

3.

Estudo de Caso - Ensaios de Perfuração em Laboratório

Este capítulo tem como objetivo identificar os parâmetros de perfuração e da rocha que sejam relevantes para melhorar o desempenho da perfuração em evaporitos, através do estudo e aplicação de modelos analíticos de otimização baseados na transferência de energia. As análises foram realizadas utilizando-se 8 ensaios de perfuração em grande escala, fornecidos pela empresa Baker Hughes, executados em amostras evaporíticas submetidas a elevadas tensões de confinamento. Serão verificadas a relevância e contribuição de cada modelo na otimização da perfuração dos ensaios de laboratório e quais as suas vantagens e desvantagens.

3.1.

Descrição do Equipamento e Metodologia do Ensaio

Os dados fornecidos pela empresa Baker Hughes foram obtidos através de ensaios executados no Laboratório de Tecnologia da Perfuração, localizado na sede da empresa Hughes Christensen em Woodlands, Texas. Estes ensaios serviram como referência para a análise de dados deste trabalho, pois foram executados em um ambiente de perfuração controlado, onde os problemas existentes em uma perfuração real são minimizados e as grandezas de perfuração são medidas o mais próximo da broca possível, diminuindo perdas por atrito e vibração.

A Figura 23 ilustra o simulador de perfuração em grande escala utilizado para a execução dos ensaios. A Tabela 2 apresenta as características do simulador, incluindo os intervalos de aplicação dos parâmetros de perfuração, de pressão e o diâmetro de broca suportado. A tabela também mostra que existem duas maneiras de se controlar a perfuração: mantendo-se a taxa de penetração constante ou mantendo-se o peso sobre a broca constante. Conforme os ensaios mostram, também é possível manter a velocidade de rotação constante.



Figura 23 - Imagem do simulador em grande escala de perfuração da Baker Hughes.

Tabela 2 - Características do simulador de elevadas pressões da Baker Hughes.

Capacidade do Simulador de Elevadas Pressões	
WOB	0 - 100,000 lbs.
TOB	0 - 10,000 ft-lbs. (1,000 hp motor)
Velocidade de Rotação	0 - 240 rpm
ROP	0 - 300+ ft/hr
Pressão de Fundo de Poço	6,500 psi @ 500 gpm or up to 10,000 psi @ 200 gpm
Pressão Fornecida	7,500 psi @ 500 gpm or up to 15,000 psi @ 200 gpm
Pressão Confinante	0 - 15,000 psi
Pressão de Sobrecarga	0 - 15,000 psi
Pressão da Formação	0 - 15,000 psi
Modos de Perfuração	Constante ROP ou Constante WOB
Tamanho de Broca	Up to 12 ¼"
Amostras de Rocha	
Diâmetro	15 ½", 17 ½", 20", 20 ½"
Comprimento	36", 38"
Materiais Comumente Utilizados	
Folhelhos	■ Folhelho Mancos ■ Folhelho Catoosa
Arenitos	■ Mansfield ■ Crab Orchard
Outros	■ Mármore Carthage ■ Granito ■ Gabbro
Sistema de Fluido de Perfuração	
Estoque	Quatro tanques de fibra de vidro, 50 bbl cada, quatro tanques com misturadores mecânicos, trocador de calor para controle de temperatura.
Bombas de Fluido	2 Skytop-Brewster B1300T com 1000 hp motores controlados SCR

Os ensaios utilizados para o desenvolvimento desta dissertação foram apenas aqueles realizados em halita, utilizando broca do tipo PDC com 8,5 polegadas de diâmetro. A escolha deste tipo de broca baseou-se na experiência da empresa executora, que costuma obter taxas de penetração em torno de três vezes

maiores com este tipo de broca do que aquelas obtidas utilizando-se brocas tricônicas em rochas evaporíticas. A pressão de fundo de poço (que equivale à tensão de confinamento) foi mantida constante e seu valor é de 6000 psi. O valor do peso de lama para os ensaios foi de 13.6 lb/gal à exceção dos ensaios OB0001A, cujo valor foi de 13.3 lb/gal e do ensaio OB0002A, com valor de 16 lb/gal. Todos eles tiveram a grandeza RPM mantida constante alternando entre 120 rpm (para a primeira parte do ensaio) e 180 rpm (segunda parte do ensaio). A grandeza peso sobre a broca foi elevada em etapas, partindo de 5 Klb para 10, 15, 20 e 25 Klb. A Figura 24 e a Figura 25 ilustram os parâmetros medidos nos ensaios. Os ensaios restantes podem ser visualizados no item A.1 do apêndice deste trabalho. A Tabela 3 apresenta um resumo das características dos ensaios.

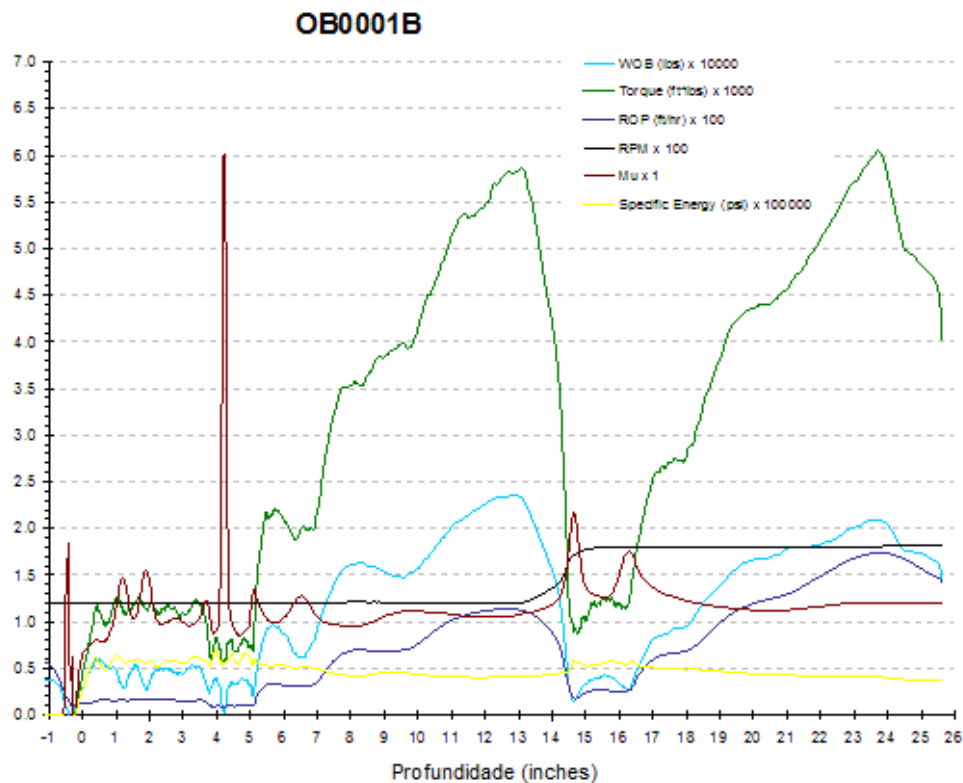


Figura 24 - Perfis do ensaio OB0001B.

Ensaio	Broca	Haletas	Tamanho Dentes (mm)	Diâmetro Broca (in)	Pressão de Fundo (psi)	Peso de Lama (lb/gal)	RPM	WOB (Klb)
OB0001A	DP0123	6	13.4	8.5	6000	13.3	120	5, 10, 15, 20 e 25
OB0001B	DP0123	6	13.4	8.5	6000	13.6	120 e 180	5, 10, 15, 20 e 26
OB0001D	DP0269	6	19	8.5	6000	13.6	120 e 180	5, 10, 15, 20 e 27
OB0001F	DP0123	6	13.4	8.5	6000	13.6	120 e 180	5, 10, 15, 20 e 28
OB0001I	DP0123	6	13.4	8.5	6000	13.6	120	5, 10, 15, 20 e 29
OB0001J	DP0123	6	13.4	8.5	6000	13.6	120 e 180	5, 10, 15, 20 e 30
OB0001K	DP0391	4	19	8.5	6000	13.6	120 e 180	5, 10, 15, 20 e 31
OB0002A	DP0269	6	19	8.5	6000	16	121 e 180	5, 10, 15, 20 e 32

Tabela 3 - Resumo das características de perfuração dos ensaios.

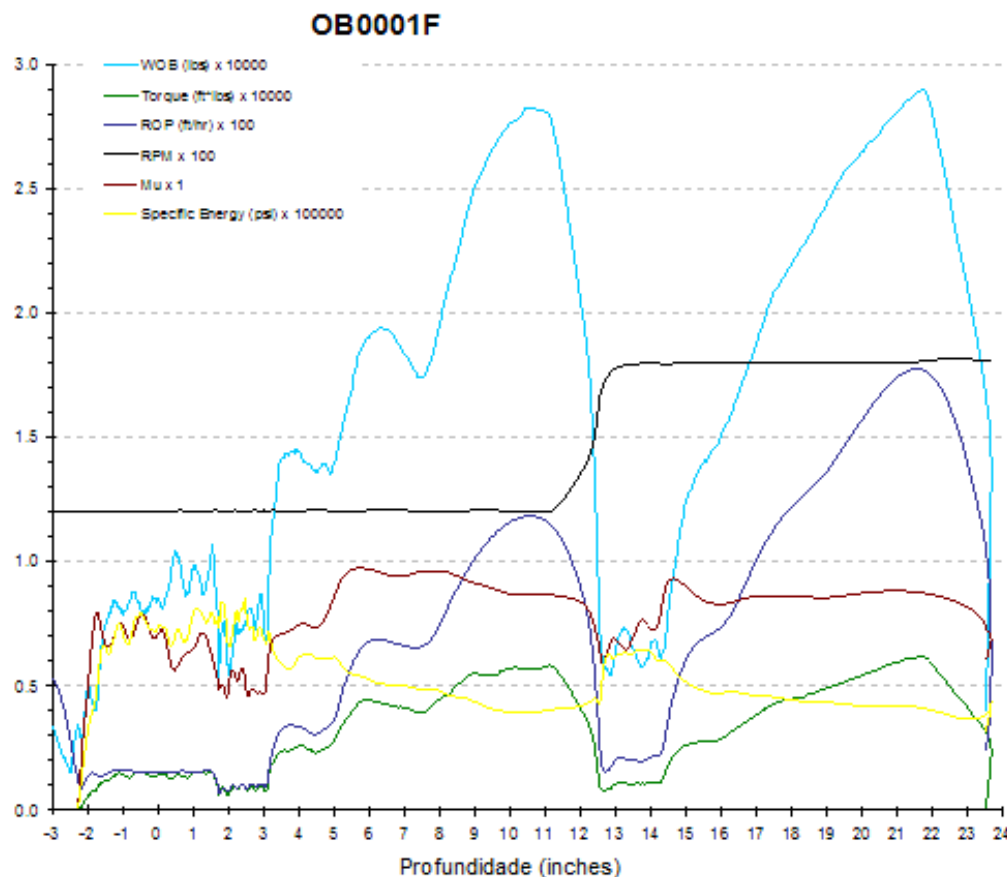


Figura 25 - Perfis do ensaio OB0001F.

3.2. Avaliação da Resistência da Rocha

A resistência da rocha é um parâmetro importante na avaliação da otimização da perfuração através dos conceitos de transferência de energia. Quanto mais próximo estiver o valor da energia específica do valor da resistência da rocha, mais eficiente será a perfuração, pois menos trabalho terá sido realizado para quebrar a rocha. Na perfuração em condições atmosféricas, as forças exercidas pelo cortador quebram a cimentação dos grãos de rocha ao longo de um plano de ruptura, originando um fragmento que é expelido para fora da face do cortador. Para este mecanismo de corte, a força exercida pelo dente precisa superar somente a resistência da cimentação entre os grãos da rocha e por isto ela pode ser relacionada à resistência à compressão não confinada (Rafatian et al., 2009).

É importante salientar que a relação exposta acima ($UCS = SE$) é válida para perfurações sob pressão atmosférica. Pessier e Fear (1992) realizaram ensaios em rocha sob pressões hidrostáticas e sugeriram a utilização da energia específica mínima como sendo equivalente à resistência à compressão confinada (CCS). Esta relação foi proposta devido à observação de um grande aumento da energia específica, que os autores relacionam ao aumento da resistência da rocha quando esta está sob condições hidrostáticas. A utilização da resistência à compressão confinada aproximou os valores de energia aplicados no sistema àqueles valores efetivamente entregues à rocha. Os resultados ainda não representam os valores reais de energia gastos na perfuração, mas devido à falta de um parâmetro que melhor represente os gastos mínimos de energia, será utilizada neste trabalho a resistência à compressão confinada para o cálculo da eficiência.

3.2.1.

Resistência da Rocha definida pela CCS (*Confined Compressive Strength*)

Como não se dispunha de resultados de ensaios de CCS nas amostras, o próximo passo da análise foi a estimativa da resistência à compressão confinada da formação. A sua determinação para os ensaios de laboratório foi feita utilizando-se valores típicos de UCS para sal obtidos na literatura e, a partir destes dados de UCS, foi calculada a resistência à compressão confinada (CCS) através do critério de Mohr-Coulomb, onde a CCS equivale à UCS acrescida a um ganho de resistência determinado pelo confinamento. Desta maneira, foram encontrados valores máximos e mínimos de resistência confinada, obtendo-se uma faixa de variação de valores para cada ensaio, que foi utilizada como referência deste parâmetro. É importante lembrar que para os ensaios de laboratório, o confinamento é definido pela pressão de fundo de poço que é aplicada ao equipamento através de um sistema de aplicação de pressões e medida por sensores.

Jeremic (1994) determinou valores de resistência à compressão não confinada através de ensaios de laboratório para dois tipos de evaporitos: halita e carnalita. A Figura 26 ilustra estes valores.

Através da Figura 26, percebe-se que, para as duas litologias, a resistência atinge um patamar. O tipo de evaporito presente nos ensaios de laboratório e

predominante na litologia dos poços em estudo é a halita. Portanto, o valor de 35 Mpa (que equivale a 5076.57 psi), será utilizado para o cálculo da CCS para esta litologia.

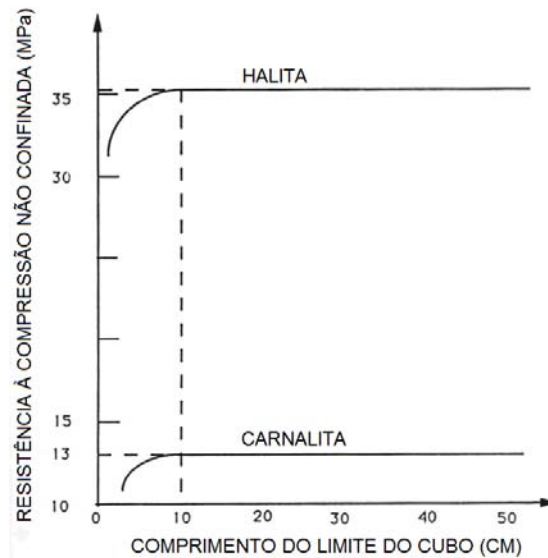


Figura 26 - Valores típicos de UCS para minerais evaporíticos (Jeremic, 1994).

Isbell *et al.* (2001) sugere um valor de resistência não confinada variando entre 3400 e 3900 psi. Estes valores também serão considerados nos cálculos da resistência à compressão confinada.

Conforme dito anteriormente, a CCS foi determinada através de uma relação originada a partir do critério de Mohr-Coulomb e estabelecida por Caicedo *et al.*, (2005), podendo ser visualizada através da Eq. (9). É importante salientar que o parâmetro pressão diferencial (DP) é equivalente à pressão de fluido circulante diminuída da pressão de poros da formação. Esta relação, contudo, não se aplica para perfuração em sal, pois este tipo de rocha não apresenta poros. Portanto, a pressão diferencial não foi utilizada para o cálculo da resistência à compressão confinada e, em seu lugar, aplicamos a pressão de fluido circulante.

$$CCS = UCS + ECMP + 2ECMP \cdot \frac{\sin \phi}{(1 - \sin \phi)} \quad (22)$$

Onde:

$ECMP$ = pressão equivalente de fluido circulante (*equivalent circulating mud pressure*) (psi);

Os valores de ângulo de atrito utilizados para os cálculos foram estimados de acordo com valores típicos obtidos na literatura. Liang *et al.* (2006) realizaram ensaios de compressão uniaxial e triaxial em halita e sugeriram um valor de 31.1° para o ângulo de atrito desta litologia.

Aplicando-se na Eq. (22) as correlações obtidas para UCS, CCS e ângulo de atrito, foi possível estimar uma faixa de valores de resistência à compressão confinada para cada ensaio estudado. Os resultados de dois ensaios são apresentados na Figura 27. Os demais apresentaram curvas com mesmo comportamento e podem ser visualizados no item A.2 do Apêndice deste trabalho.

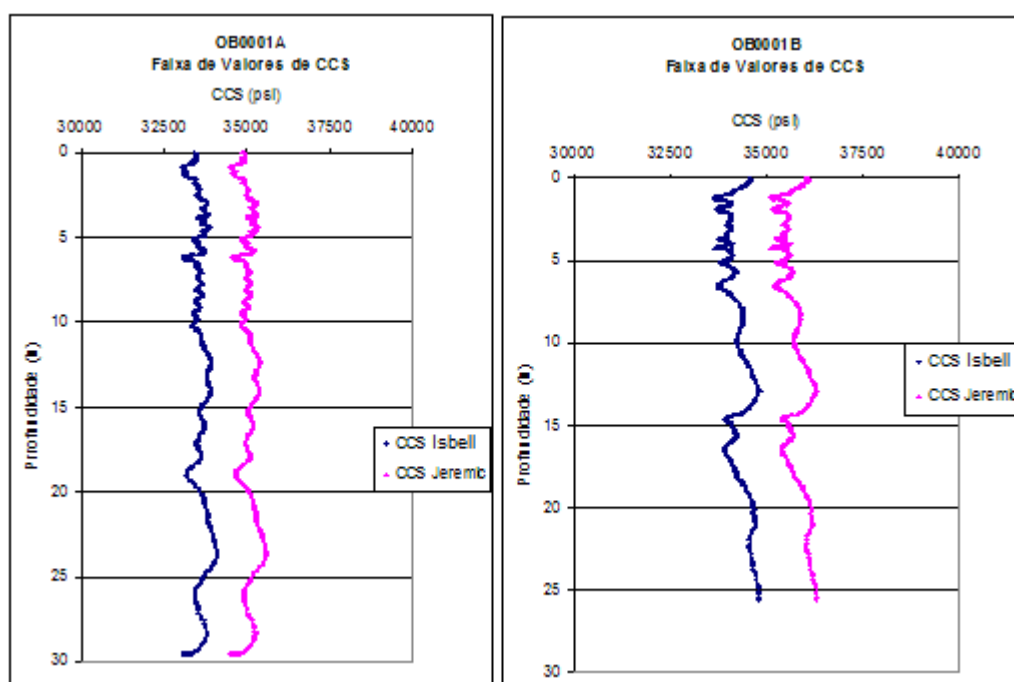


Figura 27 - Faixa de valores de CCS para os ensaios OB0001A e OB0001B.

As variações nas curvas da Figura 27 se devem à pequena variação que ocorre na aplicação da pressão de fundo de poço. Esta pressão é mantida constante (6000 psi), mas o sistema de aplicação de pressões oscila entre 5900 psi e 6100 psi, ocasionando estas mudanças nas curvas da CCS.

3.3.

Aplicação dos Modelos Analíticos de Otimização Baseados na Transferência de Energia Específica

No Capítulo 2 foi feita uma revisão sobre os modelos analíticos de perfuração que utilizam o parâmetro energia específica como ferramenta para otimização da taxa de perfuração. Nesta seção, estes modelos serão aplicados aos ensaios em estudo no intuito de avaliar a sua contribuição na otimização da perfuração e de verificar quais as vantagens e desvantagens oferecidas por cada um. As equações de energia específicas calculadas foram as propostas por Dupriest et al., (2005), Teale (1965) e Armenta (2008).

O modelo de Caicedo et al. (2005), utilizado pela empresa Chevron Texaco, não pôde ser aplicado aos dados experimentais devido à falta de informação sobre valores de eficiência mecânica máxima e coeficiente de atrito para broca PDC com menos de 7 lâminas. Houve a tentativa de aplicar aos dados experimentais os valores de μ e de EFF para brocas PDC com mais de 7 haletas (publicados pela Chevron), porém, observou-se que pequenas variações nestes parâmetros geravam uma grande variação na energia específica. Logo, o correto seria aplicar os dados válidos para o tipo de broca utilizada nos dados experimentais estudados neste trabalho (brocas PDC com menos de 7 haletas).

Os ensaios foram realizados com dois valores de revoluções por minuto. Na primeira parte dos ensaios o valor das rotações foi de 120 RPM e na segunda parte, 180 RPM, à exceção dos ensaios OB0001A e OB0001I que foram perfurados com rotação única de 120 RPM. O peso sobre a broca foi aumentado até um valor de 25000 libras para cada uma das rotações. A análise dos dados foi feita para cada trecho separadamente (120 e 180 RPM) e, dentro destes trechos, considerou-se somente o momento em que o peso sobre a broca foi aumentado.

Estas condições favorecem a análise dos dados, pois tendo RPM constante, podemos estudar qual a influência do aumento de WOB na geração da taxa de penetração, do torque e na geração de energia específica. A Figura 24 e a Figura 25 mostradas anteriormente ilustram os parâmetros medidos nos ensaios. Os ensaios restantes podem ser visualizados no item A.1 do apêndice deste trabalho. A partir da Figura 28 até a Figura 34, observa-se com melhor precisão as curvas de SE versus CCS para as duas partes de cada ensaio.

Para todos os ensaios foi retirada a parte inicial da perfuração (3 polegadas para as brocas DP0269 e DP0391 e 2.63 para a broca DP0123) pois neste trecho a broca ainda não penetrou os dentes laterais e portanto, a energia específica é gerada apenas pelos cortadores da base. Como neste trabalho desejamos estudar a otimização da perfuração, devemos considerar a análise a partir do momento em que a broca perfura com todos os cortadores. A distância para que a broca penetre todos seus dentes laterais foi determinada calculando-se o diâmetro de cada cortador lateral e somando-os, conforme mostra a Figura 35.

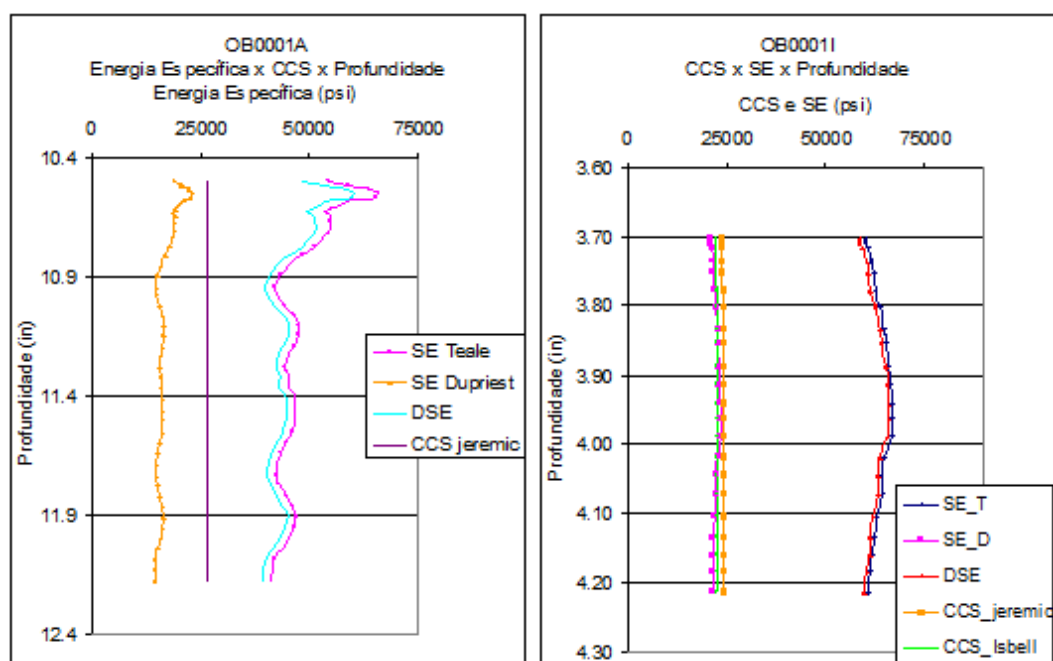


Figura 28 - SE versus CCS – ensaio OB0001A e OB0001I.

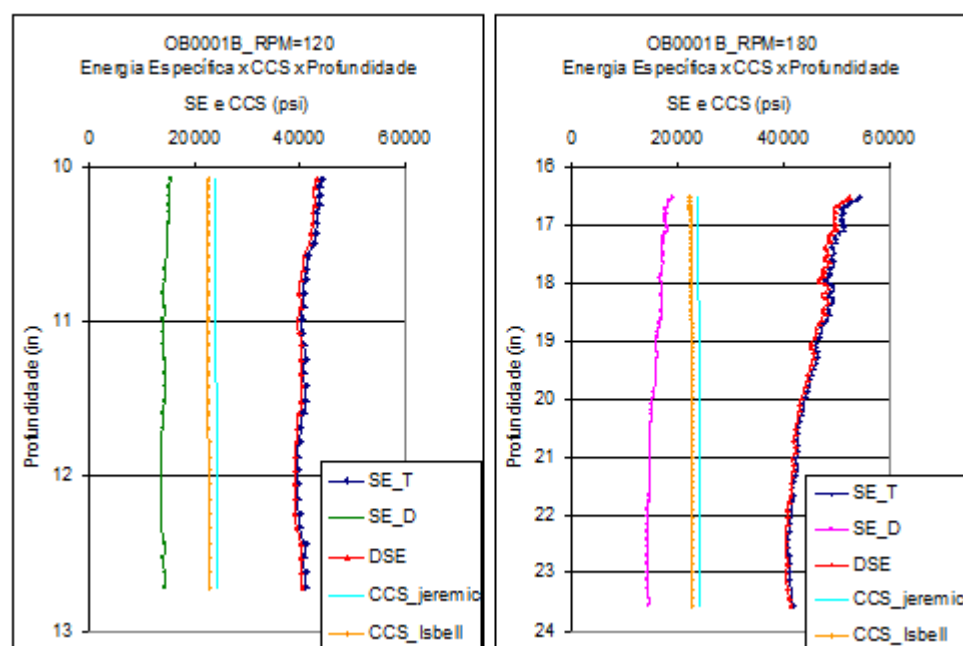


Figura 29 - SE versus CCS – ensaios OB0001B_RPM=120 e OB0001B_RPM=180.

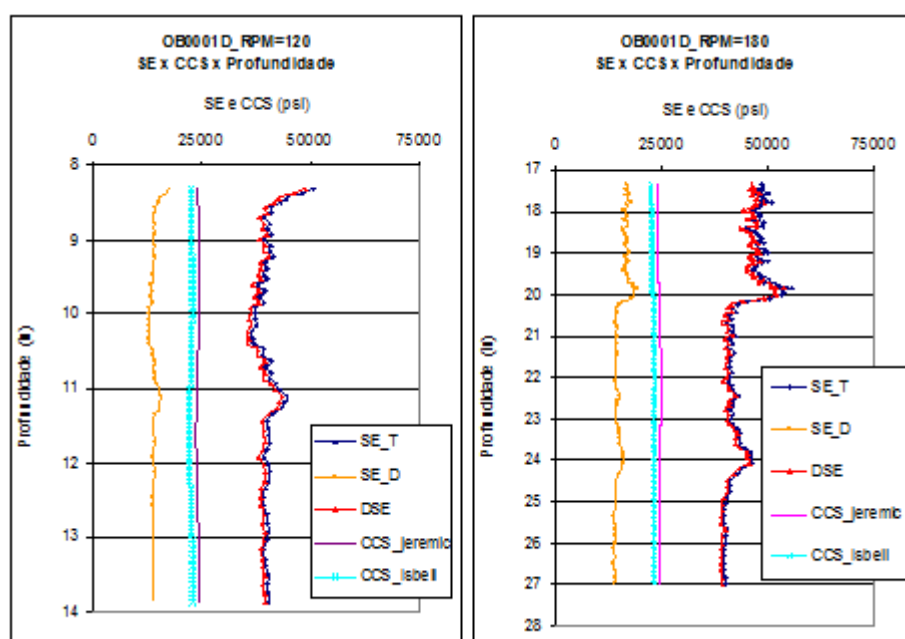


Figura 30 - SE versus CCS – ensaios OB0001D_RPM=120 e OB0001D_RPM=180.

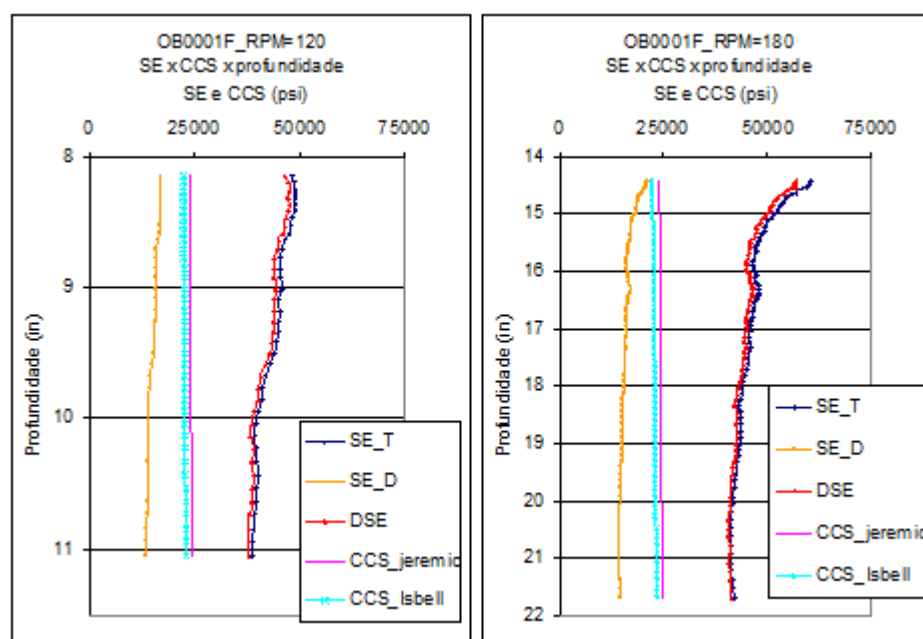


Figura 31 - SE versus CCS – ensaios OB0001F_RPM=120 e OB0001F_RPM=180.

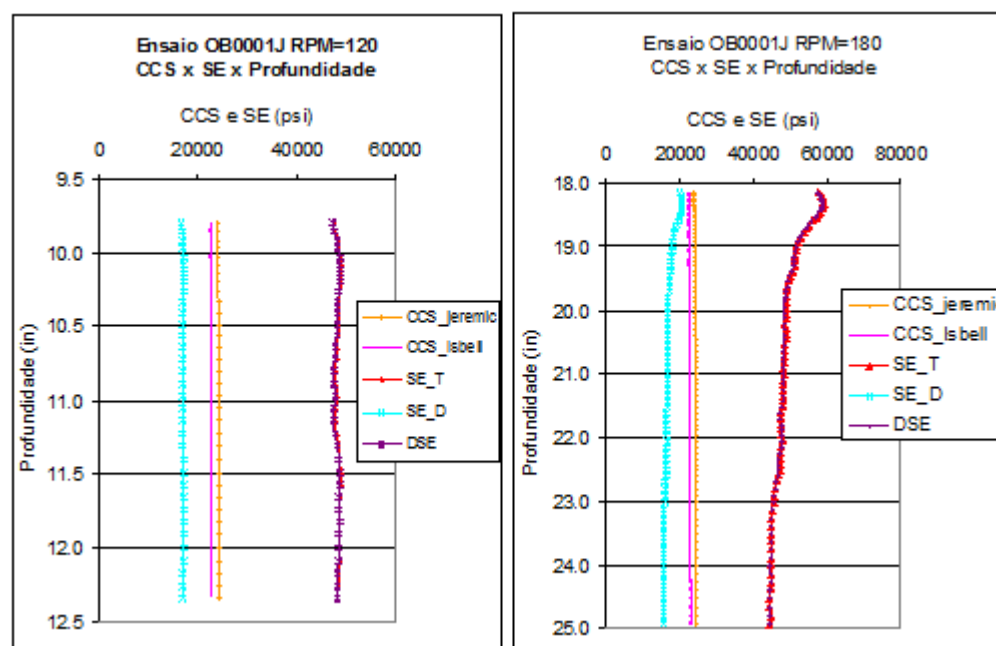


Figura 32 - SE versus CCS – ensaios OB0001J_RPM=120 e OB0001J_RPM=180.

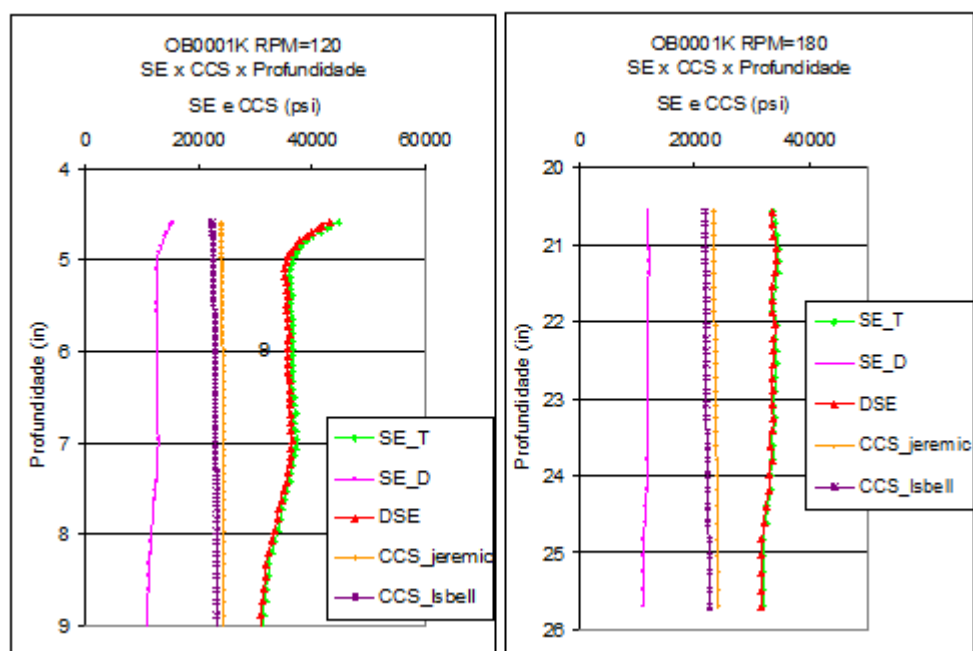


Figura 33 - SE versus CCS – ensaios OB0001K_RPM=120 e OB0001K_RPM=180.

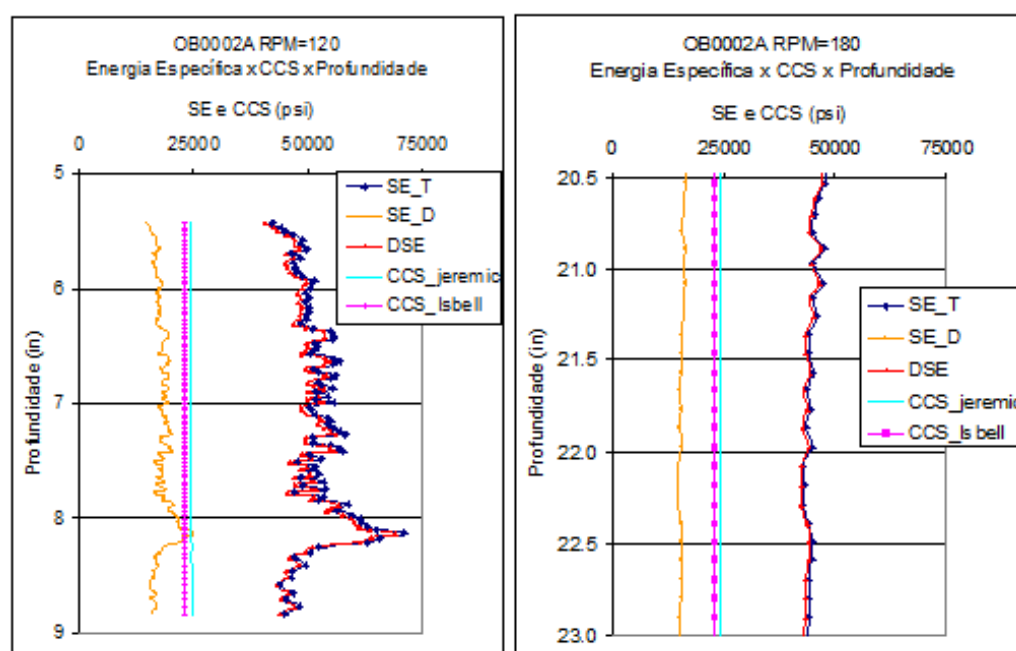


Figura 34 - SE versus CCS – ensaios OB0002A_RPM=120 e OB0002A_RPM=180.

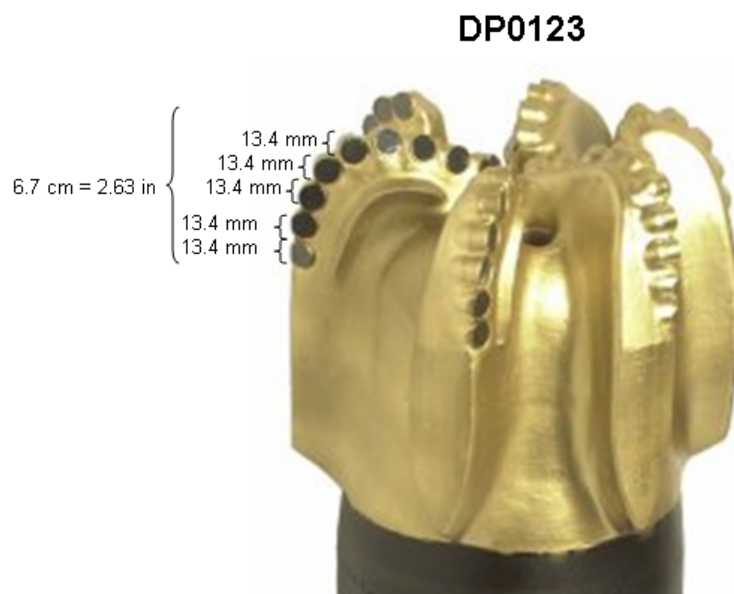


Figura 35 - Cálculo da distância para que a broca penetre todos seus dentes laterais.

Através dos resultados da Figura 28 até a Figura 34, percebe-se que a energia específica de Teale (1965) e de Armenta (2008) apresentam valores consideravelmente maiores do que os de resistência confinada. Isto indica que a CCS não representa o gasto mínimo de energia em uma perfuração. Como estes ensaios representam as condições ideais de perfuração, onde não ocorrem perdas de energia por atrito ou vibrações, e onde os parâmetros são medidos próximos da broca, a confiabilidade nos resultados aumenta consideravelmente.

A diferença existente entre os valores de CCS e os valores de energia específica (SE_T e DSE) poderia ocorrer devido a um erro na estimativa da resistência à compressão não confinada. Porém, aumentado este parâmetro para valores bastante elevados (que inclusive são incoerentes com valores de UCS de sal, que é uma rocha que não apresenta elevada resistência), as duas curvas continuam com diferença significativa. Outra possível causa para justificar esta diferença seria erro na estimativa do ângulo de atrito da rocha. Por este motivo foi feito um teste onde este parâmetro foi elevado para 43° e a curva da CCS ainda continuou com valores significativamente menores que os da energia específica.

Portanto, pode-se concluir que, mesmo que haja erros inseridos nas estimativas dos parâmetros UCS e ângulo de atrito, a resistência à compressão confinada não se aproxima dos valores de SE, e não se equivale ao gasto de energia mínimo em uma perfuração submetida a confinamento. Fica evidente a

necessidade de um estudo mais aprofundado a respeito do processo de corte de rocha em perfurações submetidas a pressões confinantes.

Um comportamento comum a todos os ensaios está na pequena diferença existente entre os valores da energia específica calculada pela equação de Teale (1965) e os valores da energia específica de perfuração de Armenta (2008). A diferença entre elas é da ordem de 500 psi. Cabe salientar que o valor de HSI foi calculado utilizando-se o índice de potência hidráulica apresentado na Eq. (21) do Capítulo 2 e a queda de pressão através da broca (ΔP) foi obtida diminuindo-se a pressão aplicada da pressão de fundo de poço. O valor calculado de HSI resultou em 2.5 hp/in², sendo que este nível de energia hidráulica, segundo Park (1982) *apud* Holster e Kipp (1984) fornece boa limpeza e resfriamento das brocas PDC.

Através da pequena diferença entre as curvas de energia específica de Teale (1965) e de Armenta (2008), pode-se entender que a contribuição da hidráulica de limpeza e remoção de cascalhos não influenciou significativamente na redução da energia específica aplicada, indicando que a energia específica gerada pelo trabalho da broca tem influência determinante. Uma das possíveis explicações para isso seria a aplicabilidade da equação de Armenta (2008) apenas para algumas condições específicas. Isto pode ser mais bem entendido comparando-se os resultados da Figura 28 até a Figura 34 com aqueles obtidos por Armenta (2008), apresentados na Figura 19. Em seus gráficos percebe-se que a taxa de penetração obtida foi em torno de 3 vezes menor do que a dos ensaios de laboratório aqui estudados. Outras condições de contorno são diferentes: a faixa de valores de WOB das perfurações analisadas pelo autor (30000 lb a 50000 lb) e o tipo de rocha (folhelho). No folhelho é muito comum acontecer um problema de perfuração conhecido como encerramento. O bom desempenho da hidráulica é fundamental para minimizar este problema, auxiliando a retirada do material colado aos dentes da broca. Este pode ser um dos motivos pelos quais Armenta (2008) encontrou um termo hidráulico com magnitude significativa. Já para perfurações em evaporitos a grandes profundidades e elevadas pressões de fundo de poço, a equação de Armenta não afetou a energia específica.

As curvas originadas pela aplicação do modelo de Dupriest et al., (2005) apresentam valores mais baixos do que a resistência à compressão confinada. Fisicamente, isto significa que a energia específica aplicada ao sistema não vence a resistência para quebrar a rocha. Porém essa conclusão não é coerente já que a

perfuração ocorre ao longo do ensaio. Portanto, conclui-se que o modelo de Dupriest et al., (2005) não é aplicável aos ensaios de laboratório porque a relação de 35% entre CCS e energia específica não representa o pico de performance dos ensaios. A eficiência deste conjunto de perfurações em grande escala é maior do que o valor sugerido por Dupriest, indicando que as perfurações em campo podem atingir eficiências maiores. A comparação entre as análises dos ensaios de laboratório e dos poços será discutida no Capítulo 5.

Há uma tendência geral de queda da energia específica ao final de cada trecho. Este valor é em torno de 40000 psi para a broca DP0123 (ensaos A, B, F, I e J), 40000 psi e 50000 psi para a broca DO0269 (ensaos D e 2A respectivamente) e de 31000 psi para a broca DP0391. É possível compreender este comportamento observando a equação de Teale (1965) (Eq. (6)), onde vemos que WOB é diretamente proporcional à energia específica. A taxa de penetração apresentada é inversamente proporcional a esta mesma grandeza. Um aumento do peso sobre a broca deveria ocasionar um aumento na SE e não é o que acontece nos ensaios de laboratório. Isto porque o aumento de WOB gera um aumento considerável da taxa de penetração, fazendo com que diminua a SE. Percebe-se aqui a importância do parâmetro taxa de penetração na variação da energia específica, o que já era esperado, pois quando a perfuração é otimizada, a energia específica tende a se aproximar de seu valor mínimo. Isto indica que grande parte da energia está sendo efetivamente aplicada na quebra da rocha.

A Tabela 4 apresenta os valores médios de energia específica para os ensaios. Nela, podemos visualizar a parcela de energia específica axial e a parcela torcional, cuja soma resulta na energia específica média total.

Observando-se os valores da Tabela 4 se percebe que o primeiro termo da equação de Teale, (1965) (SE axial) tem magnitude muito pequena quando comparado com o segundo termo. Isto significa que o trabalho executado por WOB atuando através da distância percorrida é sempre pequeno quando comparado ao trabalho executado pelo torque atuando através da rotação da broca.

Esta constatação gera a questão de qual seria o papel de WOB no processo de geração de energia e da conseqüente eficiência da perfuração. A resposta é que o peso sobre a broca influencia diretamente o torque. Isto pode ser mais bem compreendido analisando a Eq. (17) proposta por Pessier e Fear (1992). Esta equação relaciona WOB ao torque utilizando-se o conceito de força de atrito,

considerando a broca com fundo circular achatado e integrando-se o torque ao longo do raio e ao longo do ângulo de giro. Inserindo-se esta equação no modelo de Teale (1965) conforme mostra a Eq. (18), torna-se visível a contribuição de WOB na parcela torcional da energia específica. Esta equação será descrita novamente através da Eq. (23) com o objetivo de facilitar o entendimento desta questão.

Tabela 4 - Energias específicas médias para os ensaios.

Ensaio	Valores médios		
	SE axial (psi)	SE torcional (psi)	SE Total (psi)
OB0001 A_RPM=120	152.17	49362.07	49514.25
OB0001 B_RPM=120	347.78	40937.60	41285.39
OB0001 B_RPM=180	233.05	46188.04	46421.09
OB0001 D_RPM=120	278.05	40179.33	40457.38
OB0001 D_RPM=180	219.64	44972.11	45191.75
OB0001 F_RPM=120	416.26	43461.96	43878.22
OB0001 F_RPM=180	324.16	46947.57	47271.72
OB0001 I_RPM=120	132.57	63573.56	63706.13
OB0001 J_RPM=120	442.49	48132.40	48574.89
OB0001 J_RPM=180	382.68	49131.43	49514.11
OB0001K_RPM=120	269.09	36161.10	36430.20
OB0001K_RPM=180	194.23	33273.38	33467.61
OB0002A_RPM=120	134.96	61474.15	61609.11
OB0002A_RPM=180	269.89	43792.12	44062.01

$$SE = WOB \cdot \left[\frac{1}{A_B} + \frac{120\mu N}{D_B \cdot ROP} \right] \quad (23)$$

Onde:

μ = coeficiente de atrito ao deslizamento da broca (adimensional)

WOB = peso sobre broca (libras)

ROP = taxa de penetração (pés / hr)

A_B = área da seção transversal da broca (polegadas ao quadrado)

N = revoluções por minuto

D_B = diâmetro da broca

Olhando para o segundo termo da equação da energia específica fica claro que os parâmetros de controle WOB e RPM e o parâmetro coeficiente de atrito ao deslizamento devem ter uma combinação ótima que melhore o desempenho da perfuração. É com o objetivo de obter esta relação ótima que será estudado mais adiante o comportamento do coeficiente de atrito ao deslizamento da broca.

Conhecendo-se os valores de energia específica de Teale (1965) e a resistência à compressão confinada, é possível obter a eficiência para cada trecho dos ensaios de laboratório. A Tabela 5 apresenta os valores médios de eficiência mecânica máxima para os ensaios de laboratório em grande escala.

Através dos resultados da Tabela 5, observa-se que as eficiências dos ensaios são iguais ou maiores que 50 % para os ensaios, exceto para o ensaio OB0001I, que apresentou eficiência mecânica mais baixa (38 %). Estes resultados indicam que a eficiência de uma perfuração pode ser superior a 35%, o que contraria a idéia de que a broca perfuraria no seu pico de performance com este último valor de eficiência (Dupriest *et al.*, 2005). Estudando-se valores de EFF de outros trabalhos (Pessier e Fear, 1992; Caicedo *et al.*, 2005) feitos em perfurações em campo, sabe-se que eles são da ordem de 20 a 35%. Através dos resultados do presente trabalho, percebe-se que há possibilidade de atingir valores mais elevados de eficiência.

Portanto, deve-se tentar compreender quais as causas dos altos valores de energia específica obtidos em campo e minimizá-las, otimizando a perfuração. Não se pode esquecer que, em campo, ocorrem perdas de energia específica por diversos motivos (atrito, temperatura, erro de projeto, broca desgastada, encerramento da broca, vibração), e que, mesmo minimizando essas perdas e os possíveis problemas que ocorrem ao longo de uma perfuração, é difícil atingir valores de eficiência da mesma magnitude que os obtidos em ensaios de laboratório. No próximo Capítulo, serão feitas considerações a respeito da comparação entre as EFFs obtidas nos ensaios e aquelas obtidas nos poços perfurados.

Tabela 5 - Valores médios de EFF_{máx} para os ensaios de laboratório em grande escala.

Ensaios Laboratório	Média das EFF _{máx}
OB0001A Trecho RPM=120	0.49
OB0001B Trecho RPM=120	0.59
OB0001B Trecho RPM=180	0.52
OB0001D RPM=120	0.6
OB0001D RPM=180	0.55
OB0001F RPM=120	0.36
OB0001F RPM=180	0.52
OB0001I RPM = 120	0.38
OB0001J RPM=120	0.5
OB0001J RPM=180	0.5
OB0001K RPM=120	0.67
OB0001K RPM=180	0.71
OB0002A RPM=120	0.47
OB0002A RPM=180	0.56

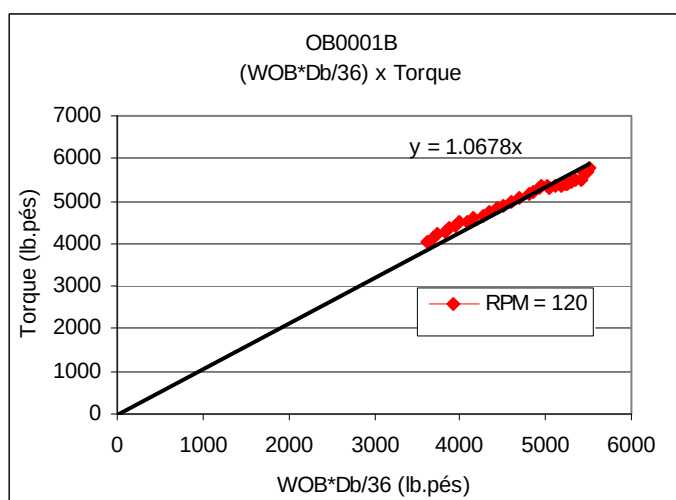
- **Coefficiente de atrito ao deslizamento da broca (μ)**

Adiante será estudado o comportamento do parâmetro coeficiente de atrito ao deslizamento da broca obtido a partir dos ensaios de laboratório em grande escala. Conforme dito anteriormente e mostrado na Eq. (17), μ é obtido a partir de uma relação entre o peso aplicado à coluna e o torque gerado através do trabalho torcional. É importante compreender que o conceito deste coeficiente de atrito ao deslizamento da broca difere daquele coeficiente de atrito dinâmico dos materiais. O primeiro relaciona o atrito entre dois materiais diferentes: a broca e a rocha. E neste coeficiente estão inseridos a coesão e atrito do material (que compõem a resistência), estão inseridas características da broca (como a influência da inclinação dos cortadores) e ainda há a dependência de μ à profundidade de corte (quanto maior a profundidade de corte, maior o torque gerado e maior o WOB aplicado).

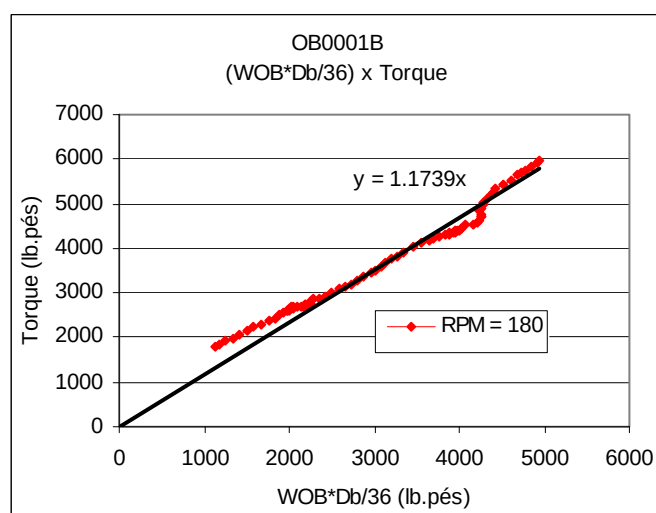
Os gráficos da Figura 36 apresentam a relação entre WOB.Db/36 e torque obtida para o ensaio OB0001B, onde o coeficiente de atrito ao deslizamento da broca equivale à inclinação da reta de ajuste passando pelos pontos obtidos no ensaio e pela origem. É importante impor que esta reta de ajuste passe pela origem porque, fisicamente, quando WOB for nulo (não houver aplicação de peso), não existe torque. Portanto, foi assumido que os pontos se ajustam a esse critério.

No eixo das abscissas, o peso sobre a broca aparece multiplicado pelo diâmetro da broca, transformando a unidade deste termo equivalente à unidade de torque (pés.libra). Este mesmo gráfico é apresentado para o restante dos ensaios e pode ser visto na seção A.6 do apêndice.

Dos gráficos apresentados na Figura 36, conclui-se que, para os trechos analisados, a relação entre torque e peso sobre a broca é linear. A inclinação da reta equivale ao coeficiente de atrito ao deslizamento da broca que vale 1.06 para o trecho com rotação de 120 RPM e 1.1 para o trecho com 180 RPM. Um aumento da inclinação significa que houve um aumento de μ . A Figura 37 apresenta uma comparação entre as retas obtidas através da relação entre WOB e torque para as diferentes rotações (120 e 180 RPM) para o ensaio OB0001D. Os outros gráficos estão anexados na seção A.8 do apêndice.



(a)



(b)

Figura 36 - Avaliação do comportamento de μ para o ensaio OB0001B: (a) RPM=120 e (b) RPM=180.

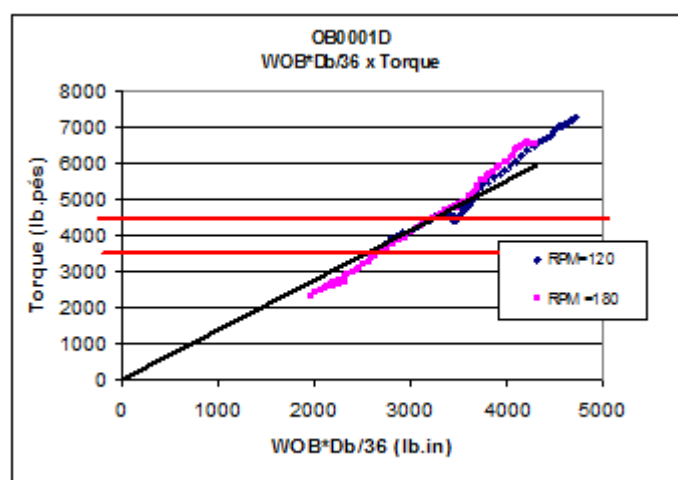


Figura 37 - Comparação entre μ para rotações de 120 e 180 RPM do ensaio OB0001D.

Através da Figura 37 e observando as Figuras da seção A.8 do Apêndice, percebe-se que a inclinação da reta não muda quando o número de revoluções varia. Isto indica que não há aumento de torque quando a rotação muda de 120 para 180 RPM. O torque não aumenta porque a profundidade de corte (DOC) não se altera com o aumento de RPM (Figura 38) e porque a distância dos dentes da broca ao eixo é a mesma (o conceito de torque equivale a uma força multiplicada por um deslocamento. No caso, a força seria aquela aplicada pelo WOB em cada cortador e o deslocamento seria a distância do dente ao centro da broca.).

Através da Figura 36, da Figura 37 e da Figura 38, conclui-se que o coeficiente de atrito ao deslizamento da broca é um parâmetro que não depende da rotação aplicada. Esta relação se estabelece quando a broca está afiada. Do contrário deve-se reavaliar a relação. Na Figura 36, percebe-se uma diferença de 10% na inclinação das curvas. Essa variação é pequena e provavelmente ocorre devido ao aumento da vibração que acontece quando se aumenta o número de revoluções.

É importante considerar a existência de um limite no sistema de perfuração que impede de se utilizar todo o potencial da broca. Geralmente para brocas de 8 1/2" o limite de torque que a broca suporta varia entre 3500 e 4500 lb.pés (Isbell *et al.*, 2001). Na Figura 37, este limite é estabelecido pelas duas linhas horizontais vermelhas. Quando é aplicado um peso sobre a broca que requer maiores valores de torque, o sistema se torna instável e ocorre problema de torção na coluna (*stick-slip*). Portanto, o torque não deve superar este limite para que a operação esteja otimizada.

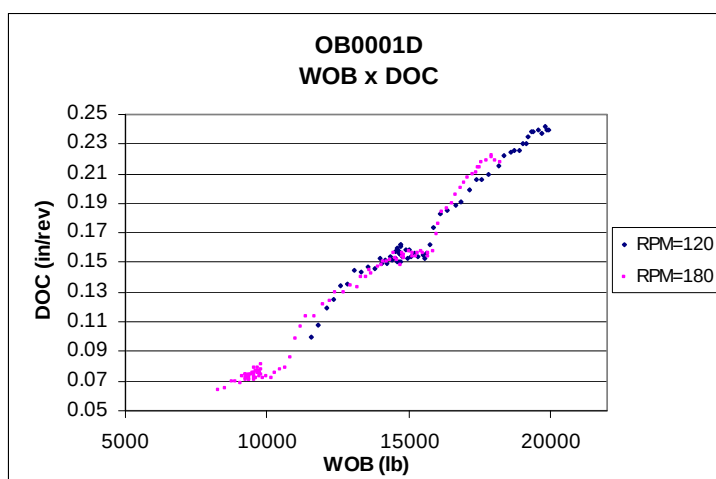


Figura 38 - Profundidade de corte *versus* WOB para o ensaio OB0001D.

É interessante observar o que acontece com a taxa de penetração quando a velocidade de rotação é aumentada. A Figura 39 ilustra essa relação para os trechos do ensaio OB0001D.

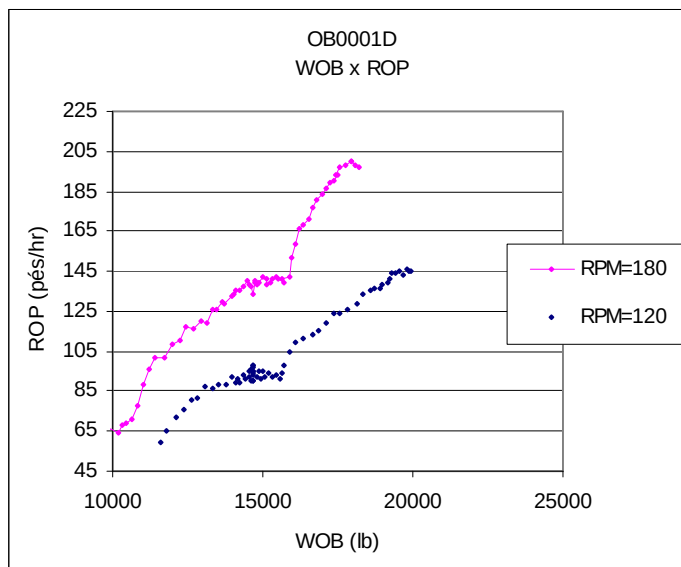


Figura 39 - ROP versus WOB para o ensaio OB0001D.

A partir da Figura 39, é possível concluir que um aumento de 50% na velocidade de rotação resultou em um aumento em torno de 32 % na taxa de penetração. Portanto, percebe-se que o desempenho da perfuração melhora quando se utiliza maior velocidade de rotação. Para que se possa concluir que valores mais elevados de RPM levam a uma otimização da perfuração, é importante analisarmos também o comportamento da energia específica para essa situação, que será discutido mais adiante.

Lembrando dos ensaios de *Drilloff* utilizados por Dupriest *et al.* (2005), sabemos que os autores consideram o trecho linear da curva ROP x WOB como sendo aquele em que a broca perfura no pico de performance, até que se atinja um ponto conhecido como *founder*, onde a relação deixa de ser linear em função de algum problema na perfuração. Estender a porção linear da curva dos ensaios de *drilloff* é o objetivo de qualquer esquema de otimização de perfuração. Nos gráficos acima, segundo o critério de Dupriest *et al.*, (2005), pode-se considerar que a perfuração está otimizada no trecho linear, até atingir o ponto *founder*, momento em que se perde a linearidade.

A relação entre a energia específica e a taxa de penetração é apresentada na Figura 40.

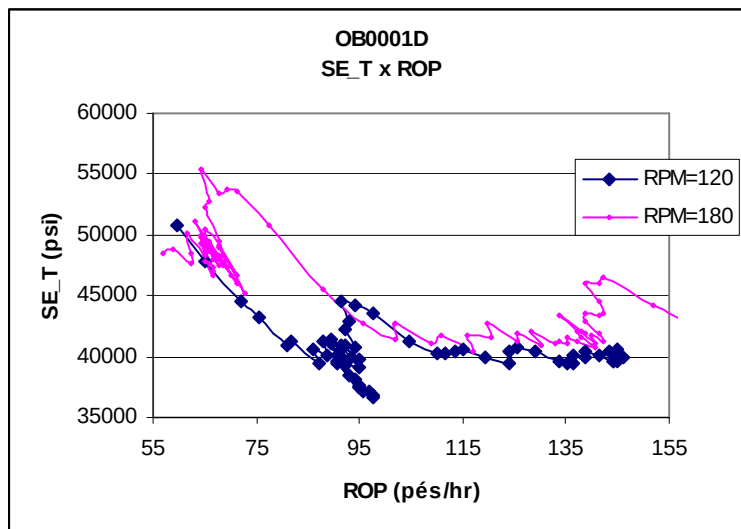


Figura 40 - SE_T versus ROP para o ensaio OB0001B.

A Figura 40, juntamente com os gráficos da seção A.9 do apêndice, mostra que a energia específica é praticamente a mesma quando a velocidade de rotação é aumentada para 180 RPM. No ensaio OB0001B, percebe-se que a energia específica aparece um pouco mais elevada para rotações de 180 RPM. O mesmo acontece no trecho inicial dos ensaios OB0001D e OB0001J. Também é possível determinar que a energia específica mínima para esta formação utilizando-se as brocas DP0123 e DP0269 fica em torno de 40000 psi e é atingida quando a taxa de penetração atinge valores em torno de 110 pés/hr. Utilizando-se a broca DP0391, utilizada no ensaio OB0001K, observa-se que a energia específica mínima não foi atingida, sendo que a menor energia do ensaio foi 31000 psi.

O aumento do número de revoluções é limitado pelo tipo de broca utilizado e o valor máximo deste parâmetro pode ser obtido no catálogo de brocas *World Oil's Drill Bit Classifier*. O acréscimo de RPM pode gerar um maior desgaste da broca porque a sua temperatura aumenta e porque ela realiza um trabalho maior para um mesmo tempo de perfuração. Isto também deve ser levado em consideração quando se deseja melhorar o desempenho da perfuração. Este desgaste é percebido quando acontece um aumento do coeficiente de atrito ao deslizamento da broca juntamente com a queda da taxa de penetração. Para o ensaio OB0001D não se observa variação deste coeficiente, indicando que a broca continua afiada.

Portanto, após verificar que o aumento da taxa de penetração para rotação de 180 ocorre sem aumento de torque, com pouco aumento de energia específica e com coeficiente de atrito ao deslizamento da broca constante, pode-se concluir que, para este ensaio, o aumento das revoluções otimiza a perfuração. Os valores ótimos de WOB podem ser extraídos do trecho linear da Figura 37, não esquecendo de observar o limite superior de torque acima do qual o sistema se torna instável.

Logo, para que se possa melhorar o desempenho de uma perfuração, deve-se obter uma combinação ótima entre os parâmetros de controle (WOB e RPM), o coeficiente de atrito ao deslizamento da broca (que relaciona o tipo de broca utilizada, a qualidade desta broca e a resistência da formação) e a energia específica, somados a um bom desempenho da hidráulica de limpeza de poço e observação de possíveis problemas de perfuração.

O monitoramento de problemas de perfuração em tempo real pode ser feito observando-se como variam os parâmetros taxa de penetração, energia específica, e coeficiente de atrito ao deslizamento da broca. É importante também fazer monitoramento de vibrações.

Neste contexto, o aumento do coeficiente de atrito ao deslizamento pode significar três coisas: que a resistência da rocha diminuiu (Pessier e Fear, 1992), que a broca desgastou ou que houve aumento do torque gerado por algum outro problema (atrito, vibração, entre outros). Se for observada uma queda na taxa de penetração juntamente com este aumento de μ , fica caracterizado o desgaste da broca.

Com o objetivo de estabelecer a maneira como a variação da resistência influencia o coeficiente de atrito ao deslizamento da broca, foi analisado um ensaio de laboratório feito em uma amostra de anidrita (semelhante aos outros ensaios aqui estudados), perfurada com o mesmo tipo de broca dos ensaios A, B, F, I e J, e foi feita uma comparação deste ensaio com o OB0001B. A Figura 41 apresenta esta comparação. A Figura que ilustra o comportamento dos parâmetros de perfuração deste ensaio pode ser visualizada na seção A.1 do Apêndice.

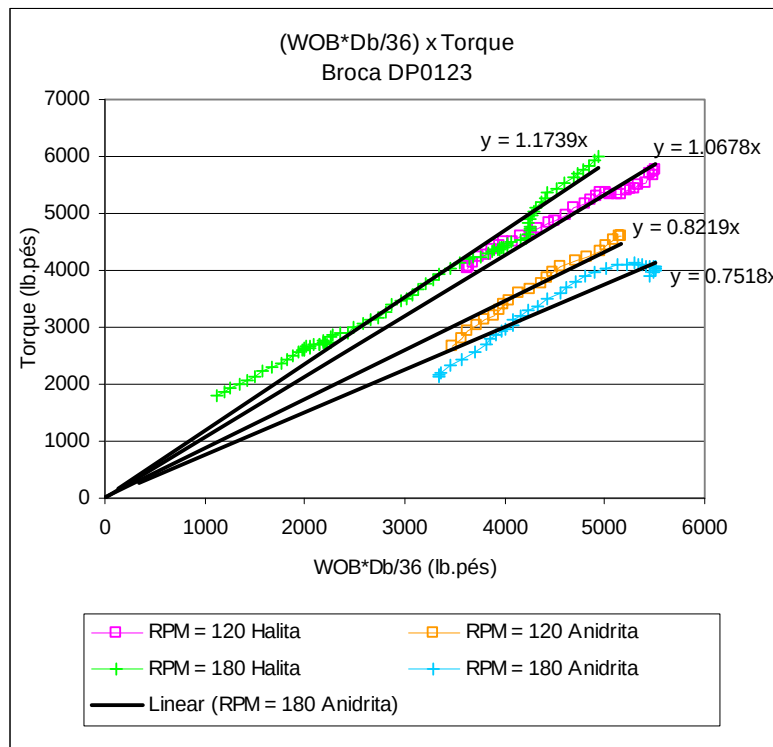


Figura 41 - Influência da resistência da formação na variação de μ : (a) RPM=120 e (b) RPM=180

Através da Figura 41, é possível perceber que, para ambas as velocidades de rotação, a inclinação da anidrita é menor do que para a halita. Isto indica que a anidrita é uma rocha mais resistente e este resultado é concordante com os obtidos por Pessier e Fear (1992). A inclinação é menor para a anidrita porque, para um mesmo peso aplicado em ambas formações, a profundidade de corte será menor na anidrita, já que os dentes da broca penetrarão menos nesta rocha por ela ser mais resistente. Com uma profundidade de corte menor, o torque gerado consequentemente será menor, fazendo com que a inclinação da relação T x WOB.Db/36 seja menor.

A diferença entre as inclinações da halita e anidrita para rotações de 120 RPM é de 22,6% e para 180 RPM é de 32%. Essa porcentagem quantifica a influência da resistência do material no coeficiente de atrito ao deslizamento da broca. Conforme visto anteriormente, a relação torque *versus* WOB independe da velocidade de rotação aplicada. Então, a diferença entre as inclinações obtidas para halita (10%) e aquelas obtidas para anidrita (4%) provavelmente ocorra devido ao aumento da vibração que acontece quando o número de revoluções é aumentado.

A Figura 42 ilustra o comportamento da taxa de penetração *versus* peso sobre a broca para as duas formações.

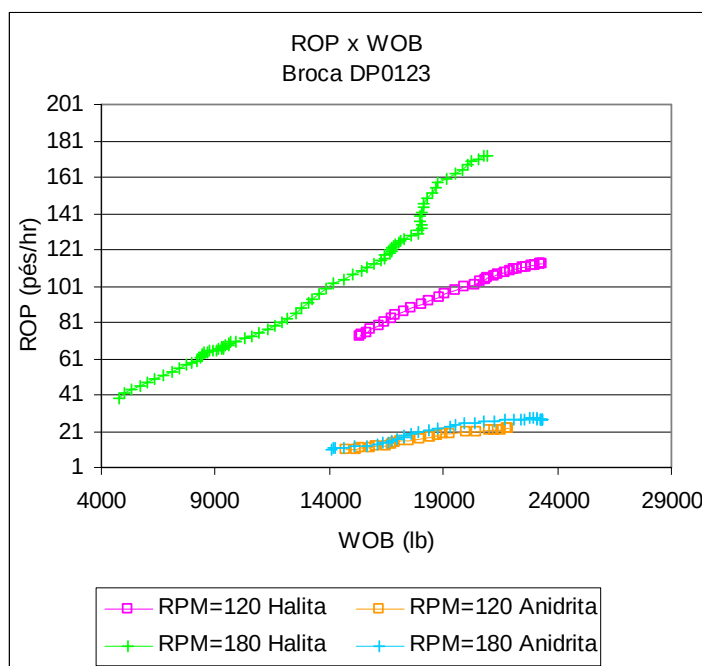
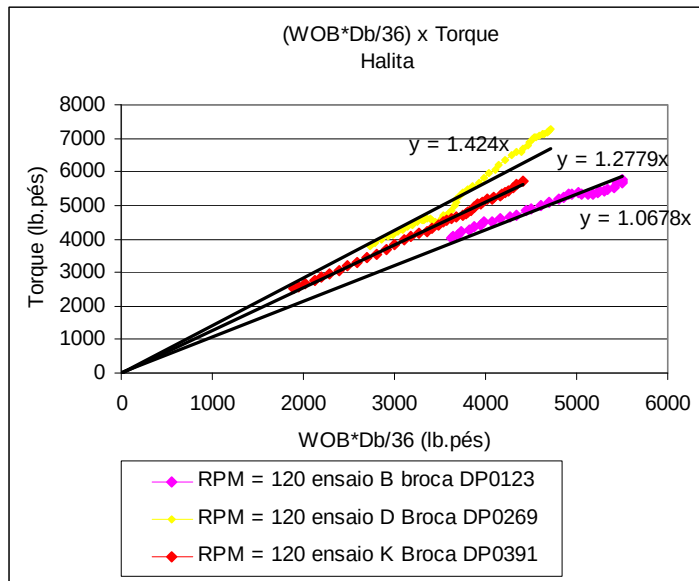


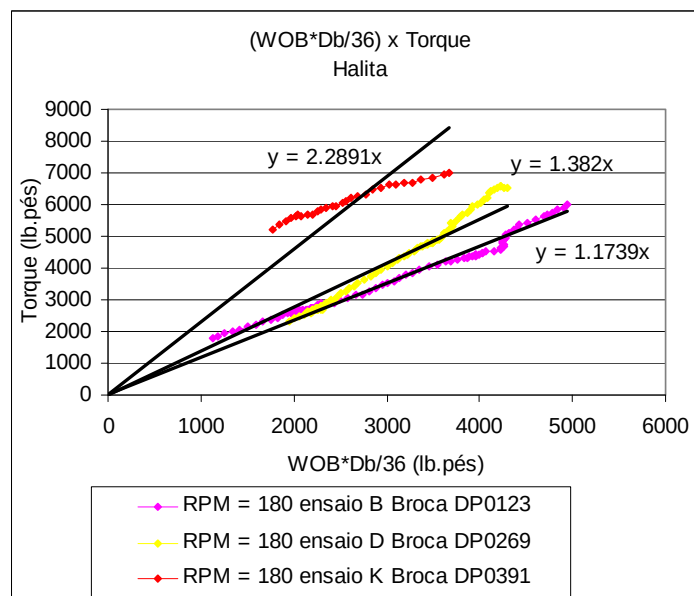
Figura 42 - ROP versus WOB para halita e anidrita em diferentes RPMs: (a) RPM=120 e (b) RPM=180

Através da Figura 42, percebe-se que a broca DP0123 foi mais eficiente perfurando a formação halita, comportamento este já esperado, pois a halita tem resistência menor do que a anidrita. Outra observação deste gráfico é que as taxas de penetração são maiores para a velocidade de rotação de 180 RPM para a halita, indicando que o aumento da velocidade de rotação aumenta a eficiência da perfuração. Na litologia anidrita percebe-se que a taxa de penetração é a mesma para ambas as rotações. Talvez isto ocorra devido à sua resistência ser mais elevada, aumentando a dificuldade de perfuração.

Acima foi quantificada a influência da resistência na variação do coeficiente de atrito ao deslizamento da broca. Agora será feita uma comparação entre três ensaios realizados em halita com diferentes tipos de broca com o objetivo de quantificar a influência da broca na variação do coeficiente de atrito ao deslizamento. A Figura 43 apresenta esta comparação.



(a)



(b)

Figura 43 - Influência da broca na variação de μ : (a) RPM=120 e (b) RPM=180

Através da Figura 43, é possível perceber que, para ambas as velocidades de rotação, a inclinação da broca DP0123 (ensaio B) é a menor e equivale a 1.0 para rotação de 120 RPM e 1.17 para rotação de 180 RPM. Já vimos anteriormente que, quanto menor a inclinação, menor o desgaste da broca, portanto, conclui-se que esta é a broca que está em melhores condições. A inclinação da Broca

DP0391 para RPM=180 perde a tendência de linearidade e o valor da inclinação deixa de ser representativo para o trecho.

A Tabela 6 mostra a diferença percentual entre as inclinações da Figura 43 para os diferentes tipos de broca que representa a influência da broca na variação do coeficiente de atrito ao deslizamento da broca.

Tabela 6 - Diferença percentual entre os coeficientes de atrito ao deslizamento para as diferentes brocas.

Broca	Diferença Percentual	
	RPM=120	RPM=180
DP0123 - DP0269	25%	15%
DP0123 - DP0391	16%	x
DP0269 - DP0391	10%	x

A Figura 44 apresenta o comportamento da taxa de penetração versus peso sobre a broca para os mesmos ensaios da Figura 43.

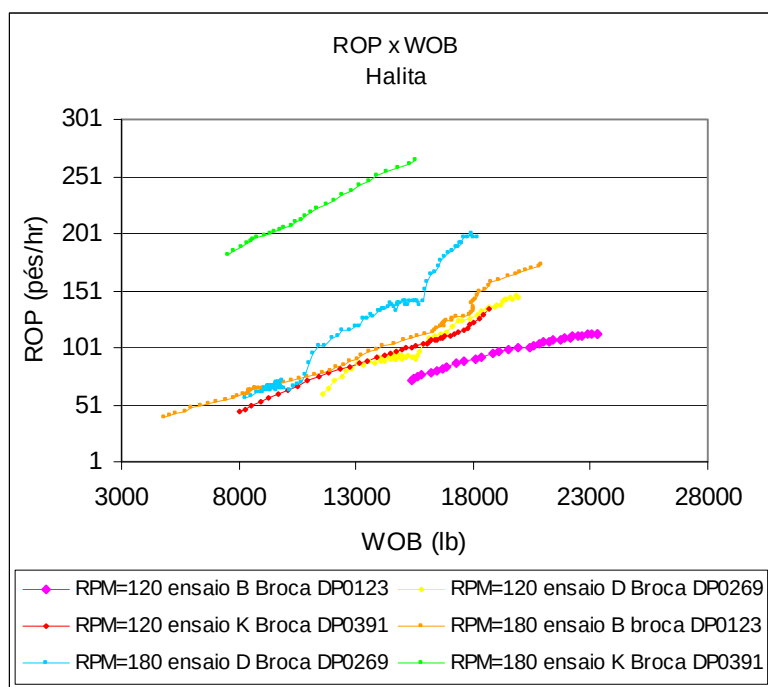


Figura 44 - Comportamento da ROP para os diferentes tipos de broca: (a) RPM=120 e (b) RPM=180

Através da Figura 44, percebe-se que, para rotação de 120 RPM, a broca DP0123 necessitou de um peso mais elevado para atingir as mesmas penetrações que as brocas DP0269 e DP0391. Isto provavelmente acontece porque a broca

DO0123 é a que tem menor tamanho de cortadores e em maior quantidade. Para velocidade de rotação de 180 RPM, a Broca DP0391 foi a de melhor desempenho, porém, é a que possui a menor quantidade de cortadores e, para uma rotação mais elevada, a tendência é que ela desgaste com mais rapidez.

Esta tendência se evidencia na Figura 43, pois a curva da broca DP0391 parece ter uma inclinação menor que as outras e segue uma tendência não linear (não se considera a aproximação da reta de ajuste porque não há tendência de linearidade). Outra conclusão importante é que quanto menor o número de cortadores e maior a velocidade de rotação, maior a taxa de penetração gerada, lembrando que as chances de desgaste da broca aumentam nessas condições.

A Tabela 7 apresenta um resumo das inclinações obtidas da curva T x (WOB.Db/36), que equivalem ao coeficiente de atrito ao deslizamento da broca para os ensaios.

Tabela 7 - Valores médios de μ para os ensaios em grande escala.

Ensaio	μ (inclinação)
OB0001A RPM=120	0.96
OB0001B trecho RPM=120	1.06
OB0001B trecho RPM=180	1.17
OB0001D trecho RPM=120	1.42
OB0001D trecho RPM=180	1.38
OB0001F trecho RPM=120	0.9
OB0001F trecho RPM=180	1.0
OB0001I RPM=120	0.57
OB0001J trecho RPM=120	0.93
OB0001J trecho RPM=180	0.82
OB0001K trecho RPM=120	1.27
OB0001K trecho RPM=180	2.28
OB0002A trecho RPM=120	1.17
OB0002A trecho RPM=180	1.3

Os coeficientes de atrito ao deslizamento da broca calculados para os dois trechos do ensaio OB0001K apresentam valores diferentes. No segundo trecho, μ subiu para 2.4 porque ocorreu uma queda do peso sobre a broca, resultando em uma queda da taxa de penetração. Pessier e Fear (1992) obtiveram valores de μ variando entre 0.8 a 1.3 em seus ensaios de laboratório em grande escala utilizando brocas PDC. Portanto, percebe-se que existe uma equivalência entre os coeficientes de atrito ao deslizamento da broca obtidos no presente trabalho e aqueles encontrados pelos autores acima mencionados.

- **Influência do peso de fluido na energia específica e na taxa de penetração**

Os ensaios OB0001D e OB0002A foram realizados utilizando o mesmo tipo de broca (DP0269) e diferentes pesos de fluido de perfuração base-óleo. A Figura 45 e a Figura 46 apresentam os valores da taxa de penetração e as energias específicas obtidas para uma mesma velocidade de rotação e variando apenas o peso de fluido de 13.6 ppg para 16 ppg.

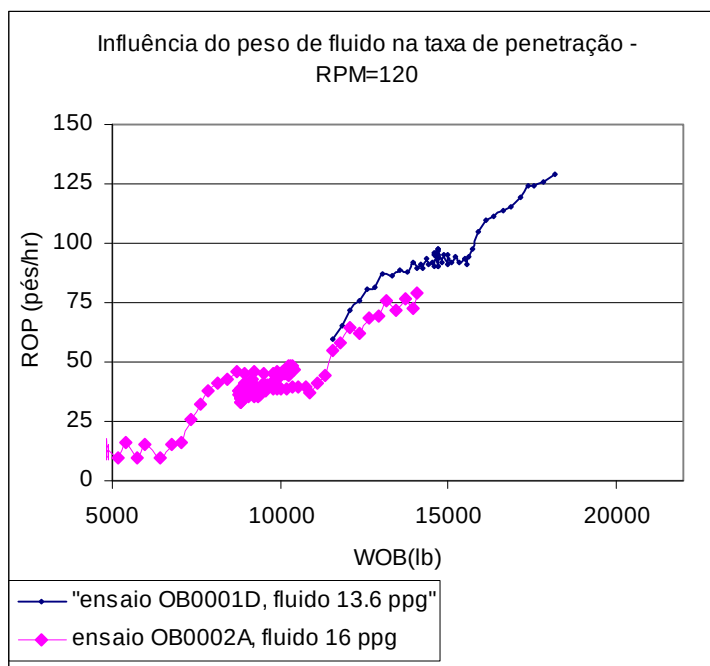


Figura 45: Influência do peso de fluido na taxa de penetração – RPM = 120

Os ensaios OB0001D e OB0002A apresentados na Figura 46 e na Figura 46 foram realizados com pressão de fundo de poço de 6000 psi. Tendo esta pressão constante para ambos ensaios, quando se aumenta o peso de fluido de 13.6 ppg para 16 ppg significa que o seu teor de sólidos está aumentando. Em uma rocha porosa, este aumento do teor de sólidos levaria a uma queda da taxa de penetração, pois a dificuldade de o fluido penetrar nos poros da rocha seria maior, fazendo com que a tensão efetiva da rocha não diminua tanto quanto ela diminuiria para um fluido com menor teor de sólidos. Resultados deste tipo foram obtidos para Judzis et al. (2009).

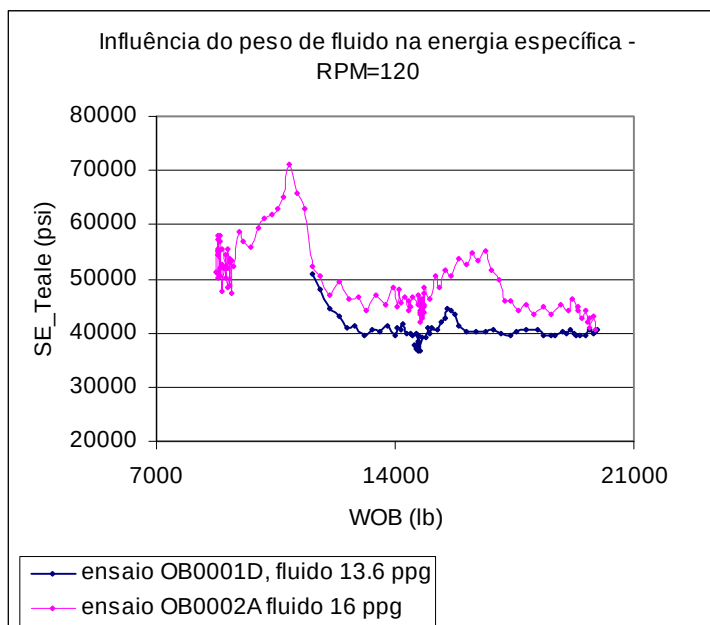


Figura 46: Influência do peso de fluido na energia específica – RPM = 120

Para uma formação salina não se espera obter diferença na taxa de penetração quando o peso de fluido é variado, já que esta é uma rocha que não possui poros e este comportamento foi observado na Figura 45. Consequentemente, a diferença entre as energias específicas destes dois ensaios deveria ser pequena, já que os parâmetros de perfuração aplicados são os mesmos e a taxa de penetração gerada é bastante próxima. A Figura 46 mostra um resultado concordante com a explicação acima.

Análise semelhante foi feita para os mesmos ensaios, mas utilizando uma velocidade de rotação de 180 rpm (Figura 47 e Figura 48). Os resultados mostram uma diferença considerável nas taxas de penetração e nas energias específicas quando o peso de fluido é aumentado de 13.6 ppg para 16 ppg. Isto indica que o aumento da velocidade de rotação diminuiu a profundidade de corte dos dentes da broca (DOC – depth of cut – que equivale à taxa de penetração dividida pela velocidade de rotação). É necessário um estudo mais aprofundado para determinar o motivo da influência do aumento da velocidade de rotação no aumento de ROP quando o teor de sólidos do fluido é aumentado.

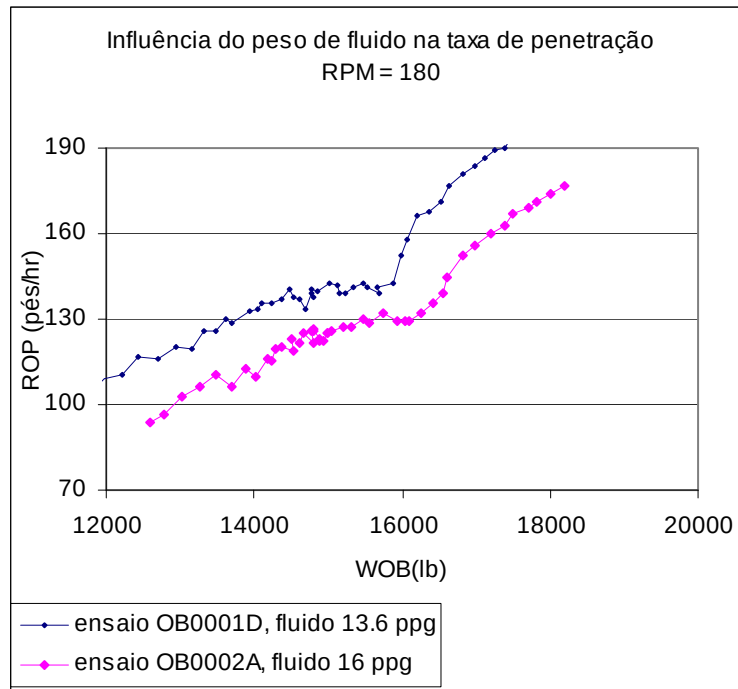


Figura 47: Influência do peso de fluido na taxa de penetração – RPM = 180.

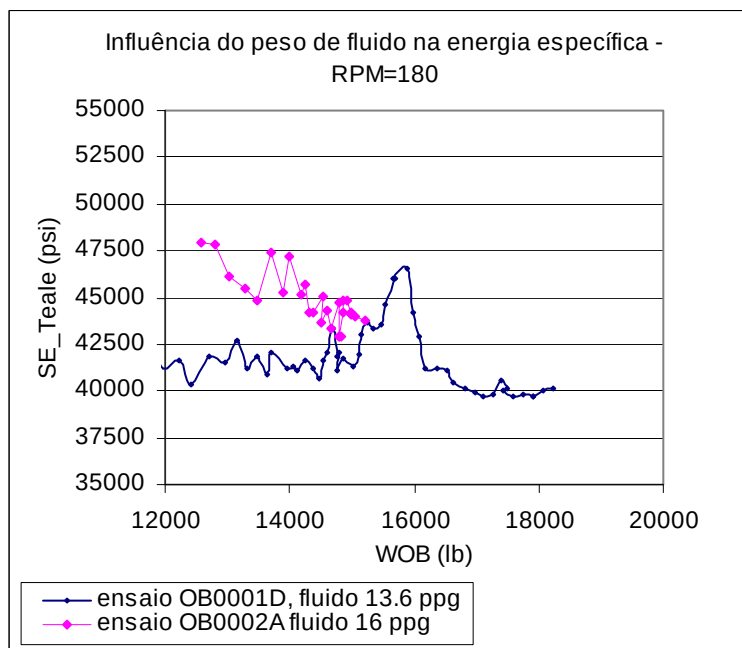


Figura 48: Influência do peso de fluido na energia específica – RPM = 180.

Algumas conclusões parciais obtidas a partir da análise dos ensaios são aqui compiladas antes de dar início à análise dos resultados de campo.

- A resistência à compressão confinada não se equivale ao gasto de energia mínimo em uma perfuração submetida a confinamento;

- O modelo de otimização de Armenta (2008) não se aplica adequadamente aos dados dos ensaios de laboratório em grande escala devido há duas possibilidades: a aplicação da equação DSE acontece em condições de contorno específicas ou devido a necessidade de aumentar o parâmetro HSI para valores mais elevados quando se perfura em grandes profundidades com elevadas tensões de confinamento;
- A eficiência de uma perfuração pode se superior a 35%, o que contraria a idéia de Dupriest et al. (2005) que a broca perfuraria no seu pico de performance com este valor de eficiência;
- O primeiro termo da equação de Teale (1965) (SE axial) tem magnitude muito pequena quando comparado com o segundo termo. Isto significa que o trabalho executado por WOB atuando através da distância percorrida é sempre pequeno quando comparado ao trabalho executado pelo torque atuando através da rotação da broca;
- A relação entre torque e peso sobre a broca é linear;
- O coeficiente de atrito ao deslizamento da broca é um parâmetro que não depende da rotação aplicada;
- Para que se possa melhorar o desempenho de uma perfuração, deve-se obter uma combinação ótima entre os parâmetros de controle (WOB e RPM), o coeficiente de atrito ao deslizamento da broca e a energia específica, somados a um bom desempenho da hidráulica de limpeza de poço e observação de possíveis problemas de perfuração;
- Quanto menor o número de cortadores e maior a velocidade de rotação, maior a taxa de penetração gerada, lembrando que as chances de desgaste da broca aumentam nessas condições.