

VICTOR GUARNIERI

**SLIM WELLS: UMA ANÁLISE DA METODOLOGIA E TECNOLOGIAS
APLICADAS**

São Paulo
2014

VICTOR GUARNIERI

**SLIM WELLS: UMA ANÁLISE DA METODOLOGIA E TECNOLOGIAS
APLICADAS**

Trabalho de Formatura em Engenharia de
Petróleo do curso de graduação do
Departamento de Engenharia de Minas e de
Petróleo da Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo

Orientador: Prof. Dr. Marcio Yamamoto

São Paulo
2014

*“Den sterkeste mann i verden, det er han som står mest alene”
Dr Tomas Stockmann - En folkefiende
Henrik Ibsen, 1882.*

RESUMO

Durante o ciclo de vida de um campo de petróleo, existem diversas etapas a ser percorridas para o desenvolvimento e produção de uma área, sendo uma das principais a perfuração de poços. Esta etapa é uma das mais custosas para as companhias, logo existe uma grande pressão para a realização dessas atividades com redução de custos, sem grandes perdas técnicas ou de segurança.

Uma metodologia proposta para atingir tal objetivo é o projeto de poços "Slim", que consistem em, resumidamente, perfurar e revestir o poço com diâmetros menores em suas seções superiores, sem afetar a última seção, responsável pela produção do óleo e/ou gás do campo.

O presente trabalho visa um maior entendimento das particularidades dessa metodologia, por meio de uma pesquisa bibliográfica sobre por que se reveste um poço e os métodos de projeto que podem ser utilizados, além de brevemente descrever algumas tecnologias que amparam o uso de "slim well". Além disso, um estudo de caso servirá para que possa ser quantificado o possível ganho com a utilização da nova metodologia.

ABSTRACT

During a petroleum field life cycle, there are several phases in order to develop and produce that area and one of the most important is the well drilling phase. This phase is one of the most costly for companies, so there's a huge pressure to perform these activities with reduced costs without great technical or safety losses.

A proposed methodology to achieve that objective is project "Slim" well, that consist of, briefly, drill and case the well with smaller diameters on the upper sections, without changing the last section, responsible for the oil and/or gas production.

This thesis seeks a better understanding of the particularities of this method by a bibliographic research of why wells are cased and the methods used to project them, but also briefly describing some technologies that made possible the "Slim wells". Moreover, a case study will be used to quantify how much could be theoretically saved by employing it.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO.....	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1	GEOPRESSÕES.....	2
2.1.1	<i>Métodos para determinação das geopressões.....</i>	<i>8</i>
2.1.2	<i>Pressão de fraturamento</i>	<i>8</i>
2.1.3	<i>Aplicação das geopressões</i>	<i>11</i>
2.2	PROCESSO PADRÃO DE REVESTIMENTO.....	12
2.3	SLIM WELL	15
2.4	TECNOLOGIAS.....	17
2.4.1	<i>Flow diversion shoe.....</i>	<i>17</i>
2.4.2	<i>Drilling agitator tool.</i>	<i>18</i>
2.4.3	<i>Bi-center bits.....</i>	<i>18</i>
3	METODOLOGIA	19
3.1	PARÂMETROS	19
3.2	CASO ESTUDADO.....	20
4	RESULTADOS	22
5	CONCLUSÕES.....	25
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	27

1 INTRODUÇÃO

Durante o completo projeto e execução da exploração de um campo de petróleo, existem diversas etapas a ser percorridas, como as fases de obtenção licenças prévias, de dados geológicos e geofísicos, perfuração, dentre outras.

A engenharia de perfuração, desde seu planejamento até a execução em campo, é um complexo campo da engenharia de petróleo, exigindo a boa integração de diversas áreas como a geologia, geofísica, resistência dos materiais, engenharia de reservatórios e produção, além das incertezas inerentes às disciplinas citadas e das dificuldades e imprevistos de campo.

Como objetivo, a engenharia de perfuração tem a aparentemente simples missão de perfurar um poço de milhares de metros de profundidade, com segurança (evitando trágicos e onerosos acidentes), atingindo os objetivos técnicos requeridos pelas áreas de produção e reservatórios e com o menor custo possível. Esse é o desafio do engenheiro de perfuração em seu dia-a-dia.

A etapa de execução da perfuração é uma das mais dispendiosas [1], devido aos altos custos de aluguel de equipamentos, custos logísticos e de postergação do início da produção e, assim, início do retorno do capital investido para a companhia.

Assim, buscam-se cada vez mais novas tecnologias e metodologias para auxiliar o engenheiro de perfuração a atingir seus objetivos, especialmente no que toca a redução de custos, mas preferencialmente sem perigosos detrimientos às áreas técnicas e de segurança.

1.1 OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é o estudo de uma metodologia de projeto relativamente recente, aplicada para a engenharia de perfuração, que busca ganhar não somente tempo operacional, mas também reduzir custos de material, aluguéis e de tratamento de resíduos.

A metodologia "Slim Well", consiste em, resumidamente, reduzir os diâmetros de revestimento de um poço em sua seção superior e intermediária, sem redução na seção de produção.

O trabalho incluirá uma análise econômica, quantificando a redução de custos básicos em um estudo de caso, além de explorar brevemente algumas tecnologias utilizadas para contornar as dificuldades advindas da mudança de método de execução. Não será analisada a variação da segurança do projeto com essas alterações.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 GEOPRESSÕES

As geopressões podem ser a fonte de grandes complicações durante as operações de perfuração. Se as geopressões (pressão de poros, pressão litostática e pressão de fraturamento) não forem bem avaliadas, problemas como perda de circulação, blowouts, prisão diferencial, instabilidade do poço e custos excessivos podem ocorrer. Maiores detalhes sobre a definição de geopressões podem ser encontradas em Adams [1] e Bourgoyne [2].

Todo o processo de planejamento de um poço é afetado pelas pressões da formação, como é possível verificar na figura 1. Mesmo assim, é difícil obter valores precisos das pressões e indicar precisamente os locais de existência de pressões anormais.

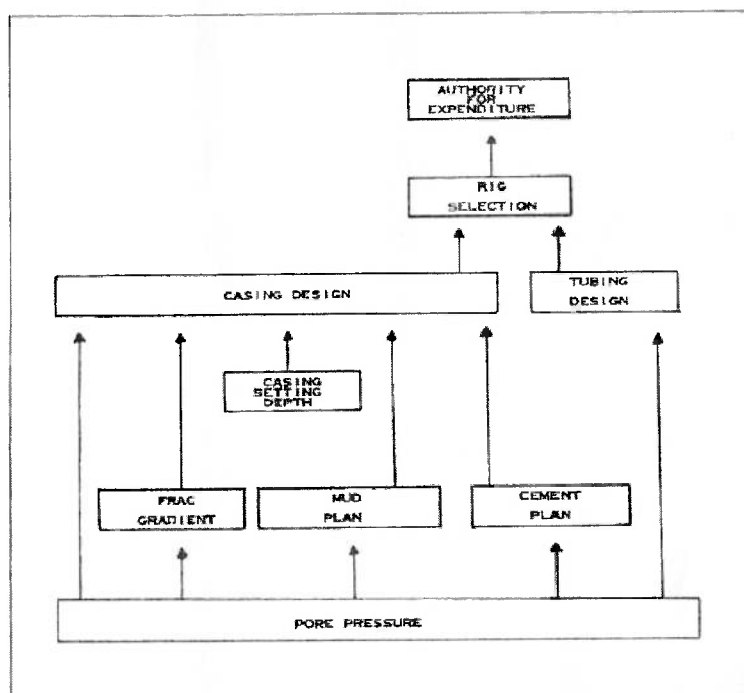


Figura 1: Influência das geopressões nas etapas do projeto de poço.[1]

A pressão litostática, também conhecida como pressão de soterramento, é gerada pelo peso das camadas rochosas acima da camada em análise [1]. O cálculo da pressão de

soterramento pode ser realizado utilizando a equação 1. Um valor médio para o gradiente de soterramento é de 1,0 psi/ft, assumindo que as rochas tenham uma densidade média de 19,23 lb/gal.

$$P_{ov} = \sum(\rho_{b,i} * \Delta H_i) * g \quad (1)$$

Sendo P_{ov} – pressão de soterramento, em Pa;

ρ_b – densidade da camada rochosa, em kg/m³;

ΔH – espessura da camada rochosa, em m ;

g – gravidade, em m/s².

Para o cálculo da densidade, pode ser aplicada a equação 2.

$$\rho_b = \phi * \rho_{fl} + (1 - \phi) * \rho_m \quad (2)$$

Sendo ϕ – porosidade da rocha, adimensional;

ρ_{fl} – densidade do fluido, em kg/m³;

ρ_m - densidade da matriz rochosa, em kg/m³.

A pressão hidrostática (P_h) corresponde a pressão exercida por uma coluna de fluidos, podendo ser calculada pela equação 3. Os fluidos podem variar de água fresca, com densidade de 8,33 lb/gal (0,433 psi/ft) até água salgada com densidade de 9,0 lb/gal (0,465 psi/ft), mas os valores mudam de acordo com a região. O gradiente de pressão hidrostática é afetado pela concentração de sólidos dissolvidos e gases na coluna de fluido, além dos diferentes gradientes de temperatura.

$$P_h = \rho_{fl} * g * H \quad (3)$$

Sendo H – a profundidade, em m.

A pressão de poros corresponde à pressão exercida pelo fluido dentro dos poros da rocha, podendo ser classificada como *anormalmente baixa* ($P_p < P_h$), *normal* ($P_p = P_h$) ou *anormalmente alta* ($P_p > P_h$).

A relação entre a pressão de poros e as outras pressões está explicitada na equação 4, a saber:

$$P_{ov} = P_p + \sigma \quad (4)$$

Sendo P_p - pressão de poros, em Pa;

σ - A tensão efetiva, em Pa.

Em ambientes de pressão normal, a tensão efetiva suporta a carga litostática pelo contato entre grãos, na matriz rochosa. Qualquer redução na tensão efetiva transfere parte da carga litostática para o fluido contido nos poros, gerando uma região de pressões acima do normal.

Podemos considerar uma formação de pressão normal de poros como um sistema hidráulico aberto, no qual há comunicação entre as diferentes camadas. A Figura 2 apresenta um modelo esquemático de uma formação de pressão normal de poros, sendo que na parte direita da figura, há um recipiente preenchido com fluido e uma rocha porosa. Uma força vertical aplicada sobre o representa a pressão de soterramento. A pressão de poros normal é representada pela pressão hidrostática da coluna no lado esquerdo da figura. A altura da coluna do fluido representa a profundidade da formação abaixo da superfície terrestre.

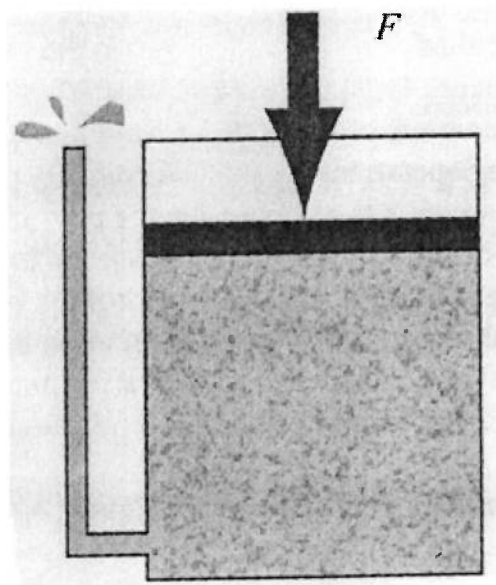


Figura 2. : Esquemático de um sistema hidráulico aberto que representa pressão normal de poros [5].

Em formações com pressões anormais não existe a total liberdade de comunicação, pois havendo tal liberdade, as altas pressões seriam rapidamente dissipadas e revertidas a pressões normais. A Figura 3 apresenta um esquemático de uma formação com pressão anormalmente alta. O modelo é similar ao caso anterior, com excessão de uma válvula que restringe o fluxo. Uma vez que o fluido da formação não pode escoar para dentro do tubo por causa da válvula, é esperado que a pressão de poros seja mais alta que no caso anterior.

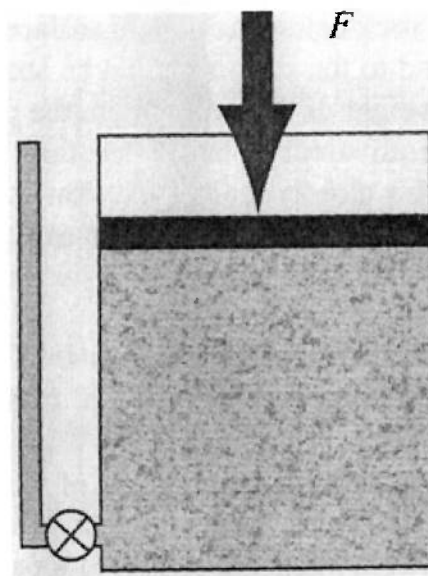


Figura 3 : Esquemático de um sistema hidráulico fechado que representa a pressão anormalmente alta de poros [5].

Assim, é necessário que exista um mecanismo para a selagem dessa alta pressão. Alguns tipos de selos estão citados na figura 4.

Suggested types of formation pressure seals (after Fertl and Timko, 1972)		
Type of seal	Nature of trap	Examples
Vertical	massive shales and siltstones massive salts anhydrite gypsum limestone, marl, chalk dolomite	Gulf Coast, U.S.A., Zechstein in North Germany, North Sea, Middle East, U.S.A., U.S.S.R.
Transverse	faults salt and shale diapirs	worldwide
Combination of vertical and transverse		worldwide

Figura 4: Tipos de selos para zonas de sobrepressões. [3]

Assim, pode-se verificar que diversas litologias pouco permeáveis/impermeáveis (folhelhos, siltitos, evaporitos, etc) ou estruturas (diápiros salinos e falhas) podem atuar como selos, separando zonas de pressão normal das com pressão anormal.

Diversos mecanismos podem gerar sobrepressão em camadas rochosas, sendo geralmente a combinação de alguns dos fatores citados abaixo:

- Estrutura do reservatório

Em reservatórios com estruturas como anticlinais, a pressão da formação será normal para a zona mais profunda, sendo transmitida para as zonas menos profundas utilizando o gradiente do fluido do reservatório (densidade menor que a da água), gerando sobrepressões, como exemplificado na figura 5.

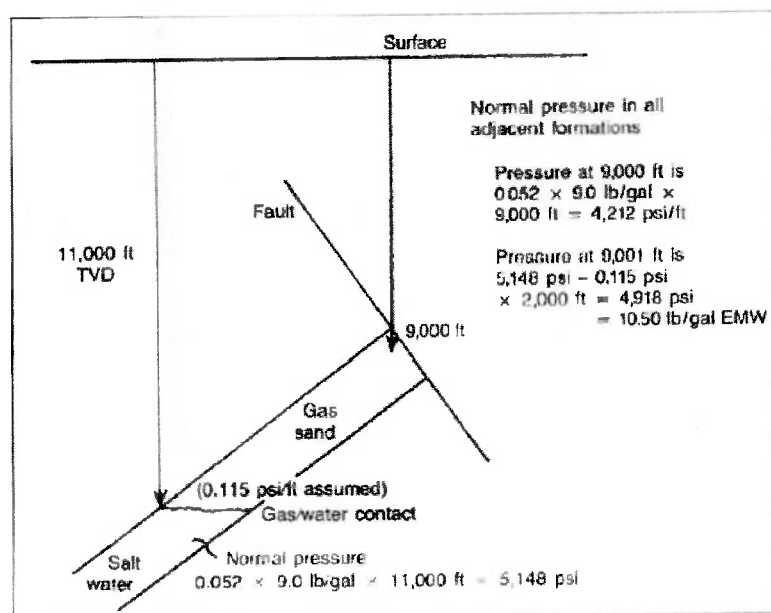


Figura 5: Pressão anormalmente alta causada pela estrutura do reservatório

[1]

- Pressurização do reservatório

Reservatórios podem ser pressurizados pela comunicação hidráulica com camadas mais profundas/pressurizadas. Tal comunicação pode ocorrer utilizando caminhos formados pela má cimentação de poços e através de zonas permeáveis de falha como, por exemplo, nos exemplos apresentados na Figura 6.

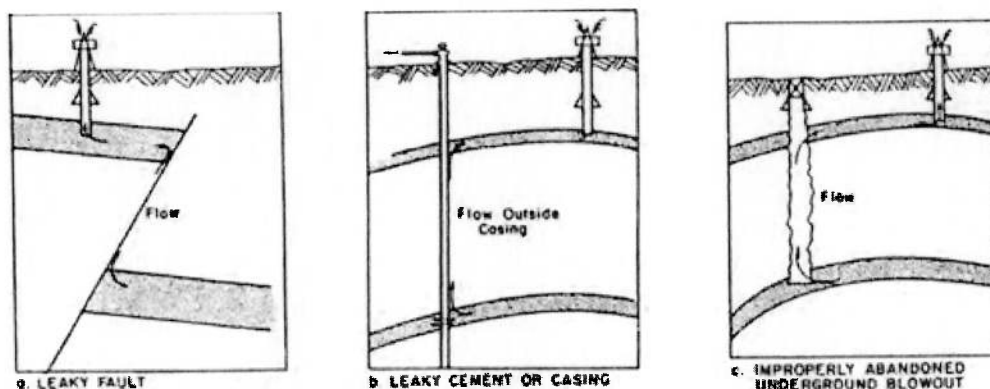


Fig. 6.9—Situations where upward fluid migration can lead to abnormally pressured shallow formations.

Figura 6: Exemplos de reservatórios com pressão anormalmente alta[2].

- Taxa de sedimentação e ambiente deposicional

Durante a compactação de uma camada sedimentar, ocorre a gradual expulsão de água de seus poros pela pressão litostática exercida pelas camadas superiores, reduzindo assim a porosidade conforme os sedimentos são soterrados. Em um ambiente deposicional com uma elevada taxa de deposição ou com permeabilidade reduzida, a expulsão da água pode não ser suficiente para o equilíbrio das pressões, gerando zonas de pressão acima do normal.

- Diagênese de argilas

Em diversas camadas rochosas é possível observar a transformação da montmorilonita, um argilomineral, em illita, sendo dependente da temperatura. Tal alteração é importante pois reduz o volume da matriz rochosa (a illita é mais compacta) e aumenta a quantidade de água nos poros (a transformação ocorre com expulsão de água da montmorilonita). Assim, se o sistema possuir baixa permeabilidade, impedindo a redistribuição da água (e assim da pressão), gera-se uma zona de alta pressão.

- Outros

Diversos outros fatores podem gerar altas pressões, como a diagênese de outros minerais, fenômenos osmóticos, formação de diápiros salinos, etc.

2.1.1 Métodos para determinação das geopressões

Existem alguns métodos utilizados para a obtenção da pressão de poros de uma camada, sendo divididos em dois grupos: baseado em perfilagem e baseado em parâmetros de perfuração.

Para os métodos baseados na perfilagem, são utilizados os perfis de condutividade elétrica, sônico e de densidade, mas qualquer perfil que dependa primariamente da porosidade pode ser utilizado. A metodologia baseia-se no fato que as zonas com pressão anormal possuem também uma porosidade anormal para a profundidade em que estão, pois possuem mais água que o normal. Assim, é feita uma comparação com a reta de tendência da propriedade medida, extrapolada para a profundidade em questão [2].

Para os métodos baseados em parâmetros de perfuração são utilizadas equações empíricas relacionando diversos fatores como peso da broca ou taxa de penetração, visando realizar uma análise similar à realizada com a perfilagem, buscando a região em que há o desvio da reta de tendência da bacia perfurada. Tal análise pode ser realizada durante a perfuração (LWD – Logging While Drilling).

Cabe lembrar que todos os métodos possuem suas limitações e hipóteses a ser verificadas, tendo prós e contras, sendo tais informações fora do escopo deste trabalho.

2.1.2 Pressão de fraturamento

A pressão de fraturamento corresponde à pressão limite no interior do poço, que, sendo superada, causa o fraturamento da rocha exposta ao fluido de perfuração.

O conhecimento de tal limite se faz importante pois durante a perfuração o “peso”¹ do fluido de perfuração é aumentado, visando manter o poço sob controle (ou seja, com $P_{fluido} > P_p$, evitando um influxo indesejado, conhecido como kick (para maiores detalhes sobre kick, veja Bourgoyne et al., 1986). Porém, ao aumentar o peso do fluido observando as camadas a ser perfuradas, a pressão também aumenta nas formações da zona de poço

¹ No jargão da Indústria, o termo “peso do fluido de perfuração” refere-se a densidade do fluido geralmente medido em unidades de campo ppg (*pound per gallon*)

aberto (sem revestimento). Essa pressão deve ser menor que a de fratura, com coeficiente de segurança.

Assim, pode-se concluir que existe uma profundidade máxima na qual o poço pode ser perfurado sem a necessidade de revestir as camadas superiores. Tal conclusão será discutida posteriormente.

Para compreender a pressão de fraturamento, podemos partir da lei de Hooke, a saber:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \mu \frac{\sigma_y}{E} - \mu \frac{\sigma_z}{E} \quad (4)$$

Em que: E, módulo de Young;
 μ , coeficiente de Poisson.

Segundo Bourgoyne, para rochas comprimidas pelo processo de sedimentação, a deformação horizontal ε_x é zero, e as tensões horizontais σ_x e σ_y são aproximadamente iguais. Assim:

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_H = \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_z \quad (5)$$

Em que: σ_H , a tensão horizontal.

Os valores para o coeficiente de Poisson de rochas sedimentares consolidadas ficam entre 0,18 e 0,27, causando uma transmissão de tensão de 22% a 37% da tensão vertical para a horizontal [2]

Claro que existem tipos rochosos onde tais valores são diferentes, uma vez que foi assumido, pela lei de Hooke, comportamento elástico das rochas, e não plástico, por exemplo. Tensões advindas de deformações geológicas, por exemplo, podem alterar esses campos de tensões.

Existem diversos modelos, mais ou menos complexos, que tentam estimar esse valor, geralmente baseados no fato que a fratura sempre se opõe a direção da menor tensão, por exigir menor esforço. Assim, para a abertura da fratura é necessário sobrepor a tensão atuante e a pressão de poros, conforme exibido na figura 7.

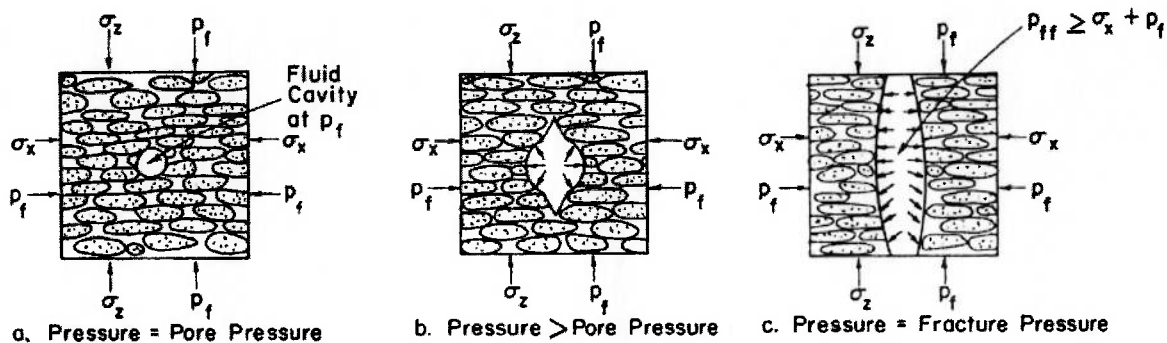


Figura 7: Mecanismo de abertura de fraturas pela pressão do poço. [2]

Um teste realizado sempre após a cimentação de um revestimento recém instalado é o leakoff test, conhecido também como teste de absorção, utilizado para verificar se o revestimento, o cimento e as formações logo abaixo do revestimento podem suportar as pressões necessárias para a perfuração da nova fase.

Um leakoff test é geralmente executado com o BOP (BlowOut Preventer) fechado e bombeando para o poço com vazão constante até atingir a pressão necessária para o teste ou até que haja perda do fluido, causando um desvio na linha de tendência do teste. Neste momento, a bomba é desligada e a pressão observada por pelo menos 10 minutos, a fim de determinar a taxa de declínio da pressão, visando evidenciar algum vazamento. O resultado típico de um leakoff test é o mostrado na figura 8.

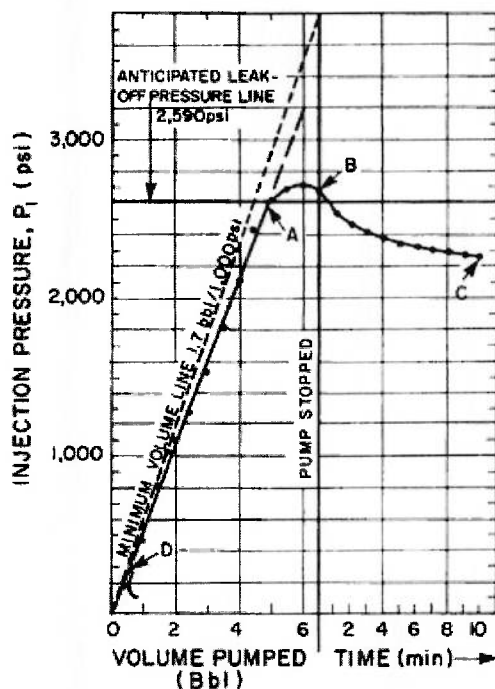


Figura 8: Resultado típico de um leakoff test.[2]

O ponto A corresponde à pressão em que a formação começa a ser invadida pelo fluido, e é a chamada pressão de leakoff, utilizada nos cálculos da pressão de fraturamento. O bombeamento é mantido até que se confirme que houve a formação de uma fratura. O ponto B corresponde ao ponto de parada das bombas.

2.1.3 Aplicação das geopressões

O conhecimento das geopressões são importantes em um projeto de poço pois fornecem valiosas informações sobre o estado de tensões no local a ser perfurado ou já em perfuração. Com a transformação dos valores obtidos (pressão de poros e pressão de fraturamento) para os gradientes das mesmas, é possível obter um gráfico de pressão por profundidade, conforme o exibido na figura 9.

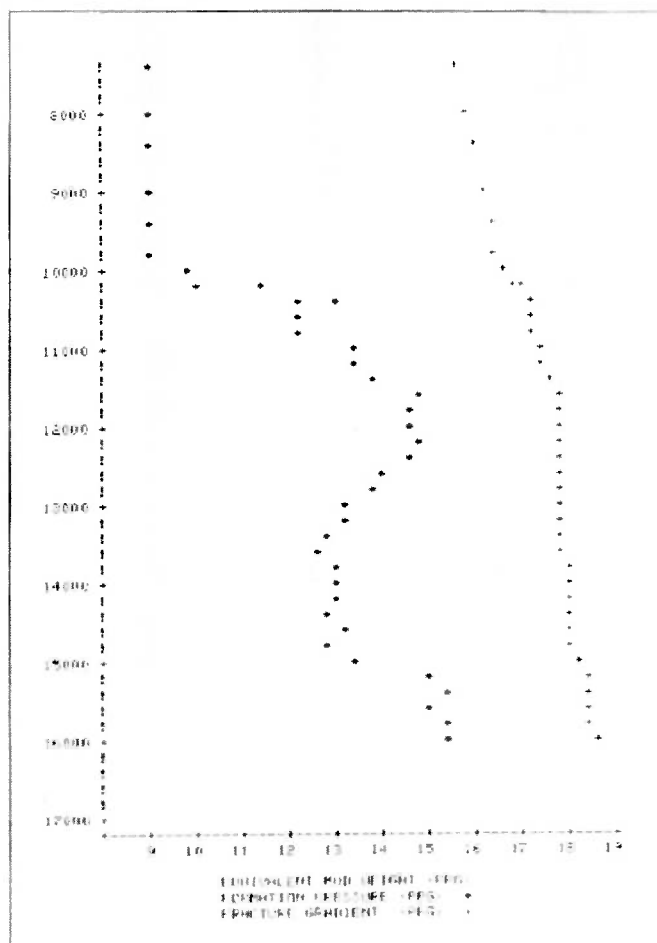


Figura 9: Gráfico dos gradientes de pressão em função da profundidade[1]

Esse gráfico possui a informação da pressão mínima e máxima que deve ser aplicada no poço, a fim de manter a operação segura e sem gastos desnecessários. Com esse gráfico são escolhidos os pesos do fluido de perfuração, sempre observando se será

suficiente para manter o poço sob controle (maior que o gradiente da pressão de poros) e se não causará fraturamento das formações (menor que o gradiente da pressão de fraturamento), causando perda de circulação e de integridade das formações perfuradas.

Com o planejamento dos pesos dos fluidos, é possível alocar as fases de revestimento necessárias e suas profundidades.

2.2 PROCESSO PADRÃO DE REVESTIMENTO

Após as etapas de perfuração e, eventualmente, de perfilagem, é realizada uma operação conhecida como revestimento de poço. Essa operação tem como objetivo a prevenção de problemas estruturais de estabilidade no poço e a prevenção do influxo de fluidos da formação para o poço, além de que é no topo dos revestimentos onde são instalados o BOP ou a árvore de natal.

A operação de revestimento consiste, basicamente, na instalação de tubos metálicos conectados uns aos outros por roscas, que serão posteriormente cimentados contra a parede do poço. Os tubos metálicos utilizados (chamados de revestimento) são geralmente padronizados pela API, sendo divididos em categorias de resistência, dimensões e qualidade do material, além de ter a rosca avaliada. A instalação é realizada pela sonda de perfuração, sem a necessidade de equipamentos especiais.

Segundo Bourgoyne, o custo médio de revestimentos em um projeto de poço é de 18% do total. Assim, com o aumento da profundidade dos poços e das dificuldades inerentes a alguns campos, torna-se viável a utilização de tecnologias novas, visando uma economia de material e tempo, com redução em nível aceitável do coeficiente de segurança.

Um esquema de revestimentos em um poço vertical pode ser visto na figura 10:

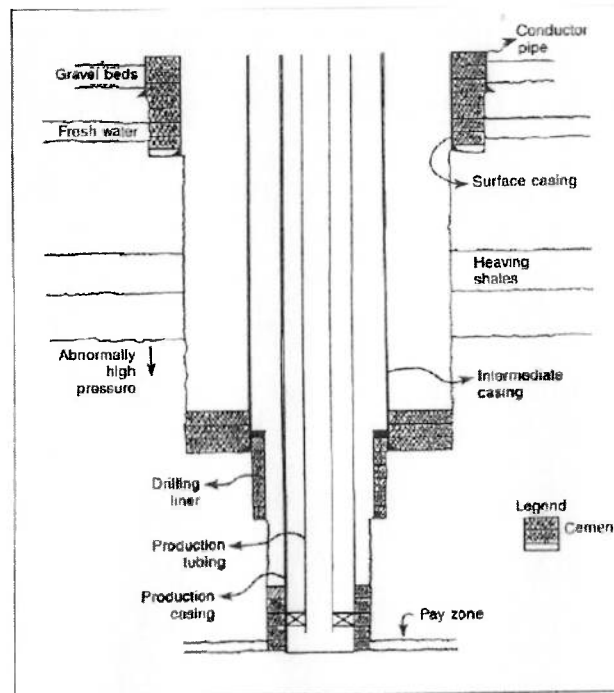


Figura 10: Esquema típico de revestimento de um poço [1]

Um poço geralmente possui quatro conjuntos de revestimentos com diâmetros e finalidades distintos, a saber:

- **Condutor:** é o primeiro revestimento a ser instalado no poço, possuindo o maior diâmetro, geralmente 30", com comprimento de 100 a 300 pés. Sua principal função é evitar problemas de estabilidade das camadas mais superficiais, geralmente inconsolidadas (e por isso, frágeis).
- **Superfície:** Segundo revestimento a ser instalado, de diâmetro inferior ao condutor. Suas principais funções são o isolamento de zonas superficiais frágeis e a proteção de aquíferos, além de permitir a instalação do BOP.
- **Intermediário:** O revestimento mais longo, utilizado para isolar zonas problemáticas (salinas ou com pressões anormalmente altas, por exemplo).
- **Produção:** Último revestimento a ser instalado, isola a zona de produção das outras zonas, além de proteger os equipamentos e a coluna de produção.
- **Liner:** Liners são trechos de revestimentos utilizados com a mesma função de uma fase de revestimento, apenas com a diferença de que o liner não chega a superfície, sendo fixado em outra fase de revestimento.

Um engenheiro, de posse da figura 9 e de outras informações geológicas sobre a região (no caso não ser um poço exploratório) deve decidir os diâmetros, profundidades e quantidades de revestimentos utilizados.

A seleção das profundidades inicia-se de baixo para cima, considerando o maior peso de lama possível para a seção pretendida, representado por uma linha vertical em um gráfico de profundidade por peso de lama, sem colocar o poço em risco (kick) ou fraturar as rochas. É necessário também utilizar uma margem para fenômenos como o swab, além de um fator de segurança. A figura 11 exemplifica este processo.

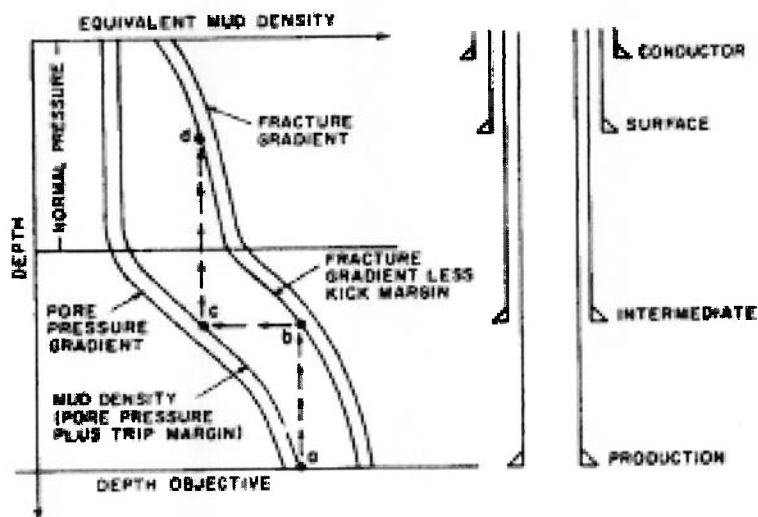


Figura 11: Processo de seleção de profundidades de revestimentos [1]

Além dos motivos acima citados, existem outras razões para a instalação de outro revestimento, como a perfuração de uma litologia mais complexa (como por exemplo os evaporitos) ou o início/término de uma seção inclinada de um poço direcional.

Para a seleção do diâmetro dos revestimentos utilizados, é necessário saber o diâmetro interno da coluna de produção projetada e o número de seções de revestimento intermediário necessários para alcançar a profundidade alvo. Outra preocupação é que a brocas utilizadas para perfurar os trechos inferiores do poço devem ter tamanho compatível para poder ser introduzida através dos revestimentos acima. Existem tabelas que listam os diâmetros de revestimentos e o “diâmetro de drift”, ou seja, o maior diâmetro de equipamento que pode ser introduzido no revestimento, com garantia que não ficará emperrado. Um trecho dessa tabela pode ser verificado na figura 12.

Casing Size (O.D. in.)	Weight Per Foot (lbm/ft)	Internal Diameter (in.)	Drift Diameter (in.)	Commonly Used Bit Sizes (in.)
4 1/2	9.5	4.09	3.965	3 3/4
	10.5	4.052	3.927	
	11.6	4.000	3.875	
	13.5	3.920	3.795	3 1/4

Figura 12: Exemplo de tabela com informações de revestimentos [2]

Após a seleção do comprimento e dos diâmetros dos revestimentos, é necessário ainda considerar as cargas e corrosão/desgaste que o revestimento estará sujeito durante toda sua vida útil, visando selecionar o peso linear (e logo seu diâmetro externo), o grau (sua qualidade) e o acoplamento entre eles (tipo de pino e rosca). Essa escolha deve levar em conta critérios econômicos também, uma vez que revestimentos mais espessos/nobres possuem valor mais elevado.

2.3 SLIM WELL

O conceito de "slim well" nasceu da necessidade de reduzir os custos de perfuração de um poço, baseados tanto em redução de material gasto quanto em tempo de operação. Um poço slim well é, basicamente, um poço em que o revestimento ou liner de produção se mantém inalterado, mas com redução do espaço anular entre as outras seções, resultando em um poço com menor diâmetro, sem alteração na produção. A figura 13 mostra um exemplo comparativo entre um slim well e um poço convencional.

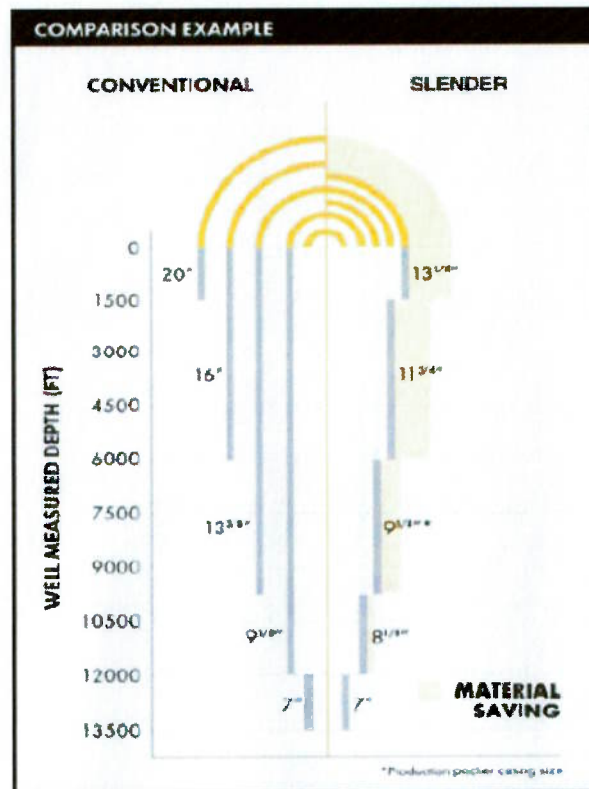


Figura 13: Comparação de um poço convencional com um poço tipo “slim well” [6]

Segundo Lyons [7], a experiência de campo diz que a diferença mínima entre diâmetros do poço e o diâmetro externo do acoplamento dos revestimentos deve ser entre 1” e 3,5”, com valores maiores para revestimentos mais largos. Tal “regra” deve ser observada para evitar problemas com a cimentação.

É possível verificar que o poço convencional observa tal regra prática com certa margem, enquanto no poço “slender” as diferenças são reduzidas. Algumas tecnologias auxiliam na construção de um poço dessa maneira, evitando problemas. Tais tecnologias serão discutidas posteriormente.

Em resumo, as vantagens da utilização de um poço slim podem ser vistas na lista abaixo:[8]

- Econômicas: Menor consumo de materiais como revestimentos e fluido de perfuração; perfuração mais rápida; custos menores de logística e de sonda.
- Ambientais: Menor geração de resíduos

- Redução de riscos: Tanto em operações com revestimentos maiores quanto durante transporte e manuseio.
- Contingência: Possibilidade de implementar revestimentos adicionais sem afetar o tamanho final do poço.

A utilização da metodologia slim possui também alguns problemas tecnológicos, como, por exemplo:

- Aumento da queda de pressão por atrito devido a redução do diâmetro do poço.
- Potencial para efeitos de swab e surge (redução e aumento, respectivamente, da pressão no poço devido a movimentação de coluna), devido ao reduzido espaço anular.
- Instabilidade do BHA, devido ao tamanho dos equipamentos ser menor, causando problemas como dificuldade de controle da verticalidade, controle do peso na broca, vibrações e calor.

Alguns desses problemas são minimizados pela adição de equipamentos especiais, sendo alguns citados abaixo.

2.4 TECNOLOGIAS

Esta seção do trabalho visa somente citar e explicar brevemente alguns equipamentos que podem expandir a utilização da metodologia slim well, sem a pretensão de aprofundar-se no tópico.

2.4.1 Flow diversion shoe

Para evitar que a velocidade de inserção ou retirada da coluna seja muito baixa, visando evitar problemas de swab/surge e perdendo tempo na operação, pode ser instalado um equipamento na coluna conhecido como "Flow diversion shoe". Essa sapata fornece, basicamente, um caminho por dentro da coluna para o fluido, conectado com o anular em

seções mais acima do poço, reduzindo o aumento / diminuição de pressão no fundo do poço. O equipamento pode ser visto na figura 14.



Figura 14: Flow diversion show [9]

2.4.2 Drilling agitator tool.

Para reduzir os problemas associados ao BHA, pode ser instalado um agitador, visto na figura 15. Esse equipamento gera, a partir do fluido de perfuração, uma oscilação que auxilia a transferência de peso para a broca e aumenta a produtividade da perfuração.

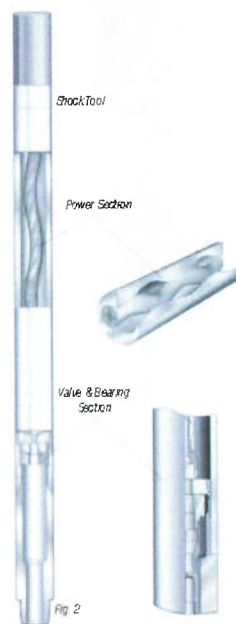


Figura 15: Drilling Agitator Tool da NOV [10]

2.4.3 Bi-center bits

As brocas bi-cêntricas (chamadas assim pois são compostas de uma broca comum e um raspador lateral, criando “duas perfurações”, cada uma com um centro, conforme figura 16.



Figura 16: Broca bi cêntrica [11]

A vantagem da utilização de uma broca desse tipo é a possibilidade de perfurar em um diâmetro maior que o “pass thru” ou diâmetro interno do revestimento anterior, fornecendo um aumento de tamanho de 15 a 20% [12]

3 METODOLOGIA

3.1 PARÂMETROS

Para a realização da quantificação de economia de materiais pela utilização da metodologia “Slim Well”, será utilizado um estudo de caso, comparando os volumes gastos em um poço comum com um slim well. A comparação será realizada em volume de material e não em custo, uma vez que verificou-se que é difícil quantificar corretamente o preço do material, pois existem diversas variáveis atreladas (logística, aditivos) e que algumas informações são restritas/de difícil acesso, fato comum na indústria do petróleo.

O estudo realizado tomou como base o exemplo apresentado por Howlett, apresentado na figura 13. Serão quantificadas algumas informações, a saber:

- Quantidade de cascalho gerado

Tal informação será obtida através do cálculo do volume de cascalho retirado do poço, através da equação abaixo, aplicada para o comprimento e diâmetro de cada seção, informada no projeto de poço:

$$V = \frac{\pi d h}{4} (6)$$

- Volume do fluido de perfuração utilizado

Para a realização deste cálculo, será utilizado, para cada seção, o somatório dos valores dos volumes internos dos revestimentos acima da seção que está sendo perfurada, somada com o volume interno da seção de poço aberto, logo, sendo perfurada. Não foi descontado o volume da coluna de perfuração, nem adicionado um fator de segurança.

Logo a equação, segundo as regras citadas, será:

$$V = \sum \frac{\pi d h}{4} (7)$$

- Quantidade de aço utilizada

Nesta etapa, será considerado o volume do revestimento instalado ao perfurar cada seção. Assim, a equação é, basicamente, o volume do tubo, considerado um cilindro oco:

$$V = \frac{\pi (D-d) h}{4} (8)$$

- Maior peso no gancho

Para esta análise, será calculada, juntamente com o volume do revestimento de cada seção, sua massa, utilizando a densidade do aço padrão, 7860 kg/m³.

3.2 CASO ESTUDADO

O caso exemplo utilizado foi o proposto na figura 13, com as profundidades e diâmetros fornecidos na figura.

Assim, consideramos que os poços foram perfurados e planejados da seguinte maneira:

Convencional

- Perfurada a primeira seção com uma broca de 36", com o assentamento de um revestimento condutor de 30", da superfície até 100m.
- Logo após, perfurada a segunda seção com uma broca de 26", assentando o revestimento de superfície de 20", da superfície até 450m.
- A terceira seção foi perfurada com uma broca de 17,5", assentando um revestimento intermediário de 16" a 1800m.
- Uma quarta seção foi perfurada com uma broca de 14,75" até a profundidade de 3000m, assentando um revestimento intermediário de 13,375".
- Uma quinta seção foi perfurada com uma broca de 12,25", assentando um revestimento intermediário de 9,625" até a profundidade de 3700m.
- Por fim, é perfurada a última seção com uma broca de 8,5", assentando um liner de produção de 7", com profundidade final de 4115m.

Slim well

- Perfurada a primeira seção com uma broca de 36", com o assentamento de um revestimento condutor de 30", da superfície até 100m.
- Logo após, perfurada a segunda seção com uma broca de 17,5", assentando o revestimento de superfície de 13,375", da superfície até 450m.
- A terceira seção foi perfurada com uma broca bi-cêntrica de 14,75", até a profundidade de 1800m. Foi assentado um revestimento intermediários de 11,75".
- Uma quarta seção foi perfurada com uma broca bi-cêntrica de 12,25", assentando um revestimento intermediário de 9,625", até a profundidade de 3000m.

- Uma quinta seção foi perfurada com uma broca bi-cêntrica de 10,625" assentando um revestimento intermediário de 8,625", até a profundidade de 3700m.
- Por fim, é perfurada a ultima seção com uma broca bi-cêntrica de 8,5", assentando um liner de produção de 7".

Claro que existem outras soluções como a utilização de liners ou outras tecnologias, porém está sendo utilizado o exemplo da figura, com a menor interferência possível nos números fornecidos.

Outro importante ponto a ser notado é que não houve a análise das geopressões, importantíssimo para o correto dimensionamento de revestimentos. Sendo assim, esse é apenas um exemplo.

4 RESULTADOS

Com base nas análises propostas na seção acima, foram obtidos os seguintes resultados, apresentados na forma de tabelas para os dois casos, convencional e slim well:

- Quantidade de cascalho gerado

Tabela 1: Volume de cascalhos gerado na perfuração do poço exemplo, método convencional

Poço Convencional				
Diâmetro	Profundidade		Comprimento	Volume
(pol)	Início (m)	Final (m)	(m)	(m³)
36,00	0	100	100	65,67
26,00	100	450	350	119,89
17,50	450	1800	1350	209,49
14,75	1800	3000	1200	132,29
12,25	3000	3700	700	53,23
8,50	3700	4115	415	15,19
Volume total de cascalhos removidos (m³)				595,76

Tabela 2: Volume de cascalhos gerado na perfuração do poço exemplo, método slim

Slim Well				
Diâmetro	Profundidade		Comprimento	Volume
(pol)	Início (m)	Final (m)	(m)	(m³)
36,00	0	100	100	65,67
17,50	100	450	350	54,31
14,75	450	1800	1350	148,82
12,25	1800	3000	1200	91,25
10,62	3000	3700	700	40,04
8,50	3700	4115	415	15,19
Volume total de cascalhos removidos (m³)				415,29

Podemos verificar que a geração de resíduos é 30% menor no caso “slim well”. Essa alteração reduz o custo de transporte/tratamento de resíduos, além da utilização de equipamentos menores.

- Volume de fluido de perfuração utilizado

Tabela 3: Volume de fluido de perfuração utilizado no poço exemplo, método convencional

Poço Convencional					
Diâmetro	Local	Diâmetro	Comprimento	Volume	Volume
poço (pol)		interno (pol)	(m)	(m³)	total (m³)
17,50	Revestimento 20,00"	18,70	450	79,74	289,23
	Poço aberto	17,50	1800	209,49	
14,75	Revestimento 16,00"	15,00	1800	205,22	337,51
	Poço aberto	14,75	3000	132,29	
12,25	Revestimento 13,37"	12,35	3000	231,85	285,08
	Poço aberto	12,25	3700	53,23	
8,50	Revestimento 9,62"	8,54	3700	136,73	151,93
	Poço aberto	8,50	4115	15,19	
Volume total (m³)					1063,74

Tabela 4: Volume de fluido de perfuração utilizado no poço exemplo, método slim

Slim Well					
Diâmetro poço (pol)	Local	Diâmetro interno (pol)	Comprimento (m)	Volume (m³)	Volume total (m³)
14,75	Revestimento 13,37"	18,70	450	79,74	228,56
	Poço aberto	14,75	1800	148,82	
12,25	Revestimento 11,75"	11,00	1800	110,36	201,61
	Poço aberto	12,25	3000	91,25	
10,62	Revestimento 9,62"	8,54	3000	110,86	150,91
	Poço aberto	10,62	3700	40,04	
8,50	Revestimento 8,62"	7,82	3700	114,80	129,99
	Poço aberto	8,50	4115	15,19	
Volume total (m³)					711,06

É possível observar que houve uma redução de 33% na quantidade de fluido de perfuração utilizada. Assim, houve uma redução no gasto com matérias primas do fluido, além da redução de resíduo a ser transportado e tratado.

- Quantidade de aço utilizada

Tabela 5: Volume de aço utilizado no poço exemplo, método convencional

Poço Convencional				
Diâmetro externo (pol)	Espessura (pol)	Comprimento (m)	Volume (m³)	Massa (t)
30,00	0,62	100	3,72	29,25
20,00	0,63	450	11,22	88,15
16,00	0,50	1800	28,27	222,24
13,37	0,55	3000	42,89	337,12
9,62	0,43	3700	29,98	235,64
7,00	0,36	500	2,44	19,14
Total de aço (volume e massa)			118,52	931,53

Tabela 6: Volume de aço utilizado no poço exemplo, método slim

Slim Well				
Diâmetro externo	Espessura	Comprimento	Volume	Massa
(pol)	(pol)	(m)	(m³)	(t)
30,00	0,62	100	3,72	29,25
13,37	0,55	450	6,43	50,57
11,75	0,37	1800	15,56	122,32
9,62	0,43	3000	24,31	191,06
8,62	0,40	3700	24,67	193,93
7,00	0,36	500	2,44	19,14
Total de aço (volume e massa)			77,13	606,26

Como resultado, houve a redução de, aproximadamente, 35% na quantidade de aço utilizada.

Outro importante ponto é a possibilidade da utilização de uma sonda com capacidade de guincho menor, uma vez que a massa da coluna mais pesada foi reduzida de 337 t para 193 t, uma queda de 43%. Isso significa o aluguel de uma sonda menor, talvez mais antiga, reduzindo o preço diário.

Claro que tais conclusões podem ser postas em dúvida, pois não foram avaliados os aumentos de custo devido ao aluguel de equipamentos mais especializados, além das tensões aplicadas no revestimento e seu correto dimensionamento para uma operação segura. De uma maneira grosseira, pode se dizer que, nos parâmetros avaliados, o "slim well" é vantajoso.

5 CONCLUSÕES

Acompanhando a revisão bibliográfica necessária, torna-se claro que, para a operação segura de um poço durante seu tempo de vida projetado, é necessário que grande parte de seu comprimento seja revestido, sendo possível também verificar que tal atividade, como todos procedimentos englobados pela engenharia de poço, é dispendiosa e possui pontos que podem ser explorados para melhorias.

Dessa maneira, a metodologia "Slim Well" foi desenvolvida para buscar um ganho de tempo operacional, reduzindo custos por meio de uma mudança no processo de revestimento e perfuração de um poço, empregando algumas novas tecnologias para o alcance de seu objetivo.

De um modo simplista, a partir do exemplo apresentado, pode-se dizer que, para os parâmetros avaliados, houve uma significativa redução de custo e tempo na operação, justificando a aplicação de tal técnica. Uma análise mais completa, englobando um comparativo de custos reais e de segurança deve ser realizada antes da decisão, fato que não estava no escopo do presente trabalho.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Adams, N. J. et al., **Drilling Engineering – A Complete Well Planning Approach**, Tulsa: Pennwell Books, 1985
2. Bourgoyne, A.T. et al., **Applied Drilling Engineering**, Richardson: SPE, 1986
3. Fertl, W.H., **Abnormal Formation Pressures**, Nova York: Elsevier, 1976
4. Rocha, L. A. S., **Projetos de poços de petróleo**, Rio de Janeiro: Interciência, 2009
5. Byrom, T.G. **Casing Liners for drilling and completions**. Houston: Gulf Publishing Company, 2013.
6. Howlett, P.D. et al., **Evolutionary Well Construction Method That Challenges Convention**, Artigo SPE/IADC 104522
7. Lyons, William, **Working Guide to Drilling Equipment and Operations**, Oxford: Gulf, 2010
8. **ADVANCEMENTS IN SLENDER WELL DESIGN**. Houston. 01/06/2009. Apresenta vantagens e desvantagens da metodologia. Disponível em <<http://www.offshore-mag.com/articles/print/volume-69/issue-6/drilling-completion/advancements-in-slender.html>> Acesso em 01/09/2014.
9. Howlett, P.D. et al., **Case Study of New Slender Well Construction Technology**, Artigo SPE 102580
10. **DRILLING AGITATOR HANDBOOK**. Apresenta as características e aplicações da ferramenta. Disponível em <http://www.nov.com/uploadedFiles/Business_Groups/Downhole/Downhole_Tools/Drilling_Tools/Drilling_Agitator/Agitator%20Handbook.pdf> Acesso em 03/09/2014
11. **HOLE OPENING BITS – BICENTER TECHNOLOGY**. Apresenta a tecnologia de brocas. Disponível em <http://www.varelintl.com/Oil-and-Gas-Home/PDC-Drill-Bits/Hole-Opener-Bicenter-Bits/> Acesso em 03/09/2014
12. **BI-CENTER DRILL BIT TECHNOLOGY USED IN SLIM HOLE RE-ENTRY APPLICATIONS**. Houston. 01/11/1999. Apresenta características da utilização de brocas bi cêntricas. Disponível em < <http://www.offshore-mag.com/articles/print/volume-59/issue-11/news/special-report/bi-center-drill-bit-technology-used-in-slim-hole-re-entry-applications.html>> Acesso em 04/09/2014