

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

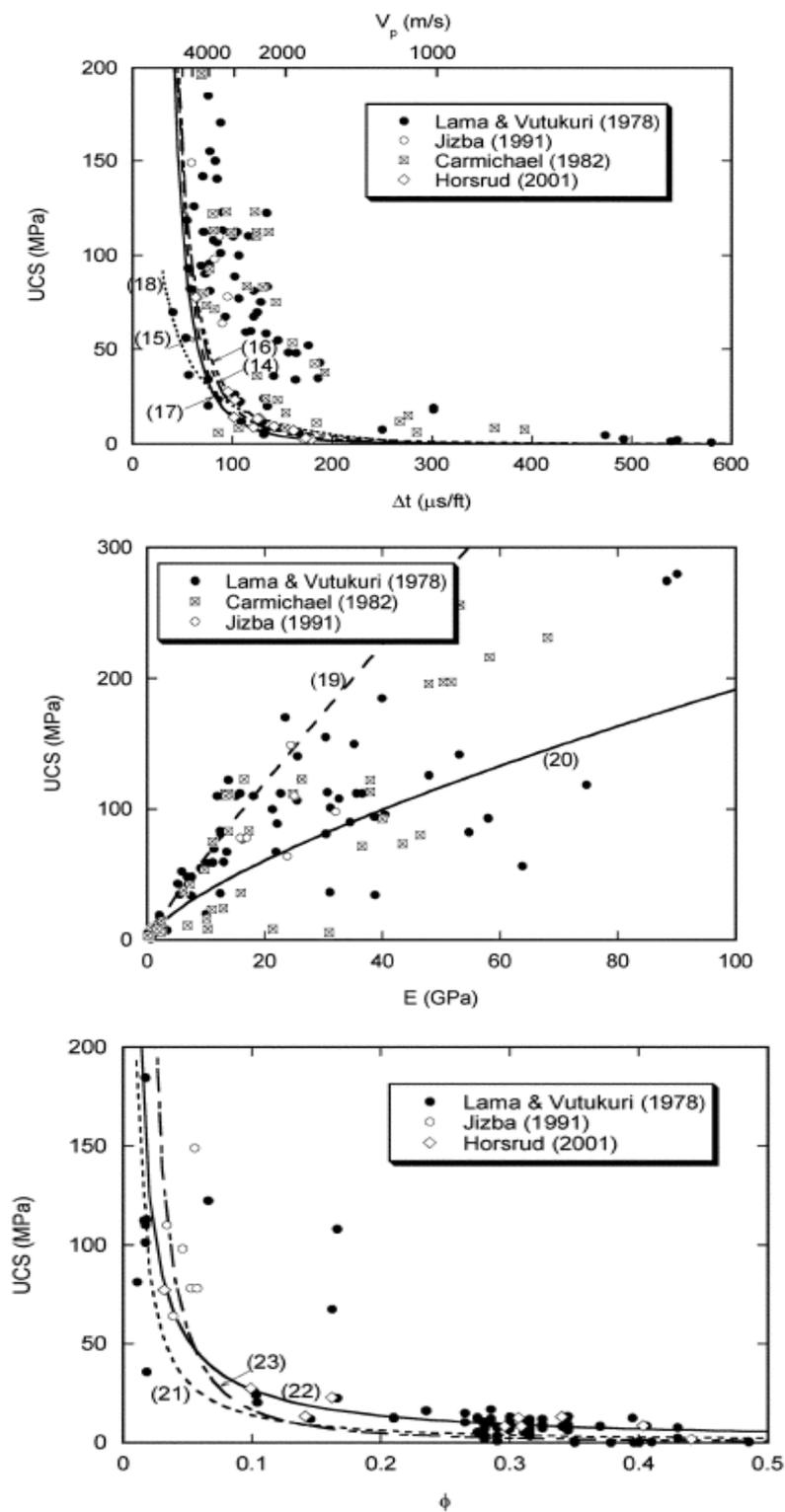


Figura 3.1. Dados de UCS de ensaios de laboratório para folhelhos como função: a) Tempo de transito Δt , b) modulo de Young, E c) Porosidade, ϕ ; sobrepostas com algumas das correlações empíricas listadas na Tabela 3.1. (Chandong, 2004).

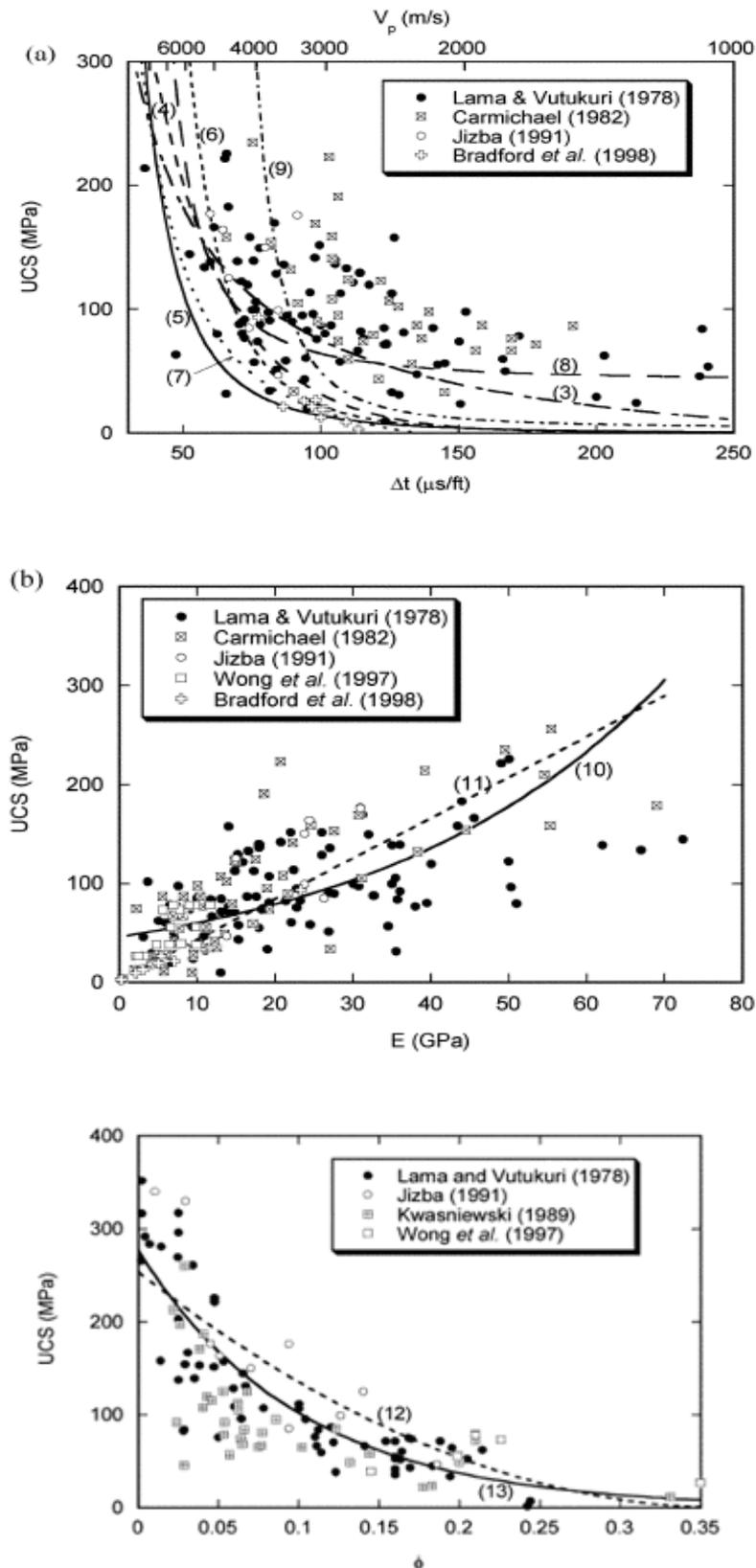


Figura 3.2. Dados de UCS para arenitos como função: a) Tempo de transitio Δt , b) modulo de Young, E c) Porosidade, ϕ ; sobrepostas com algumas das correlações empíricas listadas na Tabela 3.2. (Chandong, 2004).

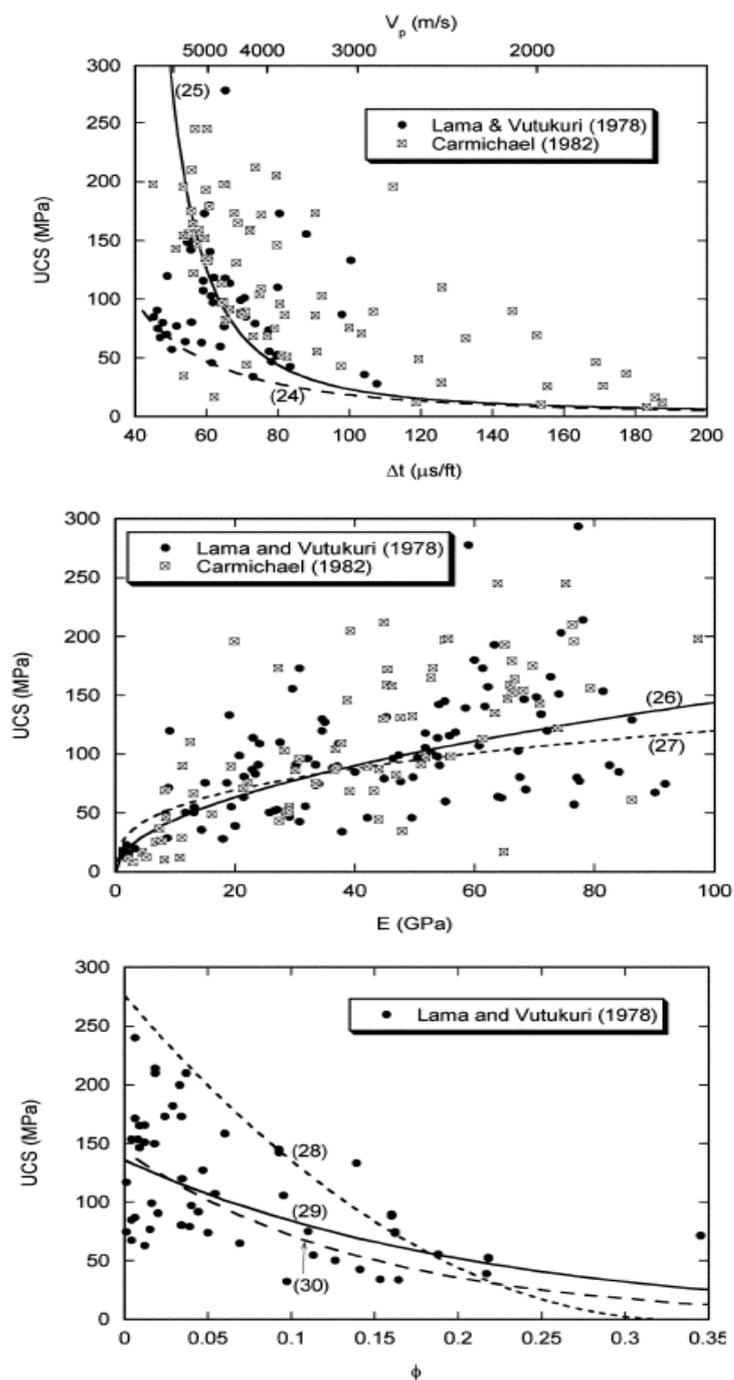


Figura 3.3. Dados de UCS para carbonatos (calcários e dolomitos) como função: a) Tempo de transitio Δt , b) modulo de Young, E c) Porosidade, ϕ ; sobrepostas com algumas das correlações empíricas listadas na Tabela 3.3. (Chandong, 2004).

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

3.2.

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

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

Tabela 3.1. Relações empíricas entre UCS e outras propriedades físicas para Folhehos, unidades Δt : $\mu\text{s}/\text{ft}$, E: GPa e ϕ : fração. (Chandong, 2004).

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

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

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

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

Tabela 3.3. Relações empíricas entre UCS e outras propriedades físicas para carbonatos, unidades Δt : $\mu\text{s}/\text{ft}$, E: GPa e ϕ : fração. (adaptado de Chandong, 2004).

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

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

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

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