utilizado para obter o perfil de resistência da rocha in situ à perfuração. Este perfil é chamado também como ASRL, perfil de resistência aparente da rocha (Hareland et al., 1997).

Além dos parâmetros operacionais é requerida informação específica do desenho da broca a qual neste caso foi disponibilizada pela HALLIBURTON.

As características da broca (Figura 4.3) utilizada para perfurar toda a seção do PUC-1 são as seguintes:

Security DBS Drill Bits:

Código IADC : M323

Tipo de corpo: Matriz.

Numero de cortadores: 63 (48 na face).

Diâmetro dos cortadores: 16 mm

Ângulo de back rake: 22 graus meio.

Ângulo side rake 3 graus meio.



Figura 4.3. Tipo de broca utilizada para perfurar o poço PUC-1.

Na Figura 4.4 é apresentado um fluxograma que esquematiza os passos da metodologia seguida para o cálculo do perfil de resistência da rocha à perfuração e as informações requeridas para esse fim. Para os poços sob estudo os passos seguidos foram: se calculou a área projetada na frente dos cortadores (A_v), com a equação 2.21, logo com o valor (de A_v) e as informações dos ângulos de back rake e side rake se determinada a penetração do cortador (P) usando a equação 2.20(b) por tentativa e erro. Tendo-se determinado a penetração do cortador, se calcula a área projetada (A_p) e por fim a resistência aparente da rocha (S) para cada profundidade.

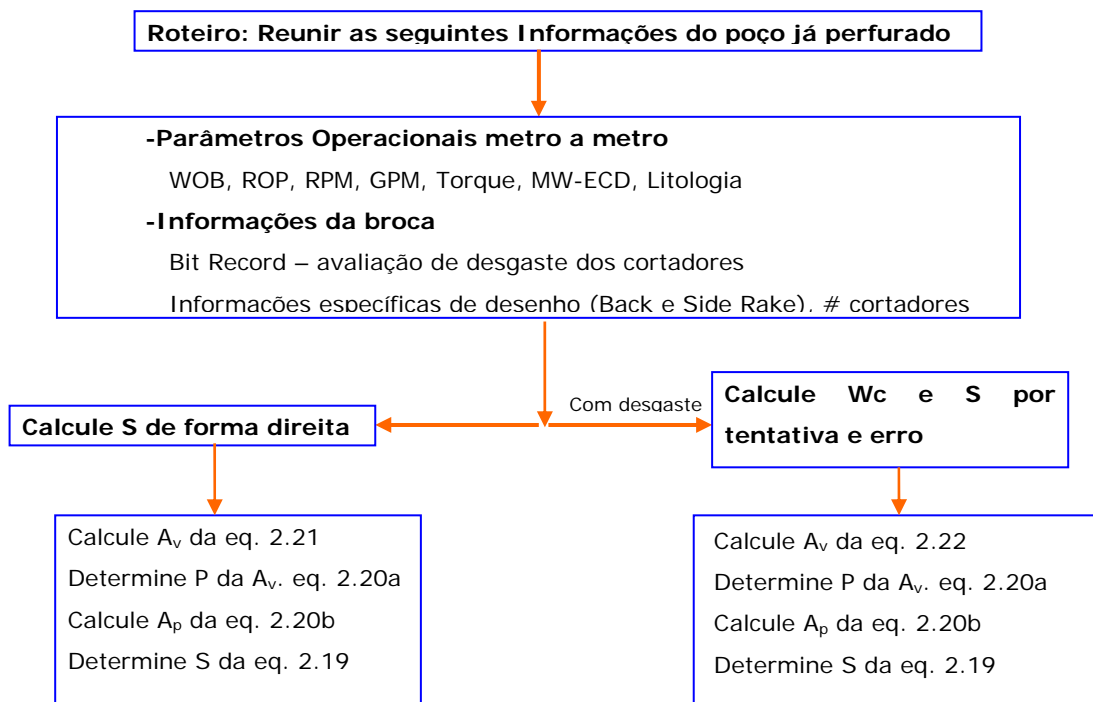


Figura 4.4. Fluxograma de trabalho para a geração do perfil de resistência à perfuração.

Na Figura 4.5 é apresentado o perfil da resistência da rocha à perfuração determinado dos parâmetros operacionais e do modelo de broca PDC. Neste perfil se observam valores de resistência à perfuração de 2 MPa até 60 MPa com média de 20MPa que indicaria a presença de uma rocha branda caso a resistência à perfuração (S) se correlacionasse de forma direta com a resistência compressiva não confinada UCS.

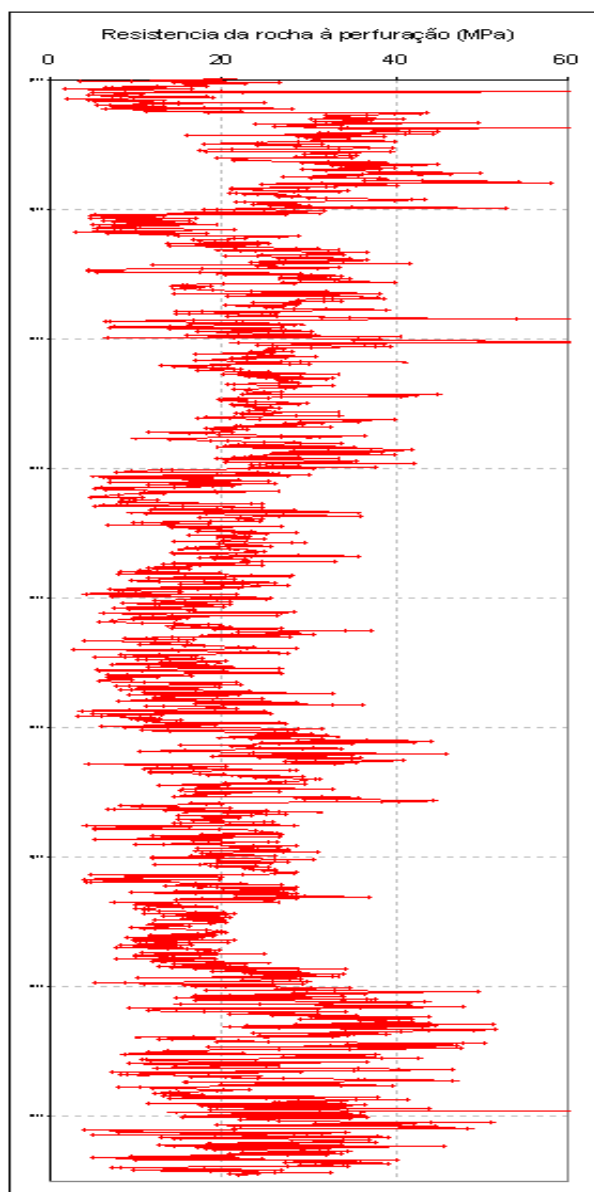


Figura 4.5. Perfil de resistência (MPa) aparente da rocha calculado para PUC-1.

4.2.

Breve descrição do poço PUC-2 e Cálculo da Resistência da Rocha à Perfuração.

O poço PUC-2 apresenta características similares às do poço PUC-1, tanto nas litologias perfuradas quanto na configuração das fases das seções da perfuração. Para este poço, se seguiu um procedimento similar ao adotado para o poço PUC-1 para calcular a resistência da rocha à perfuração (da fase de 12 ¼"). Como se apresenta na Figura 4.6 o poço PUC-2 tem uma trajetória similar ao poço PUC-1, mas um azimute completamente diferente. Também foi perfurado com um sistema Rotary Steerable (Autrotrack da Baker Hughes).

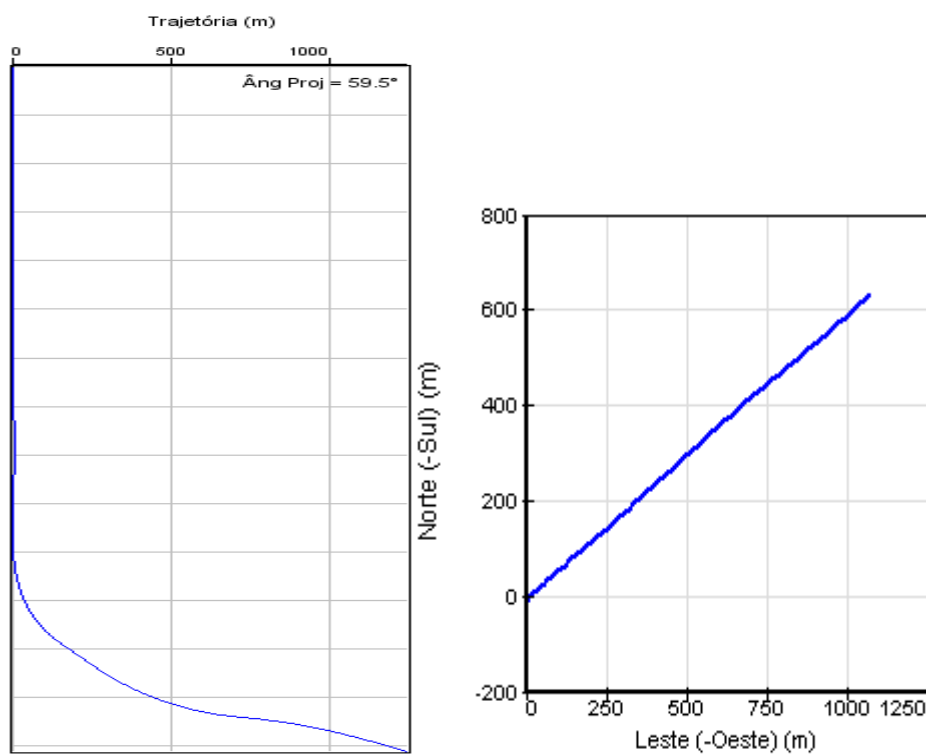


Figura 4.6. Trajetória do poço PUC-2 (Tirada do SEST Software do GTEP-PETROBRAS).

Na Figura 4.7 se mostram os parâmetros operacionais (ROP, WOB, RPM, Torque) utilizados para perfurar a seção 31.115cm (12 ½") registrados metro a metro.

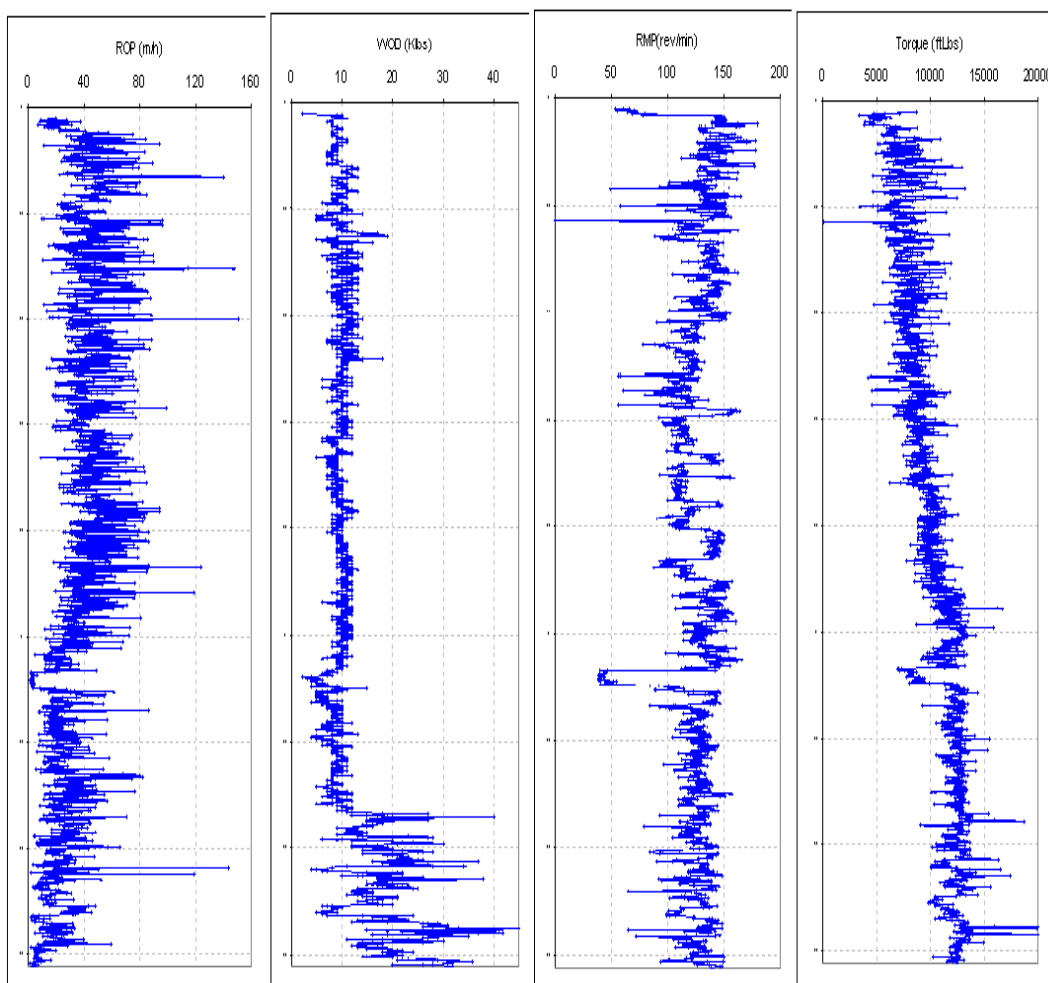


Figura 4.7. Parâmetros operacionais do poço PUC-2

A avaliação da broca utilizada para perfurar a fase sob estudo em termo de desgaste ao perfurar todo o intervalo foi qualificada como reutilizável (RR) e sem desgaste na estrutura dos cortadores (0-0). Como no caso anterior, o procedimento de cálculo seguido foi o mesmo do descrito para o poço PUC-1 e resumido no fluxograma da Figura 4.4.

As características da broca utilizada para perfurar toda a seção do poço PUC-2 são as seguintes:

Numero de cortadores: 63 (48 na face).

Diâmetro dos cortadores: 16 mm

Ângulo de back rake: 22 graus meio (recomendado).

Ângulo side rake 3 graus meio (assumido).

Na Figura 4.8 é apresentado o perfil da resistência à perfuração determinado dos parâmetros operacionais e o modelo de broca PDC para o poço

PUC-2. Neste perfil de resistência se observam valores num range de 3 MPa até 80 MPa com uma média de 20MPa.

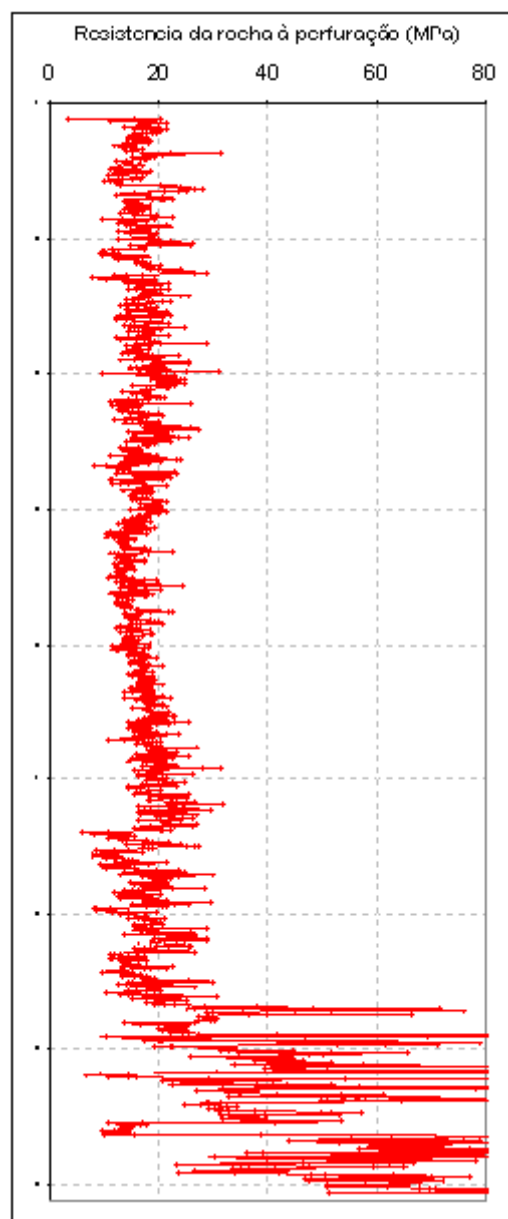


Figura 4.8. Perfil de resistência aparente da rocha (MPa) calculado com os parâmetros operacionais do poço PUC-2.

4.3.

Comparação dos Parâmetros Operacionais e dos Perfis de Resistência à Perfuração Calculados para os Poços PUC-1 e PUC-2.

Na Figura 4.9 são apresentados os parâmetros operacionais usados nos dois poços PUC-1 (em azul) e PUC-2 (em vermelho) nota-se uma diferença apreciável nos parâmetros operacionais WOB e RPM utilizados para a perfuração dos dois poços. No poço PUC-1 o peso sobre a broca (WOB) foi bastante maior em quase todo o intervalo perfurado só se alterando no trecho final do poço. Já para a taxa de rotação da coluna/broca (RPM), verifica-se que o poço PUC-2 manteve taxas maiores de RPM comparadas às do poço PUC-1. Observa-se, entretanto que a resposta a estes parâmetros, isto é, a ROP, é bastante parecida para os dois poços.

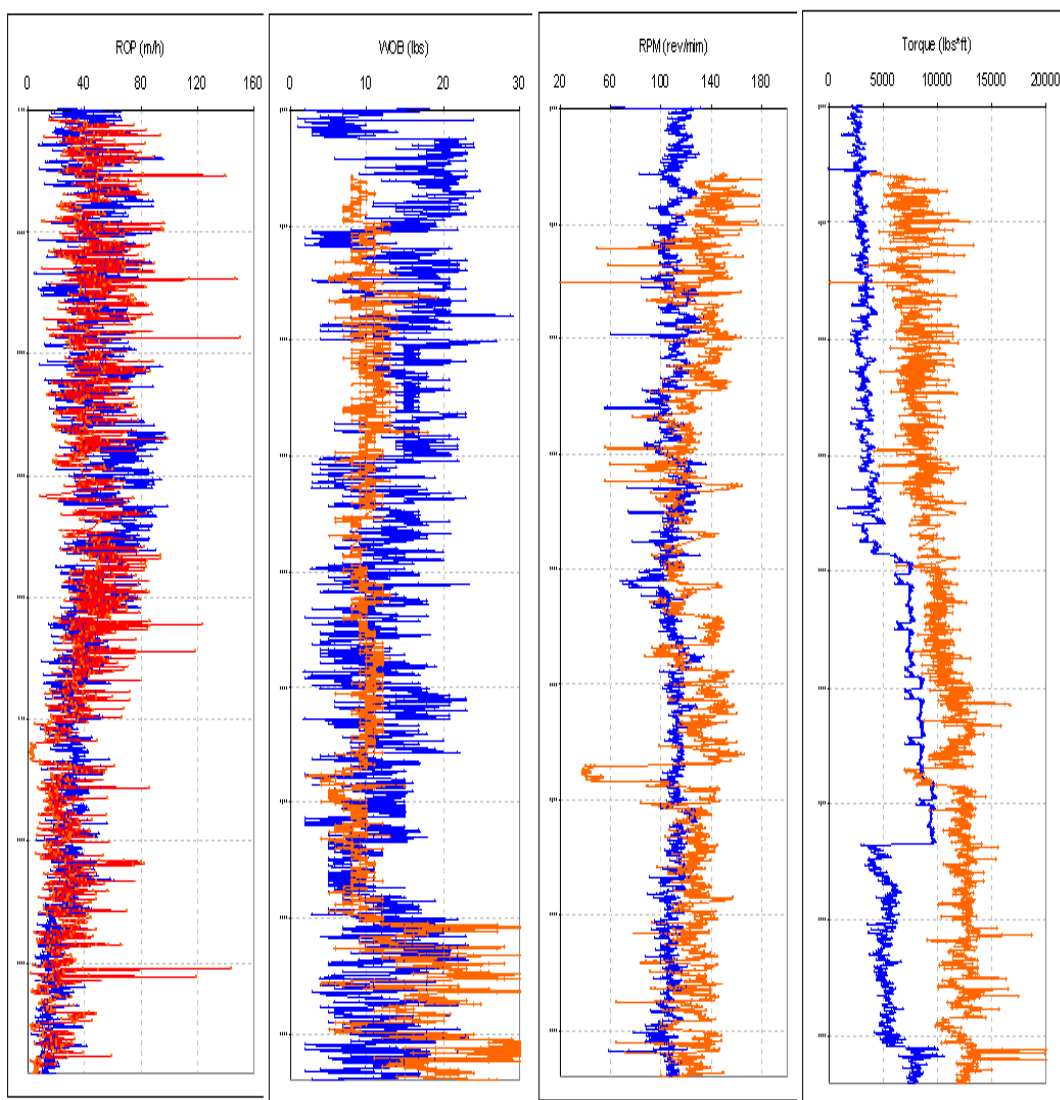


Figura 4.9. Comparação dos parâmetros operacionais dos poços PUC-1 e PUC-2

Na Figura 4.10 é apresentada uma comparação desta vez para os perfis de resistência da rocha à perfuração calculados para os dois poços sob estudo. Em geral observam-se valores de resistência muito similares. No trecho final dos perfis nota-se uma marcada diferença com o poço PUC-2 apresentando rochas de maior resistência à perfuração. Os resultados são bastante satisfatórios deixando entrever o verificado em poços no Mar do Norte e no Canadá para o planejamento/otimização da perfuração de um novo poço. Isto é, uma vez que se conta com os perfis de resistência à perfuração dos poços de correlação ao poço projeto pode-se aplicar uma metodologia que permita selecionar a melhor combinação de WOB-RPM. Essa metodologia com os objetivos de gastar um menor tempo na perfuração como um baixo desgaste da broca para o intervalo de interesse.

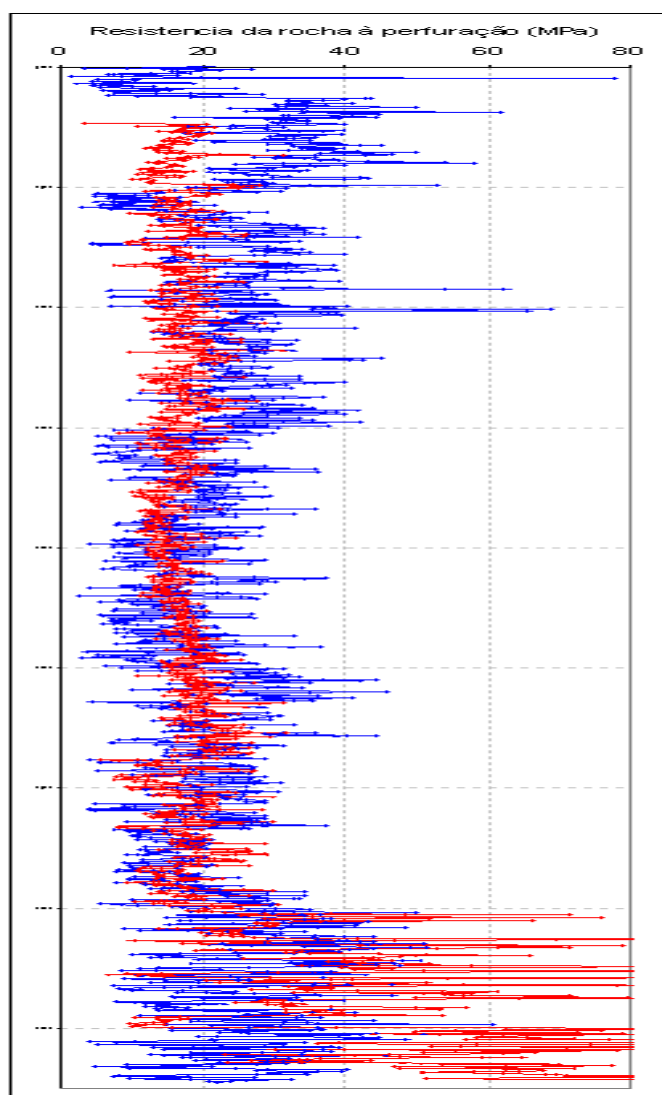


Figura 4.10. Comparação dos perfis de resistência aparente da rocha calculados para os poços PUC-1 e PUC-2, os quais são do mesmo campo.

5

Correlação Entre a Resistência Compressiva Não Confinada (UCS) da Rocha e a Resistência à Perfuração

Este capítulo visa correlacionar a resistência da rocha à perfuração com a resistência não confinada da rocha (UCS). Esta última sendo estimada de correlações publicadas na literatura a partir de perfis geofísicos de poços e calibrados com dados de UCS de ensaios de laboratório para a área sob estudo.

Como apresentado no capítulo 3 se conta com uma variada gama de correlações para o amplo range de magnitude da resistência das rochas UCS. Por outro lado nenhuma dessas correlações foi derivada para as litologias de interesse (folhelhos e arenitos) da região de estudo. Para esses casos se recomenda usar correlações derivadas para formações com características similares às de estudo e calibrar essas relações com medições de laboratórios de amostras de testemunhos representativos (Chang, 2004).

5.1.

Estimativa da UCS com Perfis Geofísicos de Poço para o PUC-1.

As informações de perfis geofísicos disponíveis para o poço PUC-1 na seção de estudo foram: perfil de Raios Gama, Sônico, tempo de transito compressional e de cisalhamento, densidade e caliper. O registro de Raios Gama (GR) junto com a descrição litológica de amostras de calha feita em poço pelo serviço de mudlogging foram usadas para discriminar as litologias em folhelhos e arenitos. Essa discriminação litológica como as profundidades dos poços não são apresentadas neste trabalho. Na Figura 5.1 se apresentam os dados de perfis disponíveis para o poço PUC-1 que se utilizaram para o cálculo da UCS das litologias de interesse.

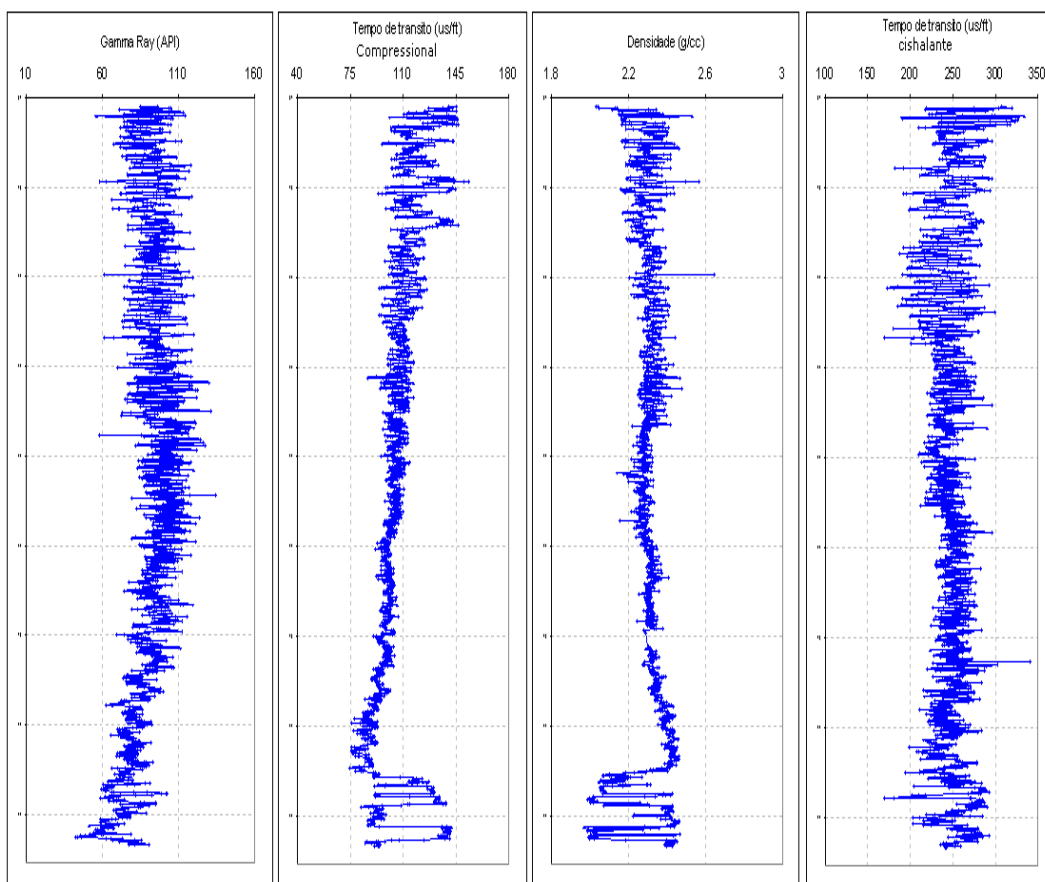


Figura 5.1. Dados de perfis medidos no poço PUC-1: GR, Densidade, Tempo de transito compressional e de cisalhante.

As litologias de interesse para o poço PUC-1 são descritas como rochas brandas no caso dos folhelhos, e arenitos não consolidados e friáveis. Baseados nessas características foram escolhidos das Tabelas 3.1 e 3.2 as correlações mencionadas na Tabela 5.1 que foram geradas para rochas com características parecidas às de nosso interesse.

Tabela 5.1. Correlações selecionadas para estimar a UCS com os dados do perfil.

	Folhelho (Tabela 3.1)	Arenitos (Tabela 3.2)
1 (Figura 5.1a)	Lal (eq. 5)	Fjaer (eq. 14)
2 (Figura 5.1b)	Chang (eq. 2)	Chang (eq. 2)
3 (Figura 5.1c)	Horsrud (eq. 9)	Chang (eq.13)

Uma vez selecionadas as correlações foram calculados os perfis de UCS para folhelhos apresentados na Figura 5.2. Pode-se observar que os perfis a) e b) têm forma parecida visto que ambas utilizam dados sônicos e são funções da

mesma base de potência. Já a Figura c) foi calculada em função da porosidade. Esta porosidade é calculada assumindo-se a densidade da matriz e do fluido.

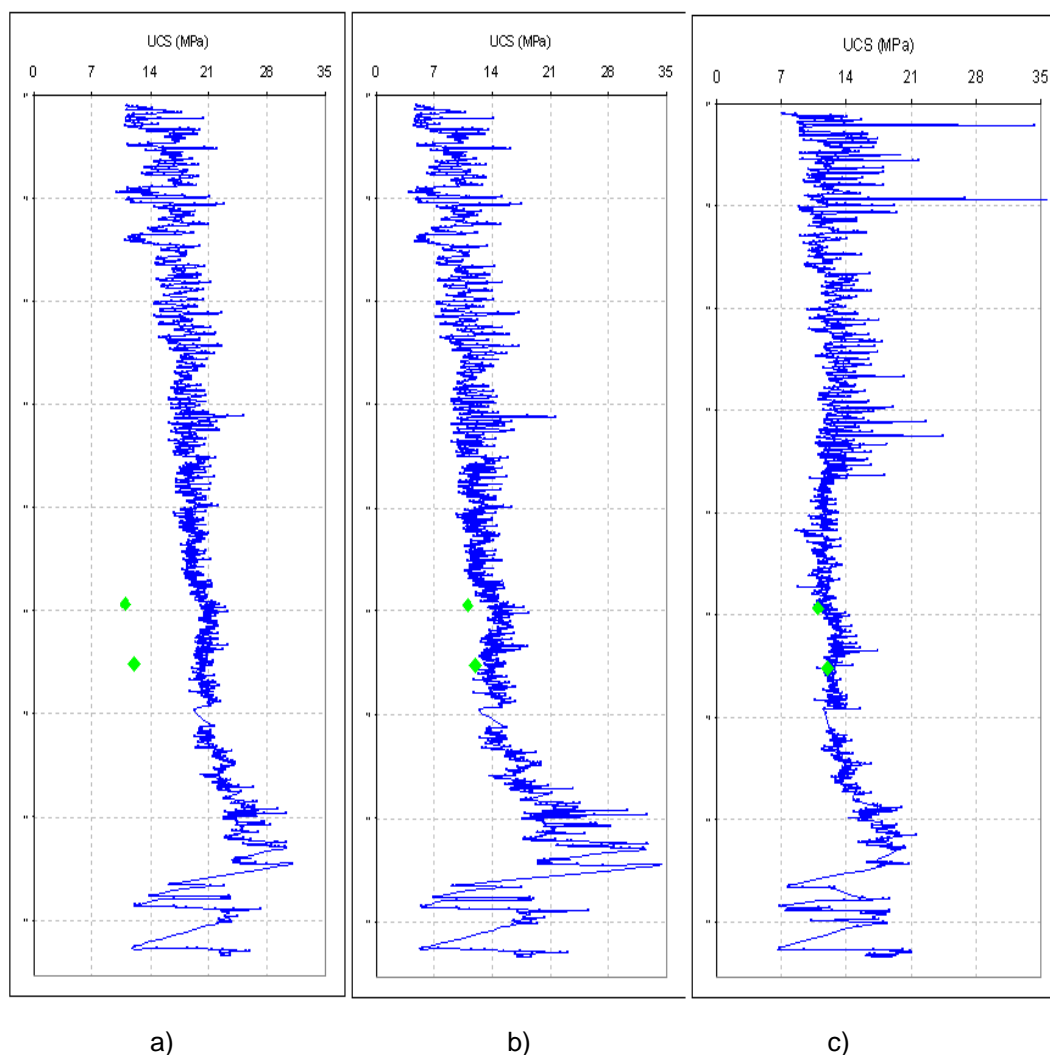


Figura 5.2 – Perfis de UCS calculados para os folhelhos do poço PUC-1. a). Lal (eq. 4.5)
b). Chandong (eq. 4.2). c). Horsrud (eq. 4.9).

Para a calibração e seleção do conjunto de correlações para este estudo require-se de dados de UCS de ensaios de laboratório. Encontram-se poucos dados de parâmetros de resistência publicados para o campo de interesse. Muniz (1998) avaliou as propriedades de resistência de um folhelho da bacia de Campos por meio de ensaios CIU. As amostras avaliadas foram recuperadas de um poço vertical a uma profundidade de 2587m e uma lamina de água 500m, obtendo-se valores de 3,17MPa e 25,3° respectivamente, para coesão e ângulo de atrito. Nessa pesquisa também aparece disponível um dado de um trabalho feito pela PETROBRAS (1996) com valores de 3,5 MPa e 24,9° para coesão e ângulo de atrito respectivamente (resumidos na Tabela 5.2).

Tabela 5.2. Dados de resistência de folhelhos da bacia de Campos (Muniz, 1998).

Profundidade (m)	Coesão (MPa)	Ângulo de Atrito (graus)
2587	3,17	25,3
2618	3,5	24,9

Nicolino & Soares (1997) realizaram ensaios de resistência do arenito reservatório da Bacia de Campos para dois poços. Os valores obtidos para coesão e ângulo de atrito foram 0MPa e 19.5° respectivamente para o poço A, e 1,67MPa e 26,5° para o poço B (resumidos na Tabela 5.3). Este arenito é descrito como não consolidado e muito friável, o objetivo desse trabalho tinha como fim estudar a estabilidade de poço na perfuração de poços horizontais.

Tabela 5.3. Dados de resistência de arenitos da bacia de Campos (Nicolino & Soares, 1997).

Profundidade (m)	Coesão (MPa)	Ângulo de Atrito (graus)
~2890	0	19,5
~2920	1,67	26,5

Segundo Fjaer et al. (1992) a UCS pode ser calculada da equação 5.1. Porém enfatiza que dita expressão só é válida quando o mecanismo de falha sob tensão uniaxial é devido a ruptura por cisalhamento. Sob esta consideração na Tabela 5.4 se apresenta a UCS calculada com dita equação e os dados da literatura apresentados anteriormente (Tabelas 5.2 e 5.3).

$$UCS = 2c' \frac{\cos \theta'}{1 - \sin \theta'} \quad (5.1)$$

Onde:

θ' = ângulo de atrito (graus)

c' = coesão (MPa)

Tabela 5.4. Dados de UCS de folhelhos e arenitos da bacia de Campos.

Profundidade (m)	UCS (MPa)	Ângulo de Atrito (graus)
2587	10,17	Folhelho
2618	11,98	
~2890	0	Arenitos
~2920	5,40	

Os dados da Tabela 5.4 foram utilizados para calibrar o perfil de resistência de UCS estimado a partir das correlações com a informação de perfis de poços. Da análise das correlações e dos dados de ensaios de laboratório para as litologias de interesse se escolheram as seguintes correlações para as diferentes litologias: para folhelhos: Horsrud (eq. 9), e para arenitos: Chang (eq. 13).

A Figura 5.3 apresenta num mesmo gráfico os perfis de UCS calibrado (azul) e a resistência à perfuração (S) (vermelho) para o poço PUC-1. Não se observa uma correlação aparente nestes perfis. A resistência à perfuração apresenta valores numa faixa muito maior, enquanto o perfil de UCS apresenta-se numa média de 10MPa.

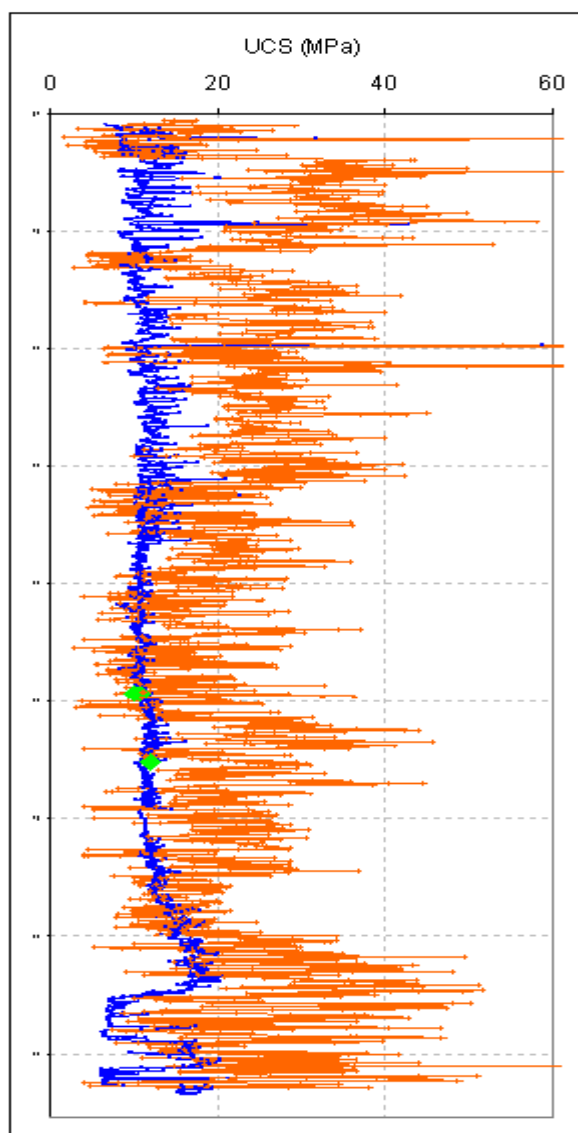


Figura 5.3. Comparação dos perfis de resistência à perfuração e a UCS para o poço PUC-1 e os pontos de calibração.

5.2. Correlação da UCS com a Resistência à Perfuração para o PUC-1.

Esta seção apresenta-se uma correlação entre a resistência à perfuração e a UCS. Como apresentado na Figura 5.3 não é apreciável uma correlação entre essas duas resistências.

Na fundamentação teórica se mencionaram diferentes trabalhos experimentais que estudaram a interação rocha-cortador de broca PDC para folhelhos e arenitos. Para os folhelhos encontraram que quando o comportamento destes for dilatante sob cisalhamento o diferencial de pressão imposto pode ser muito diferente do diferencial dado pela pressão de poros e a pressão de fluido de perfuração no fundo de poço. Esse diferencial pode atingir como valor máximo a pressão de fluido de perfuração, pelo tanto a rocha se apresentaria como se fosse mais resistente à perfuração diminuindo de maneira considerável a ROP. Para folhelhos que não apresentam o anterior comportamento como é o caso dos folhelhos sob estudo (ver Figura 5.4 e 5.5) o diferencial imposto é função tanto da pressão do fluido de perfuração como da pressão de poros podendo-se gerar aumento da pressão de poros comparada à pressão de poros inicial antes do cisalhamento.

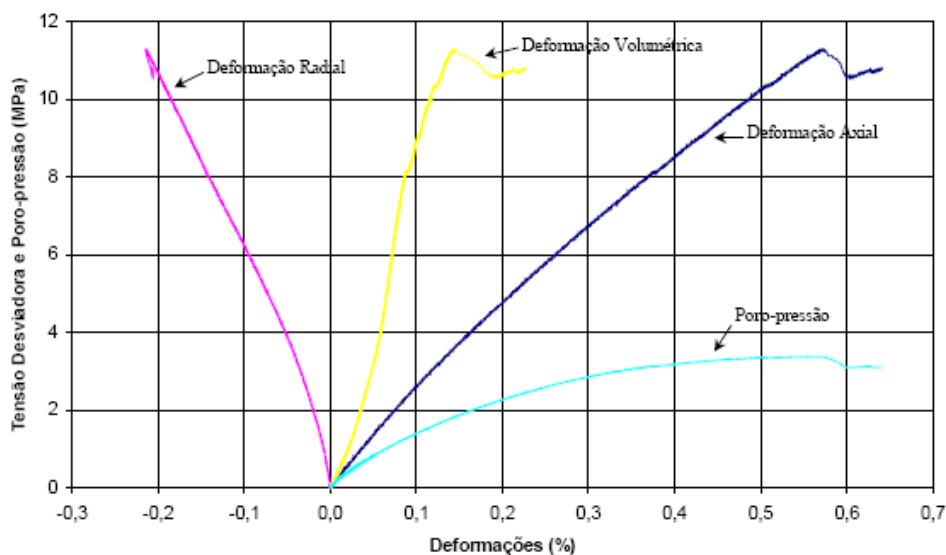


Figura 5.4. Resultado de um ensaio triaxial não drenado para o folhelho sob estudo a uma pressão de confinamento de 9MPa (fase de cisalhamento) (Muniz, 1998).

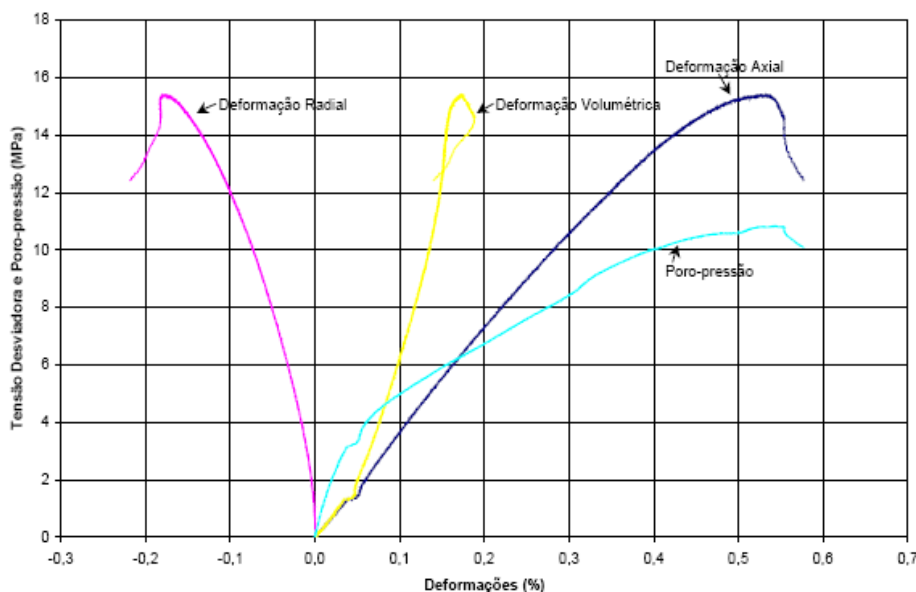


Figura 5.5. Resultado de um ensaio triaxial não drenado para o folhelho sob estudo a uma pressão de confinamento de 20MPa (fase de cisalhamento) (Muniz, 1998).

Foram escolhidos para o poço PUC-1 dois intervalos de folhelhos com o auxílio do perfil de Raios Gama e a descrição de amostras de calhas para a análise de correlacionar a UCS e a resistência à perfuração. Esses intervalos foram escolhidos fora dos intervalos de construção de ângulos com o auxílio da informação da trajetória.

A Figura 5.6 apresenta o gráfico que relaciona a UCS com a resistência à perfuração. Esta foi lograda após uma análise de relações das resistências com os parâmetros que afetam a perfuração, escolhendo-se as relações da UCS/S e WOB/RPM. Teve-se como fundamento a influência destas duas variáveis controláveis no processo de perfuração e a análise do efeito das mesmas no diferencial dinâmico de pressão imposto (baseado na fundamentação teórica). A relação WOB/RPM se crê que atua como uma taxa de carregamento sobre rocha a ser perfurada que afeta o diferencial dinâmico de pressão imposto na rocha a ser cortada no processo da indentação da rocha como no cisalhamento da mesma. Observa-se na Figura 5.6 que os dados se ajustam a uma tendência claramente definida, para o qual uma equação de potência produz um coeficiente de correlação $R^2 = 0,92$. Obtendo-se uma correlação para estimar a UCS de dados de perfuração de acordo a equação 5.2. Alcançando-se o principal objetivo desta pesquisa.

$$UCS = 0.0741 * S * \left(\frac{WOB}{RPM} \right)^{-0.9234} \quad (5.2)$$

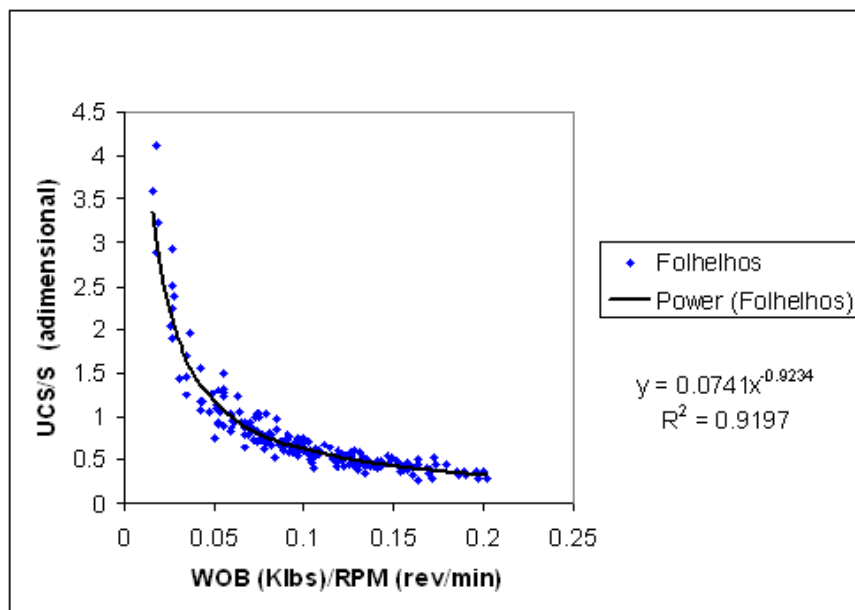


Figura 5.6. Correlação da relação da UCS/S e a relação da WOB/RPM para folhelhos do poço PUC-1.

A mesma análise e metodologia foram utilizadas para os arenitos obtendo-se resultados similares. As relações UCS/S vs. WOB/RPM seguiram também uma tendência sendo uma equação de potência a que se ajustou melhor aos dados. Os resultados se encontram acorde ao mostrado na literatura enquanto que as rochas com alta permeabilidade podem rapidamente restabelecer o campo de pressão original, os estudos publicados também apresentam que este efeito é dependente de muitos fatores e função do tempo que leva em perfurar a rocha perturbada, as propriedades reológicas/filtragem da lama. Todavia esses efeitos se crêem poderiam explicar o observado na Figura 5.7 onde os dados das relações de UCS/S são geralmente menores a 0,7 e espalhados debaixo desse valor como função da relação WOB/RPM. Isto pode induzir a pensar que existe um diferencial de pressão, mas este pode ser ligeiramente diferente ao diferencial da pressão de fundo de poço e a pressão de poros da formação (dependendo dos parâmetros e efeitos mencionados acima). De acordo a equação 5.3 a UCS para arenitos deste campo podem ser estimadas dos parâmetros da perfuração da seguinte expressão:

$$UCS = 0.0258 * S * \left(\frac{WOB}{RPM} \right)^{-0.968} \quad (5.3)$$

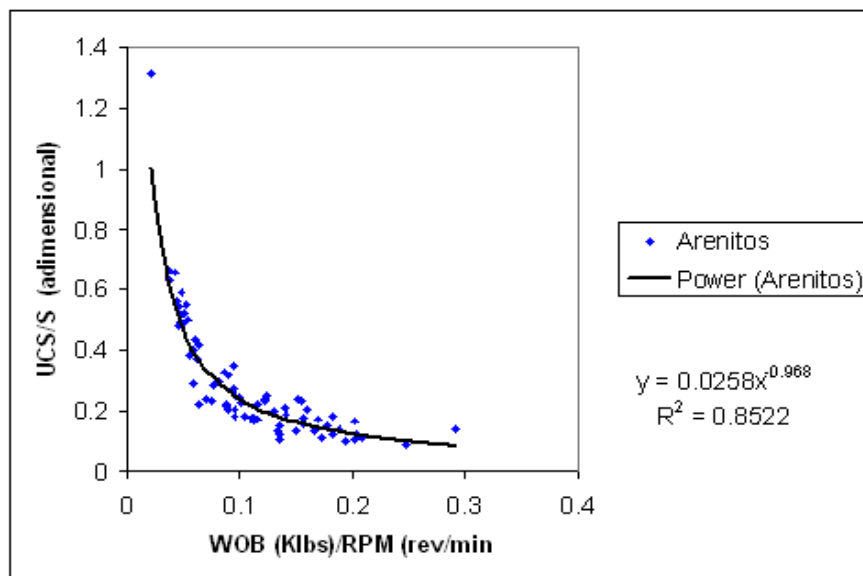


Figura 5.7. Correlação da relação da UCS/S e a relação da WOB/RPM para arenitos do poço PUC-1.

Uma vez que se conta com correlações tipo 5.2 e 5.3 podem ser rapidamente estimados perfis de UCS a partir de dados de perfuração em tempo real durante a perfuração para poços perfurados neste campo. Assim cumprindo-se com o objetivo principal desta pesquisa. Utilizando os perfis de resistência à perfuração apresentados no capítulo anterior para os poços PUC-1 e PUC-2 (Figuras 4.5 e 4.8 respectivamente) e as correlações (5.2 e 5.3) para cada litologia se estimaram os perfis de UCS para esses poços. A Figura 5.8 apresenta o fluxo de trabalho proposto nesta pesquisa para a estimativa da UCS a partir parâmetros da perfuração. Na Figura 5.9 se mostram os perfis calculados para o poço PUC-1 a partir de dados de perfis geofísicos e com as correlações citadas. Observa-se para o poço PUC-1 (Figura 5.9 à esquerda) uma estimativa muito satisfatória quando comparada com a UCS estimada do perfil sônico para os arenitos e da porosidade (estimada do perfil densidade) para os folhelhos.

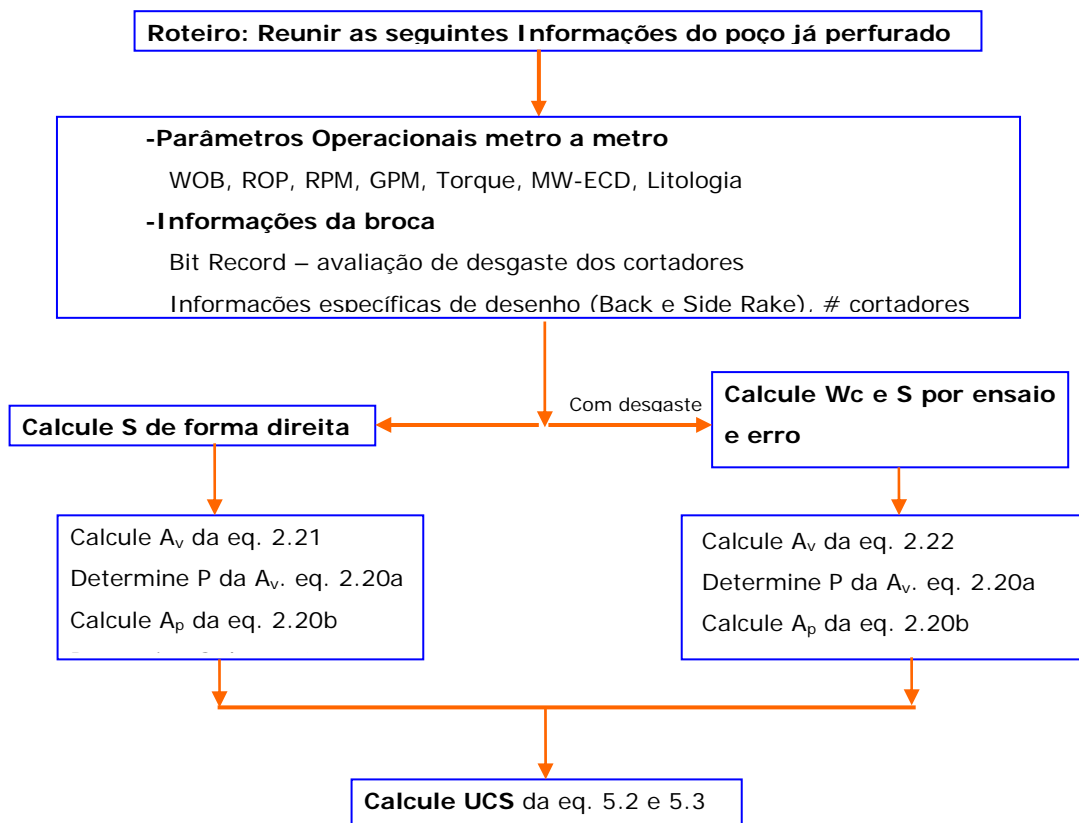


Figura 5.8. Fluxo de trabalho proposto nesta pesquisa para o cálculo da UCS a partir dos parâmetros da perfuração.

Para o poço PUC-2 com as mesmas correlações 5.2 e 5.3 e o perfil da resistência à perfuração (Figura 4.8 dos parâmetros operacionais de PUC-2) se estimou a UCS para este poço. Estimou-se um perfil da UCS a partir de perfis geofísicos (contava-se só com o perfil de densidade e não com o sônico) para compará-lo com o calculado a partir de dados de perfuração. Esses são apresentados na Figura 5.9 (à direita). Os resultados observados também são muito satisfatórios tanto para os folhelhos como para os arenitos. Pequenas diferenças se observam para a litologia de arenitos, porém os dados obtidos com a correlação 5.3 se mostram mais acorde que os estimados com o perfil de porosidade (obtida da densidade) quando comparados com os dados mostrados da UCS de ensaios de laboratório.

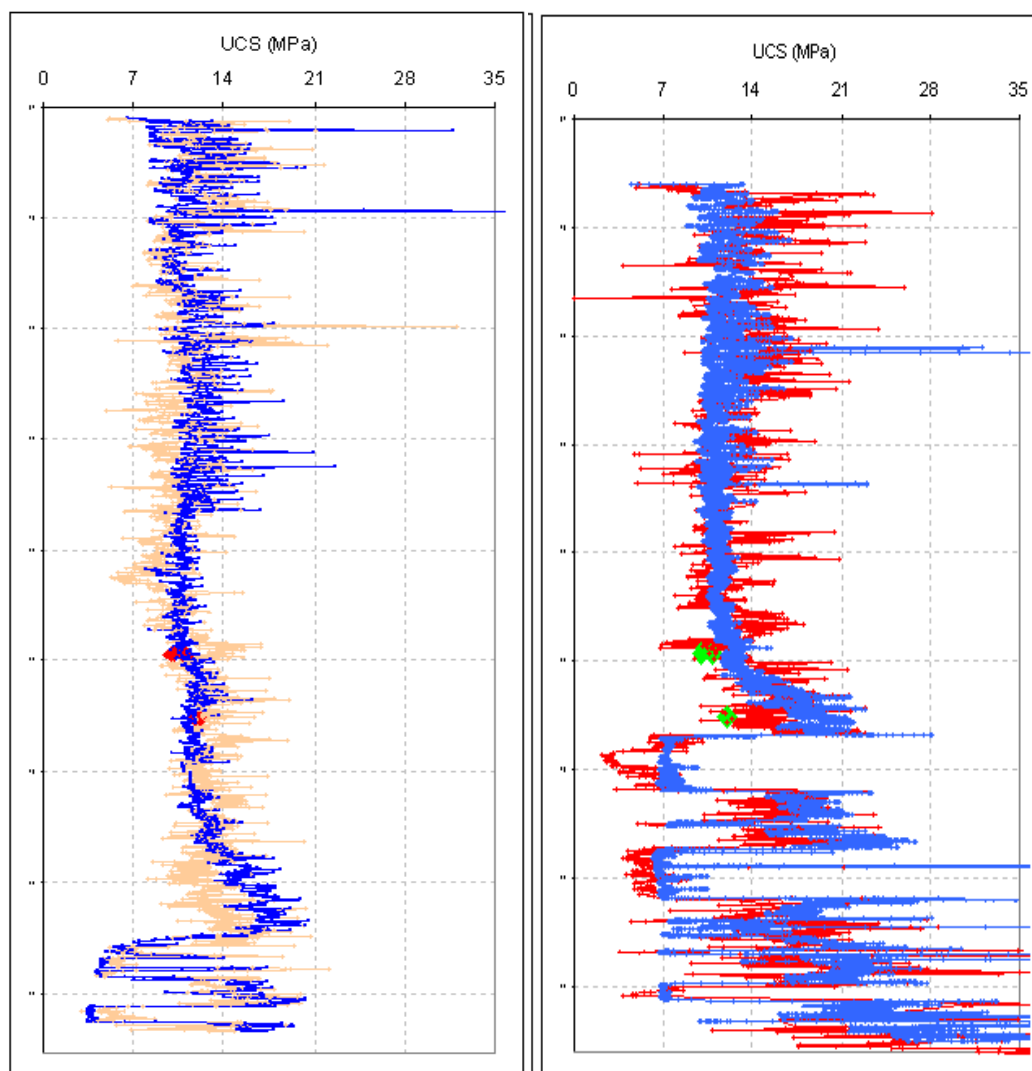


Figura 5.9. (à direita) Comparação dos perfis de UCS estimados de dados de perfuração e de perfis (azul) para o poço PUC-1. (à esquerda) Comparação dos perfis de UCS de dados de perfuração (vermelho) e de perfis (azul) para o poço PUC-2.

5.3.

Considerações do Potencial Uso das Correlações entre a UCS/S e WOB/RPM

Sabe-se que a resistência não confinada UCS das rochas é um parâmetro de grande relevância em diferentes análises, pelo tanto os resultados obtidos desta pesquisa podem ser integrados para auxiliar essas análises.

Como mencionado nesta pesquisa os modelos ROP tem sido verificados e utilizados no planejamento/otimização de poços. Crê-se que esta metodologia pode ser melhorada usando uma correlação tipo equação 5.2 ou 5.3 em vez da equação 2.7, uma vez que os resultados desta pesquisa indicam que a

resistência à perfuração é função dos parâmetros operacionais. As correlações dadas mostram que a resistência à perfuração S , é dependente da relação WOB/RPM . A literatura mostra que esta resistência também é dependente do verdadeiro diferencial de pressão (tensões efetivas) em fundo quando a rocha é cortada. Pelo tanto se crê que este fato pode ser aproveitado para melhorar o desempenho da broca e aumentar a taxa de perfuração ROP quando se perfura em folhelhos que apresentem comportamento dilatante sob cisalhamento e carbonatos, já que essa correlação sugere uma forma de controlar o diferencial dinâmico que pode levar esse diferencial a um valor máximo e igual à pressão de fluido de perfuração no fundo, como tem sido reportado na literatura. Esses postulados crê-se podem ser facilmente estudados de uma retroanálise dos poços perfurados nas litológicas assinaladas, e verificados mediante a sua implementação na perfuração de um novo poço.

Por outro lado também se crê que esta correlação no espaço UCS/S vs. WOB/RPM pode ser usada para avaliar a perfuração em TR. Uma vez que plotados essas relações e os dados se mostrarem fora da tendência esperada poderiam indicar ineficiências na perfuração tais como: na transferência do peso aplicado à broca sugerindo-se ações tais como o repassamento do intervalo perfurado por exemplo. Esta potencial aplicação precisam ser retro-analisada em vários poços e incluindo as medições de algumas das tecnologias usadas hoje nas operações em tempo real para um maior entendimento e aproveitamento. Por exemplo, se foram medidos o peso aplicado à broca (WOB) no fundo do poço como as rotações da coluna/broca. Os perfis das vibrações (laterais, axiais e torcional) registradas durante a perfuração do poço também poderiam ser integrados nesta análise com o fim de escolher combinação de parâmetros que produzam ditas vibrações que causam problemas durante a perfuração e podem diminuir a ROP.

6 Conclusões e sugestões

O presente trabalho teve como objetivo a procura de uma metodologia e uma correlação para a estimativa da resistência não confinada das rochas (UCS) a partir de parâmetros de perfuração, procurando também desta forma aproveitar a disponibilidade (parâmetros operacionais) permanente e de baixo custo desta informação para ajudar auxiliar a tomada de decisões em tempo real e as análises que requerem este parâmetro.

O estudo foi dividido em três etapas: a primeira consistiu no estudo dos modelos de ROP mostrados na literatura e o entendimento dos parâmetros que afetam o processo da perfuração. A segunda consistiu principalmente na revisão da metodologia para estimar a UCS a partir de perfis geofísicos de poços devido à carência de dados UCS provenientes de ensaios de laboratório em amostras de poços que permitiram passar diretamente a última etapa. A última etapa consistiu na análise do processo da perfuração e aproveitamento das metodologias para calcular a resistência à perfuração de modelos ROP e dados de perfuração e a UCS estimada de perfis de poços ou medida em ensaios de laboratório, conseguindo-se desta forma uma correlação que permite a estimação da UCS a partir de parâmetros da perfuração atingindo assim o principal objetivo tracejado.

Conclui-se dos perfis de resistência à perfuração estimados para os poços PUC-1 e PUC-2 que o modelo de ROP de broca PDC utilizado nesta pesquisa responde bastante bem às mudanças dos parâmetros operacionais (WOB-RPM). Esses perfis de resistência quando comparados deixam entrever o potencial destes modelos verificados no Mar do Norte e no Canadá onde esses modelos têm sido usados para o planejamento/otimização de um novo poço.

Conclui-se também que a UCS das rochas atravessadas durante a perfuração pode ser estimada a partir de dados de perfuração mediante a metodologia descrita neste trabalho e pode-se também ser estimada mediante esta metodologia em tempo real durante a perfuração do poço. Essa metodologia/correlação apresentou-se bastante robusta como se observa dos perfis de UCS estimados quando comparados aos estimados de perfis geofísicos para os poços PUC-1 e PUC-2.

Como sugestões para trabalhos futuros são indicadas as seguintes linhas de pesquisa:

- O espaço UCS/S vs. WOB/RPM apresenta-se muito promissor para entender alguns fenômenos associados à perfuração. Os dados quando plotados neste espaço sugerem uma possível diminuição da resistência à perfuração quando se escolherem de uma ótima combinação de WOB e RPM. Isto seria refletido num incremento substancial da ROP que seria de grande impacto quando se perfuram folhelhos duros e carbonatos onde taxas de perfuração baixíssimas são registradas. Pelo tanto se sugere aplicar a metodologia apresentada neste trabalho para mediante uma retroanálise nos poços perfurados nessas litológicas se avalie e/ou verifique a validade do anterior postulado.
- Sugere-se aplicar a anterior metodologia para outras áreas e litologia para analisar as mesmas quando plotadas num gráfico de UCS/S vs. WOB/RPM.
- Sugere-se a utilização de uma técnica de inteligência artificial ou algoritmo evolutivo para o planejamento e otimização de um novo poço. Mediante a seleção da melhor combinação de parâmetros (WOB-RPM) tendo-se em conta os resultados obtidos nesta pesquisa uma vez que a resistência a perfuração apresenta-se como função dos mesmos. Sugere-se pelo tanto compará-lo com os resultados obtidos quando se usar o perfil de resistência à perfuração calculado do poço de correlação diretamente para o poço projeto.
- Sugere também o uso desta metodologia com dados registrados de vibrações (axial, torcional e lateral) durante a perfuração para a seleção de ranges ótimos dos parâmetros operacionais que evitem as mesmas.

7

Referências bibliográficas

BAKER HUGHES Catalogo de brocas. www.bakerhughes.com

Bertrand, P., Atkinson, C. (1987) Dynamic Pore Pressure Ahead of the Bit. Paper SPE 14787, Drilling Engineering.

BORLAND, W., et al. Real-Time Answers to Well Drilling and Design Questions,

BORGOYNE, A. T.; CHENEVERT, M. E.; MILLHEIM, K.; YOUNG, F. S. Applied Drilling Engineering. SPE Text Book Series, Vol. 1, Cap 5, 1991.

BRATLI, R.K., HARELAND, G., STENE, F., DUNSAED, G.W., GJELSTAD, G.,(1997) Drilling Optimization Software Verified in the North Sea. Paper SPE 39007, LACPEC. Rio de Janeiro, Brazil.

CAICEDO, H.U, Calhoun, W.M, Ewy, R.T., (2005) Unique ROP Predictor Using Bit-specific Coefficient of Sliding Friction and Mechanical Efficiency as a Function of CCS Impacts Drilling Performance. Paper SPE 92576 In: Conference on Drilling. Amsterdam, The Netherlands.

CHANG, C., (2004) Empirical Rock Strength Logging in Boreholes Penetrating Sedimentary Formations, Vol. 7, No. 3, p. 174-183.

Comunicação com DE SOUSA, T., ALBUQUERQUE M. (HALLIBURTON) Spec Sheet bit FMF3653z 12 ½”.

DETOURNAY, E., ATKINSON, C., (1991) Influencia of Pore Pressure on the drilling response of PDC bits. Rock Mechanics as a Multidisciplinary Science, Roegiers (ed), Balkema, Rotterdam.

DETOURNAY, E., ATKINSON, C., (2000) Influence of Pore Pressure on the Drilling Response in Low-Permeability Shear-Dilatant Rocks. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 37, Elsevier.

DETOURNAY, E., TAN, C., (2002) Dependence of Drilling Specific Energy on Bottom-Hole Pressure in Shales. In: Conference SPE/ISRM 78221 Rock Mechanics, Texas.

EATON, B., (1985) The Equation for Geopressure Prediction from Well Logs. Paper 5544, 50Th Annual Fall Meeting of the SPE of AIME , Dallas, Texas.

GREWOOD, J.A., BREHM, A.,VAN OORT, E. (2005) Application of Real Wellbore Stability Monitoring on a Deepwater ERD Well. Paper SPE/IADC 92588, Drilling Conference, Amsterdam, The Netherlands.

GUERRERO, C.A., KULL, B.J. (2007).Deployment of an SeROP Predictor Tool for Real-Time Bit Optimization. Paper SPE 105201. Drilling Conference. Amsterdam, The Netherlands,

FJÆR, E.; HOLT, R. M.; HORSRUD, P.; RAAEN, A. M.; RISNES, R. Petroleum Related Rock Mechanics. Elsevier Science B. V., 1992

FJÆR, E.; HOLT, R. M.; HORSRUD, P.; RAAEN, A. M.; RISNES, R. Petroleum Related Rock Mechanics, Elsevier Science., 2nd Ed. 2008.

HARELAND, G. (1991) Use of Drilling Parameters to Predict In Situ Rock Stress Bounds. Theses Ph. D, Oklahoma State University.

HARELAND, G., RAMPERSAD, P., (1994) Drag – Bit Model Including Wear. Paper SPE 26957 In: Conference III LACPEC, Buenos Aires, Argentina.

HARELAND G., BRATLI, R.K., STENE, F., FAGERENG, S., JORGENSE, T., (1996). Safe Mud Weight Window Predictor – Instantaneous, Pre-Planning and Post Analysis Software. Paper SPE 36097 In: Conference Fourth LAPEC, Port of Spain.

HARELAND, G., NYGAARD, R., (2007) Drilling Simulation vs. Actual Performance in Western Canada. Paper SPE 106570 In: Conference Rocky Mountain Oil and Gas, Denver, Colorado.

HARELAND, G., NYGAARD, R., (2007). Calculating Unconfined Rock Strength from Drilling Data. Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands – Eberhart, Stead & Morrison (eds), Vancouver, Canada.

HORSRUD, P., (2001). Estimating Mechanical Properties of Shale from Empirical Correlations, Paper SPE 56017.

JORDEN, J.R., SHIRLEY, O.J., (1966) Application of Drilling Performance Data to Overpressure Detection. Paper SPE 1407, Symposium on Offshore Technology and Operations, New Orleans, La.

KOLLE, J.J., (1996). The Effects of Pressure and Rotary Speed on the Drag Bits Drilling Strength of Deep Formations. Paper SPE 36434, Annual Conference and Exhibition, Denver, Colorado.

MAURER, W.C., (1962). The "Perfect-Cleaning" Theory of Rotary Drilling. Paper SPE 408, 37th Annual Fall Meeting, Los Angeles, California.

MAURER, W.C., (1965). Bit –Tooth Penetration Under Simulated Borehole Conditions. Paper SPE 1260, Annual Fall Meeting, Denver, Colorado.

MENAND S., GERBAUD L., (2005). PDC bit technology improvements increase efficiency, bit life. Official Magazine International Association of Drilling Contractors.

MUNIZ, E.S. (1998), Nova Metodologia de Ensaios Triaxiais em Folhelhos, Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, 118 p.

NICOLINO, A., SOARES, A., (1997) Coring Samples And Obtaining Geomechanical Properties For Wellbore Stability Analysis In Deepwater Brazilian Horizontal Wells. Paper SPE 39070, 5th LACPEC, Rio de Janeiro, Brazil.

ONYIA, E.C. (1988), Relationships Between Formation Strength, Drilling Strength, and Electric Log Properties. Paper SPE 18166, In: Conference 63rd Annual Technical, Houston, TX.

PLÁCIDO, J.C. (2007), Brocas de Perfuração de Poços/Petróleo, Notas de aula, PUC-Rio.

ROBNETT, E.W. HEISIG, G. (2002), Real-Time Downhole Drilling Process Data Complement Surface Data In Drilling Optimization. Paper IADC/SPE 77248, Asia Pacific Drilling Technology, Jakarta, Indonesia, 2002.

ROMMETVEIT, ROLV., BJORKEVOLL, K.S., HALSEY G.W., FJAER, E. (2007), eDrilling: A System for Real-Time Drilling Simulation, 3D Visualization, and Control. Paper SPE 106903, Digital Energy Conference, Houston, Texas.

RAMPERSAD, P.R., HARELAND, G., BOONYAPALUK, P. (19994), Drilling Optimization Using Drilling Data and Available Technology. Paper SPE 27034, III LACPEC, Buenos Aires, Argentina.

SCHAAF, STUART., MALLARY C.R. (2000), PAFITIS DEMOS., Point-the Bit Rotary Steerable System: Theory and Field Results. Paper SPE 63247, Annual Technical, Dallas, Texas.

SELLAMI, H., FAIRHURST, C., DELIAC, E., DELBAST, B. (1989), The Role of In Situ Rock Stresses and Mud Pressure on the Penetration Rate of PDC Bits. Rock at Great Depth, Maury & Fourmaintraux (eds), Balkema, Rotterdam.

SINOR, L.A., POWERS, J.R., WARREN, T.M. (1998), The Effect of PDC Cutter Density, Back Rake, Size and Speed on Performance. Paper IADC/SPE 39306 Drilling, Dallas, Texas.

WARREN T.M. (1981), Drilling Model for Soft-Formation Bits. Paper SPE 8438 of AIME.

WARREN T.M., SMITH M. (1985), Bottomhole Stress Factors Affecting Drilling Rate at Depth. Paper SPE 13381.

WARREN T.M. (1987), Penetration Rate Performance of Roller Cone Bits, Paper SPE 13259, Drilling Engineering.

WARREN, T.M. (1994), What's Needed to Meet Tomorrow's Challenge. Paper SPE 27978, University of Tulsa Centennial Petroleum Engineering Symposium, Tulsa, OK, U.S.A.

WARREN, T.M. (2006), Steerable Motors Hold out Against Rotary Steerables. Paper SPE 104268, Annual Technical Conference, San Antonio, Texas.

WINTERS W., WARREN T., ONYIA E. (1987), Roller Bit Model With Rock Ductility and Cone Offset. Paper SPE 16696, 62nd Annual Technical Conference, Dallas, Tx.

ZIJSLING, D.H. (1987), SINGLE CUTTER TESTING – A KEY FOR PDC BIT DEVELOPMENT. Paper SPE 16529, Inc: Offshore Europe 87, Aberdeen.

ZOBACK, M.D, BARTON, C.A., BRUDY, M., CASTILLO, D.A., FINKBEINER, B.R. (2003), Determination of Stress Orientation and Magnitude in Deep Wells. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 40, Elsevier.