

## 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.

$\mu$  = viscosidade plástica do fluido de perfuração, cp.

$\rho$  = 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.

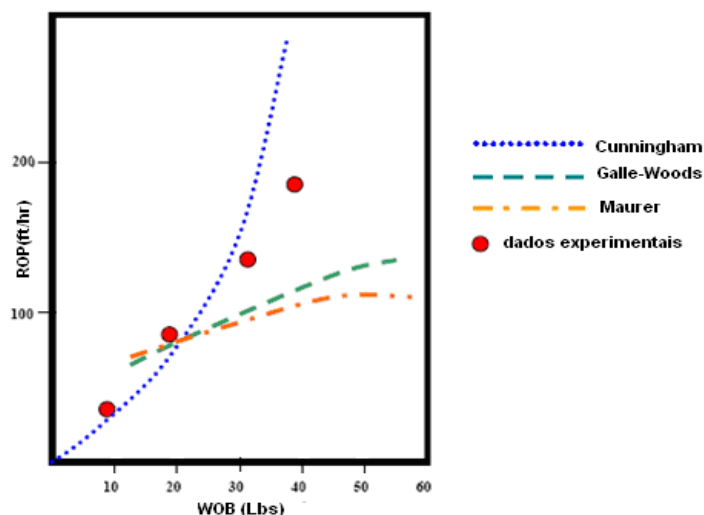


Figura 2.1 – Comparação da ROP predita por alguns modelos de perfuração e dados experimentais (Warren, 1981).

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).

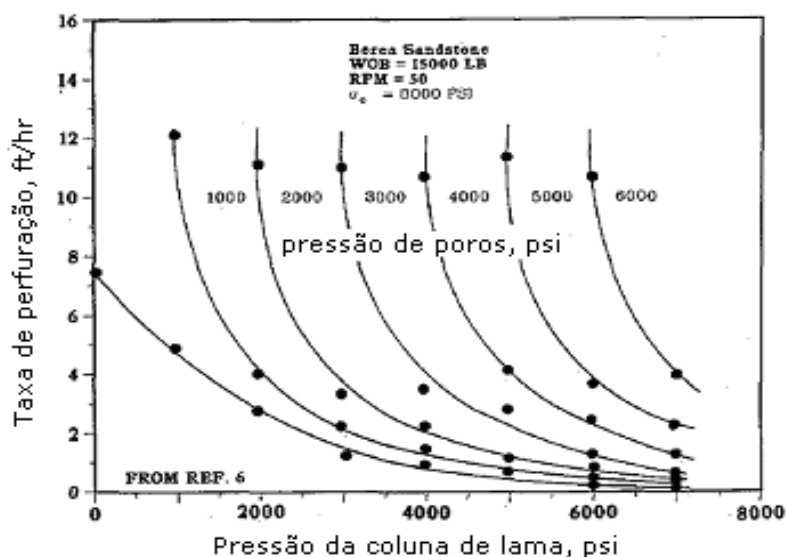


Figura 2.2 – Efeito da diferença da pressão do fluido de perfuração e a pressão de poros para um arenito permeável (Cunningham 1959).

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.

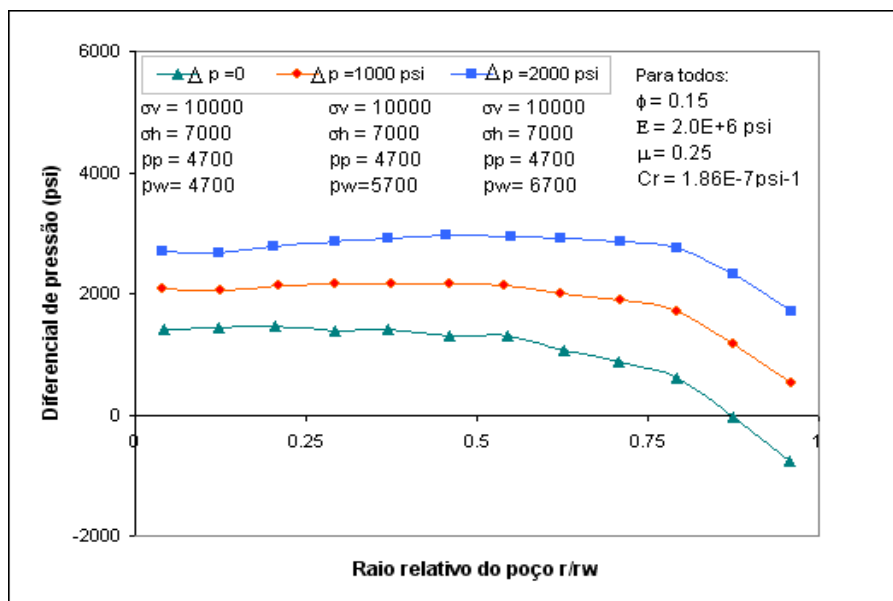


Figura 2.3. Diferencial de pressão induzido em 2,8mm (0,11in) abaixo da superfície do fundo do poço para uma formação impermeável. (Warren & Smith 1985).

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).

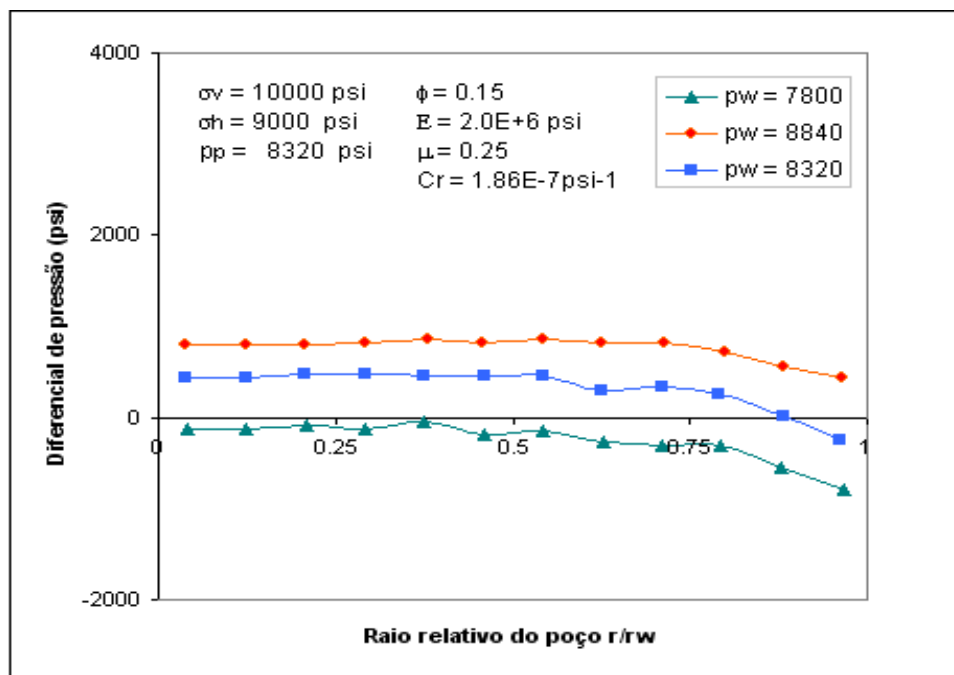


Figura 2.4. Efeito da pressão de poros anormalmente alta no diferencial de pressão induzido a 2,8mm (0.11 in) abaixo da superfície do fundo do poço para uma formação impermeável. (Warren & Smith, 1985).

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 ( $\varepsilon$ ) da rocha e  $\phi$  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:

$\varepsilon$  = ductibilidade ou deformação axial da rocha, adimensional ( $\varepsilon$ )

$\lambda$  = 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	$\lambda$
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 ( $\phi$ ) 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).

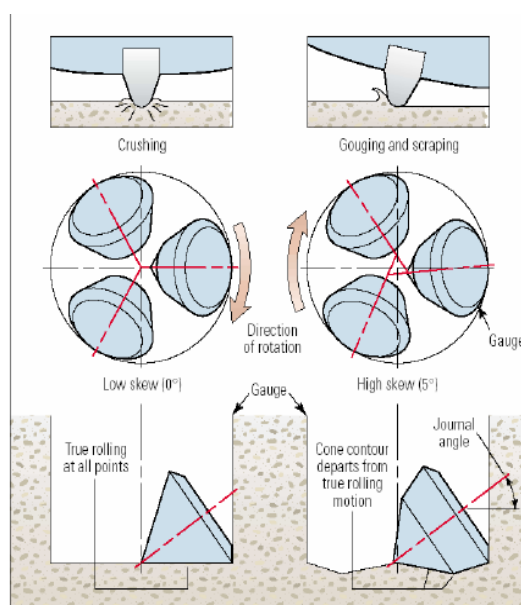


Figura 2.5. Ilustração de uma broca tricônica com e sem cone offset. (Plácido, 2007).

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.

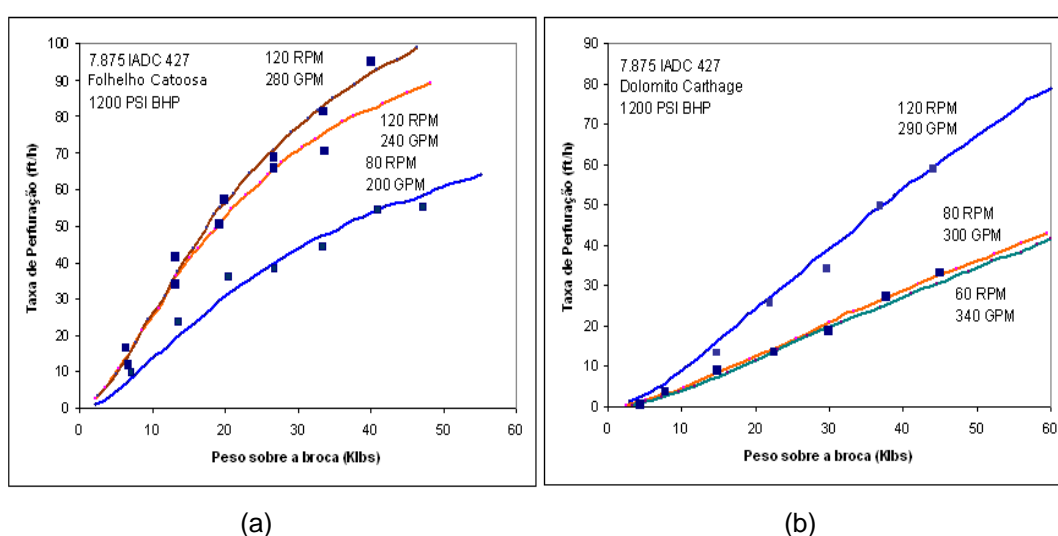


Figura 2.6. ROP para uma broca de inserto (427) com alto grau de cone offset. a) resposta do ROP no folhelho brando e dúctil. b) dolomito frágil e duro. (Winters et al., 1987).

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.

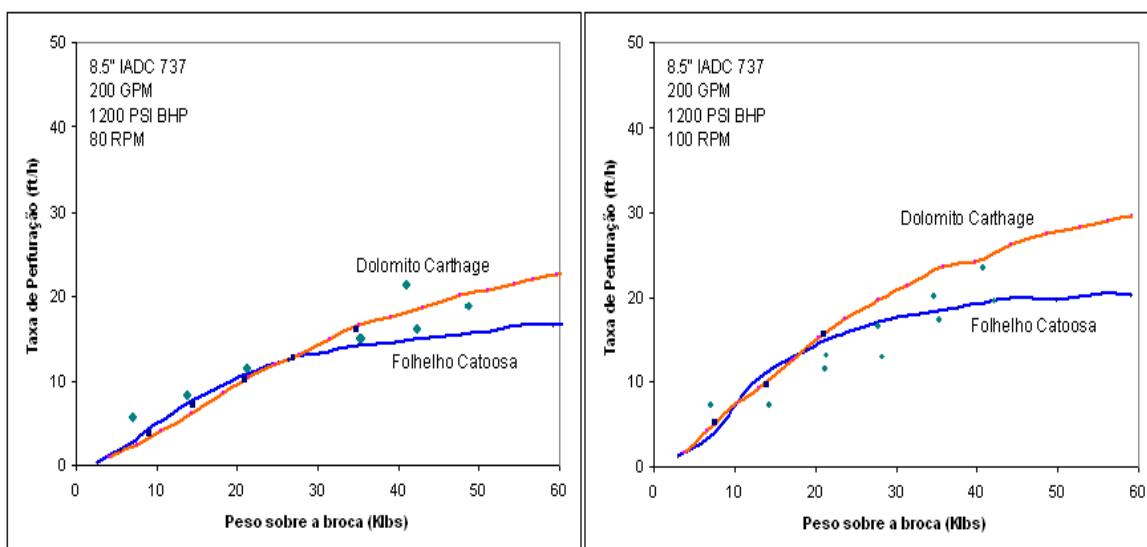


Figura 2.7. ROP em função do WOB para uma broca de inserto (737) com baixo grau de cone offset, a) para 80 RPM b) para 100 RPM. (Winters et al., 1987).

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 ( $\epsilon$ ) 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.

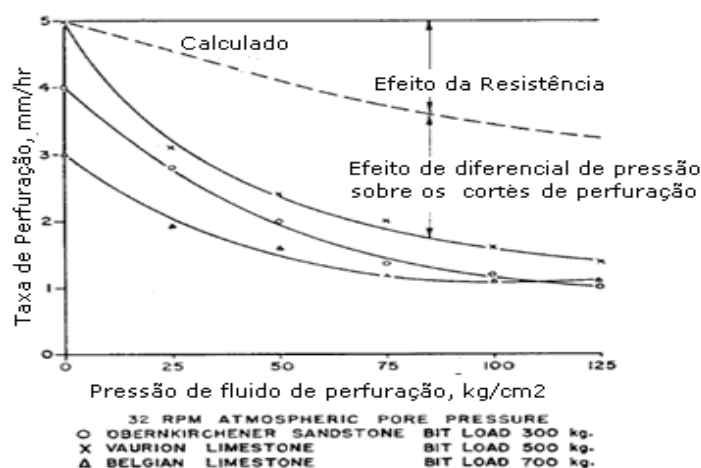


Figura 2.8. Efeito da pressão de fundo de poço (diferencial de pressão) na ROP, pressão de poros a condição atmosférica (modificado de Jorden et al., (1966)).

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;

$\Delta BG$  = 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.

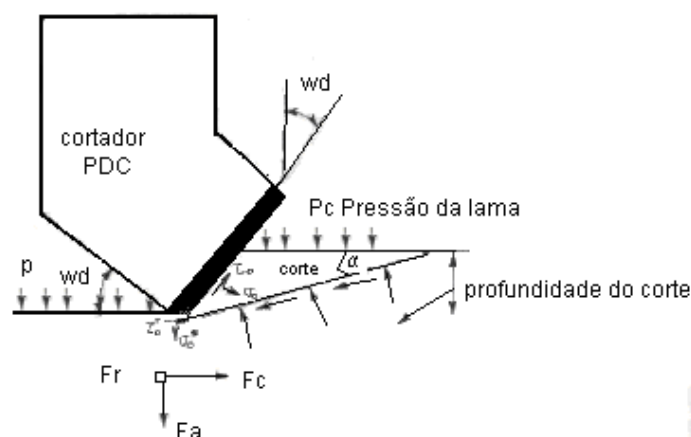


Figura 2.9. Esquema que ilustra um cortador PDC no processo de corte da rocha (modificado de Sellami et al., (1989).

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 Zijssling (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).

Zijssling (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.

$\rho$  = densidade da lama de perfuração.

KA = área aparente dos jatos.

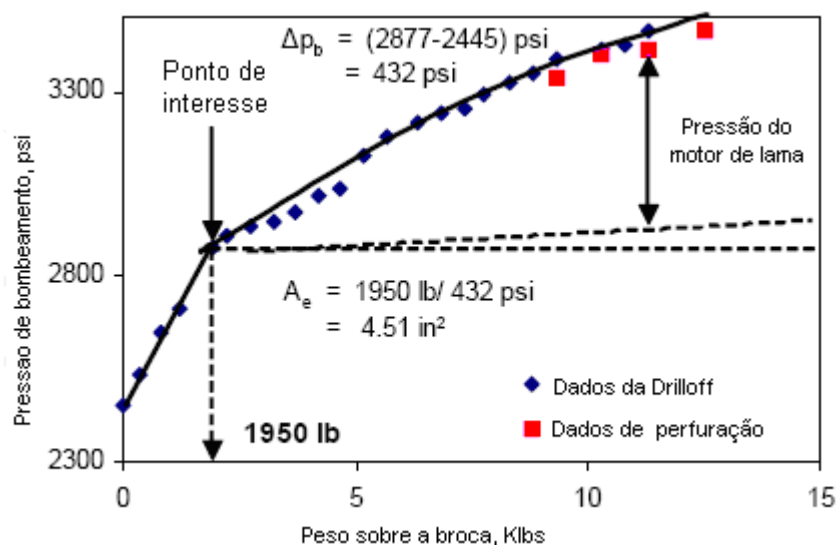


Figura 2.10. Resultado e interpretação de um ensaio de drilloff para determinar a área de bombeamento efetiva (Modificada de Winters & Warren, 1986).

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).

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

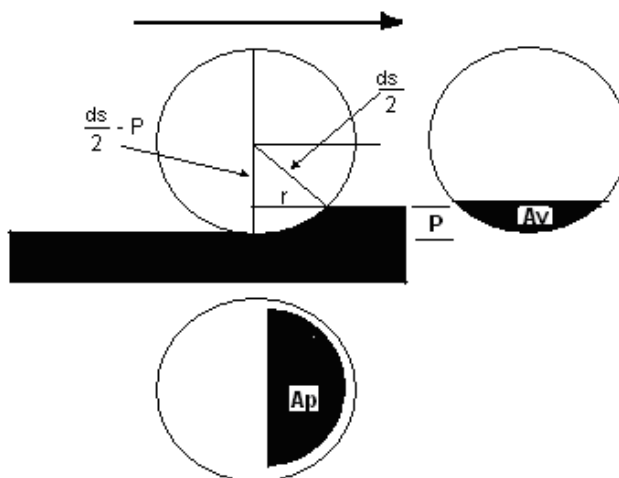


Figura 2.11. Ilustração do cortador de diamante onde se observa:  $A_p$  a área projetada e  $A_v$  a área da rocha comprimida. (Hareland & Rampersad, 1994).

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)

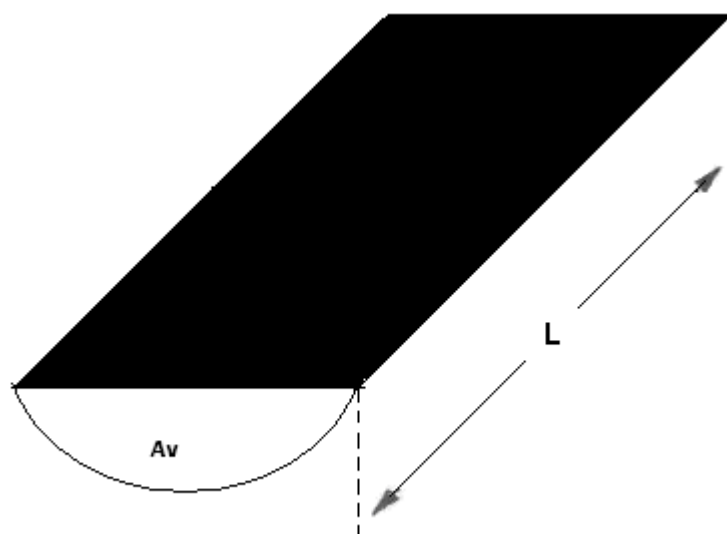


Figura 2.12. Ilustração do volume removido por diamante por revolução. (Hareland & Rampersad, 1994).

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

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

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
<b>a</b>	185.4	63.6
<b>b</b>	0.825	0.5397
<b>c</b>	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.

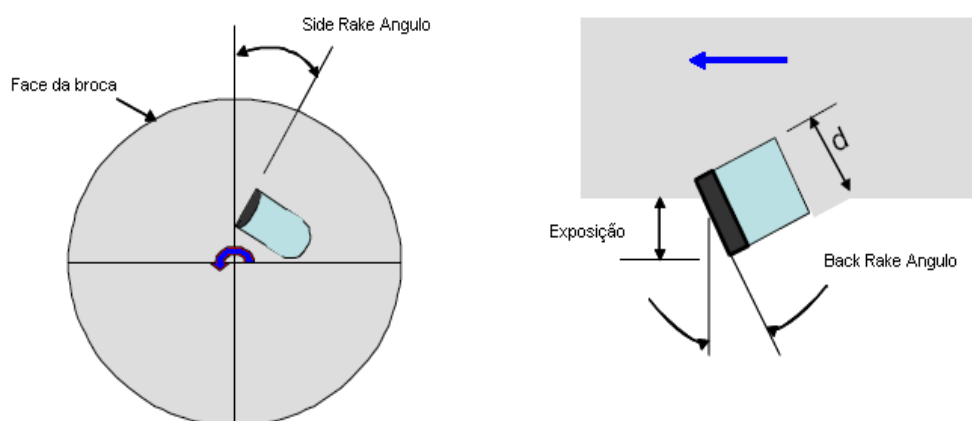


Figura 2.13. Esquema do volume removido por diamante por revolução. (Modificado Bourgoyne et al., 1991).

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:

$\beta$  = ângulo back rake (graus)

$\alpha$  = ângulo side rake (graus)

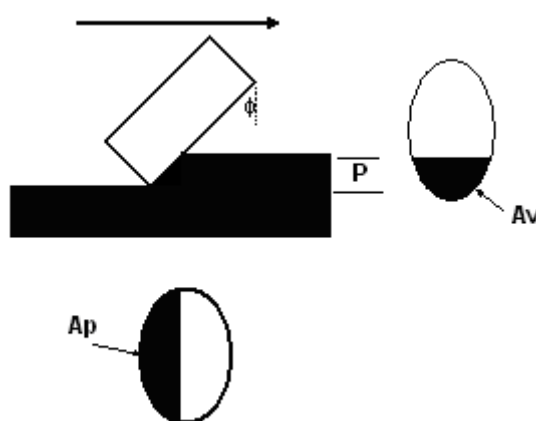


Figura 2.14. Ilustração de um cortador de uma broca PDC (Modificado de Hareland & Rampersad 1994).

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

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).