

## 5

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

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

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

### 5.1.

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

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

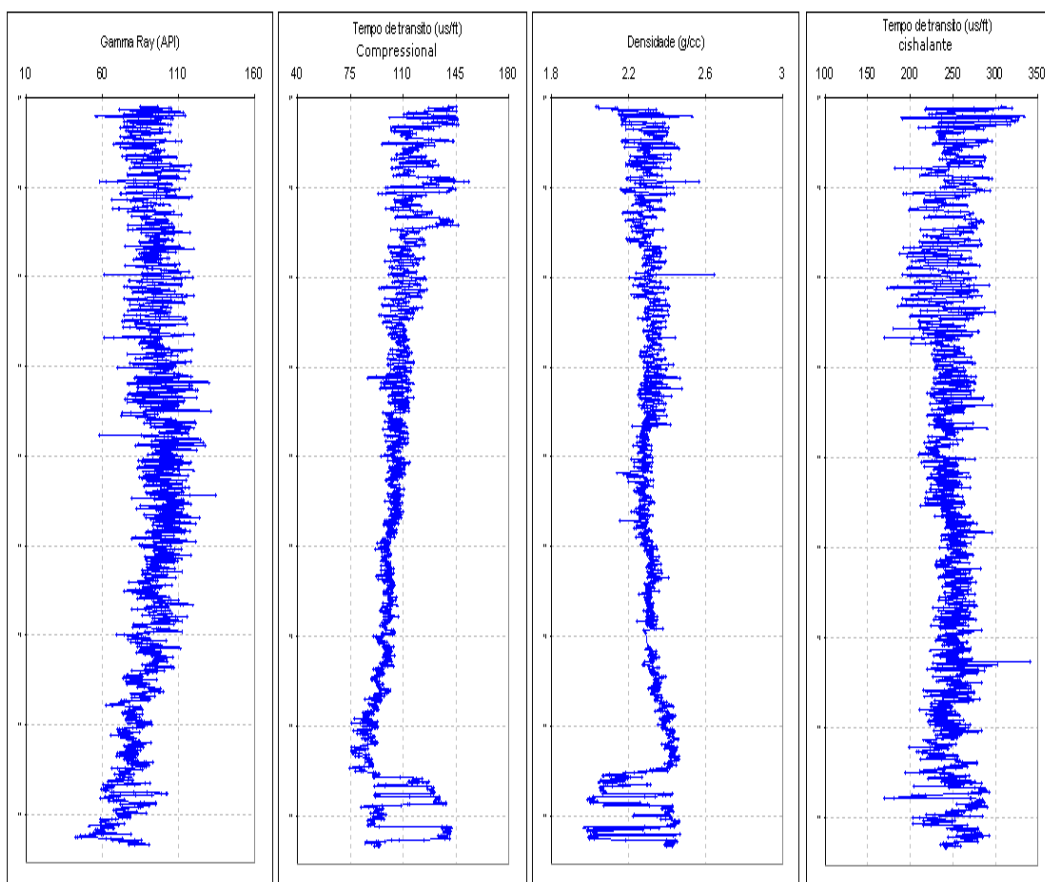


Figura 5.1. Dados de perfis medidos no poço PUC-1: GR, Densidade, Tempo de transito compressional e de cisalhante.

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

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

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

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

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

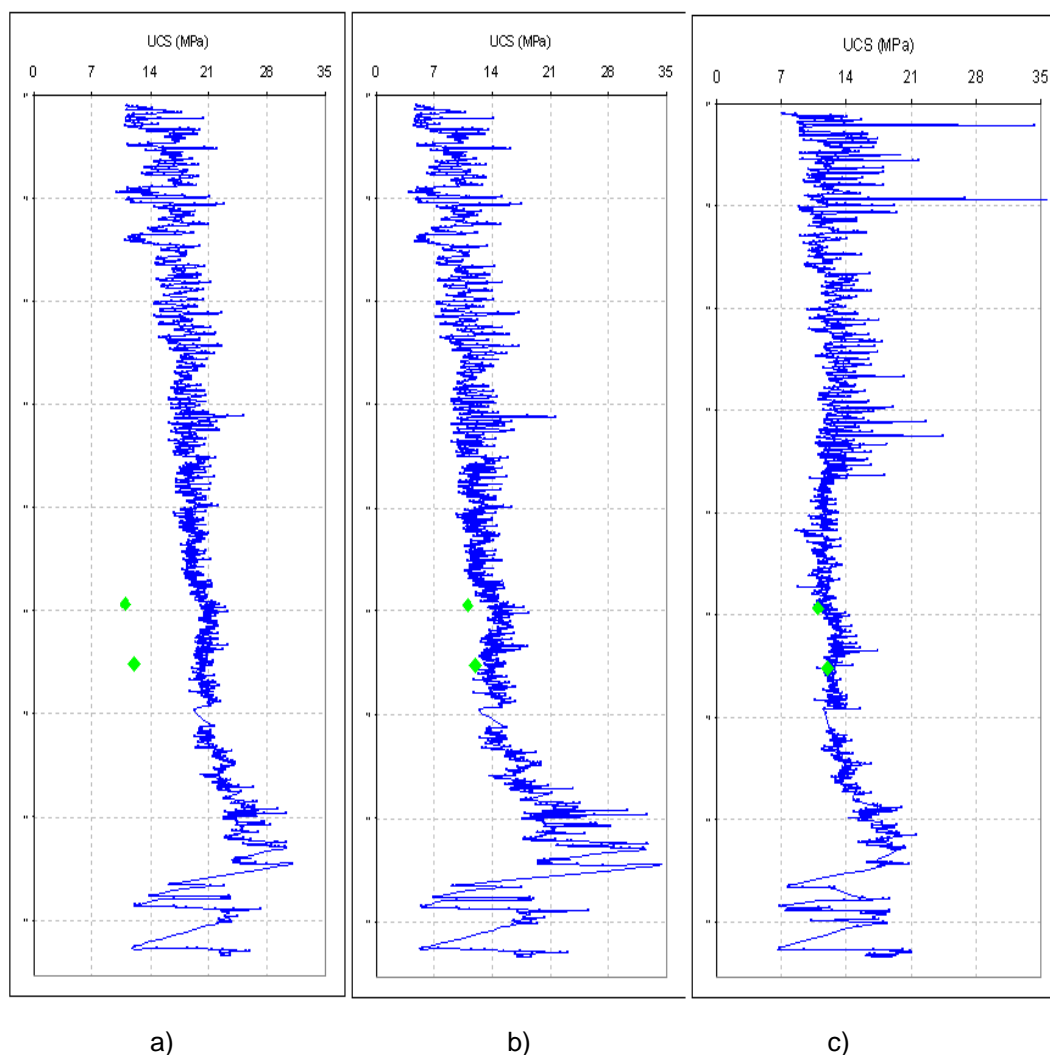


Figura 5.2 – Perfis de UCS calculados para os folhelhos do poço PUC-1. a). Lal (eq. 4.5)  
b). Chandong (eq. 4.2). c). Horsrud (eq. 4.9).

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

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

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

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

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

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

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

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

Onde:

$\theta'$  = ângulo de atrito (graus)

$c'$  = coesão (MPa)

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

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

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

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

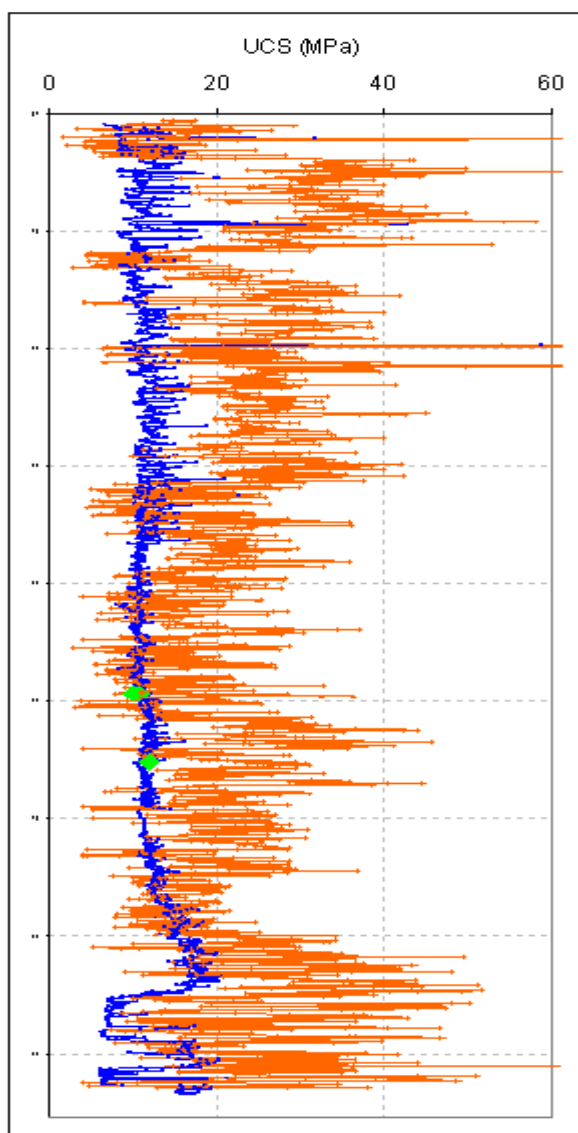


Figura 5.3. Comparação dos perfis de resistência à perfuração e a UCS para o poço PUC-1 e os pontos de calibração.

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

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

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

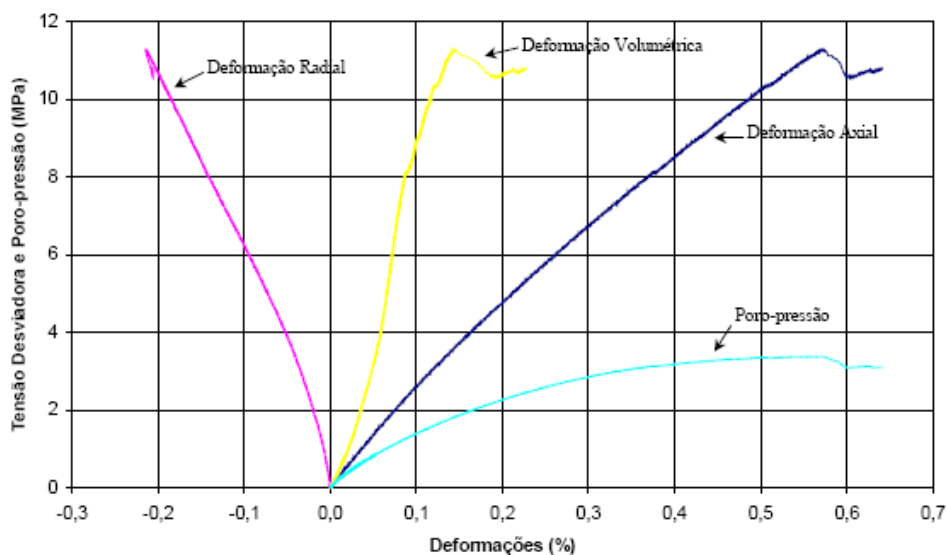


Figura 5.4. Resultado de um ensaio triaxial não drenado para o folhelho sob estudo a uma pressão de confinamento de 9MPa (fase de cisalhamento) (Muniz, 1998).

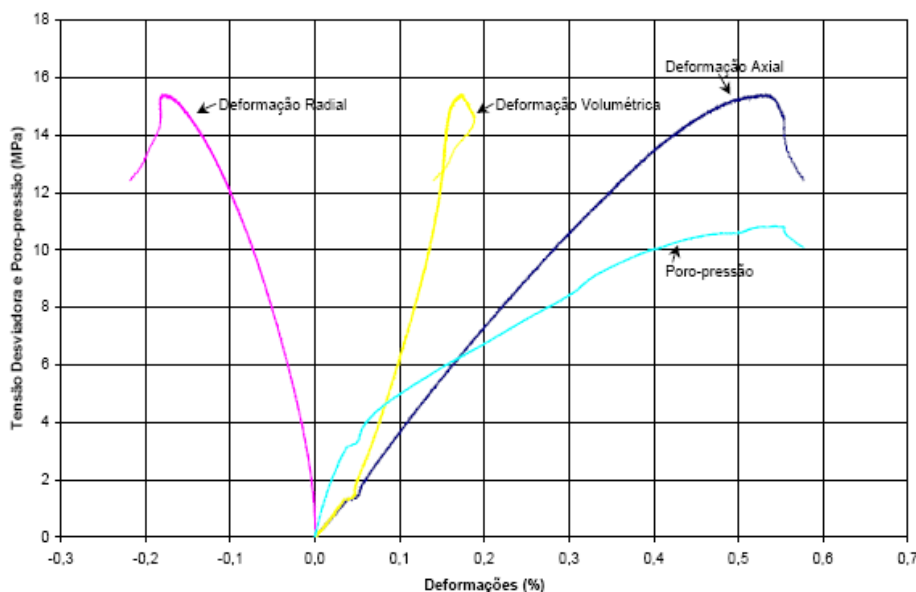


Figura 5.5. Resultado de um ensaio triaxial não drenado para o folhelho sob estudo a uma pressão de confinamento de 20MPa (fase de cisalhamento) (Muniz, 1998).

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

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

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

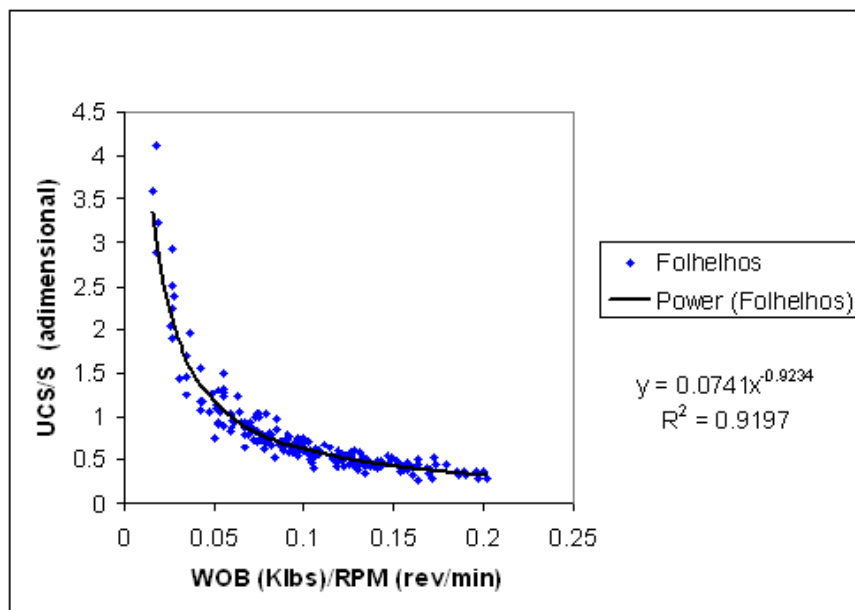


Figura 5.6. Correlação da relação da UCS/S e a relação da WOB/RPM para folhelhos do poço PUC-1.

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

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



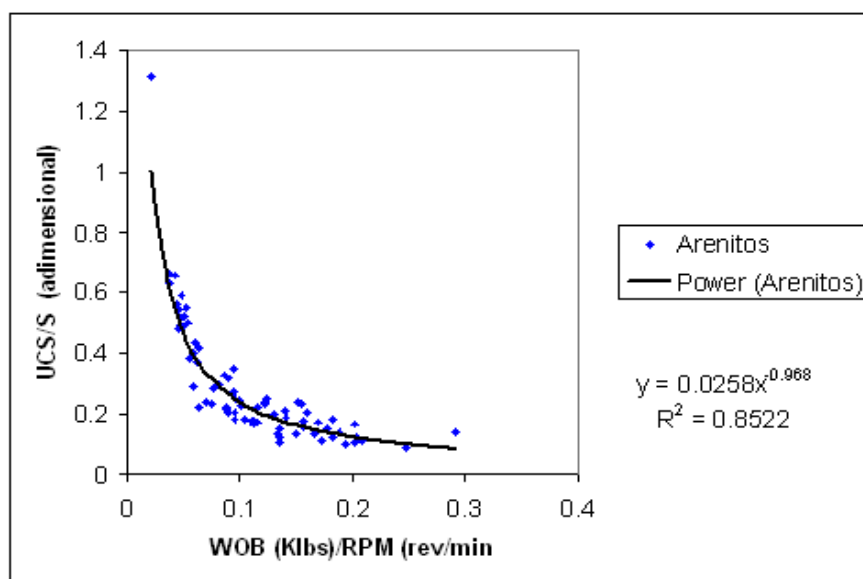


Figura 5.7. Correlação da relação da UCS/S e a relação da WOB/RPM para arenitos do poço PUC-1.

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

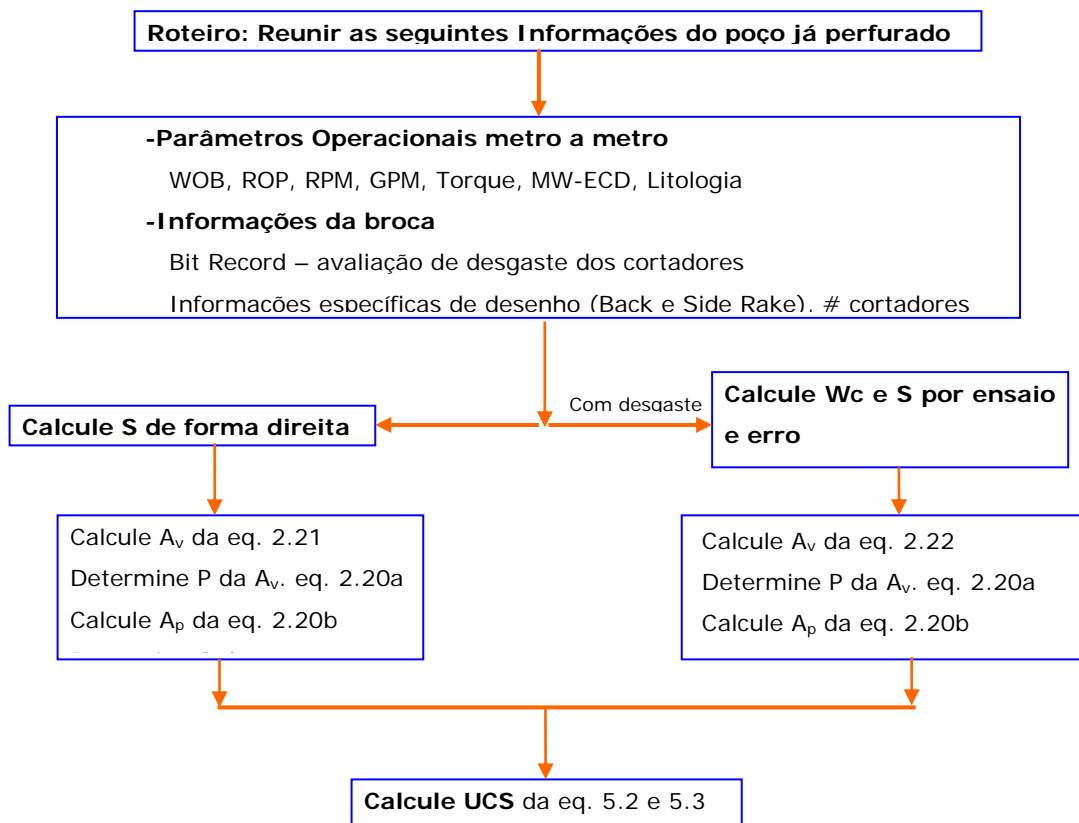


Figura 5.8. Fluxo de trabalho proposto nesta pesquisa para o cálculo da UCS a partir dos parâmetros da perfuração.

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

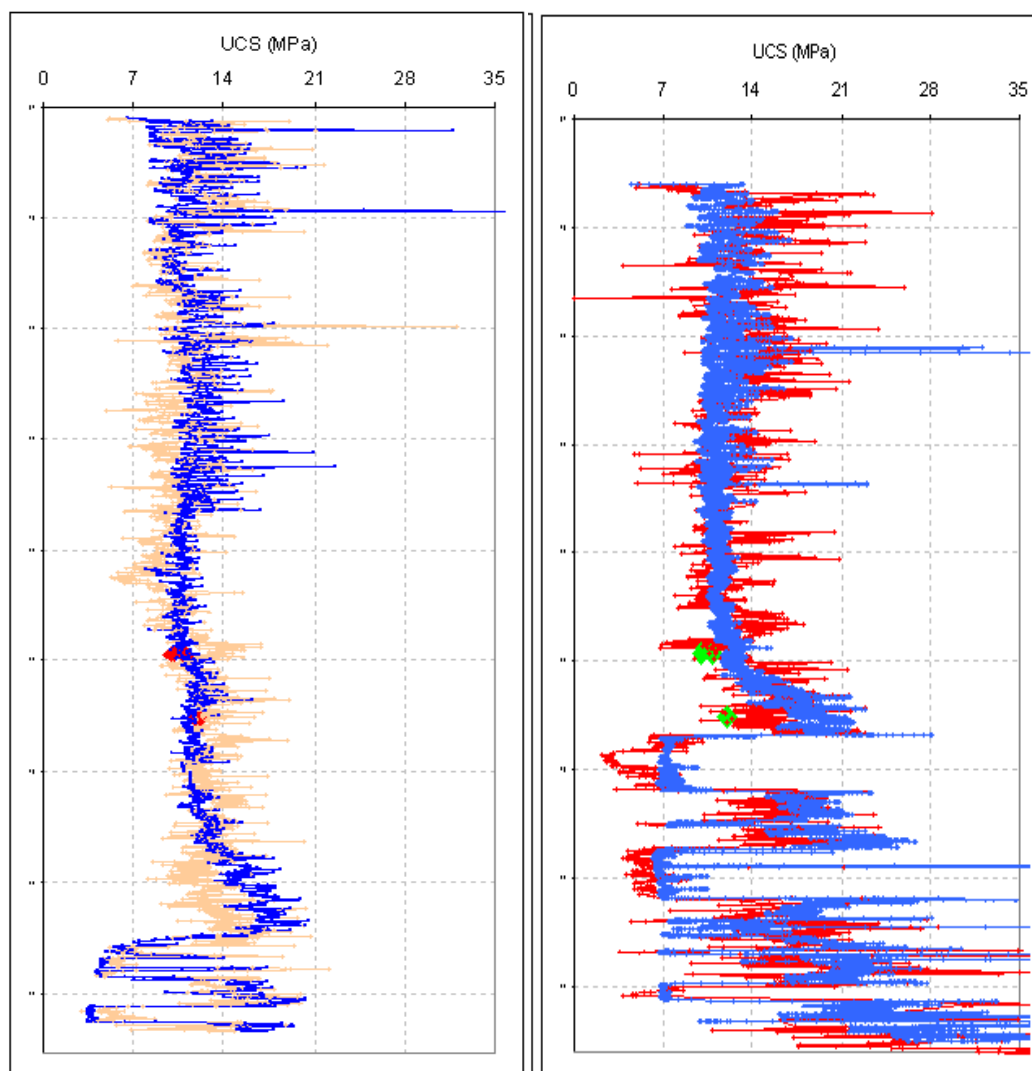


Figura 5.9. (à direita) Comparação dos perfis de UCS estimados de dados de perfuração e de perfis (azul) para o poço PUC-1. (à esquerda) Comparação dos perfis de UCS de dados de perfuração (vermelho) e de perfis (azul) para o poço PUC-2.

### 5.3.

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

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

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

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

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