## Estudo de Caso - Perfuração no Campo

Neste Capítulo, tendo em vista as conclusões obtidas a partir da análise dos ensaios de laboratório, as análises foram realizadas utilizando-se dados de 10 poços perfurados em rochas evaporíticas submetidas a elevadas tensões de confinamento, que foram fornecidos pela empresa Baker Hughes em conjunto com a Petrobrás. Foram verificadas a relevância e contribuição de cada método na otimização da perfuração dos poços além de verificadas quais as vantagens e desvantagens.

Os poços em estudo foram perfurados verticalmente e se situam em uma região marítima brasileira, apresentando em torno de 2000m de lâmina d'água e possuindo como característica comum a sua litologia predominante: halita. A profundidade da perfuração dos poços se localiza entre 2900m e 6100m, implicando em um ambiente de elevadas pressões atuantes. Os dados de perfuração de 7 poços foram medidos através de sensores de superfície, aumentando o grau de incerteza com relação à eles, já que o mais preciso seria medi-los no fundo do poço, o mais próximo possível da broca. Os 3 poços restantes tiveram seus dados medidos tanto através de sensores de superfície como através do equipamento CoPilot<sup>™</sup>, localizado no *bottomhole assembly* (BHA). Os dados sônicos dos poços com medidas de sensores de superfície foram determinados por perfilagem a cabo.

A existência de dados medidos no BHA possibilitou a aplicação dos modelos analíticos de otimização e sua comparação com a energia específica calculada com os dados de sensores de superfície. A Tabela 8 apresenta um resumo de todos os dados disponíveis e não disponíveis dos poços estudados.

As brocas utilizadas em todos os poços foram do tipo PDC com cortadores variando entre 12 <sup>1</sup>/<sub>4</sub> e 17 <sup>1</sup>/<sub>2</sub> mm. A Tabela 9 apresenta a profundidade das perfurações, tipos de brocas, diâmetro e desgaste das brocas utilizadas, espessura da lâmina d'água e outras informações de perfuração para os poços estudados.

| Medidas por sensores em     | C<br>C   | Ϋ́́́́ | ۲<br>۲   |     | MOO |     | Torouto | Densidade              | Diâmetro             | Colinor | Tipo de          |     | Trajetória            | ק<br>ר | l itologia | Lâmina           |
|-----------------------------|----------|-------|----------|-----|-----|-----|---------|------------------------|----------------------|---------|------------------|-----|-----------------------|--------|------------|------------------|
| superfície                  | 5        | נ     | 2        |     |     | 2   | anhini  | do fluido              | da broca             | Caliba  | broca            | לכ  | do poço               | 2      | гилия      | d'água           |
| Ροςο 1                      | ×        | ×     | $\times$ | ×   | ×   | ×   | ×       | ×                      | ×                    | ×       | ×                | ΩN  | Vertical              | **     | Х          | 2210             |
| Poço 2                      | ŊD       | QN    | QN       | ×   | ×   | ×   | ×       | ×                      | ×                    | ×       | ×                | QN  | Vertical              | **     | ×          | 2170             |
| Poço 3                      | ŊD       | QN    | QN       | ×   | ×   | ×   | ×       | ×                      | ×                    | Q       | ×                | g   | Vertical              | **     | ×          | 2187             |
| Poço 4                      | ×        | ×     | ×        | ×   | ×   | ×   | ×       | ×                      | ×                    | ΔN      | ×                | ΔN  | Vertical              | **     | Х          | 2139             |
| 5 οςο 5                     | ×        | ×     |          | ×   | ×   | ×   | ×       | ×                      | ×                    | DN      | ×                | ΔN  | Vertical              | **     | ΩN         | 2155             |
| 9 οζο 6                     | ×        | ×     | ND       | ×   | ×   | ×   | ×       | ×                      | Х                    | ×       | Х                | ND  | Vertical              | **     | Х          | 2234             |
| Poço 7                      | ×        | ×     | ×        | ×   | ×   | ×   | ×       | ×                      | ×                    | ΔN      | ×                | ΔN  | Vertical              | **     | Х          | 2126             |
| Βοςο 8                      | ΔN       | ×     | ×        | ×   | ×   | ×   | ×       | ×                      | ×                    | DN      | ×                | ΔN  | Vertical              | **     | Х          | 2166             |
| Poço 9                      | ND       | ND    | ND       | ×   | ×   | ×   | ×       |                        | Х                    | DN      | Х                | ND  | Vertical              | **     | Х          | 2153             |
| Poço 10                     | ×        | ×     | ×        | ×   | ×   | ×   | ×       | ×                      | ×                    | X       | ×                | ND  | Vertical              | **     | Х          | 2160             |
| Medidas de fundo de<br>poco | GR       | DTc   | DTs      | WOB | RPM | ROP | Torque  | Densidade<br>do fluido | Diâmetro<br>da broca | Caliper | Tipo de<br>broca | ECD | Trajetória<br>do poco | ISH    | Litologia  | Lâmina<br>d'áqua |
| Poço 1                      | $\times$ | ×     | $\times$ | ×   | ×   | ×   | ×       | ×                      | ×                    | ×       | ×                | ×   | ×                     | ×      | ×          | ×                |
| Poço 10                     | ×        | ×     | ×        | ×   | ×   | ×   | ×       | ×                      | ×                    | Х       | ×                | Х   | Х                     | Х      | Х          | Х                |
| Poço 2                      | ×        | ×     | ×        | ×   | ×   | ×   | ×       | ×                      | ×                    | ×       | ×                | Х   | Х                     | Х      | Х          | Х                |
| ** dado que pode ser calci  | ulado    | -     |          |     |     |     |         |                        |                      |         |                  |     |                       |        |            |                  |

ND - não disponível

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812383/CA

86

| àmina<br>lágua             | 2187               | 2187               | 2139               | 2139               | 2139               | 2139               | 2139               | 2155               | 2155               | 2234               | 2126               | 2126               | 2126               | 2126               | 2126               | 2126               | 2166               | 2166               | 2166               | 2153               | 2153               | 2153               | 2160               | 2210               | 2170               | 2170               | 2170               |                     |
|----------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| Desgaste da broca          | 0/0/NC/T/D/0/RR/DU | 2/5/ID/0/D/0/IL/PF | 2/3/ID/G/D/1/IQ/MB | 0/0/NC/T/D/0/NC/TP | 1/1/ID/T/D/1/NC/MB | 0/1/NC/T/D/1/IQ/PE | 3/3/IL/C/D/2/CE/PF | 1/1/IL/T/E/0/NC/MB | 0/3/ID/O/D/0/JP/PF | 3/8/MA/O/D/1/IP/TP | 0/0/NC/T/D/0/NC/TP | 1/0/DL/N/D/0/NC/TP | 0/0/NC/T/D/0/NC/TP | 2/2/ID/T/D/1/NC/MB | 3/8/IQ/T/E/0/IP/TP | 0/0/NC/T/D/0/NC/TP | 0/0/NC/T/D/0/NC/TE | 1/0/NC/T/D/0/NC/MB | 0/0/NC/T/D/0/NC/FM | 1/1/IL/O/D/0/NC/MB | 1/1/IL/O/D/0/RR/FC | 1/3/ID/N/D/2/IQ/PF | 1/2/ID/0/D/0/NC/PF | 4/8/MA/O/D/2/IP/PF | 0/0/NC/T/D/1/RR/TE | 2/6/IQ/0/D/0/ID/PF | 1/2/DL/N/D/1/DQ/TE |                     |
| IADC                       | M0616              | M0716              | M0616              | M0616              | M0716              | M0716              | M716               | 115M               | S0816              | M0616              | M0616              | M0616              | M0619              | M0619              | 445M               | M0619              | M0616              | Coroa              | M0616              | M0716              | M0616              | M0616              | M0616              | M0616              | M0616              | Coroa              | M0616              |                     |
| Pump<br>Pressure<br>(nei)  | bombeam            | 4950               | 5200               | 5100               | 5350               | 5900               | 5700               | 4300               | 4250               | 4300               | 5300               | 5800               | 5600               | 5700               | 5750               | 6000               | 4900               | 1200               | 6000               | 4300               | 4350               | 4300               | 5350               | 4780               | 5700               | 500                | 5270               |                     |
| Taxa de<br>fluido<br>(cnm) | 800                | 730                | 800                | 700                | 700                | 725                | 700                | 1000               | 840                | 200                | 800                | 850                | 880                | 750                | 780                | 765                | 860                | 200                | 800                | 800                | 720                | 600                | 1000               | 1000               | 1050               | 80                 | 1000               | očo                 |
| Hr                         | 201.00             | 52.50              | 246.00             | 7.00               | 11.00              | 39.50              | 223.00             | 54.00              | 203.00             | 189.50             | 5.00               | 22.00              | 131.50             | 84.00              | 65.50              | 83.00              | 175.50             | 12.00              | 22.50              | 262.50             | 142.00             | 121.50             | 214.00             | 196.00             | 129.00             | 6.00               | 2.50               | d op opur           |
| Perfur<br>ado<br>(m)       | 1773               | 258                | 1452               | 24                 | 34                 | 169                | 880                | 110                | 1423               | 1239               | 11                 | 6                  | 765                | 362                | 143                | 412                | 1645               | 18                 | 186                | 1270               | 628                | 400                | 1579               | 1918               | 1800               | 27                 | 27                 | e no fu             |
| Prof. (m)                  | 3310               | 5083               | 3444               | 4896               | 4920               | 4954               | 5123               | 3493               | 3603               | 3779               | 3117               | 3128               | 3218               | 3983               | 4345               | 4488               | 3053               | 4698               | 4716               | 2905               | 4175               | 4803               | 3319               | 3031               | 3005               | 4805               | 4805               | superfície          |
| Data                       | 6/30/2008          | 7/6/2008           | 11/24/2007         | 11/27/2007         | 11/30/2007         | 12/6/2007          | 1/1/2008           | 4/23/2008          | 5/5/2008           | 10/20/2007         | 5/3/2006           | 5/6/2006           | 5/13/2006          | 5/19/2006          | 5/23/2006          | 5/29/2006          | 6/7/2007           | 6/10/2007          | 6/14/2007          | 5/12/2007          | 5/21/2007          | 5/29/2007          | 9/11/2009          | 4/14/2009          | 9/14/2009          | 9/17/2009          | 9/20/2009          | medidos em          |
| Tipo                       | MDI616LHSPX        | M716LTBPXC         | FS2653Z            | FS2653Z            | FS3753             | FS3753             | M716LTPXC          | GTXCMSG1DX         | S816VBPX           | MA616LTBPXC        | FM2663Z            | FM2663Z            | HCR606             | HCR606             | GTXCMS18HDX        | HCR606             | MDI616LSBPX        | COROA              | MDI616LSBPX        | FS3753             | MGR89VBPX          | MGR89VBPX          | MDI616LSBPX        | S616VBPX           | MDI616LSBPX        | COROA              | MDI616LSBPX        | e possuem dados     |
| Tamanho                    | 12 1/4             | 12 1/4             | 17 1/2             | 17 1/2             | 17 1/2             | 17 1/2             | 12 1/4             | 17 1/2             | 17 1/2             | 12 1/4             | 17 1/2             | 17 1/2             | 17 1/2             | 17 1/2             | 17 1/2             | 17 1/2             | 14 3/4             | 12 1/4             | 14 3/4             | 17 1/2             | 17 1/2             | 17 1/2             | 14 3/4             | 17 1/2             | 14 3/4             | 12 1/4             | 14 3/4             | são os qu           |
| z                          | e                  | 4                  | ო                  | 4                  | ъ                  | 5R1                | 9                  | 3R1                | 4                  | ო                  | 5R1                | 5R2                | 9                  | 7                  | œ                  | 6R1                | 4                  | ъ                  | 4R1                | 2                  | ო                  | 3R1                | 4R1                | 3                  | 4                  | ß                  | 4R1                | narelo              |
| Manuf                      | Smith              | Smith              | SDBS               | SDBS               | SDBS               | SDBS               | Smith              | Hughes             | Smith              | Smith              | SDBS               | SDBS               | Hughes             | Hughes             | Hughes             | Hughes             | Smith              |                    | Smith              | SDBS               | Smith              | Smith              | Smith              | Smith              | Smith              |                    | Smith              | idos de an          |
| oĵod                       | Ροςο 3             | Poço 3             | Poço 4             | Poço 5             | Ροςο 5             | Ροςο 6             | Ροςο 7             | Ροςο 7             | Poço 7             | Ροςο 7             | Ροςο 7             | Ροςο 7             | Ροςο 8             | Ροςο 8             | Ροςο 8             | Ροςο 9             | Ροςο 9             | Ροςο 9             | Ροςο 10            | Ροςο 1             | Ροςο 2             | Ροςο 2             | Ροςο 2             | ** Os poços rachura |

Tabela 9 - Dados de perfuração e de broca para os poços estudados.

Os gráficos que ilustram os dados de perfuração dos poços foram obtidos utilizando-se o programa PETREL<sup>™</sup>. Com o intuito de facilitar a visualização dos mesmos, foi feita uma suavização dos dados através de uma média aritmética com janelas móveis de 15 metros. A suavização dos dados não afetou o comportamento global das curvas, conforme pode ser visualizado na Figura 49 e na Figura 50, onde foram plotadas as curvas originais versus suavizadas (os demais gráficos são apresentados no item A.1 do apêndice). Nestas Figuras podem ser observadas a litologia, dados sônicos e dados de perfuração dos poços analisados. A Tabela 10 apresenta a legenda de cores que representa o perfil de litologia.

| Código | Litologia   | Cor |
|--------|-------------|-----|
| 6      | Calcilutito |     |
| 81     | Taquidrita  |     |
| 82     | Anidrita    |     |
| 85     | Halita      |     |
| 86     | Silvinita   |     |
| 87     | Carnalita   |     |

Tabela 10 - Legenda de cores representativa da litologia dos poços.

Optou-se por não utilizar os dados dos Poços 6 e 1 porque foram encontrados valores erráticos de WOB. O peso sobre a broca do Poço 6 tinha valores equivalentes aos de RPM e o WOB do Poço 1 estava em torno de 300 klb, incoerente com valores usuais deste parâmetro.

Todos os perfis estudados foram perfurados em camadas de evaporitos, variando entre halita, carnalita, taquidrita e anidrita, que apresentam comportamentos diferenciados, especialmente no que diz respeito à sua resistência. Para determinar qual o tipo de evaporito existente e predominante em cada poço, foi realizada uma análise dos dados sônicos e do *Gamma Ray*.

O parâmetro *Gamma Ray* indica a ausência ou presença de elementos radioativos na formação, ou mais especificamente a presença de argilas (naturalmente radioativas). Os parâmetros tempo de trânsito compressional e cisalhante foram utilizados para caracterizar os diferentes tipos de formações, conforme valores típicos apresentados por Mohriak et al. (2008). A Tabela 11 apresenta estes valores de *Gamma Ray* e de tempo de trânsito para os diferentes evaporitos.



Figura 49 - Perfis do Poço 8.



Figura 50 - Perfis do Poço 2.

|             | Propriedades de alguns evap | ooritos         |
|-------------|-----------------------------|-----------------|
|             | Tempo de Trânsito (μs/pés)  | Raio Gama (API) |
| Halita      | 67                          | 0               |
| Anidrita    | 50                          | 0               |
| Carnalita   | 78                          | 200             |
| Silvita     | 74                          | 500             |
| Gipsita     | 52.5                        | 0               |
| Polihalita  | 57.5                        | 180             |
| Kieserita   | não                         | 0               |
| Kainita     | não                         | 225             |
| Langbeinita | 52                          | 275             |

Tabela 11 – Valores típicos de tempo de trânsito compressional e raios gama de alguns evaporitos (Mohriak et al., 2008).

Os Poços 3, 9 e 2 não apresentam dados sônicos de LWD (*logging while drilling*), lembrando que neste último foram medidos pelo CoPilot<sup>TM</sup>. Nos demais, observando-se os dados sônicos e/ou litologia (alguns poços não apresentaram litologia), é possível observar a predominância da halita (valores muito baixos de *Gamma Ray* e tempo de trânsito de 67  $\mu$ s/pés), sendo que a ocorrência de picos elevados de *Gamma Ray* indica a presença de uma camada de carnalita ou taquidrita (os valores aumentam devido à maior concentração de potássio, Urânio ou Tório nestes minerais).

O Poço 10 apresenta diferenças significativas entre os dados de sensores de superfície e os dados de CoPilot<sup>™</sup>. A Figura 51 e a Figura 52 ilustram estas diferenças.

As diferenças entre as grandezas expostas na Figura 51 e na Figura 52 apresentam incoerências do ponto de vista teórico. O torque total medido em superfície é composto por torque friccional, torque mecânico e torque da broca. Portanto, o torque medido pelo CoPilot<sup>™</sup> não deve ser maior que aquele medido através de sensores de superfície, como indica a Figura 51. As revoluções por minuto também tendem a serem maiores (ou equivalentes) quando medidas em superfície. Isto porque pode haver atrito entre a coluna e a parede do poço, fazendo com que o RPM atuante na broca seja menor que o aplicado. A Figura 52 mostra o contrário, as revoluções medidas pelo CoPilot<sup>™</sup> são maiores e não refletem o mesmo comportamento das revoluções medidas dos dados sônicos. Aqueles medidos pelo CoPilot<sup>™</sup> são menores, provavelmente devido à interferência do fluxo de fluido simultâneo à aquisição do tempo de trânsito. Os

dados de sensores de superfície foram desconsiderados durante a análise deste poço.



Figura 51 - Comparação entre dados de superfície e CoPilot™ para Poço 10 – torque e tempo de trânsito cisalhante.



Figura 52 - Comparação entre dados de superfície e CoPilot<sup>™</sup> para Poço 10 – RPM e Gamma Ray.

## 4.1. Avaliação da Resistência da Rocha

A determinação da resistência à compressão confinada para as perfurações em campo foi feita do mesmo modo que para os ensaios de laboratório, sendo que ela equivale à UCS acrescida a um ganho de resistência determinado pelo confinamento. A Eq. (22) apresentada no Capítulo 3 estabelece o cálculo da CCS utilizado para os poços.

A grandeza UCS foi obtida por duas metodologias diferentes: utilizando-se equações empíricas de UCS relacionadas a dados sônicos e, utilizando-se valores típicos de UCS obtidos na literatura para os diferentes tipos de sal. Esta última metodologia foi a mesma aplicada aos ensaios de laboratório, apresentada no Capítulo 3.

A obtenção da resistência à compressão não confinada através de correlações com dados sônicos é utilizada há bastante tempo na Indústria do Petróleo. Alguns autores estabeleceram correlações que podem ser aplicadas para formações específicas (Chandong, 2004 e Horsrud, 2001) e outros estabeleceram equações que podem ser aplicadas para diferentes litologias (Andrews *et al.*, 2007 e Onyia, 1988). Para a obtenção da resistência à compressão não confinada do trabalho em questão, foram utilizadas as correlações de Onyia (1988) e de Andrews *et al.* (2007) que podem visualizadas, respectivamente, na Eq. (24) e na Eq. (25).

$$UCS = \frac{1}{5.15 \times 10^{-8} \cdot (\Delta t_c - 23.87)^2} + 2$$
(24)

$$UCS = \frac{k_1}{(\Delta t_c - 40)^{k_2}}$$
(25)

Onde:

UCS = resistência à compressão não confinada (psi);  $\Delta tc$  = tempo de trânsito compressional (µs/pés);  $k_1$  e  $k_2$  = parâmetros de ajuste adimensionais. A Tabela 12 apresenta os valores dos parâmetros de ajuste  $k_1$  e  $k_2$  de acordo com a litologia.

Tabela 12 - Valores dos parâmetros de ajuste k<sub>1</sub> e k<sub>2</sub> (Modificado de Olea et al., 2008).

|    | Todos  | Folhelho | Areia  |
|----|--------|----------|--------|
| k1 | 217457 | 754708   | 149595 |
| k2 | 0.52   | 0.83     | 0.42   |

Conforme mencionado acima, estas correlações são válidas para diferentes litologias. Olea *et al.*, (2008) sugeriu uma correção destas equações para sua aplicação em sal. Essas correções foram feitas após comparações das correlações de Andrews e de Onyia com resultados de ensaios de laboratório para obtenção de UCS feitos em amostras de sal. As Eq. (26) e (27) apresentam respectivamente a relação de correção de Onyia (1988) apud Olea et al. (2008) e a de Andrews et al. (2007) apud Olea et al. (2008).

$$UCS = 10.48 \left[ \frac{1}{5.15 \times 10^{-8} \cdot (\Delta t_c - 23.87)^2} + 2 \right]^{0.5724}$$
(26)

$$UCS = \frac{6823.813358}{\left(\Delta t_c - 40\right)^{0.2912}}$$
(27)

Onde:

 $\Delta tc = tempo \ de \ trânsito \ compressional (\mu s / pés);$ 

UCS = resistência à compressão não confinada (psi).

Todos os métodos para obtenção da resistência não confinada demonstrados acima foram aplicados aos dados analisados. Cabe salientar que os Poços 3 e 9 não possuem dados sônicos ( $\Delta$ ts e  $\Delta$ tc) nem de Raios Gama e o Poço 5 não possui dados de tempo de trânsito cisalhante. O mesmo ocorre com os ensaios de laboratório, que não possuem dados sônicos. Portanto, as correlações de Andrews et al. (2007) *apud* Olea et al. (2008), de Onyia (1988) *apud* Olea et al. (2008) e as corrigidas por Olea te al. (2008) não puderam ser aplicadas a eles.

Os resultados de dois poços são apresentados na Figura 53. Os demais experimentos apresentaram curvas com mesmo comportamento e podem ser

visualizados no item A.2 do Apêndice deste trabalho. É possível perceber através da Figura 53 que a correlação de Andrews apresentou valores que destoam daqueles obtidos pelas demais. Por este motivo a correlação de Andrews foi desconsiderada da análise de dados.



Figura 53 - Valores de CCS estimados por diferentes correlações para os Poços 4 e 7.

## 4.2. Aplicação dos Modelos Analíticos de Otimização Baseados na Transferência de Energia Específica

Nesta seção será feita uma análise da aplicação dos modelos analíticos para os poços de estudo. Os perfis das energias específicas calculadas e sua comparação com a resistência à compressão confinada estimada estão ilustrados na Figura 62. Optou-se por apresentar apenas os gráficos de dois dos poços, cujo comportamento é semelhante aos restantes. A partir da Figura 54 à Figura 61 é possível estabelecer comparações entre a SE e os outros parâmetros de perfuração. Na Figura 62 observa-se com melhor precisão as curvas de SE versus CCS. Os gráficos dos demais poços podem ser visualizados na seção A.3 do apêndice.



Figura 54 - Aplicação dos modelos analíticos de otimização através da SE - Poço 3.



Figura 55 - Aplicação dos modelos analíticos de otimização através da SE - Poço 4.



Figura 56 - Aplicação dos modelos analíticos de otimização através da SE - Poço 5.



Figura 57 - Aplicação dos modelos analíticos de otimização através da SE - Poço 7.



Figura 58 - Aplicação dos modelos analíticos de otimização através da SE - Poço 8.



Figura 59 - Aplicação dos modelos analíticos de otimização através da SE - Poço 9.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812383/CA



Figura 60 - Aplicação dos modelos analíticos de otimização através da SE - Poço10.



Figura 61 - Aplicação dos modelos analíticos de otimização através da SE - Poço



Figura 62 - SE x CCS para Poços 3 e 4.

A eficiência mecânica máxima foi calculada para todos os poços através da divisão entre a resistência à compressão confinada máxima (que segundo Pessier e Fear (1992), equivale à energia específica mínima) e a energia específica de Teale. A Tabela 13 apresenta os valores médios de eficiência obtidos para cada poço. Os gráficos da variação da eficiência com a profundidade estão anexados na seção A.4 do apêndice.

| Poços medidas de sensores de superfície | Média das EFFmáx |
|---|------------------|
| Poço 3                                  | 0.3              |
| Poço 4                                  | 0.25             |
| Poço 5                                  | 0.3              |
| Poço 7                                  | 0.37             |
| Poço 8                                  | 0.32             |
| Poço 9                                  | 0.16             |
| Poços medidas Co-Pilot                  | Média das EFFmáx |
| Poço 10                                 | 0.82             |
| Poço 2                                  | 0.76             |

Tabela 13 - EFF máximas para os poços perfurados.

O primeiro passo será fazer uma análise pontual a respeito do comportamento da SE conforme variam os parâmetros de perfuração e os dados sônicos para os poços que possuem dados de CoPilot<sup>™</sup>, seguidos dos demais poços.

As medidas de CoPilot<sup>™</sup> são fundamentais para a otimização da perfuração. Através da utilização desta tecnologia, é possível comparar os parâmetros medidos em superfície com aqueles medidos próximos da broca. A diferença entre estes valores pode indicar problemas ocorridos durante a perfuração, como problemas de transferência de peso, de atrito lateral ou de vibração. Os modelos analíticos de otimização baseados na energia específica tornam-se mais eficazes quando os parâmetros de perfuração também forem medidos próximos da broca. Algumas considerações iniciais serão feitas para os poços que têm dados medidos em CoPilot<sup>™</sup>:

- No Poço 10 percebe-se que os valores de energia específica ٠ calculados a partir dos dados de sensores de superfície estão mais baixos que a faixa de variação da resistência à compressão confinada. Isto acontece devido aos baixos valores de RPM que ocorrem ao longo da perfuração, chegando a atingir 17 rotações por minuto na profundidade de 3818m. Provavelmente houve erro de medição já que aquela realizada pelo CoPilot<sup>TM</sup> apresenta valores usuais de RPM. A energia específica calculada através dos dados de CoPilot<sup>TM</sup> aparece mais elevada que a CCS, sendo que a eficiência média é de 82%. Conforme vimos anteriormente, este poço apresenta divergências entre os dados medidos por sensores de superfície e os dados de CoPilot<sup>TM</sup>. Pelos resultados da energia específica, pode-se concluir que houve algum problema na aquisição dos dados de superfície, e, portanto, eles serão desconsiderados na análise.
- O Poço 2 tem eficiência de 76 % para medição em CoPilot<sup>™</sup>. É um valor elevado que contradiz o modelo de Dupriest et al. (2005) que sugere que o pico de performance seja alcançado quando a eficiência for de 35%. As medidas de CoPilot<sup>™</sup> resultaram em valores de eficiência altos e, como as medidas feitas próximas da broca são mais confiáveis do que as realizadas em superfície, estes resultados indicam que as perfurações podem atingir eficiências de até 80%. Conforme mostram os valores de EFF do Poço 2, não há perdas de energia consideráveis ao longo da coluna, o que é coerente, pois o poço é vertical e praticamente não há atrito lateral.

Isto também indica que não ocorreram problemas durante a perfuração como vibrações ou enceramento.

Figura 63 apresenta a comparação entre as energias específicas medidas em superfície e no CoPilot<sup>™</sup> para o Poço 2. A diferença existente no trecho inicial entre a energia específica medida em superfície e a medida no fundo do poço se deve à diferença de valores de RPM. As medidas de RPM feitas por sensores de superfície apresentam valores da ordem de 80 rev/min e as medidas de Co-Pilot mediram revoluções da ordem de 150 rev/min para o mesmo trecho.



Figura 63 - SE\_Teale\_CoPilot<sup>™</sup> versus SE\_Teale\_superfície - Poço 2.

Observando-se o comportamento da energia específica do Poço 4 apresentado na Figura 62, é possível perceber um aumento neste parâmetro quando a profundidade de 4954 m é alcançada. Isto ocorre devido à uma mudança de fase e conseqüente mudança de broca de diâmetro 17,5" para 12,25". A diminuição da área da seção transversal da broca acarreta em um aumento da energia específica, relação que pode ser visualizada na equação de Teale (1965). Fisicamente, isto acontece porque a área de corte de rocha está diminuindo, há menos cortadores, fazendo com que a broca trabalhe mais para conseguir cortar a mesma quantidade de rocha que uma broca maior cortaria. Outra análise importante é a variação da energia específica quando ocorre mudança de litologia. É possível perceber nas curvas que a energia específica é muito sensível à mudança de formação. Esta sensibilidade é um reflexo da mudança dos parâmetros mecânicos da rocha que se reflete nos parâmetros de perfuração quando a broca encontra uma formação mais / menos resistente daquela que estava quebrando.

Um dos comportamentos comuns a todos os poços é a ocorrência um grande aumento da energia específica (pico) juntamente com uma queda dos valores de tempo de trânsito compressional e cisalhante quando a rocha muda da formação halita para anidrita. A queda de DTc e DTs indica que a anidrita é uma formação mais resistente que a halita e isto é comprovado pela queda que ocorre na taxa de penetração. O fato de a SE tornar-se elevada, significa que está ocorrendo um gasto excessivo de energia, ou seja, um trabalho realizado superior àquele necessário para o corte da rocha.

Quando a broca encontra as formações silvinita, carnalita e calcilutito, percebe-se uma queda da energia específica, um aumento de DTc, DTs, de GR e de ROP. Este comportamento é conseqüência das menores resistências oferecidas por estas formações quando comparadas à halita. O aumento de *Gamma Ray* pode ser devido à presença de impurezas (argilas) na formação.

Estas considerações a respeito da variação da energia específica conforme o tipo de rocha perfurada leva a concluir que seria ideal inserir na fórmula da SE algum parâmetro representativo da resistência da rocha. A Eq. (17), formulada por Pessier e Fear (1992), fornece este parâmetro: o coeficiente de atrito ao deslizamento, que relaciona o tipo de broca utilizada com a resistência oferecida pela formação.

Aplicando-se a Eq. (17) na equação de energia específica de Teale (1965), resulta na Eq. (18) onde se estabelece uma relação direta entre a energia específica e o coeficiente de atrito ao deslizamento da broca (e consequentemente, uma relação direta entre SE e a resistência da rocha). O objetivo disso seria monitorar a variação de  $\mu$  e de SE para otimizar a perfuração. Este coeficiente será analisado para os poços na próxima seção e será feita uma comparação com os valores dos coeficientes de atrito ao cisalhamento da broca obtidos para os ensaios de laboratório. A seguir, é apresentada uma análise global a respeito das curvas obtidas através da aplicação dos modelos analíticos. A Figura 64 apresenta as curvas de energia específica para todos os poços plotadas *versus* a profundidade.



Figura 64 – Comparação entre as curvas de energia específica de todos os poços de estudo.

As curvas de energia específica visualizadas na Figura 64 têm um valor médio de 100000 psi, à exceção da curva do Poço 9 que tem valores acima da média e à exceção das curvas calculadas através de dados medidos em CoPilot<sup>™</sup>, que têm energias específicas menores. As energias específicas dos dados medidos em Co-Pilot<sup>™</sup> são da ordem de 39000 psi (Poço 10) e da ordem de 47000 psi (Poço 2). Isto indica que a energia aplicada na plataforma não é a mesma que é empregada na broca, ou seja, a energia específica que efetivamente é empregada no mecanismo de corte da rocha é da ordem de 39% (Poço 10) e 45% (Poço 2) daquela que é medida com dados de superfície. Isto acontece porque o monitoramento dos parâmetros feito na plataforma gera dados diferentes daqueles monitorados no fundo do poço, que refletem no valor das energias específicas. Quando os parâmetros de perfuração são medidos no fundo do poço, a confiabilidade nos dados adquiridos é maior, já que estes são medidos o mais próximo da broca possível, refletindo exatamente o trabalho realizado para cortar a rocha. Quando os parâmetros de perfuração são medidos por sensores na plataforma, as medidas estão sendo feitas muito distantes da broca (no caso dos poços estudados, a distância é em torno de 3000 m). Por este motivo, alguns parâmetros podem ter a sua leitura afetada, como o parâmetro torque, que pode ter um aumento exagerado devido ao atrito lateral da coluna de perfuração com a parede do poço (especialmente em poços direcionais) ou pode ter uma redução, geralmente causada por um enceramento da broca.

Apesar de existir uma diferença entre as energias específicas dos poços com medidas de superfície e dos poços com medidas de Co-Pilot<sup>™</sup> (Poço 2 e Poço 10), analisando os dados de ROP para ambos os conjuntos de poços, percebe-se que eles são da mesma ordem de grandeza. Isto indica que as perfurações tiveram desempenho equivalente no que se refere à taxa de penetração, porém não é o que se observa pelos valores de eficiência mecânica apresentados na Tabela 14. Este parâmetro é calculado a partir da energia específica, logo era esperado que as EFF dos dados com medidas de sensores de superfície fossem menores que as dos dados medidos por Co-Pilot<sup>™</sup>. Se os poços com medidas de superfície fossem monitorados com Co-Pilot, provavelmente teriam valores de EFF e SE equivalentes às dos Poços 2 e 10.

A Tabela 14 apresenta valores de SE de halita obtidos na literatura por medidas de sensores de superfície, para que se possa comparar com aqueles obtidos neste trabalho.

ReferênciaEnergia Específica MédiaProfundidadeSalMorel et al. (2010)950005180 m - 5959 mGolfo do MéxicoThomson et al. (2010)600002316,5 m - 2400 mGolfo do México

Tabela 14 - Valores de energia específica para sal obtidos na literatura.

As perfurações dos poços em estudo acontecem entre as profundidades de 2900m a 6100m. Os valores de SE encontrados neste trabalho estão próximos daqueles encontrados por Morel et al. (2010).

Através da Tabela 13, apresentada anteriormente, observa-se que os poços com dados medidos em sensores de superfície apresentam valores de eficiência próximos daquele sugerido por Dupriest et al. (2005) de 35 %, exceto para os

Poços 4 e 9, que apresentam valores mais baixos. Segundo o critério de otimização desse autor, estes últimos poços poderiam ter o seu desempenho melhorado. Na próxima seção, será feita comparação entre as EFFs dos poços e as dos ensaios de laboratório em grande escala.

Um comportamento comum a todos os poços está na diferença entre os valores da energia específica calculada pela equação de Teale (1965) e os valores da energia específica de perfuração de Armenta (2008), que é muito pequena. A diferença entre elas é da ordem de 1000 psi. Cabe salientar que o valor de HSI foi estimado em 3 hp/in<sup>2</sup>, valor este, considerado alto e que certamente implicaria em um bom desempenho hidráulico durante a perfuração. Este valor foi estimado por não haver dados suficientes para a sua determinação (valor da viscosidade do fluido desconhecido). Este mesmo comportamento do modelo de Armenta (2008) foi observado nos ensaios de laboratório em grande escala e discutido no Capítulo 3.

Conforme visto no Capítulo 2, a energia específica de Dupriest et al. (2005) é equivalente à 35 % da energia calculada através da equação de Teale (1965) quando a perfuração está no seu pico de performance. Isto se deve ao fato de o autor deste modelo aproximar as curvas da CCS e SE desconsiderando a existência de uma ineficiência durante o processo de corte mesmo quando a broca perfura no seu pico de eficiência. Esta ineficiência pode ser obtida subtraindo-se o valor da eficiência de 100%. Os motivos pelos quais há esta ineficiência ainda não são bem compreendidos, sendo que atualmente existem duas hipóteses para o problema. A primeira é a de que a ineficiência aconteça devido a problemas de perfuração somados à falta de um conhecimento aprofundado a respeito da mecânica de corte de rochas em ambientes pressurizados. Dentro deste contexto, surge o questionamento sobre qual seria o parâmetro representativo da rocha que melhor se compare aos gastos de energia mecânica. A resistência à compressão confinada é a grandeza atualmente utilizada para esse fim, mas já é conhecido e pode-se verificar na análise de dados deste trabalho, que a energia específica é consideravelmente maior que a CCS. Portanto percebe-se a necessidade de pesquisas mais aprofundadas no sentido de definir outro parâmetro que melhor se ajuste ao problema. A segunda hipótese é a de que o monitoramento dos parâmetros de perfuração feita através de sensores colocados na plataforma de perfuração, gera dados imprecisos, acarretando na obtenção de uma eficiência

menor do que aquela que realmente acontece durante a perfuração. Esta hipótese é concordante com as análises realizadas neste trabalho, onde se obtém EFFs maiores para poços com monitoramento de dados no fundo do poço.

Dupriest et al. (2005) desconsidera esta problemática em seu modelo e aproxima as curvas de energia específica e CCS através de um artificio matemático no intuito de facilitar a visualização em tempo real das mesmas. Quando as curvas estão próximas, a perfuração é considerada como eficiente (pois está no pico de performance com EFF = 35%). Quando as curvas se distanciam, deve-se analisar qual o problema que está acontecendo e modificar os parâmetros de perfuração para corrigi-los. Se WOB e torque forem mais elevados do que o valor que define o ponto conhecido como *founder*, deve-se modificar o projeto da perfuração.

Outro ponto importante de ser ressaltado nos resultados é a proximidade entre as curvas de SE\_Dupriest (para os poços com monitoramento de dados através de sensores de superfície) e a resistência à compressão confinada. Para todos os poços analisados, as curvas estão bastante próximas, sugerindo que o modelo de Dupriest et al. (2005) funcione adequadamente. É importante lembrar que o autor considera a perfuração eficiente quando estas duas curvas crescem paralelas entre si, mantendo a eficiência em um valor constante e gerando um aumento proporcional da ROP conforme é aumentado o peso sobre a broca.

Portanto, segundo o modelo de Dupriest et al. (2005), pode-se dizer que as perfurações nos poços com medidas de superfícies foram eficientes, já que a base da curva de SE\_D é equivalente à da CCS e que os picos de energia específica representam pontos de ineficiência, que devem ser avaliados em tempo real para compreender a sua causa.

Nenhum dos métodos de otimização da perfuração através do monitoramento da energia específica considera a variação de energia térmica que ocorre no fundo do poço quando a SE varia. É provável que ocorra um aumento da energia térmica conforme a energia específica é aumentada, já que, para que isto ocorra, é necessário elevar os parâmetros torque e peso sobre a broca. O conhecimento da quantidade de energia térmica que é gerada é importante, pois ela pode causar danos à broca.

## 4.3. Comparação entre as Análises: Poços x Ensaios de Laboratório

Nesta seção será discutida a comparação entre os resultados obtidos dos ensaios de laboratório e dos poços perfurados em campo. É inviável estabelecer qualquer tipo de comparação entre uma perfuração real, onde há variabilidade de material, de parâmetros de perfuração, onde se trabalha em um universo muito maior do que aquele em que são realizados os ensaios de laboratório em grande escala. Por este motivo, para este estudo, foram selecionados pequenos trechos dos poços de campo que tenham mesma litologia (halita), possuam mesmo peso de fluido, diâmetro de broca e resistência. Isto possibilita a comparação com os ensaios de laboratório, já que eles simulam o corte de rocha para profundidades pequenas, com resistência, peso de fluido e velocidade de rotação constante.

A primeira consideração a ser feita é a respeito da eficiência mecânica. Para o conjunto de dados de laboratório, os valores médios de eficiência mecânica máxima podem ser visualizados na Tabela 5. Já os dos poços são apresentados na Tabela 15. A Figura 65 ilustra a curva de energia específica *versus* resistência à compressão confinada para o Poço 3.



Figura 65 - SE versus CCS para trecho do Poço 3.

Comparando-se a Tabela 5 com a Tabela 15, é possível observar que a eficiência mecânica máxima está mais próxima da unidade nos ensaios de laboratório e no conjunto de dados dos poços com medição de Co-Pilot<sup>™</sup>. Isto indica que as perfurações feitas em laboratório e as perfurações nos poços com medições de Co-Pilot<sup>™</sup> tiveram desempenhos aproximados e podem ser consideradas eficientes.

Tabela 15 - Valores médios de EFF máxima para os trechos dos poços perfurados em campo.

| Prof. (m)     | Trechos dos poços com medidas de superfície | Média das EFFmáx |
|---------------|---|------------------|
| 4090-4104     | Poço 3 Trecho 1                             | 0.23             |
| 4366-4404     | Poço 3 Trecho 2                             | 0.26             |
| 4019-4056     | Poço 4 Trecho 1                             | 0.31             |
| 4225-4242.5   | Poço 4 Trecho 2                             | 0.31             |
| 3963.5-3995.5 | Poço 5 Trecho 1                             | 0.39             |
| 4409-4417.5   | Poço 5 Trecho 2                             | 0.27             |
| 4116-4179     | Poço 7 Trecho 1                             | 0.31             |
| 3684-3724     | Poço 7 Trecho 2                             | 0.33             |
| 3737-3768     | Poço 8 Trecho 1                             | 0.28             |
| 4100-4125     | Poço 8 Trecho 2                             | 0.3              |
| 3300-3327     | Poço 9 Trecho 1                             | 0.16             |
| 3800-3838     | Poço 9 Trecho 2                             | 0.17             |
| Prof. (m)     | Trechos dos poços com medidas de Co-Pilot   | Média das EFFmáx |
| 3400-3412     | Poço 10 Trecho 1                            | 0.78             |
| 3700-3719     | Poço 10 Trecho 2                            | 0.82             |
| 3644.5-3663   | Poço 2 Trecho 1                             | 0.82             |
| 4446-4463.5   | Poço 2 Trecho 2                             | 0.7              |

Na seção anterior foi visto que os poços com medidas de sensores de superfície apresentaram valores de ROP da mesma ordem que os dos poços com medições de Co-Pilot<sup>™</sup>. Por este motivo pode-se considerar que a perfuração dos poços com medidas de superfície também foi eficiente (apesar dos altos valores de SE que se justificam pela precariedade do tipo de monitoramento de dados). A partir destas considerações, fica clara a importância do monitoramento de dados no fundo do poço, pois informações obtidas são mais precisas do que aquelas medidas por sensores de superfície.

As próximas considerações serão feitas a respeito do comportamento do coeficiente de atrito ao deslizamento da broca. A Tabela 16 apresenta seu valor obtido a partir da inclinação da curva T x WOB.Db/36 para os poços perfurados em campo com medidas de CoPilot<sup>™</sup> e, na Tabela 6 (do Capítulo 3), este mesmo parâmetro pode ser visto para os ensaios de laboratório. A Figura 66 ilustra a

relação entre WOB.Db/36 e torque para um trecho do Poço 2, cuja inclinação equivale ao coeficiente de atrito ao deslizamento da broca. Os gráficos dos ensaios de laboratório foram apresentados na seção anterior e na seção A.6 do apêndice.

| Tabela 16 - Valores de $\mu$ para os trechos dos poços perfurados com medidas | de CoPilo | эt. |
|---|-----------|-----|
|---|-----------|-----|

| Prof. (m)   | Poços com medidas de CoPilot | μ (inclinação) |
|-------------|------------------------------|----------------|
| 3400-3412   | Poço 10 Trecho 1             | 0.96           |
| 3700-3719   | Poço 10 Trecho 2             | 1              |
| 3644.5-3663 | Poço 2 Trecho 1              | 1.2            |
| 4446-4463.5 | Poço 2 Trecho 2              | 2.3            |



| 1  | -   | ١. |
|----|-----|----|
|    | GA. | •  |
| L  | a   |    |
| ۰. |     | ,  |



(b)

Figura 66 - Avaliação de  $\mu$  para um trecho do Poço 2: (a) RPM=169 e (b) RPM=193

Através da Figura 66, percebe-se que a relação T x WOB.Db/36 é linear e a inclinação da reta de ajuste equivale ao coeficiente de atrito ao deslizamento da

broca. Para os ensaios de laboratório, a relação exposta acima também é linear, porém, para os poços perfurados com medidas de superfície, a relação deixa de ser linear e o coeficiente de atrito ao deslizamento da broca não pode mais ser obtido através da inclinação da curva WOB.Db/36 *versus* torque. A Figura 67 ilustra este comportamento.







(b)

Figura 67 - Avaliação de  $\mu$  para um trecho do Poço 3: (a) Trecho 1 e (b) Trecho 2

A falta de linearidade para os poços com medidas de superficie pode ser explicada pela grande variação de torque (e consequentemente de  $\mu$ ) por fatores específicos de campo, como: diferentes comprimentos de coluna de perfuração, possível influência do carreamento de cascalhos no funcionamento da coluna, possível diferencial de pressão, vibração, enceramento, dentre outros. Ou simplesmente pelo fato de as perfurações não estarem otimizadas.