

Completação

Índice

1 - Tipos de Completação.....	4
1.1 - Categorias Básicas de Completação	4
1.2 - Seleção do Tipo de Completação e Critérios de <i>Design</i>	9
2 - Operações de Cimentação na Completação.....	12
2.1 - Tipos de Cimentação.....	12
2.2 - Objetivo das Operações com Cimento.....	13
2.3 - Técnicas Operacionais.....	16
3 - Avaliação da Cimentação e Perfilagem.....	31
3.1 - Introdução.....	31
3.2 - Objetivo da perfilagem sônica.....	32
3.3 - Aderência do Cimento.....	32
3.4 - Movimento Ondulatório.....	34
3.5 - Perfis Sônicos.....	38
3.6 - CBL: Cement Bond Logging.....	40
3.7 - VDL: Variable Density Logging.....	41
3.8 - Revestimento Livre.....	42
3.9 - Revestimento Cimentado.....	42
3.10 - Sinais do Fluido.....	43
3.11 - Interpretação Qualitativa do Perfil CBL/VDL.....	43
3.12 - Perfil Ultra-sônico.....	44
3.13 - Cuidados na Perfilagem Sônica.....	46
4 - Canhoneio.....	47
4.1 - Introdução.....	47
4.2 - Processo.....	47
4.3 - Vantagens.....	47
4.4 - Classificação.....	48
4.5 - Tipos de Canhoneio.....	53
4.6 - Cargas Explosivas.....	57
4.7 - Eficiência do Canhoneio.....	60
4.8 - Segurança.....	64
4.9 - Assentamento de Tampões.....	64
5 - Tratamento Químico na Completação.....	66
5.1 - Ocorrências e Causas de Dano à Formação.....	66
5.2 - Lavagem Ácida das Colunas.....	69
5.3 - Lavagem Ácida Canhoneados.....	70
5.4 - Remoção de Incrustações Solúveis em Ácido.....	70
5.5 - Tratamentos Matriciais de Carbonatos.....	71
5.6 - Diretrizes para Seleção dos Fluidos de Tratamento.....	71

5.7	- Projeto do Tratamento Ácido.....	72
5.8	- Procedimentos Operacionais de Segurança.....	72
5.9	- Tratamentos Matricias de Arenitos.....	73
5.10	- Método para Seleção dos Fluidos de Tratamento.....	74
5.11	- Outros Sistemas Não-Convencionais.....	76
6	- Fraturamento Hidráulico.....	77
6.1	- Introdução.....	77
6.2	- Mecânica das Rochas.....	80
6.3	- Fluidos de Fraturamento.....	83
7	- Gravel Pack.....	85
7.1	- Introdução.....	85
7.2	- Arenitos friáveis.....	85
7.3	- Técnicas de Predição de Produção de Areia.....	87
7.4	- Métodos para Controle da Produção de Areia.....	87
7.5	- O Mecanismo de Gravel Pack.....	89
8	- Completção Submarina.....	94
8.1	- Introdução.....	94
8.2	- Completção submarina.....	95

Complementação de Poços de Petróleo

A Complementação de poços consiste no conjunto de serviços efetuados no poço desde o momento em que a broca atinge a base da zona produtora de produção. Este é um conceito operacional da atividade, note que a cimentação do revestimento de produção, ou seja o que entra em contato com a zona produtora é, por esta definição, uma atividade de Complementação. Por outro lado a melhor definição seria:

A de transformação do esforço de perfuração em uma unidade produtiva completamente equipada e com os requisitos de segurança atendidos, pronta para produzir óleo e gás, gerando receitas.

1 - Tipos de Complementação

1.1 - Categorias Básicas de Complementação

Existem muitos métodos de complementação utilizados ao redor do mundo. No entanto, o que ocorre são inúmeras variações de alguns métodos básicos que podem ser classificados quanto:

à interface entre a coluna e reservatório:

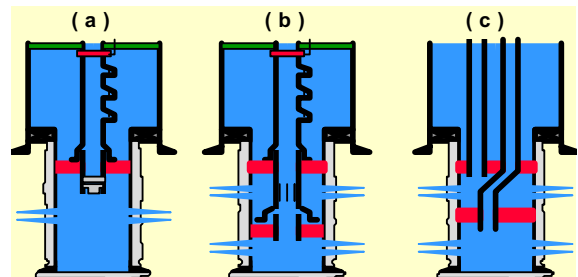
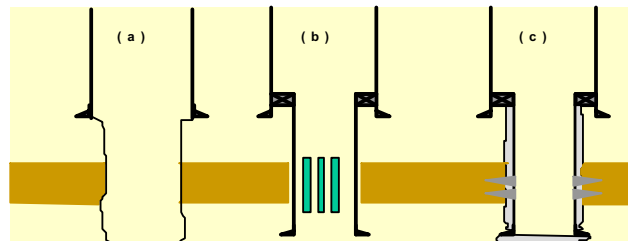
- a) Complementação a poço aberto
- b) Liner rasgado ou canhoneado
- c) Revestimento canhoneado

ao método de produção:

- Surgente
- Elevação artificial

Ao número de zonas completadas:

- a) Simples
- b) Seletiva
- c) Múltiplas



1.1.1 - Complementação a poço aberto

A complementação a poço aberto é frequentemente utilizada em espessas seções de reservatórios constituídos por tipos de rochas bem firmes. É o método mais antigo de complementação de poços. As vantagens deste método são as seguintes:

- a zona de interesse inteira é aberta para a coluna;
- não há gasto com canhoneio do revestimento;
- existe a intercomunicação de fluidos em todo o intervalo aberto para produção;
- drawdown pode ser reduzido por causa da larga área de fluxo;
- há uma redução no custo do revestimento;
- o poço pode ser facilmente aprofundado;
- a completação pode ser facilmente convertida para um outro tipo de completação como o liner rasgado ou revestimento canhoneado;
- pelo fato de não haver revestimento, não há risco de haver dano à formação causada pelo cimento.

A completação a poço aberto é particularmente atrativa quando há dificuldade de identificação do retorno líquido financeiro durante o período de completação; ou onde perdas com uma filtragem ruim do fluido de perfuração pode levar a grandes prejuízos. Porém existem desvantagens e limitações deste método de completação, são elas:

- formações que apresentam grandes razões gás-óleo / água-óleo normalmente não podem ser controladas porque todo o intervalo é aberto para produção;
- o controle do poço durante a completação pode ser mais difícil;
- a técnica não é aceitável para formações constituídas por reservatórios separados que contêm fluidos com propriedades incompatíveis;
- as diversas zonas dentro do intervalo de completação não podem ser facilmente selecionadas;
- este tipo de completação vai requerer freqüentes limpezas se houver produção de areia ou se a formação não estiver estável.

1.1.2 - Liner rasgado ou canhoneado

Para controlar problemas de desmoronamento , os primeiros produtores de petróleo colocaram tubos com fendas ou telas na parte inferior do poço como um filtro de areia. O uso deste tipo de completação como método para controle de areia vem se tornando muito popular hoje em dia em algumas áreas. Este método tem praticamente as mesmas vantagens e desvantagens da completação a poço aberto.

Na maneira mais simples e antiga um tubo com fendas é colocado dentro do poço. As fendas são pequenas o suficiente para que a areia fique retida. Para areias muito finas são colocadas telas de arame. Esta técnica é um método de controle de areia razoavelmente eficaz.

Algumas vezes este é o único método de controle de areia que pode ser usado por causa da perda de pressão e considerações sobre a geometria do poço. Entretanto, este método não é muito recomendado porque:

- O movimento da areia para a coluna faz com que haja um impedimento da permeabilidade devido a mistura de diferentes de tamanhos de grãos.
- Grãos de areia finos tendem a obstruir a tela.
- A tela pode sofrer desgaste devido à movimentação da areia.
- Um suporte ineficaz da formação pode causar desabamento.

Para solucionar estes problemas, o anular entre o poço e a tela é preenchido com grãos de areias mais grossos. A areia ou cascalho serve como suporte para a parede do poço e para prevenir o movimento de areia. Este método pode remover alguns dos estragos causados pelo fluido de perfuração.

1.1.3 - Revestimento canhoneado

O método mais comum de completação envolve cimentação do revestimento na área de interesse, onde a comunicação com a formação é feita através de buracos perfurados no revestimento e no cimento, denominados canhoneados.

Este canhoneio é feito para comunicar o interior do poço com a zona de interesse. Se o poço é revestido e não-perfurado durante os estágios iniciais da operação de perfuração, o controle do poço é mais fácil e os custos de completação podem ser reduzidos.

Usando várias técnicas de controle de profundidade, é possível decidir quais zonas serão perfuradas e abertas para produção, evitando assim, a comunicação de fluidos indesejáveis como gás e água, zonas fracas que podem produzir areia ou ainda, zonas improdutivas.

Esta seletividade que é completamente dependente de um bom trabalho de cimentação e canhoneio adequado também permite que um simples poço produza vários reservatórios separados, sem que haja comunicação entre eles.

Este canhoneio pode também ser usado para controlar o fluxo da zona de interesse, fechando o canhoneado ou injetando fluidos para transformar as zonas em menos permeáveis.

A decisão de colocação do revestimento pode ser adiada até que a avaliação do reservatório seja concluída, reduzindo gastos com poços secos. Em suma, as vantagens desta completação incluem:

- Operações mais seguras;
- Seleção mais segura das zonas a serem completadas;
- Redução da relevância de estragos causados pela perfuração;
- Facilitação da estimulação seletiva;
- Possibilidade de completação em zonas múltiplas;
- Custos reduzidos com poços secos;
- Planejamento mais fácil de operações de completação.

Este tipo de completação é geralmente usada a menos que haja uma razão específica para preferir um outro tipo de completação.

1.1.4 - Completação para poços com bombas

A completação também é classificada de acordo com o método de produção e o número de zonas produzidas. Poços equipados com bombas de fundo são completados com

anular aberto através do qual o gás vai para a superfície. Todos os sistemas de bombeamento se tornam ineficientes na presença de gás.

1.1.5 - Completação de Múltiplas Zonas

Para completação de múltiplas zonas o principal é saber o que se deseja produzir. Quando um poço encontra mais de uma zona de interesse, a decisão deve ser tomada frente aos seguintes aspectos:

- Produzir as zonas individualmente, uma depois da outra, através de uma linha única;
- Completar o poço com várias linhas e produzir várias zonas simultaneamente;
- Misturar várias zonas numa única completação; ou
- Produzir uma única zona por esse poço, e perfurar poços adicionais para as outras acumulações;

Esta decisão deve ser baseada numa comparação econômica das alternativas, porém a completação de múltiplas zonas, com uma única linha de produção, são freqüentemente preferíveis porque quando se trabalha com linhas duplas, o tamanho do revestimento limita o diâmetro, que, por sua vez, limita o fluxo obtido através de cada linha. . Estas completações podem também ser usadas para minimizar custos de completação, que é freqüentemente a razão para limitar o tamanho do revestimento de produção.

Completações com linhas duplas podem ser paralelas ou concêntricas. Onde a elevação artificial pode ser requerida, linhas paralelas são freqüentemente usadas. Linhas concêntricas requerem menos remoção de cascalhos e podem alcançar uma capacidade mais alta de fluxo.

Completações com linhas triplas têm sido também utilizadas em algumas áreas, mas são muito limitadas em capacidade de poço para que sejam economicamente atrativas como completações convencionais.

Completações com múltiplas linhas sem tubulação são, às vezes, usadas para completação de reservatórios empilhados que têm reservas individuais pequenas e pressões normais. Estas completações são particularmente atrativas para retirar pequenas acumulações de óleo abaixo de grandes reservatórios de gás e para baixo custo com o gás. A melhoria no *design* e qualidade dos equipamentos dos mais convencionais métodos de completação tem resultado numa diminuição de popularidade deste último tipo de instalação.

1.2 - Seleção do Tipo de Completação e Critérios de *Design*

Assim como o método de produção varia, o *design* da completação vai variar significativamente com:

- Taxa de produção;
- Pressão e profundidade do poço;
- Propriedades da rocha;

- Propriedades do fluido;
- Localização do poço.

Dada a variedade de condições de produção ao redor do mundo, a definição dos limites é naturalmente algo nebuloso (uma baixa taxa de produção num poço no Oriente Médio pode ser considerada uma taxa respeitável em muitos campos Norte-americanos).

É importante que o engenheiro de completação leve em consideração o impacto do retorno da produção, custo de capital e custo de operação dos projetos. Os custos de instalação só são significantes na medida em que os requisitos de completação têm um impacto significativo no tempo total de perfuração e completação. O custo real dos equipamentos de completação são relativamente baixos se comparado a produção incremental conseguida através da melhoria de potencial devido a utilização de materiais mais adequados, porém mais caros.

Considerações a respeito dos aspectos geológicos, econômicas e de reservatório ditarão os requisitos funcionais para um projeto de uma completação. Estes requisitos devem ser antecipadas num estágio anterior ao da perfuração. O modelo de completação do poço é também influenciado pelos requisitos de serviço de poço, como monitoramento de rotina e serviço de cabeça de poço e linha de fluxo.

1.2.1 - Considerações de Perfuração

Algumas considerações de perfuração podem influenciar o tipo de completação a ser instalada. Dentre os fatores a serem considerados estão:

- Extensão dos prejuízos deixados pela perfuração e necessidade de utilização de técnicas de estimulação, seleção de fluidos especiais de perfuração, etc.
- O programa de avaliação, particularmente a necessidade de testes de perfuração;
- O tamanho e o peso do revestimento de produção;
- A força de explosão e desmoronamento do revestimento de produção. O revestimento deve se capaz de suportar o máximo de pressão dentro do tubo no caso de uma quebra na superfície;
- Gasto ou corrosão do revestimento de produção devem ser avaliados em completações com liner, especialmente para poços fundos.
- Em ambientes ácidos ou quando as condições podem se tornar ácidas, os materiais de revestimento de produção devem se adequar a certas especificações já definidas.

1.2.2 - Resumo

Em suma, devemos enfatizar que a avaliação das condições sob as quais um poço deve operar dita quais opções podem ser consideradas dentre uma variedade de possibilidades de modelos de completação. A parte econômica dita qual desses modelos é mais adequado para uma situação particular.

Selecionar o melhor modelo de completção para uma dada situação requer que os engenheiros considerem a performance atual e futura do poço, as restrições impostas pelo programa de perfuração, as regulamentações ou políticas que possam ser aplicadas e a operacionalidade da nova tecnologia.

Devemos frisar sempre que a regra básica de um projeto de Completção é:

SEJA SIMPLES

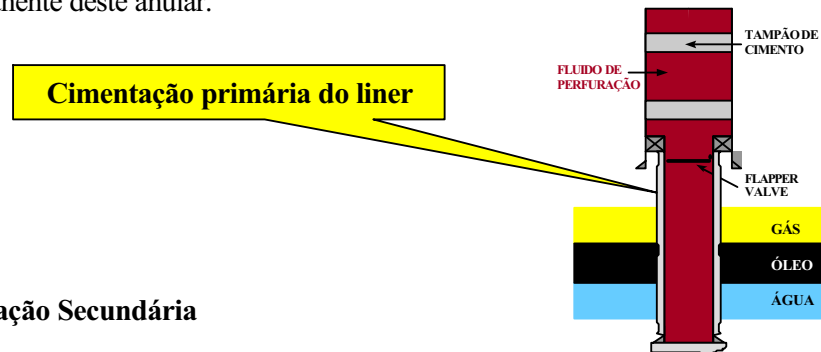
Utilize sempre a alternativa mais simples que atende aos requisitos técnicos e econômicos para a Completção de um poço

2 - Operações de Cimentação na Completção

2.1 - Tipos de Cimentação

2.1.1. - Cimentação Primária

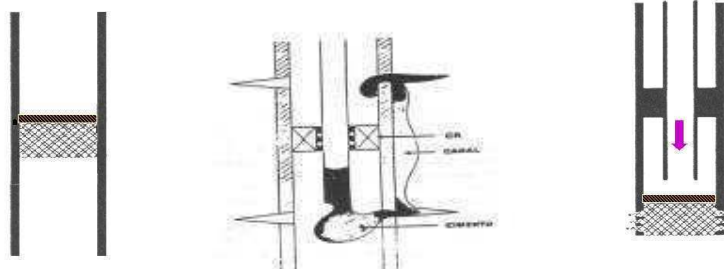
Denomina-se cimentação primária a cimentação principal de cada coluna de revestimento, levada a efeito logo após sua descida ao poço. Seu objetivo básico é colocar uma pasta de cimento não contaminada em determinada posição no espaço anular entre o poço e a coluna de revestimento, de modo a se obter fixação e vedação eficiente e permanente deste anular.



2.1.2. - Cimentação Secundária

São assim denominadas as demais operações de cimento realizadas no poço, excetuando-se a cimentação primária.

- Tampões de Cimento – Consistem no bombeamento para o poço de determinado volume de pasta, com o objetivo de tamponar um trecho do poço. São usados nos casos de perda de circulação, abandono definitivo ou temporário do poço, como base para desvios, compressão de cimento, etc.
- Recimentação – É a correção da cimentação primária, quando o cimento não alcança a altura desejada no anular ou ocorre canalização severa. O revestimento é canhoneado em dois pontos. A recimentação só é feita quando se consegue circulação pelo anular, através destes canhoneados. Para possibilitar a circulação com retorno, a pasta é bombeada através de coluna para permitir a pressurização necessária para a movimentação da pasta pelo anular.
- Compressão de Cimento ou Squeeze – Consiste na injeção forçada de pequeno volume de cimento sob pressão, visando corrigir localmente a cimentação primária, sanar vazamentos no revestimento ou impedir a produção de zonas que passaram a produzir quantidade excessiva de água ou gás. Exceto em vazamentos, o revestimento é canhoneado antes da compressão propriamente dita.



2.2 - Objetivo das Operações com Cimento

2.2.1. - Correção da Cimentação Primária (CCR)

Cimentações primárias deficientes podem causar intervenções onerosas. A decisão quanto a necessidade ou não da correção de cimentação primária é uma tarefa de grande importância. A correção implica em elevados custos, principalmente no caso de poços marítimos, onde o custo diário de uma sonda é bastante alto.

O prosseguimento das operações, sem o devido isolamento hidráulico entre as formações permeáveis, pode resultar em:

- produção de fluidos indesejáveis devido a proximidade dos contatos óleo/água ou gás/óleo;
- testes de avaliação das formações incorretos;
- prejuízo no controle dos reservatórios (produção, injeção, recuperação secundária);
- operações de estimulação mal sucedidas, com possibilidade inclusive de perda do poço.

Uma outra possível falha da cimentação primária, que precisa ser corrigida, se refere a falta de isolamento do topo do liner. Tais falhas são decorrentes das condições adversas encontradas para a sua cimentação, como anular pequeno e difícil centralização do liner.

Cuidados adicionais devem ser tomados na interpretação da qualidade da cimentação nos topos de liner, onde a leitura elevada da amplitude do CBL pode ser decorrente justamente da boa qualidade da cimentação e da presença do revestimento por detrás do liner. .

2.2.2. - Tamponamento de Canhoneados (RAO, RGO, ISZ)

A finalidade básica de uma compressão de cimento para o tamponamento de canhoneados é impedir o fluxo de fluidos através destes canhoneados, entre a formação e o interior do revestimento ou vice-versa. Os problemas mais comuns que geram intervenções para tamponamento de canhoneados são aqueles relacionados com a excessiva produção de água ou gás.

Uma razão água-óleo (RAO) elevada apresenta várias desvantagens como perda de energia do reservatório, dispêndio de energia em elevação artificial e custos com tratamento e descarte, além de riscos de degradação ao meio ambiente. Uma elevada produção de água pode ser consequência da elevação do contato óleo/água devido ao mecanismo de produção (influxo de água), ou injeção de água. Isto pode ser agravado pela ocorrência de *cones* ou *fingerings*, falhas na cimentação primária, furo no revestimento ou uma operação de estimulação atingindo a zona de água.

Se a zona produtora é espessa, pode-se tamponar os canhoneados e recanhonear apenas na parte superior, o que resolve o problema temporariamente. O aparecimento de água se torna um problema mais complexo quando há permeabilidade estratificada. A variação de permeabilidade ao longo da zona, verticalmente, provoca um avanço

diferencial da água conhecido como *fingering*, cujo efeito pode ser minimizado com a redução de vazão.

Quando uma fratura mal dirigida alcança uma zona de água, tal fato geralmente inviabiliza a produção desta zona, visto que este contato se localiza dentro da formação e ainda não se dispõe de metodologia eficiente para correção deste problema.

Uma razão gás-óleo alta pode ter como causa o próprio gás dissolvido no óleo, o gás de uma capa ou aquele proveniente de uma outra zona ou reservatório adjacente. Esse último caso pode ser produto de uma falha de cimentação primária, furo no revestimento ou de uma estimulação mal concretizada.

A produção excessiva de gás, devido a formação de cone, pode ser contornada temporariamente completando-se o poço apenas na parte inferior. Um cone de gás é mais facilmente controlado pela redução da vazão do que o de água. Isto se deve a maior diferença de densidade entre o óleo e o gás. O fechamento do poço, temporariamente, é também uma técnica recomendada para a retração do cone de gás ou água.

2.2.3. - Reparo de Vazamentos no Revestimento

Quando o aumento da RAO ou RGO não é observado através dos canhoneados abertos para produção, deve-se suspeitar de dano no revestimento. Perfis de produção, ou pistoneio seletivo, são usados para localizar ponto de dano no revestimento. Vazamentos no revestimento podem ocorrer devido a corrosão, colapso da formação, fissuras, desgaste ou falhas nas conexões dos tubos, sendo necessário identificar a natureza do problema, sua localização e extensão.

Basicamente, em se tratando de pontos localizados ou pequenos intervalos de revestimento danificados, a técnica utilizada é semelhante à empregada em tamponamentos de pequeno número de canhoneados. No caso de trechos longos, o tratamento é similar ao de canhoneados extensos.

2.2.4. - Combate à Perda de Circulação em Zonas sem Interesse

Pastas de cimento podem ser usadas para estancar perdas apenas quando não há preocupação com o dano de formação, isto é, em zonas que vão ser isoladas definitivamente.

2.3 - Técnicas Operacionais

2.3.1. - Introdução

As operações com cimento na completação podem ser classificadas, quanto ao nível de pressão utilizada, em:

- operações à baixa pressão;
- operações à alta pressão.

Nas operações à baixa pressão o cimento é colocado nas posições desejadas sem que se fracture qualquer zona, e à alta pressão, são impostas pequenas fraturas á formação. O entendimento deste assunto é requisito mínimo necessário ao profissional que se propõe a trabalhar com cimento na completação.

Quanto à forma de colocação da pasta de cimento na posição desejada, os tipos possíveis são:

- tampão balanceado (baixa ou alta pressão);
- injeção direta (baixa ou alta pressa);
- recimentação (baixa pressão);
- caçamba (baixa pressão).

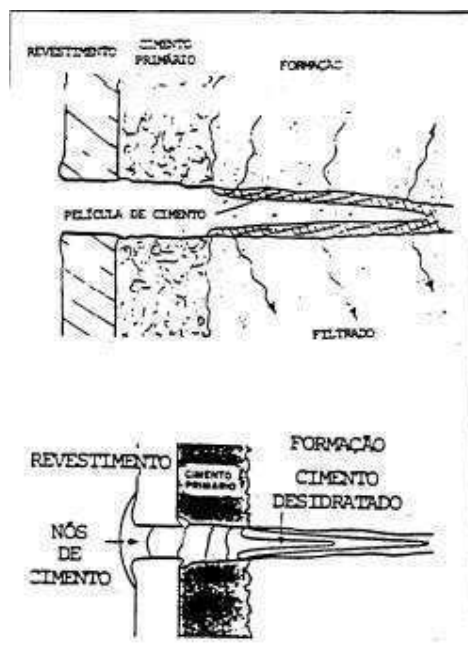
Quanto à tubulação que se encontra no poço, excluindo-se as operações com caçamba, tem-se:

- executadas com colunas de trabalho convencionais (tampão balanceado, injeção direta e recimentação);
- executadas com flexitubo (tampão balanceado).

Para se definir o tipo mais adequado de operação a ser executada, é de fundamental importância diagnosticar corretamente o problema. De posse deste diagnóstico é possível adequar o nível de tecnologia a ser empregado, atendendo todas as restrições detectadas neste diagnóstico.

2.3.2. - Compressão de Cimento à Baixa Pressão

A pasta de cimento é uma suspensão de partículas solidas de cimento dispersas em água. Na técnica à baixa pressão, a pasta, sujeita a um diferencial de pressão poço-formação, perde parte da água de mistura para o meio poroso e um reboco de cimento parcialmente desidratado é formado. Ao término deste processo de filtração, todo o canhoneado está preenchido por reboco de cimento, e por este reboco ter uma permeabilidade bastante baixa, a pressão na superfície se estabiliza.



É de fundamental importância o conhecimento e controle das pressões envolvidas na operação. É bom observar que uma coluna cheia de pasta com peso específico 15,8 lb/gal pode quebrar uma formação com gradiente de fratura igual ou inferior a 0,82 psi/pé, sem pressão adicional na cabeça.

Nos trabalhos à baixa pressão, é essencial que os canhoneados, canalizações e cavidades a serem preenchidas com cimento estejam desobstruídos de lama e/ou sólidos e que contenham um fluido penetrante a ser deslocado pela pasta de cimento para a formação permo-porosa, seja fluido de completação isento de sólidos ou fluido produzido de algum intervalo permo-poroso.

A pasta ideal numa operação com cimento deve ter uma taxa de desidratação controlada, de forma a permitir a deposição uniforme do reboco sobre toda a superfície permeável, preencher os vazios e as canalizações por detrás do revestimento, preencher os túneis de canhoneio e deixar pequenos nódulos dentro do revestimento. Nesta situação, o restante da pasta permanece fluida no interior do poço, podendo ser removida por circulação.

2.3.3. - Compressão de Cimento à Alta Pressão

Em alguns casos, com formações de baixa permeabilidade, o squeeze à baixa pressão pode não ser possível, de forma a permitir que a pasta ocupe os espaços desejados. Por exemplo, a correção de cimentação primária executada com fluido de perfuração dentro do poço, formações de baixíssimas injetividades onde o método de injeção direta é mandatório devido à existência de canhoneado aberto logo acima, etc.

Nesses casos alguns autores acreditam que a criação de uma fratura, a fim de permitir a comunicação entre poço e esses espaços a serem preenchidos com cimento, pode ser uma solução. É importante observar que deve ser criada uma pequena fratura, e que a operação deve ser concluída a uma pressão abaixo da pressão de quebra da formação.

As antigas operações à alta pressão, muitas vezes associadas ao mito do “block squeeze”, (panquecas horizontais), com a criação de grandes fraturas e o uso de grandes volumes de pasta foram definitivamente banidas das práticas recentes. Entretanto, mesmo com a utilização de uma boa técnica, a alta pressão envolve uma série de riscos que podem comprometer o sucesso da operação, sendo recomendado, sempre que possível, as operações à baixa pressão.

Como exemplos de riscos têm-se:

- possibilidade da criação de grandes fraturas que podem propiciar a comunicação indesejada de zonas que se pretendia isolar;
- por se desenvolver numa direção preferencial ditada pelo estado de tensões da rocha, a fratura pode não interceptar o canal que se pretendia eliminar;
- a fratura pode se estender ao longo de um intervalo com boa cimentação e promover a comunicação indesejada entre zonas .

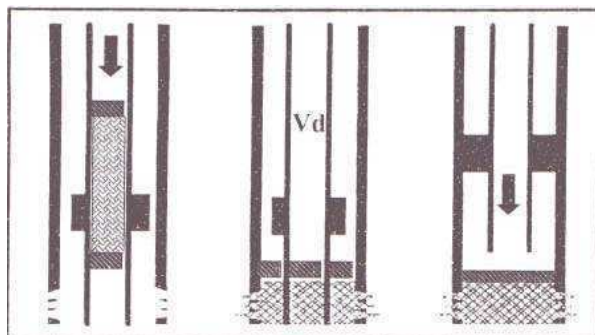
2.3.4 - Tampão Balanceado

Esta técnica é normalmente empregada em operações à baixa pressão, sendo que os volumes: (1) da pasta de cimento, (2) do colchão espaçador à frente e atrás da pasta e (3) de deslocamento da pasta são calculados de forma a se obter um tampão balanceado hidrostaticamente em frente ao local em que será efetuada a cimentação.

Para se obter o balanceamento, o colchão separador, bombeado à frente da pasta, deve ter um volume que ocupe uma altura do espaço anular $\text{revestimento} \times \text{coluna}$ equivalente à altura de coluna ocupada pelo colchão separador bombeado atrás da pasta. Normalmente o volume de água atrás da pasta é adotado como sendo 1 barril e à frente o volume correspondente para a mesma altura de coluna de água.

A extremidade da coluna deve ficar posicionada cerca de 3 metros abaixo dos canhoneados inferiores garantindo que, após o deslocamento e balanceamento hidrostático, todos os furos estejam cobertos com pasta.

A composição da coluna pode ser livre ou com packer. O uso de packer somente é necessário quando existe canhoneados abertos acima do ponto de injeção da pasta, ou quando existir dúvidas quanto à capacidade do revestimento em suportar as pressões de operação. Neste caso, a quantidade de tubos abaixo do packer deve ser dimensionada de forma conveniente, em função do volume de pasta a ser usado, de forma que o tampão de cimento deslocado fique abaixo do packer.



Após o balanceamento do tampão, os tubos imersos na pasta são retirados e se procede a uma circulação reversa, com volume correspondente a 1,5 vezes o volume da coluna de trabalho, para completa limpeza da mesma de eventuais resíduos de cimento. A partir daí a pasta é comprimida, geralmente segundo a técnica de hesitação.

Hesitação é uma técnica de compressão geralmente utilizada em operações à baixa pressão, na qual a pasta é comprimida em intervalos regulares para diversos níveis de pressão. Após a pressurização inicial, sempre inferior à pressão de quebra, aguarda-se a queda da pressão examinando-se a curva de pressão registrada na superfície. O aumento do raio de curvatura da queda de pressão indica a formação de reboco, ao passo que uma curvatura de raio constante nos diversos ciclos indica a injeção de pasta em alguma cavidade por detrás do revestimento ou a existência de furos ou vazamentos no interior do poço. Após a conclusão da compressão, é necessário liberar a pressão da tubulação e

determinar o volume de pasta injetado. Mesmo em intervalos fraturados, a técnica de hesitação é aplicável, com resultados plenamente satisfatórios, sendo recomendado usar pastas com maior filtrado API. Nos casos de zonas fraturadas onde não se consegue atingir pressões estabilizadas é conveniente que, após se injetar um volume desejado de pasta, se feche o poço e aguarde a pega da pasta, para posterior corte do cimento com a broca.

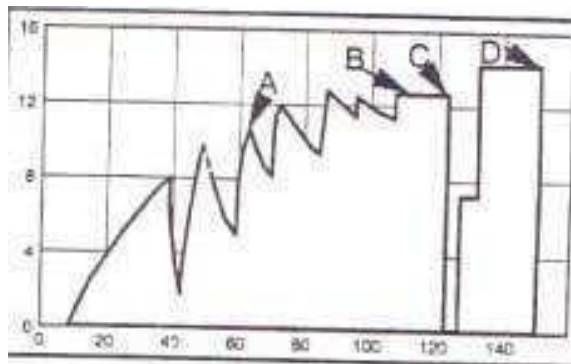


Fig. 3.3

Para se obter pressão final estabilizada em tamponamento de canhoneados, nos casos onde a operação está exigindo mais pasta do que se previa, é comum hesitar a pasta deixando-se tempos maiores de decaimento de pressão, visto que, nestes casos a intenção é permitir o início da pega do cimento. Uma operação considerada ideal é aquela onde tudo acontece de acordo com o previsto, sem sobressaltos, resultando em testes de pressão direta e reversa positivos. No caso de correções de cimentação primária, é recomendável que não se sonegue pasta, caso a operação esteja exigindo, visto que se pretende preencher completamente o restante do anular que não tenha sido preenchido durante a cimentação primária.

Nas operações de tampão balanceado realizadas sem packer, a pasta é deslocada até o ponto desejado, a tubulação de produção é suspensa acima do tampão de cimento e após circulação reversa para limpeza da coluna, o BOP é fechado, e então, é aplicada a pressão de injeção. Portanto, em tais operações deve-se considerar também como limite, além da pressão de quebra da formação, a resistência a pressão interna do revestimento.

Cálculo de Volumes para o Tampão Balanceado:

Conhecendo-se:

- capacidades do revestimento (C_r), da coluna de trabalho (C_t), do anular (C_a) e do anular junto com o da coluna de trabalho (C_{a+t});
- volume de pasta em bbl (V_p);
- comprimento do intervalo canhoneado (I_c);
- extremidade da coluna (H), que deve estar 3 metros abaixo da base dos canhoneados.

Calcula-se a altura do tampão de cimento com a coluna imersa, que naturalmente deve ser inferior ao comprimento da cauda (L_{cauda}):

$$H_c (m) = V_p (bbl) / C_{a+t} (bpm)$$

A altura do tampão de cimento sem a coluna:

$$H_s (m) = V_p (bbl) / C_r (bpm)$$

O volume de água atrás (V_{at}), normalmente utilizado 1 barril mas podendo ser aumentado, deve gerar uma altura de coluna de água de:

$$H_{at} = V_{at} (bbl) / C_t (bpm)$$

O volume de água à frente (V_{af}), para uma mesma altura de coluna de água é dada por:

$$V_{af} (bbl) = H_{at} (m) \cdot C_a (bpm)$$

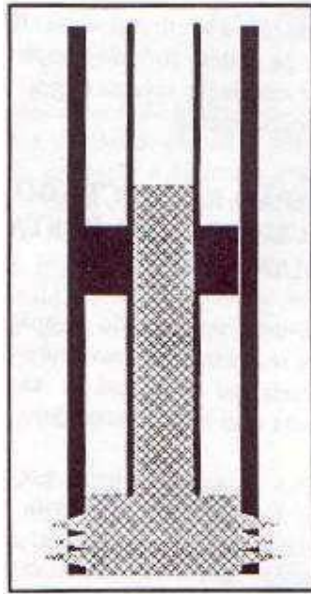
Calculando-se o volume de deslocamento (V_d) para balancear o tampão tem-se:

$$V_d (bbl) = C_t (bpm) \cdot [H (m) - H_{at} (m) - H_c (m)]$$

O número de tubos à retirar deve ser tal que deixe a extremidade da coluna fora do tampão de cimento. O volume de circulação reversa é igual a 1,5 vezes o volume de deslocamento.

2.3.5 - Injeção Direta

Esta técnica pode ser empregada tanto em operações à baixa pressão (quando há boa injetividade) como em operações à alta pressão. A pasta de cimento é bombeada, continuamente, até a pressão final desejada, que pode ser maior ou menor que a pressão de quebra da formação. Após o final do bombeio, a pressão é monitorada, e caso não fique estabilizada, se reinicia a operação com a injeção de mais pasta até se obter a completa vedação dos furos e a estabilização da pressão. A coluna de operação para os squeeze pode ser livre, com packer ou com retentor de cimento (vide fig. 3.4). Esta técnica de correção deve ser a preferida quando se prevê a utilização de maiores volumes de pasta.

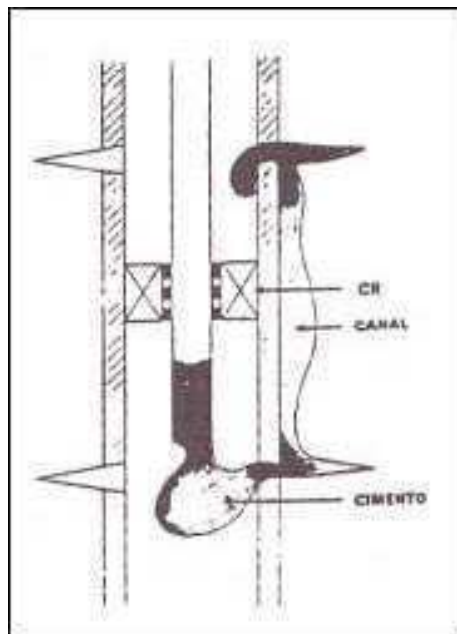


2.3.6 - Recimentação

É a técnica a ser utilizada quando os perfis sônicos indicam revestimento livre onde o isolamento hidráulico está sendo exigido. Nos casos onde o perfil não indique revestimento livre, possivelmente haverá dificuldade de circulação da pasta em longos trechos. A ausência de cimento em determinados trechos pode ser decorrência de entupimentos do anular, por carreamento de detritos durante a cimentação primária, gerando incremento da pressão de circulação e o fraturamento de alguma formação, ou também pode ser decorrência de sobredeslocamento da pasta. A recimentação consiste basicamente na circulação de colchões lavadores, colchões espaçadores e pasta de cimento entre os pontos previamente perfurados, de forma similar a uma cimentação primária.

Como diretriz, a recimentação deve ser executada o mais breve possível, logo após o término da cimentação primária, onde tenha se verificado indícios de falhas. Isto se deve ao fato de que o fluido de perfuração em repouso no anular pode ocasionar decantação dos sólidos, inviabilizando a circulação da pasta de cimento.

Um retentor de cimento é enato assentado próximo e acima do canhoneado inferior. Os retentores de cimento (*cement retainer*) tem constituição semelhante ao tampão mecânico (*bridge plug*) e possuem uma válvula para evitar o retorno da pasta de cimento para a coluna após a circulação da pasta e o desencaixe do *stinger*, reduzindo também o perigo de prisão da ferramenta pela deposição de pasta sobre o packer (3.5).



2.3.7 - Determinação da Altura Máxima da Pasta

O cálculo envolve o gradiente de fratura da formação, do fluido e da pasta, a altura máxima de cimento e canhoneados (profundidade), mais um fator de segurança.

Gradiente de fratura da formação	=	Gradiente de Fratura do Fluido X (Prof Canhoneados – Altura Max Cimento)
X		+
Prof Canhoneados		Gradiente de Fratura da Pasta X Altura Max Cimento
		+
		Fator de Segurança

2.3.8 - Composição do Cimento

Todos os tipos de cimento apresentam combinações de quatro componentes principais, representados pelas letras C, A, F e S.

- C: óxido de cálcio, CaO
- A: óxido de alumínio, Al₂O₃
- F: óxido de ferro, Fe₂O₃
- S: sílica, SiO₂

Outros componentes podem ser encontrados no cimento, em baixos teores. Entre eles estão óxido de magnésio (MgO) e sulfatos alcalinos originados de compostos de enxofre presentes nas argilas e no combustível de aquecimento do forno rotativo.

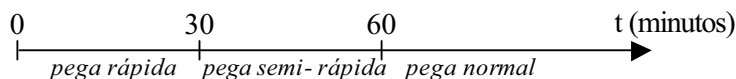
2.3.9 - Hidratação do Cimento

A adição de água ao cimento produz uma pasta bombeável que tem a propriedade de conservar uma plasticidade durante certo tempo, após o qual sofre um aumento brusco na sua viscosidade. A perda de plasticidade é denominada “pega” do cimento e ocorre em paralelo com um lento processo de endurecimento, responsável pelas propriedades mecânicas das pastas, argamassas e concretos. O fim da pega pode ser determinado quando a aplicação de pequenas cargas deixa de provocar deformações na pasta, que se torna um bloco rígido.

As reações de pega e endurecimento do cimento são bastante complexas, pelo fato de ser o cimento uma mistura heterogênea de vários compostos que se hidratam mais ou menos independentemente. O comportamento dos diferentes compostos frente à hidratação é responsável pelas propriedades aglomerantes do cimento.

2.3.10 - Classificação do Cimento quanto ao Tempo de Início da Pega

O cimento é dito de pega “normal” quando o início da pega ultrapassa 60 minutos, ou “semi-rápida” quando fica entre 30 e 60 minutos. Pega “rápida” demora menos de 30 minutos.



O fim da pega se dá de 5 a 10 horas após seu início para cimentos normais. Em cimentos de pega rápida, o fim ocorre em poucos minutos.

2.3.11 - Características da Pasta de Cimento

O desempenho de uma pasta de cimentos depende basicamente das características do cimento, da temperatura e pressão a que o mesmo é submetido, da concentração e do tipo de aditivos, da ordem de mistura, da energia de mistura e da razão água-cimento. Devido à grande interação entre os vários aditivos incluídos na pasta e à variação da composição do cimento em função da batelada, os testes com as pastas são imprescindíveis para a previsão do desempenho da pasta a ser utilizada.

Para a maior parte das operações com cimento na completação, a pasta deve apresentar baixa viscosidade, não gelificar quando estática, manter a viscosidade praticamente constante até a ocorrência da pega, ter baixa perda de filtrado sem separação de água livre ou decantação de sólidos. A verificação dessas características é feita através de testes laboratoriais, dentre os quais podemos destacar:

- **Reologia:** As propriedades reológicas estão relacionadas ao comportamento mecânico da pasta. Seu entendimento e controle nas operações com cimento visam otimizar a eficiência com que a pasta de cimento desloca o fluido do espaço anular sob determinado regime de fluxo e a real pressão exercida sobre as paredes do poço.

- **Perda de fluido:** O teste de filtrado estático visa medir a taxa de desidratação da pasta. A redução do filtrado de uma pasta através da adição de redutores de filtração previne sua desidratação prematura, protege formações sensíveis a dano e gera reboco de menor espessura e baixíssima permeabilidade.
- **Água livre:** Quando os sólidos de uma pasta não estão completamente dispersos na suspensão, pode ocorrer migração ascendente da água, que acumula-se em bolsões nas partes mais elevadas da coluna de cimento. O fenômeno cria canais e altera a pasta ao longo da coluna.
- **Resistência Compressiva:** Tem valor inversamente proporcional à razão água-cimento e não necessariamente à densidade. Uma boa resistência à compressão deve garantir o selamento de canhoneados.

Cálculo da Pasta de Cimento:

Além da concentração de aditivos sólidos e líquidos, o cálculo determina o volume de cimento, peso específico e rendimento da pasta, e volume de água da mistura. O entendimento de algumas definições se faz importante para a compreensão do cálculo:

- A concentração de sólidos é dada pela relação percentual em peso entre o aditivo e um saco de cimento (94 libras).
- A concentração de líquidos é dada pela relação em volume entre o aditivo e um saco de cimento (um pé cúbico).
- rendimento da pasta é o volume da mesma produzido por cada pé cúbico de cimento.
- fator água/cimento é a relação em peso entre água e cimento, expressa em percentual ou fração.
- Água de mistura é a água já misturada à todos os aditivos, líquidos ou sólidos, pronta para receber o cimento.

Aditivos para pasta de cimentos.

- **Controladores de filtrado:** Diminuem a permeabilidade do reboco de cimento criado e/ou aumentam a viscosidade do filtrado. Dividem-se em duas classes: materiais finamente divididos e polímeros solúveis em água. A redução do filtrado previne a desidratação prematura da pasta, gerando reboco de menor espessura e baixíssima permeabilidade.
- **Aceleradores de pega:** Aumentam a taxa de hidratação do cimento, através do aumento do caráter iônico da fase aquosa. Os mais utilizados são o cloreto de sódio e o cloreto de cálcio.
- **Retardadores de pega:** Têm efeito contrário ao dos aceleradores, decrescem a taxa de hidratação. Os mais comuns são celulosas, lignosulfonatos e derivados de açúcar. Atuam inibindo a precipitação do hidróxido de cálcio.

- **Dispersantes:** Reduzem a velocidade aparente, o limite de escoamento e a força gel das pastas, melhorando suas propriedades de fluxo. Facilitam a mistura da pasta, reduzem a fricção e permitem a confecção de pastas de elevada densidade. Os sulfonatos são os mais comuns. A adição de dispersantes pode produzir um efeito secundário indesejável: aumento da água livre e da decantação dos sólidos, tornando a pasta menor estável.
- **Adensantes:** Têm efeito principal oposto ao dos dispersantes, ou seja, aumentam a densidade da pasta.
- **Estendedores:** Visam reduzir a densidade ou aumentar o rendimento da pasta. Dividem-se basicamente em três categorias: estendedores de água (permitem adição de excesso de água), materiais de baixa densidade e gases.

3 - Avaliação da Cimentação e Perfilagem

3.1 - Introdução

A avaliação de cimentação ocorre após a instalação dos equipamentos de segurança e o posterior condicionamento do revestimento de produção/liner. Avaliar a cimentação consiste em checar se os inúmeros objetivos propostos para esta operação foram alcançados. Nas cimentações primárias, a pasta posicionada no espaço anular entre a parede do poço e o revestimento descido em cada fase de perfuração tem vários objetivos além de suportar o peso dos tubos. Por exemplo, no revestimento condutor, o objetivo é impedir a circulação de fluidos de perfuração e uma possível corrosão de aços. No de superfície, o cimento visa proteger horizontes superficiais de água e suportar equipamentos e colunas a serem descidos posteriormente. No revestimento intermediário, o objetivo é isolar/proteger formações instáveis geologicamente, portadoras de fluidos corrosivos, com pressão anormal e/ou com perda de circulação. No revestimento de produção, o objetivo principal do cimento é promover a vedação hidráulica eficiente e permanente entre os diversos intervalos produtores, impedindo a migração de fluidos.

A existência de uma efetiva vedação hidráulica entre intervalos produtores é de fundamental importância técnica e econômica, e condiciona o sucesso de etapas subsequentes. A intercomunicação de fluidos por detrás do revestimento pode causar a produção de fluidos indesejáveis, testes de produção e de avaliação incorretos, prejuízo no controle dos reservatórios e operações de estimulação mal sucedidas, com possibilidades inclusive de perda do poço. Portanto, a decisão de corrigir ou não a cimentação primária é de grande importância e deve ser tomada com a máxima segurança possível.

Ao longo da vida produtiva dos poços, o cimento também pode ser utilizado para tamponar canhoneados, reparar furos e vazamentos no revestimento, isolar zonas produtoras, combater perda de circulação e efetuar operações de abandono do poço.

Existem diversos métodos para a avaliação da qualidade de uma cimentação. Dentre os principais, encontram-se os testes hidráulicos, os testes de pressão com diferencial positivo ou negativo, os perfis de temperatura, os traçadores radioativos e os perfis sônicos e ultra-sônicos. A escolha do método de avaliação depende dos objetivos de cada trabalho.

Vamos tratar especificamente das técnicas de avaliação de cimentação mediante perfis sônicos. Este é o método mais utilizado e que permite efetivamente avaliar a qualidade da cimentação e a possibilidade de migração de fluidos.

3.2 - Objetivo da perfilagem sônica

A perfilagem sônica a poço revestido tem como objetivos principais: inferir a existência ou não de intercomunicações entre os intervalos de interesse, analisar o grau de

isolamento entre as zonas de gás, óleo e água, e verificar a aderência do cimento ao revestimento e à formação.

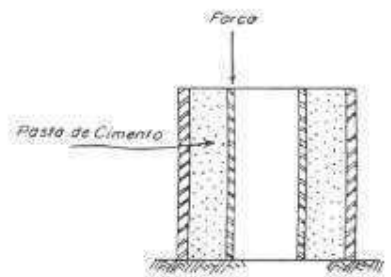
3.3 - Aderência do Cimento

O principal objetivo da cimentação primária é fornecer um bom isolamento hidráulico entre as diversas zonas permeáveis, impedindo a movimentação de fluidos, seja líquido ou gás, pelo espaço anular formado entre o revestimento e a formação.

3.3.1 - Tipos de aderência

Os principais tipos de aderência são:

- **Aderência Mecânica (Shear Bond Strength):** definida como sendo a razão entre a força requerida para iniciar o deslocamento de um tubo cimentado e a área lateral de contato.



Geralmente é expressa em psi e traduz o grau de adesão entre o cimento e o revestimento.

- **Aderência Hidráulica (Hydraulic Bond):** definida como a pressão de líquido que, aplicada na interface revestimento/cimento ou formação/cimento, provoca vazamento.

É expressa em psi e corresponde a aderência que impede a migração de fluidos.

3.3.2 - Fatores que influenciam a aderência do cimento

Os principais fatores relacionados às falhas de aderência nas interfaces entre revestimento, cimento e formação, são:

- **Rugosidade da parede externa do tubo:** A aderência mecânica e hidráulica é grandemente afetada em função do tipo de acabamento ou rugosidade da parede externa do revestimento. Quanto maior a rugosidade, maior a aderência.
- **Filme de lama e canalizações na interface:** A correta remoção da lama de perfuração é apontada como o fator mais importante para se evitar o fluxo de fluidos entre os diferentes horizontes permeáveis.
- **Tipo de fluido no anular:** A aderência sofre alteração em função do tipo de fluido que molha a superfície do tubo. [Inserir tabela 3.2](#)

Microanular

Pequenos canais provocados pela expansão/contração do revestimento. Variações de pressão e temperatura podem induzir a deformações no revestimento, que modificam as tensões no cimento e nas interfaces, possibilitando a quebra de aderência e o aparecimento de um pequeno espaço entre o revestimento e o cimento, chamado de microanular. Geralmente admite-se que não há fluxo pelo microanular devido às suas dimensões reduzidas, da ordem de 0,1mm.

Devido à redução parcial ou total da aderência na interface, o microanular interfere no perfil sônico, induzindo a uma interpretação equivocada. Uma solução para isto, é a corrida de um perfil pressurizado, de forma a promover a expansão do revestimento, resgatando assim a aderência na interface.

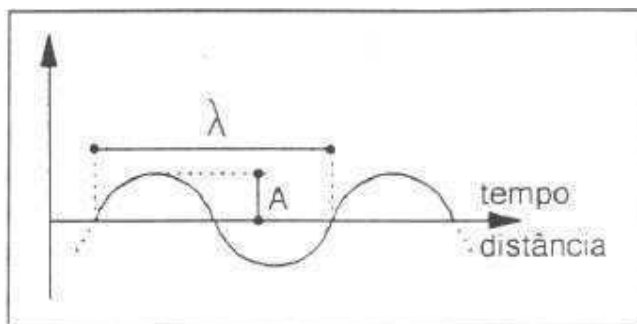
3.4 - Movimento Ondulatório

3.4.1 - A Onda - Conceitos Básicos

A propagação de energia acústica em um meio elástico se faz através de ondas mecânicas. Entende-se por meio elástico aquele que uma vez deformado volta ao estado inicial após cessar a causa perturbadora, como os líquidos e os sólidos.

Quando um ponto de um meio contínuo experimenta uma modificação qualquer em suas condições físicas devido a uma perturbação ou abalo impelido por uma fonte ou centro emissor de excitação, há uma propagação progressiva do choque mecânico a todos os pontos do meio, gerando um movimento oscilatório com o deslocamento de cada um desses pontos em relação à sua posição de equilíbrio, sem que o meio se desloque como um todo.

Entende-se por onda o conjunto de todas as diferentes posições assumidas por uma partícula de um meio elástico quando executa uma oscilação completa. A onda é caracterizada basicamente pelos seguintes parâmetros:



Amplitude (A): deslocamento da partícula em relação ao ponto de equilíbrio. É proporcional à energia de vibração das partículas.

Frequência (f): número de vezes em que um ponto passa por uma mesma posição relativa onda por unidade de tempo. É medida em vibrações por segundo ou hertz.

Período (T): tempo necessário para uma partícula realizar uma oscilação completa, de tal forma que a perturbação percorra uma distância igual ao comprimento de onda. É o inverso da frequência.

Comprimento de onda (λ): distância percorrida pelo pulso durante o intervalo de tempo igual ao período.

Velocidade de propagação da onda (V): é a razão entre λ e T .

Tempo de trânsito (t): é o tempo gasto na propagação da onda por unidade de comprimento do meio. É o inverso da velocidade.

Se uma fonte de energia produz uma perturbação isolada, tem-se a propagação de uma onda simples; se há uma excitação contínua da força perturbadora tem-se a propagação de um conjunto de ondas simples, denominado “trem de ondas”. Além disso, movimento ondulatório tem um caráter de dupla periodicidade: no tempo, com a repetição do fenômeno em instantes regulares, e no espaço, com a repetição do fenômeno em pontos regularmente espaçados.

3.4.2 - Formas de Propagação

Existem dois tipos de ondas mecânicas ou elásticas, que se diferem em relação à direção do movimento vibratório dos pontos do meio, embora possuam a mesma direção de propagação.

Onda Longitudinal, Compressional ou Onda P: o movimento das partículas do meio ocorre na mesma direção de propagação da onda. A perturbação é transmitida pela proximidade entre as partículas, que se movem uma contra as outras, provocando no meio uma seqüência alternada de zonas de expansão, extensão ou dilatação e zonas de compressão ou condensação. Fig 2.2 A

Onda Transversal, Cisalhante ou Onda S: o movimento das partículas do meio é perpendicular à direção de propagação da onda. A perturbação é transmitida pelo atrito entre as partículas, que provoca um arraste ponto a ponto.

Cabe ressaltar que as ondas longitudinais se propagam em sólidos e fluidos, porém, as ondas transversais somente são transmitidas em sólidos.

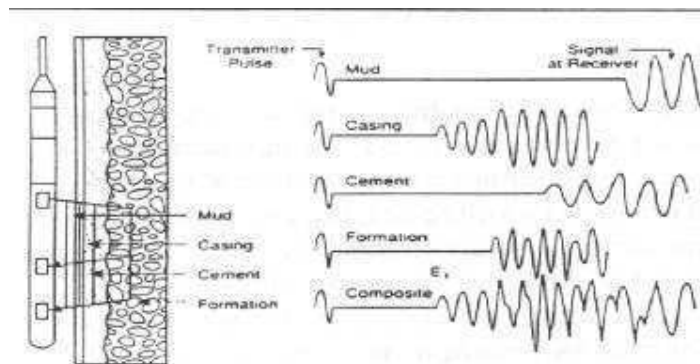
3.5 - Perfis Sônicos

A ferramenta usada na obtenção do perfil sônico, CBL/VDL, é composta basicamente por um transmissor, dois receptores acústicos com transdutores, um cabo condutor e um aparelho de medição (unidade de processamento). Os receptores ficam localizados normalmente um a 3 pés e outro a 5 pés do transmissor. O conjunto também requer um

número adequado de centralizadores de forma que a seção que contém o transmissor e receptores permaneça perfeitamente centralizada no revestimento durante a perfilagem.

O transmissor recebe pelo cabo condutor a energia elétrica e a converte em energia mecânica, emitindo repetidamente pulsos curtos de energia acústica (10 a 60 pulsos por segundo) com duração de cerca de 50 microsegundos cada. A frequência de cada pulso é de 20 KHz para ferramentas de grandes diâmetros (acima de 3”) ou de 30 KHz para ferramentas de diâmetros menores (abaixo de 2”). A grande maioria do sinal acústico chega ao receptor em cerca de 2000 microsegundos.

O pulso sonoro emitido faz vibrar o meio fluido no qual o transmissor está imerso, criando uma frente de onda aproximadamente esférica que se propaga em todas as direções. Quando encontra o revestimento, a energia acústica é refratada segundo a Lei de Snell, tomando diferentes caminhos até chegar ao receptor. Uma parcela desta energia se propaga segundo um ângulo de incidência crítico, viajando pelo revestimento. Outra parcela é refletida e se propaga diretamente pelo fluido no interior do poço, e parte é refratada para o anular (cimento) e formação.



3.5.1 - Tipos de Sinais

A onda longitudinal que viaja diretamente pelo revestimento é, geralmente, a primeira a chegar devido a maior velocidade do som no aço que nos demais meios envolvidos, aliado a uma distância relativamente mais curta. Posteriormente, chegam as ondas longitudinais e transversais oriundas da formação e os sinais que viajam pelo fluido.

A acima é uma representação esquemática por ordem de chegada dos sinais e também contém uma composição final do trem de ondas. No receptor, a energia sonora é reconvertida em energia elétrica e os sinais são enviados à superfície pelo cabo condutor para serem devidamente processados.

3.5.2 - Apresentação do Perfil Conjunto CBL/VDL

O perfil CBL/VDL é o registro de três medidas simultâneas, que são o tempo de trânsito, o sinal de amplitude do revestimento e o trem de ondas. O TT é utilizado para assegurar a qualidade e a acuracidade do sinal de amplitude. O sinal de amplitude do

revestimento é usado para calcular a percentagem de cimento do anular. O registro completo do trem de ondas na forma de assinatura de onda ou densidade variável permite uma avaliação da aderência entre cimento e formação, controle de qualidade e outros fatores que afetam as medidas anteriores. Tradicionalmente é apresentado em três pistas:

- A primeira pista contém a curva do tempo de trânsito(TT), uma curva de correlação a poço aberto (Gamma Ray) e um localizador de luvas do revestimento (Casing Colar Locator). O perfil de raios gama, que mede a radioatividade natural da formação, pode ser corrido a poço aberto ou revestido, sendo por isso utilizado para colocar o perfil CBL/VDL em profundidade com o perfil base de referência a poço aberto. O CCL é usado para detectar as luvas do revestimento, que causam uma deflexão na curva. Como o CCL é colocado em profundidade com o perfil base de referência a poço aberto (GR corrido a poço aberto), ele é utilizado como referência de profundidade para as operações futuras no poço. Os dados de profundidade são registrados entre as pistas 1 e 2.
- A segunda pista contém a curva de amplitude e/ou taxa de atenuação. A taxa de atenuação é normalmente apresentada na escala 20 a 0 dB/pé. A amplitude é registrada na escala de 0 a 50 ou 100 mV, com curvas amplificadas de 0 a 10 ou 20 mV, respectivamente.
- A terceira pista contém o registro do trem de ondas, apresentando na forma de assinatura de onda ou de intensidade variável (VDL). A escala horizontal usual é de 200 a 1200 microsegundos.

3.5.3 - Curva de Amplitude

O sinal acústico que se propaga pelo revestimento perde energia para os meios que estão em contato com a parede do aço, interna e externamente. Como o material no interior do poço é geralmente um fluido homogêneo, a atenuação sofrida pelo pulso acústico é pequena e constante. A única variável é o material no anular. Se for um líquido, a energia perdida é pequena e a amplitude do sinal medido no receptor é alto (50 a 90mV). Se existir cimento de qualidade aderido em toda a circunferência do revestimento, a quantidade de energia perdida para o meio será grande e a amplitude registrada, pequena (0,2 a 10mV). A existência de canalizações corresponderá a valores médios entre os limites anteriores, sendo que a amplitude medida é inversamente proporcional a quantidade de cimento aderida à parede externa do revestimento. (quanto maior for a quantidade de cimento aderida, menor a amplitude registrada).

3.6 - CBL: Cement Bond Logging

O Perfil de Aderência do Cimento (Cement Bond Log) é o registro contínuo da amplitude, em mV, do primeiro sinal que chega ao receptor distante 3 pés do transmissor, sendo geralmente este sinal aquele que viaja pelo revestimento. A interpretação deste perfil baseia-se nesta premissa, a de que o sinal do revestimento chegará antes de qualquer outro. (Em revestimentos livres isto será sempre verdade. Em

intervalos bem cimentados, a depender das propriedades acústicas da formação e da espessura de cimento do anular, isto pode não acontecer).

Considerando que os primeiros ciclos são provenientes do revestimento e que a intensidade do sinal é função do material presente no anular, o registro da amplitude do primeiro ciclo permite uma avaliação da qualidade da cimentação. Como citado anteriormente, altos valores de amplitude correspondem à ausência de cimento ou de aderência na interface, enquanto baixos valores correspondem à presença de cimento no anular. A variação da amplitude irá indicar a qualidade da aderência, e isto ocorre da seguinte forma:

- Amplitude atenuada: < que 10mV, indica boa aderência cimento-revestimento.
- Amplitude alta: > que 10mV, indica má aderência.

Este perfil é conhecido como o que efetua o controle de aderência entre cimento e revestimento. As variações de amplitude indicam mudanças na resistência do cimento à compressão, no diâmetro e espessura do revestimento, na percentagem da circunferência cimentada. Por último, cabe ressaltar que este perfil é sensível a presença de microanular.

3.7 - VDL: Variable Density Logging

O Perfil de Densidade Variável (Variable Density Log) é um registro contínuo de trem de ondas, na forma de traços de luminosidade variável, que chega ao receptor distante 5 pés do transmissor. O perfil avalia a qualidade da cimentação investigando a aderência do cimento ao revestimento, mas principalmente, do cimento à formação.

Há duas formas tradicionais de se apresentar o registro completo do trem de ondas que chega ao receptor. A primeira delas é discreta, sendo registrado no perfil o sinal acústico como este aparece no osciloscópio, na forma de assinatura de onda, com espaçamento entre as assinaturas de onda de 2 a 4 pés. Entretanto, a forma de apresentação mais utilizada pelas companhias é através do perfil de densidade variável (VDL), também chamado de micro-sismograma. Através do painel eletrônico e da unidade de raios catódicos existentes na superfície, os sinais exibidos no osciloscópio são convertidos em faixas de luz com intensidade luminosa variável em função da magnitude de sua amplitude.

O VDL é a melhor apresentação quando se quer determinar a presença de microanular e permite também uma melhor visão global do poço, sendo fundamental para se interpretar a boa aderência entre cimento-formação (ausência do efeito chevron, ausência de sinal de revestimento, presença de sinal de formação) ou se há revestimento livre (faixas paralelas retas, claras e escuras).

3.8 - Revestimento Livre

O revestimento livre apresenta um perfil CBL/VDL característico de um revestimento livre. Devido à homogeneidade do meio (fluido no interior do poço e no anular) os sinais são uniformes, alternando faixas paralelas claras e escuras, bem distintas. Os sinais da formação não são registrados.

Existem muitos sinais secundários causados por reflexões das luvas de revestimento, das irregularidades da parede do poço ou nos limites das camadas de formação, etc, que chegam ao receptor. Em frente às luvas do revestimento livre são observados o efeito “chevron”, que são marcas em forma de w causadas por reflexões devido à descontinuidade do metal nas luvas.

3.9 - Revestimento Cimentado

Em revestimentos bem cimentados, os sinais provenientes do revestimento têm baixas amplitudes e praticamente não aparecem no perfil VDL.

Quando há aderência entre o cimento, revestimento e formação, a energia acústica se propaga pela formação como ondas longitudinais e transversais, sendo registradas na forma de faixas sinuosas devido à heterogeneidade do meio.

As ondas longitudinais são mais velozes e chegam primeiro; as ondas transversais têm maiores amplitudes e, por serem muito atenuadas ao atravessar espaços preenchidos com líquidos ou gás, sua detecção é um atestado de integridade e aderência do cimento. Em perfis CBL, o sinal de baixa amplitude indica a ocorrência da boa cimentação.

3.10 - Interpretação Qualitativa do Perfil CBL/VDL

3.10.1 - Curva de Tempo de Trânsito

A interpretação do perfil CBL/VDL deve sempre começar pela análise da curva de TT.

O TT é usado primeiramente para verificar se a sonda de perfilagem está centralizada, que é uma condição absolutamente essencial para validar o perfil. Isto é feito comparando-se o TT registrado em revestimento livre, não afetado por formações rápidas, com os valores calculados e/ou tabelados. Desvios maiores que 4 microsegundos indicam descentralização, tornando o perfil inválido.

3.10.2 - Resumo para interpretação

- **Revestimento livre**
 1. CBL: Altas amplitudes e tempo de trânsito constante. Nas luvas do revestimento, a amplitude decresce e o TT aumenta.
 2. VDL: Fortes sinais do revestimento e das luvas (efeito chevron).

- **Boa aderência entre revestimento, cimento e formação**
 1. CBL: Baixas amplitudes, com possibilidade de alongamentos e saltos de ciclo no TT. Formações rápidas podem causar alterações na amplitude, TT e no VDL.

2. VDL: Fortes sinais da formação e sinais fracos do revestimento.

- **Microanular em revestimento bem cimentado**

1. CBL: Amplitude alta ou moderada.
2. VDL: Forte sinal do revestimento e forte sinal da formação.

- **Boa aderência entre revestimento e cimento/Aderência ruim entre cimento e formação/Formação lenta**

1. CBL: Baixas leituras de amplitude.
2. VDL: Sinais fracos do revestimento.

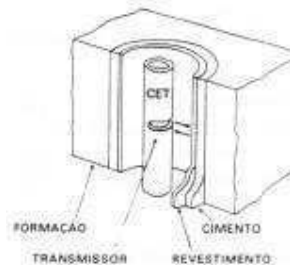
- **Formação Rápida**

1. CBL: Amplitudes altas e instáveis.

3.11 - Perfil Ultra-sônico

3.11.1 - Princípio de funcionamento

A CET é a ferramenta utilizada na obtenção do perfil ultrassônico CEL (Cement Evaluation Log). Oito transdutores são dispostos helicoidalmente em diferentes azimutes, de tal forma que cada um avalie 45° da circunferência. Um nono transdutor com distância conhecida de um refletor é posicionado logo abaixo do centralizador inferior e mede a velocidade acústica no fluido do poço.



3.11.2 - Apresentação do perfil CEL

Em um perfil CEL, as seguintes curvas são apresentadas:

- **Ovalização:** diferença entre o maior e o menor dos quatro diâmetros.
- **Caliper acústico (CALU):** média dos valores dos quatro diâmetros.
- **Excentralização (ECCE):** para controle de qualidade. Comparação entre raios opostos.
- **Perfil de raios gama (GR):** para correlação com perfil a poço aberto.
- **Localizador de luvas (CCL-Casing Colar Locator):** para correlação e controle de profundidade.
- **Desvio (DEVI):** auxílio na análise de cimentação.
- **WWM:** média da relação $w2/w1$, dos oito transdutores.
- **Rotação da Ferramenta (RB):** permite o controle do movimento de rotação da ferramenta no interior do poço e a identificação geométrica de possíveis falhas na cimentação. Muito útil em poços direcionais e no futuro, com a utilização de canhões direcionais para squeeze. Refere-se à posição do 1º transdutor.
- **Máxima Resistência Compressiva (CSMX):** média dos três maiores valores.

- **Mínima Resistência Compressiva (CSMN):** média dos três menores valores.
- **Presença de Gás e Reflexões Secundárias:** Sinalizado para cada transdutor por uma linha estreita e uma marca larga, respectivamente.

3.12.3 - Considerações finais

Este perfil apresenta boa resolução vertical e circular, mas não é tão eficiente quanto o perfil sônico CBL/VDL para investigar a aderência cimento-formação. Na verdade, ele completa a avaliação da qualidade da cimentação em combinação com o perfil CBL/VDL.

3.14 - Cuidados na Perfilagem Sônica

Os principais cuidados durante uma perfilagem sônica são enumerados a seguir:

- Verificar o posicionamento de revestimentos concêntricos.
- Pesquisar anormalidades ocorridas durante a cimentação primária.
- Verificar o tipo de pasta, peso e topos de revestimento previstos.
- Verificar se estão previstas estimulações ou injeção de água ou gás (maior rigor na avaliação da cimentação para os casos em que o revestimento for trabalhar pressurizado).
- Verificar o tempo entre término da cimentação primária e a corrida do perfil (cimento aumenta a resistência com o tempo).
- Verificar a calibração das ferramentas durante a descida (parâmetros relacionados ao tipo de revestimento, tipo de pasta, etc.).

4 - Canhoneio

4.1 - Introdução

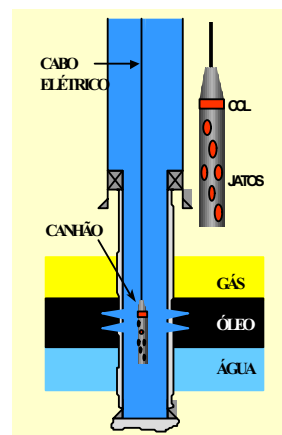
O requisito mínimo para que possa haver algum sucesso na completação de um poço é o estabelecimento de uma comunicação limpa e efetiva entre o poço e a formação.

Dentre as técnicas para a perfuração desse canal de comunicação poço / formação, a mais comumente utilizada é conhecida como canhoneio, *gun perforation* ou *jet perforation*¹. Ela se refere à perfuração do revestimento, do cimento e da formação através de cargas explosivas.

4.2 - Processo

O processo convencional de canhoneio é baseado fundamentalmente no emprego de cargas explosivas montadas em série em um suporte metálico e introduzidas em uma peça tubular (também conhecida como canhão), responsável pelo isolamento entre o explosivo e o poço.

O canhão é então descido no poço, tensionado por um cabo elétrico, que por sua vez conduz um pulso acionador das cargas.



4.3 - Vantagens

Dentre as vantagens oferecidas pelo método de canhoneio, destacam-se:

- capacidade de viabilizar a produção de fluido de formações em poços que encontram-se já revestidos, agregando mais estabilidade à completação;
- seletividade na produção, devido aos diversos níveis da formação onde ocorrem os disparos do canhão (mais detalhado a seguir).

Características dos Disparos:	Características do Canhão:
<ul style="list-style-type: none">• velocidade = 6.000 m/s;• pressão = 4.000.000 psi;• defasagem: 0°, 90°, 120° e 180°; densidade: 4 a 21 HJ/FT.	<ul style="list-style-type: none">• L = 16/20”;• Diâmetro = 3 3/8” a 5”.

¹ Os métodos pioneiros de canhoneio utilizavam como carga balas de munição (*gun perforation*); com o advento da tecnologia empregada, surgiu o canhoneio à jato com cargas moldadas (*jet perforation*), de maior penetração e menor risco de destruição da formação.

4.4 - Classificação

Quanto ao sistema de classificação do canhoneio, este se dá em função da pressão exercida junto à formação. O processo pode ser caracterizado como *Overbalance*, *Underbalance* ou ainda *Extreme Overbalance*.

4.4.1 - Overbalance

O método de *Overbalance* baseia-se numa pressão positiva do poço em relação à formação, exercida pelo fluido presente no poço (fluido de completação).

Devido a esse diferencial de pressão, logo após o canhoneio ocorre uma invasão do fluido de completação dentro da área canhoneada, contaminando as imediações do poço. Isto representa perigo para a completação, pois caso haja uma incompatibilidade entre o fluido e as argilas da formação, então pode-se provocar um dano tal que só seja possível a descontaminação através de tratamento químico específico, o que acarretaria mais gastos com o poço.

Além disso, outro problema que ocorre no processo de *Overbalance* é a compactação dos detritos da explosão nos poros da formação. O fluxo que se inicia após o disparo acaba por empurrar os resíduos dos explosivos, do cimento e do revestimento, assim como outras partículas existentes na lama ou no fluido de completação, em direção aos poros da formação. Este fenômeno é chamado tamponamento, e vem a dificultar o fluxo de fluido da formação em direção ao poço, implicando em queda de produtividade.

O *Overbalance* lança mão das válvulas de fechamento de emergência do poço (BOP) durante o canhoneio, o que possibilita que os disparos ocorram antes que a completação do poço esteja totalmente finalizada (os fluxos dos fluidos são controlados de acordo com as seções do poço).

4.4.2 - Underbalance

O método de *Underbalance*, como o próprio nome já sugere, tem como mecanismo principal o inverso do *Overbalance*. Isto significa que agora a pressão exercida é no sentido da formação para o poço.

Este método busca solucionar as deficiências apresentadas pelo *Overbalance*. O diferencial contrário de pressão passa a ser, neste novo caso, favorável à limpeza dos detritos do canhoneio imediatamente após a explosão, prevenindo assim o tamponamento. Outra vantagem é que, se o fluxo tende a ser da formação para o poço, então também não deve haver contaminação da formação pelo fluido do poço.

Para o canhoneio por *Underbalance* é necessário que o poço seja totalmente completado antes de se iniciar o processo, visto que a pressão negativa no poço em relação à formação indica que logo que os disparos ocorram, o poço dará início à produção do fluido da formação. Esta capacidade de início imediato da produção é uma das principais vantagens do *Underbalance*.

O Underbalance é mais seguro que o Overbalance no sentido de que o poço não fica exposto em momento algum, levando-se em conta que as maiores incidências de *blow outs* ocorrem durante as operações de completação.

Em muitos casos, a técnica de Underbalance é considerada a mais adequada para a completação, entretanto não se pode generalizar tal adequação. Apesar de bastante conhecida, esta técnica não pode ser tida como totalmente dominada. Inúmeros problemas já foram constatados, envolvendo deformação nos revestimentos, instabilidade e colapso dos furos canhoneados com conseqüente produção de areia. Portanto deve-se estudar cautelosamente os impactos deste tipo de canhoneio na formação.

Em geral o Underbalance é preferível ao Overbalance, devido à limpeza dos detritos da explosão, o que desobstrui as vias para escoamento do fluido da formação. Porém, algumas pesquisas indicam que, para reservatórios de gás altamente pressurizados, o canhoneio com Overbalance pode obter melhores resultados que aquele com Underbalance.

4.4.3 - Extreme Overbalance (EOB)

Este método é uma variação do primeiro apresentado (Overbalance), e se baseia numa altíssima pressão no sentido do poço para a formação.

Os principais objetivos do EOB são basicamente limpar os túneis dos canhoneados dos resíduos sólidos ou depositados, resultantes do disparo das cargas, e criar fraturas de pequena penetração e alta condutividade que ultrapassem a região danificada pelo fluido de perfuração e pelo próprio canhoneio, ampliando o raio de drenagem do poço.

Para a efetivação dessas metas, dois processos são combinados:

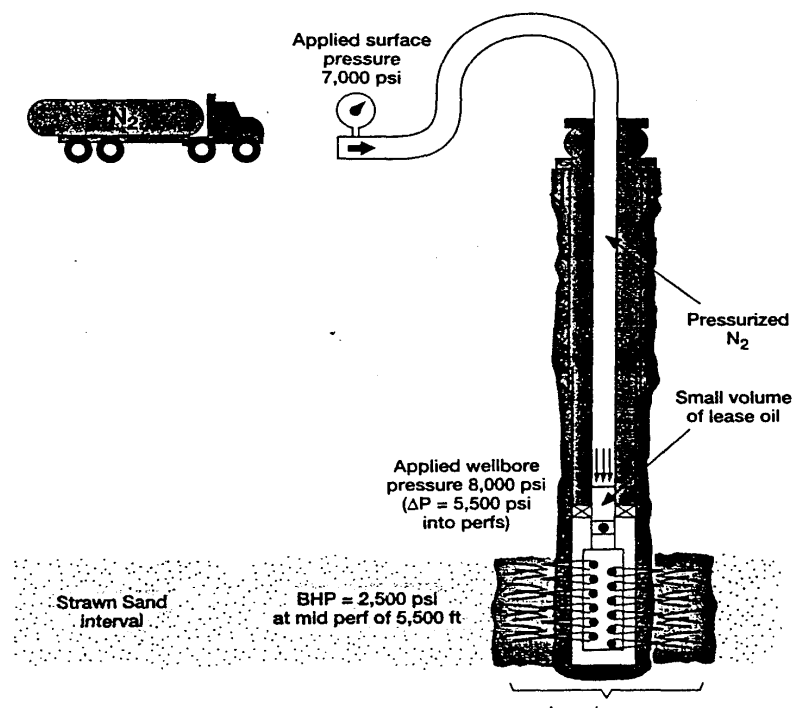
- o grande excesso de pressão e a ação do fluxo de fluido e gás pelos canhoneados, no momento do disparo das cargas, asseguram a completa remoção de quaisquer resíduos que possam bloquear a entrada dos canhoneados, forçando-os para o fundo dos túneis (estudos mostram que apenas a porção intermediária do túnel de canhoneio está apta a contribuir com o fluxo de fluidos, no caso do canhoneio convencional);
- a alta pressão no poço, resulta em ruptura abrupta da formação, criando fraturas radiais, de pequena penetração, a partir do túnel canhoneado, cuja extensão ultrapassa a zona danificada pelo fluido de perfuração e pelo próprio canhoneio do poço.

A elevada pressão no EOB é produzida por aplicação direta na cabeça do poço (como se pode observar na figura a seguir). Os fluidos utilizados no poço são o fluido de completação e N₂ (gás).

Num exemplo prático, um poço é canhoneado com 7000 psi de Overbalance (8000 psi no fundo do poço). Um método de utilização do EOP (*Extreme Overbalance Perforation*) consiste em pressurizar a coluna de completação com nitrogênio, deixando um pequeno volume de fluido acima do intervalo a ser canhoneado. No momento em que ocorre o disparo das cargas e a abertura dos túneis (em cerca de 40 a 60 microssegundos), o líquido pressurizado, empurrado pelo gás e o próprio gás, fluem pelos canhoneados em alta velocidade, forçando os resíduos que se encontram nos túneis, a se deslocarem para o fundo. A alta pressão de Overbalance gerada pela expansão do nitrogênio, também é suficiente para causar o fraturamento abrupto da formação (em cerca de 1 a 5 milissegundos), criando pequenas fraturas que irão se estender por poucos pés a partir de cada canhoneado e ultrapassar as áreas com dano.

O volume de gás pressurizado também mantém a alta pressão por um tempo relativamente longo, de maneira uniforme, sobre todos os canhoneados. Como resultados desse processo tem-se uma eficiência de quase 100% do canhoneio, com a maioria dos canhoneados aptos a contribuir para o fluxo de hidrocarbonetos.

Com o emprego do EOP obtiveram-se resultados surpreendentes, que aparentemente superam as dificuldades encontradas no uso das técnicas convencionais. Apesar dessa

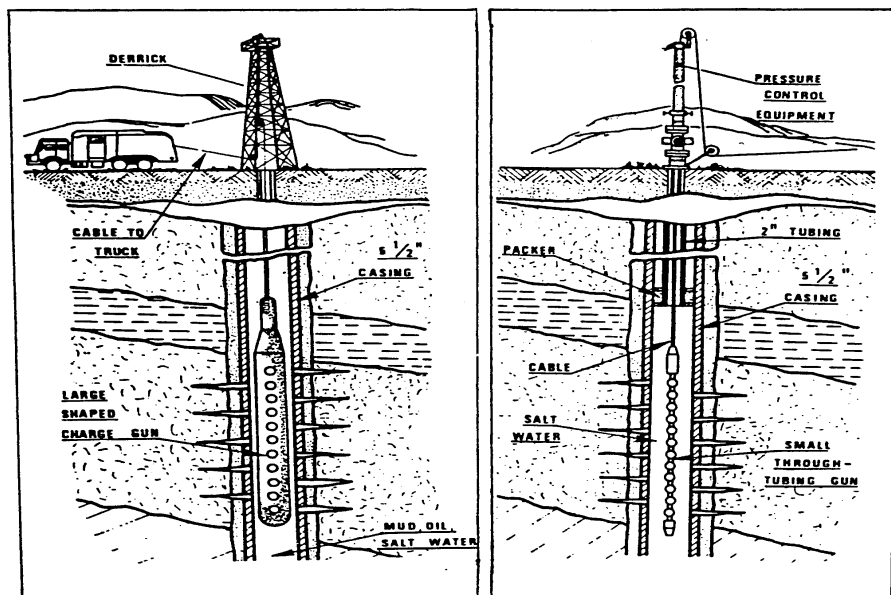


técnica estar se difundindo rapidamente, a experiência das companhias operadoras e de serviço nesse tipo de completação ainda é pequena. Poucas operações foram realizadas, e por isso os resultados ainda são bastante discutíveis.

4.5 - Tipos de Canhoneio

Como reflexo de constantes pesquisas e inovações na busca por melhora de produtividade, diferentes tipos de canhoneio foram surgindo ao longo do tempo, dentre os quais:

- Convencional² (já comentado no item 5.1);
- Through Tubing;
- TCP (Tubing-conveyed Perforation);
- Outros (Tubing Puncher, Jet Cutter...).



Convencional.

Through Tubing.

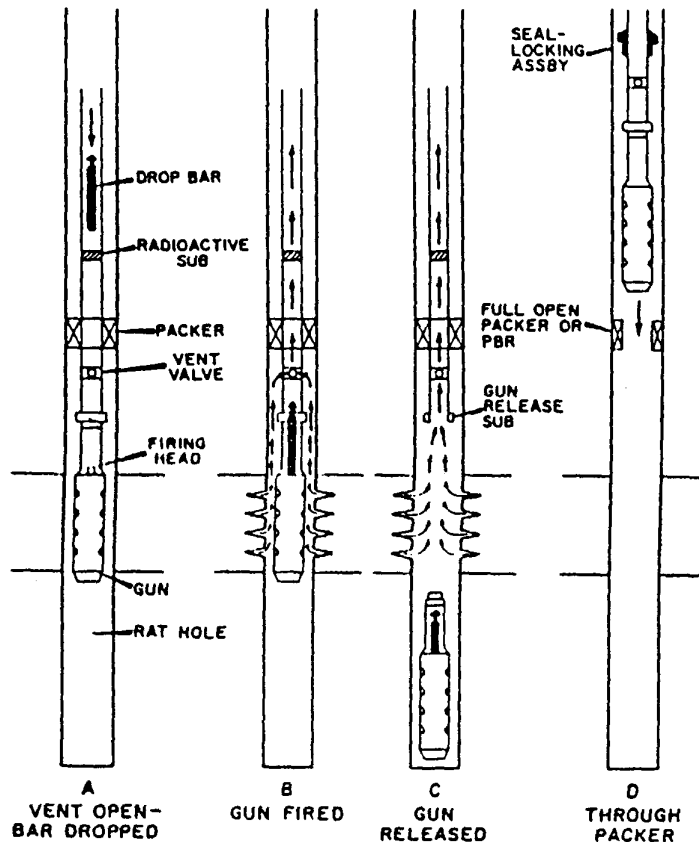
O sistema de Through Tubing consiste no canhoneio do revestimento em um intervalo abaixo da extremidade da coluna, com o uso de cargas unidirecionais, e necessita que a coluna seja gabaritada para dar suporte à estrutura (packer e subs).

Esse tipo de canhoneio foi inicialmente desenvolvido para atender ao processo de Underbalance. Infelizmente alguns problemas puderam ser observados, tais como baixa performance, problemas mecânicos e operacionais, quantidade excessiva de resíduos decorrentes das cargas usadas, e diferencial de pressão limitado pelos equipamentos de controle e segurança do poço e pelo fato do canhão ser suspenso por um cabo.

² O canhoneio para *squeeze* é convencional, porém com cargas de maior diâmetro.

Já o TCP - Tubing-conveyed Perforation , apresentado pela primeira vez em 1972, acopla um canhão de grande diâmetro (até 7") e um "obturador" (*packer actuated vent assembly*) à coluna de produção, que por sua vez é descida no poço totalmente equipada e instalada no cabeçal com a árvore de natal. Ele também fora desenvolvido para atender ao Underbalance.

O canhão pode ser disparado de forma hidráulica (através de pressão na cabeça do



Canhoneio do tipo TCP.

poço), elétrica (com um conector a cabo) ou mecânica. Neste último caso o acionamento se dá com o lançamento de uma barra de impacto no interior da coluna (vide figura a seguir). Após o disparo o canhão é desconectado e abandonado temporariamente no fundo do poço, enquanto se processa a produção do fluido da formação (como se pode perceber pela figura a seguir, o packer isola hermeticamente o poço enquanto a liberação do canhão possibilita o fluxo do fluido de produção rumo à superfície). Uma vez aberto o packer, torna-se possível conectar de novo o canhão e trazê-lo de volta à superfície.

Vantagens do TCP:

- Otimização do diferencial negativo de pressão entre os fluidos da formação e do poço, aumentando a quantidade de orifícios desobstruídos em condições de fluir;
- Otimização do afastamento entre o canhão e o revestimento devido ao uso de diâmetro adequado do canhão para um dado revestimento, obtendo-se assim máxima eficiência tanto em penetração quanto em diâmetro de orifício;
- Aumento na densidade das perfurações: possibilidade de se disparar até 12 tiros por pé em revestimentos de 7" com canhões de 5" e até 6 tiros por pé em revestimentos de 5" com canhões de 3 3/8";
- Maior segurança no canhoneio devido à coluna estar no fundo com o packer assentado e o equipamento de superfície testado;
- Menor tempo de sonda gasto no canhoneio, principalmente no caso de intervalos extensos quando a operação é realizada em uma única descida;
- Redução do custo de completação no que se refere ao fluido de amortecimento, principalmente em poços com pressões anormalmente altas onde o mesmo se torna oneroso com a utilização, nos casos mais críticos, de material importado;
- Possibilidade de se evitar futuras estimulações, principalmente em reservatórios sensíveis ao dano pela invasão de fluido;
- Menor risco do canhão topar, principalmente em poços direcionais.

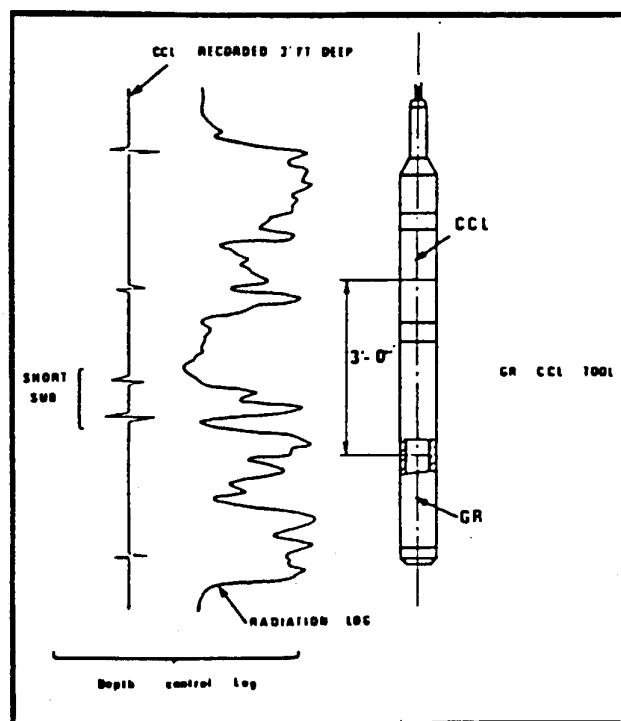
Desvantagens do TCP:

- Maior custo do que os canhoneios convencionais;
- Necessidade de se manobrar com a coluna de produção no caso de falha ou de se checar o mecanismo de disparo do canhão;
- Necessidade do canhão permanecer no fundo até uma próxima intervenção no poço caso o mesmo entre em produção após o canhoneio.

Os intervalos a serem perfurados e completados são escolhidos a partir dos perfis corridos a poço aberto, sendo que para efetuar o canhoneio, se faz necessário ter um perfil para correlação que funciona a poço aberto e revestido. Geralmente se usa um perfil de raios gama (GR) que apresenta a medida da radioatividade natural das formações e em rochas sedimentares dá uma idéia do teor de folhetos.

Juntamente com o GR se corre um perfil localizador de luvas conhecido como CCL (*Casing Collar Locator*), que tem a profundidade amarrada ao GR e, portanto, relacionada ao perfil básico.

O conjunto GR / CCL é conhecido como perfil de controle de canhoneio ou PDCL



Correlação nas luvas.

(*Perforation Depth Control Log*), e a vantagem de se dispor do mesmo é não se necessitar de correr um GR nos canhoneios futuros, bastando apenas acoplar um CCL aos canhões e efetuar a correlação pelas luvas. Durante a avaliação da cimentação deve-se correr o perfil GR / CCL juntamente com um perfil sônico conhecido como CBL / VDL.

A profundidade das luvas deve ser ajustada correlacionando-se o GR / CCL com o perfil GR corrido a poço aberto no período da perfuração. Todas as medidas de profundidade posteriores vão se referir a este perfil GR / CCL (sendo o CCL mais barato que o GR). Antes de posicionar o canhão para disparo, é preciso que se correlacione a profundidade do CCL do canhão como CCL corrido no perfil CBL / VDL.

A utilização destes perfis é simples e as possibilidades de erros no controle de profundidade são remotas. No entanto, se isto vier a acontecer, ficam comprometidas todas as operações subsequentes que dependem basicamente de avaliações de produtividade do intervalo perfurado.

4.6 - Cargas Explosivas

Os métodos pioneiros de canhoneio utilizavam como carga balas de munição (*gun perforation*); com o advento da tecnologia empregada, surgiu o canhoneio à jato com cargas moldadas (*jet perforation*), de maior penetração e menor risco de destruição da formação. Alguns problemas no uso destes dois tipos de carga podem ser aqui apresentados:

Cargas à bala

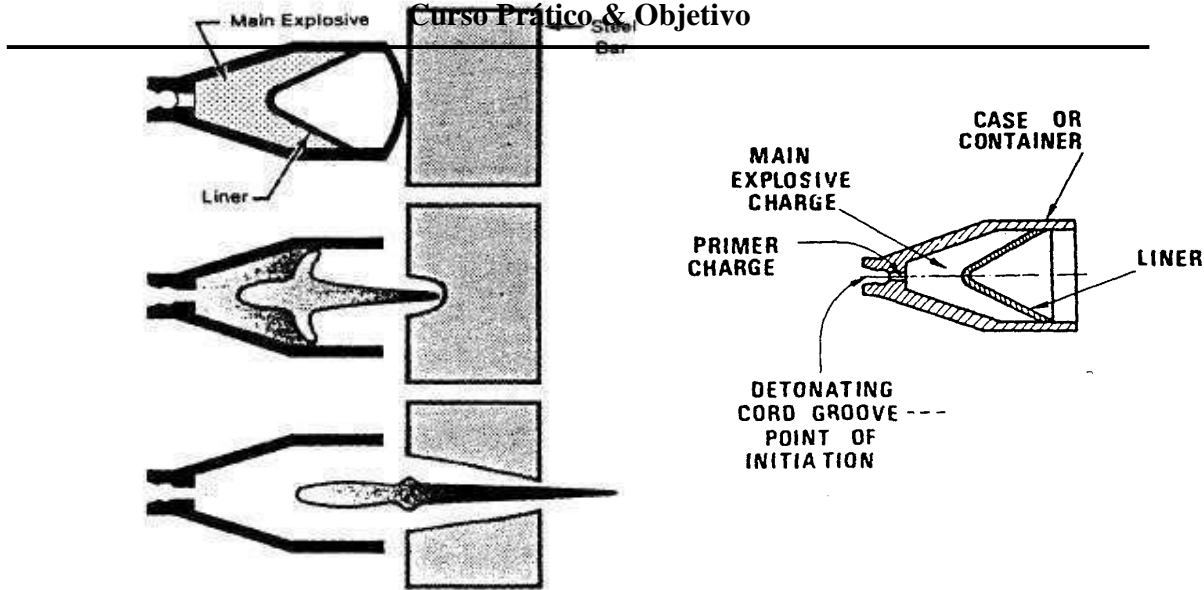
- A penetração decresce quando a resistência à penetração do revestimento e da formação aumentam;
- Ocorre esmagamento e compactação dos grãos de areia ao redor do túnel;
- A matriz da formação acaba sendo obstruída (plugueamento) com partículas finas de areia quebrada e sólidos do fluido de perfuração.

Cargas à jato

- Os túneis sofrem plugueamento, sendo preenchidos por uma “cenoura”, formada por resíduos sólidos da detonação do explosivo, restos do metal do *liner*³ e outras partículas existentes na lama ou fluido no poço quando do momento do disparo;
- Sofre plugueamento também a matriz da formação com partículas finas de resíduos da detonação, partículas finas de areia quebrada e fluido de perfuração;
- Ocorre um esmagamento e compactação dos grãos de areia ao redor do túnel e plugueamento do túnel com areia da formação.

Uma carga moldada para canhoneio à jato é constituída por um invólucro externo, uma carga principal de alto explosivo, uma carga iniciadora e um *liner*.

³ O *liner* será explicado logo a seguir.



Formato do jato.

Estrutura interna da carga.

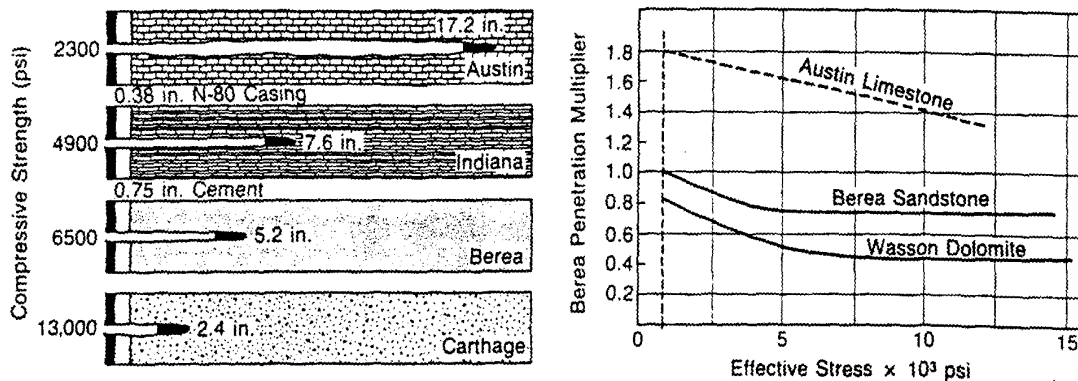
O invólucro externo é um vaso de contenção projetado para suportar as forças de detonação da carga durante a formação do jato. Este invólucro é também importante na prevenção de interferências com as cargas adjacentes, ao longo da seqüência de disparos. Pode ser fabricado com aço, zinco ou alumínio (também pode-se utilizar cerâmicas ou vidro), a precisão nas tolerâncias de projeto e fabricação são parâmetros importantes na performance de disparo.

A carga principal de explosivo deve ser compatível com a temperatura da operação. O explosivo é prensado mecanicamente no interior do invólucro externo pelo cone metálico. Quanto mais homogênea a distribuição da mistura de explosivos sob o cone metálico e uniforme sua espessura, melhor a formação do jato e maior a penetração.

O iniciador realiza a ligação entre o cordão detonante e a carga principal de explosivo. É geralmente composto do mesmo material explosivo da carga principal, mas com maior sensibilidade devido ao menor tamanho da partícula.

O *liner*, revestimento cônico metálico, ou ainda simplesmente cone, é colapsado sob a força de detonação da carga principal, contribuindo assim para a formação do jato. Inicialmente os *liners* eram fabricados de metal sólido. Estas cargas produziam com sucesso, jatos de alta densidade, mas tendendo a tampar o túnel canhoneado com grande quantidade de resíduos (formação de *slug*). Nas cargas mais modernas os *liners* são fabricados com uma mistura de metais pulverizados, que produzem jatos com densidade suficiente para uma grande penetração na formação, com uma razoável redução na quantidade de resíduos. *Liners* de metal pulverizado são utilizados na maioria das cargas, exceto nas do tipo *big hole (BH)*. Neste tipo de carga a profundidade de penetração é menos importante do que o diâmetro de entrada e os *liners* sólidos são utilizados, por produzirem furos com diâmetros maiores em revestimentos e cimento. Os indesejáveis problemas da formação do *slug* podem ser minimizados pelo uso de técnicas do canhoneio Underbalance ou lavagem dos canhoneados. Os materiais que comumente compõe os *liners* podem ser cobre, zinco, tungstênio, estanho e chumbo.

É necessário frisar que quanto maior a penetração, maior a produtividade do poço, sendo que a penetração depende diretamente da consolidação da formação.



Penetração em função da deformação.

4.7 - Eficiência de Canhoneio

As técnicas e equipamentos empregados na completção de poços têm como objetivo principal maximizar a produtividade dos mesmos, reduzindo ao mínimo as restrições ao fluxo entre o reservatório e o poço.

Diversos fatores durante a fase de perfuração e completção contribuem para que haja restrição ao fluxo, sendo alguns relacionados ao canhoneio e às condições em que o mesmo foi efetuado. Há três conjuntos de parâmetros que devem ser controlados a fim de maximizar a vazão de um poço:

- limpeza dos orifícios;
- fatores geométricos do canhoneio;
- efeito de película (“*skin effect*”).

4.7.1. Limpeza dos Orifícios

Independentemente do método de completção empregado, a desobstrução dos orifícios produzidos pela carga do canhão é de vital importância.

Nos canhoneios em que o diferencial de pressão é positivo (pressão hidrostática maior que a da formação), usando-se canhões de revestimento torna-se necessário induzir surgência no poço através de uma operação de pistoneio. Ao se aliviar a pressão hidrostática, apenas alguns orifícios serão desobstruídos, permanecendo outros tamponados.

Utilizando-se canhões que descem pela coluna de produção ou o sistema TCP, é possível um disparo com diferencial negativo de pressão (pressão hidrostática menor que a pressão da formação), causando-se um fluxo imediato através dos orifícios,

desobstruindo-os. Testes de laboratório indicam que, deixando-se fluir entre 20 e 50 litros por orifício, estes permanecerão definitivamente desobstruídos.

Usam-se como nível de diferencial de pressão entre 200 e 500 psi para formações arenosas (pressões maiores que não são recomendáveis porque há o risco de produção de areia). Para formações carbonáticas usam-se diferenciais de pressão de até alguns milhares de psi, de modo a causar um choque maior à formação.

Os valores usados têm grande variação dependendo da experiência local. Permeabilidades baixas necessitarão, de modo geral, de diferenciais de pressão mais elevados.

4.7.2. - Fatores Geométricos

Os fatores geométricos mais relevantes para o estudo da eficiência de canhoneio são:

- densidade de tiros;
- profundidade de penetração;
- defasagem entre os tiros;
- distância entre o canhão e o revestimento;
- diâmetro do orifício.

Densidade de tiros:

A vazão e a queda da pressão através dos orifícios do canhoneio são profundamente afetados pela densidade de tiros. Estudos mostram que ao aumentar-se a densidade para até 12 tiros por pé consegue-se um aumento da vazão do poço, desde que haja um direcionamento adequado dos tiros, a fim de se evitar efeitos de interferência de fluxo.

Deve-se, no entanto, levar em consideração os danos causados ao revestimento pela alta densidade de tiros. Usando-se canhões do tipo oco (“*hollow carrier*”) e uma distribuição uniforme de tiros, este problema pode ser minimizado.

Profundidade de penetração:

A profundidade de penetração dos tiros é muito importante pois, para que seja efetivo, o canhoneio necessita ultrapassar a zona danificada durante a perfuração (conforme anteriormente comentado). Experimentalmente pode verificar-se a ocorrência de um aumento significativo da produtividade quando o disparo ultrapassa a zona danificada.

Defasagem entre tiros:

A defasagem entre os tiros é causada pela distribuição angular das cargas no canhão. Um mesmo número de tiros por pé, quando disparados em diferentes direções, produz maior relação de produtividade.

Assim, um canhão com defasagem não nula deve ter diâmetro suficientemente grande para evitar que algumas cargas fiquem muito distantes do revestimento.

Distância entre o canhão e o revestimento:

A distância que separa o canhão do revestimento deve ser a menor possível a fim de não comprometer a penetração do disparo. No caso do canhão ser do tipo multidirecional, seu diâmetro deve ser o maior possível, compatível com o do revestimento, para que o efeito adverso acima relacionado seja desprezível e a técnica, efetiva.

Usando-se um canhão de pequeno diâmetro (*through tubing gun*), o afastamento pode ser muito grande se os tiros forem disparados ao acaso. Por isso, com este tipo de canhão deve-se utilizar tiros em linha (0° ou unidirecional). O canhão dispõe de um posicionador magnético alinhado com a direção dos disparos que garante um perfeito posicionamento do canhão.

Diâmetro do orifício:

Sob circunstâncias normais o diâmetro do orifício de canhoneio afeta muito pouco a vazão do poço. Entretanto, se um filtro de areia (*gravel pack*) for utilizado, deve-se fazer uso do maior orifício de entrada possível, pois quanto maior o seu diâmetro, menor a perda de carga. O valor da perda de pressão através dos orifícios do canhoneio deve ser minimizado para evitar-se a produção de areia em formações pouco consolidadas, devendo-se optar por um grande diâmetro de orifício ou uma alta densidade de jatos.

4.7.3. Efeito de Película (SKIN EFFECT)

O efeito de película resulta da redução da permeabilidade da formação nas vizinhanças do mesmo, causada pelas operações de perfuração, completação e produção do poço. Essa restrição ao fluxo pode ser detectada em testes de formação pelo *skin* que, na maioria dos casos, pode ser subdividido em três fatores relacionados à causa do dano:

- *dano devido ao fluxo convergente (S1)*: causado pelas mudanças de direção do fluxo quando os fluidos do reservatório atingem os furos do canhoneio; assume um papel significativo nos casos de altas vazões;
- *dano de formação propriamente dito (S2)* – causado na maioria das vezes pela invasão de fluidos incompatíveis com a formação, presença de reboco e cimento, e expansão de argilas;
- *dano devido à compactação (S3)* – resultante da ação compressiva dos jatos durante o canhoneio, originando uma zona de permeabilidade reduzida ao redor do furo; segundo estudos de laboratório, esta zona tem uma espessura média de ½ ” e permeabilidade de 10 a 20% da original.

O efeito desses fatores na produtividade de um poço no caso de um fluxo radial regido

onde:

Ko: permeabilidade ao óleo

h: espessura do intervalo

ΔP : $P_e - P_w$

μ : viscosidade do fluido

St: $S_1 + S_2 + S_3$

re: raio de drenagem

rw: raio do noco

$$Q = \frac{(7,08) \times K_o \times h \times \Delta P}{St + \mu \times \ln(re/rw)}$$

pela lei de Darcy, incorporando os efeitos de restrição ao fluxo devido ao *skin* é dado por:

Mediante um correto planejamento da operação de canhoneio é possível minimizar o efeito de película, escolhendo de forma mais adequada os parâmetros geométricos, o fluido do poço e promovendo uma efetiva limpeza dos orifícios.

4.8 - Segurança

A questão da segurança é crítica quando se trata de operações onde se emprega o uso de explosivos, e o canhoneio é uma delas. Portanto, a atenção dispensada a este item deve ser exageradamente demasiada e cumprida à risca.

Todos os procedimentos da legislação vigente na localidade devem ser seguidos, no que se refere ao manuseio de explosivos. Além disso, cada companhia operadora possui suas próprias normas internas de segurança.

Em relação ao poço, como o canhão é acionado por pulso elétrico em alguns casos, são terminantemente proibidas as transmissões de rádio nas proximidades da operação. Para aumentar a segurança na área, utiliza-se um BOP de cabo. É imprescindível que se observe atentamente o comportamento do poço logo após o disparo, para não correr riscos de manobras precipitadas de retirada do canhão. O mesmo deve ser retirado lentamente para evitar pistoneio (caso ainda haja cargas carregadas, existe certo risco de que elas sejam acidentalmente acionadas). Somente com a total retirada do canhão do poço e a verificação de que todas as cargas foram detonadas é seguro retomar as transmissões de rádio. Finalmente, é preciso assegurar-se antes do disparo que há fluido de completção em quantidade suficiente para o amortecimento do poço no pós-canhoneio.

4.9 - Assentamento de Tampões

Este item refere-se à questão dos procedimentos para fechamento do poço, após tendo sido executado o canhoneio e tendo a produção iniciado. Dentre os procedimentos técnicos utilizados, pode-se citar o BPP (*Bridge Plug Permanente*) e o CR (*Cement Retainer*).

O BPP promove a vedação do revestimento para abandonos temporários ou definitivos do poço ou parte dele, podendo ser usado em conjunto com tampões de cimento. Ele pode ser assentado por meio de coluna ou a cabo; deve-se atentar para a localização das luvas do revestimento, pois o BPP não deve ser assentado sobre as mesmas. Sua remoção, caso se faça necessária, se dá através de corte mecânico da estrutura. Já o CR é empregado em operações de recimentação, e possui um *flapper* que só permite o fluxo com o encaixe do *sting*.

5 - Tratamento Químico na Completação

5.1 - Ocorrências e Causas de Dano à Formação

Grande parte do dano à formação é causada por práticas descuidadas de perfuração, completação ou de produção podendo portanto ser evitados. Mesmo quando o dano é inevitável, o estudo de sua natureza é fundamental para a seleção do tratamento adequado.

5.1.2 - Tipos de danos, causas e métodos de remoção

As características físicas do dano são parâmetro fundamental pois determinam o tipo de fluido de tratamento ideal. Os tipos de danos existentes são:

- **Emulsões:** são causadas pela mistura de fluidos base óleo com soluções aquosas no interior da formação. Tal tipo de dano é estabilizado por materiais tensoativos (surfactantes). Nestes casos, solventes com ou sem desemulsificantes são geralmente usados.
- **Alteração de Molhabilidade:** ocorre quando torna-se a formação parcial ou totalmente molhável a óleo e conseqüentemente acaba-se por reduzir a permeabilidade relativa ao óleo. Alterações na molhabilidade podem ser corrigidas pela injeção de solventes mútuos para remover a fase óleo, seguida da injeção de surfactantes que tornem a formação novamente molhável a água.
- **Bloqueio por Água:** é causado por um aumento da saturação de água nas proximidades do poço. O tratamento deste problema é feito através da injeção de surfactantes para reduzir a tensão superficial água-óleo.
- **Depósitos Minerais:** ocorre durante a produção devido às baixas temperaturas e pressões encontradas nas proximidades do poço. Vários solventes podem ser usados para dissolver os depósitos precipitados, dependendo de sua composição química. Os tipos mais comuns são: carbonáticos, sulfáticos, cloretos, de sílica, de ferro e de hidróxidos.
- **Depósitos Orgânicos:** são precipitados de hidrocarbonetos pesados. Apesar de complexos, o mecanismo principal de formação consiste na mudança de temperatura ou pressão nas vizinhanças do poço durante a produção. Em certos casos, não se pode evitar tais danos, sendo normalmente executada a remoção mecânica dos depósitos com raspadores. Em outros casos, os depósitos podem ser re-solubilizados por solventes orgânicos ou pelo aquecimento da formação com óleo aquecido.
- **Siltes e Argilas:** dano causado por siltes e argilas onde ocorre invasão do espaço poroso pela lama de perfuração e a migração de argilas autigênicas. Quando as partículas danificantes originam-se da própria rocha reservatório, elas são chamadas genericamente de “finos”. A remoção de danos por finos em reservatórios carbonáticos se faz com HCl, que apesar de não dissolver os finos, pode dispersá-los.

- Depósitos Bacterianos: ocorre com o crescimento de bactérias, que pode ocorrer em diversas condições de temperatura e pH, a reprodução das mesmas, causando entupimento do espaço poroso. Como este dano é praticamente impossível de remover, especial atenção deve ser dada à previsão e à prevenção de sua ocorrência através do uso de agentes bactericidas.

5.1.3 - Localização do Dano

A localização do dano é um parâmetro importante porque o fluido de tratamento vai entrar em contato com outros materiais antes de atingir o agente causador do dano, ocasião em que o fluido deve ainda manter sua efetividade.

5.1.4 - Simulação Física de Dano

Em casos em que a causa do dano não é simples deve-se utilizar um simulador de dano, em condições de reservatório, com plugues da rocha reservatório, amostras do óleo da formação e dos fluidos injetados para identificar as causas do dano. Pode-se também estudar a melhor forma de remover o dano ou de preveni-lo.

5.1.5 - Pseudo-dano

Atribuir o fato de dano (ou Skin) encontrado nos testes de formação totalmente ao dano constitui um erro comum. Existem outras contribuições não relacionadas com o dano à formação, chamadas genericamente de pseudo-dano. Estas devem ser subtraídas do skin total para que se possa estimar o valor real do dno e não se superestime a potencialidade de uma possível operação de remoção.

A origem do pseudo-dano deriva da configuração do poço, das condições de produção ou outras causas mecânicas.

5.1.6 - Configurações do Poço

Todo pseud-dano restante após uma completação pode ser atribuído à configuração do poço. Nenhum destes componentes do dano é devido ao reservatório. Algumas das causas são :

- entrada de fluxo limitada;
- completação parcial do poço;
- baixa densidade de canhoneios, fase incorreta e etc...

Um pseudo-dano sempre existirá em poços inclinados e é uma função do ângulo de inclinação e da espessura da formação.

A fase de canhoneados e condições de fluxo podem também induzir uma queda de pressão adicional ou pseudo-dano. Produzir um poço a alta vazão pode causar uma queda de pressão ao redor do poço, por se atingir pressões abaixo do ponto de bolha do hidrocarboneto. Um pseudo-dano positivo, consequência do bloqueio de gás, é criado.

5.1.7 - Outras Formas de Pseudo-dano

Podem haver outras causas para o pseudo-dano :

- colapso do tubo de produção;
- colapso dos canhoneados;
- mau isolamento de uma zona ocasionado por uma má cimentação.

5.1.8 - Tratamentos Ácidos Matriciais para Remoção de Dano.

Deve-se observar os seguintes passos para elaborar um programa de tratamento matricial:

- Assegurar de que exista dano significativo à formação;
- Estabelecer a causa do dano, sua intensidade e penetração;
- Selecionar os fluidos de tratamento adequados;
- Determinar a pressão e a vazão de injeção dos fluidos;
- Caso o intervalo a ser tratado seja muito espesso, adotar medidas para promover a divergência dos fluidos de tratamento em todo o intervalo;
- Determinar o tempo de fechamento do poço após o tratamento;
- Estimar a economicidade do tratamento;
- Acompanhar o desempenho do poço após a estimulação.

5.2 - Lavagem Ácida das Colunas

5.2.1 - Objetivos

Os principais objetivos da lavagem ácida das colunas é remoção de ferrugem e restos de lama e cimento da coluna, revestimento, riser e etc...

5.2.2 - Tipos de Ácidos

Usa-se normalmente até 1000 gal de HCl 15% com inibidor de corrosão e sequestrador de ferro.

5.2.3 - Procedimentos Operacionais

O ácido deve ser injetado até a extremidade da coluna a baixa vazão e circulado reverso a alta vazão. Devem ser coletadas amostras do ácido no início, no meio e no final do retorno e enviadas para a sede a fim de se efetuarem análises de concentração de ácido e do teor de ferro.

5.3 - Lavagem Ácida de Canhoneados

5.3.1 - Objetivos

- Remoção do dano devido ao processo de canhoneio;
- Desobstrução dos canhoneados;
- Remoção dos danos muito rasos solúveis ou desagregáveis em ácido.

5.3.2 - Tipos e Volumes de Ácidos

Usa-se geralmente HCl de 5% a 15% em pequenos volumes. Além de inibidor de corrosão e sequestrador de ferro, deve-se utilizar elevado teor de surfactante.

5.3.3 - Procedimentos Operacionais

- Proceder a lavagem ácida da coluna de operação para remover a ferrugem;
- Balancear um tampão de ácido em frente aos canhoneados e deixar em imersão ou promover agitação. Repetir este processo ou injetar o ácido a baixíssima pressão;
- Remover o ácido gasto imediatamente.

OBS.: A vazão de bombeio do fluido de tratamento, da superfície até próximo dos canhoneados deve ser suficiente para gerar um fluxo turbulento.

5.4 - Remoção de Incrustações Solúveis em Ácido

5.4.1 - Objetivos

Remoção das incrustações ocorridas em tubulações, canhoneios e/ou na formação.

5.4.2 - Tipos e Volumes de Ácidos

HCl de 5 a 15%. Agentes redutores e sequestrador de ferro devem ser utilizados quando a incrustação for de ferro.

5.4.3 - Procedimentos Operacionais

A técnica operacional depende da localização e gravidade da incrustação. Com frequência é feita através de flexitubo

5.5 - Tratamentos Matriciais de Carbonatos

5.5.1 - Objetivos

Restaurar a produtividade de reservatórios de carbonatos ou arenitos com elevado teor de cimentação calcífera.

5.5.2 - Sistemas Ácidos mais Utilizados

Usa-se geralmente HCl 15% em peso. Pode-se eventualmente emulsionar ou gelsificar o ácido a fim de reduzir as taxas de reação e conseguir maior penetração para ultrapassar a região danificada.

5.6 - Diretrizes para Seleção dos Fluidos de Tratamento

Devem ser levados em consideração os seguintes fatores ao se selecionar o fluido de tratamento:

- **Temperatura:** influencia a seleção dos fluidos de duas maneiras:
 1. Determina fortemente a inibição do ácido;
 2. A taxa de reação é diretamente proporcional à temperatura.
- **Mineralogia:** A primeira consideração a ser feita é se a formação é puramente carbonática ou se é parcial ou totalmente dolomitizada. A utilização de fluidos incompatíveis ou inadequados à formação pode causar precipitação de subprodutos de reação e outros inconvenientes.
- **Petrofísica:** O tipo e a distribuição da porosidade têm grande influência na extensão do dano e na penetração do ácido. Reservatórios com alta permeabilidade da matriz podem ser severamente danificados pela invasão de sólidos.

5.7 - Projeto do Tratamento Ácido

O projeto de um tratamento deve envolver não apenas os tipos de ácido mas também os volumes e vazões. Num tratamento matricial, o importante é manter a pressão abaixo da pressão de quebra da formação. A vazão depende da espessura do intervalo, da permeabilidade, do tipo de porosidade e da necessidade de divergência.

5.8 - Procedimentos Operacionais de Segurança

5.8.1 - Na Mistura de Ácidos

- Verificar a disponibilidade e o funcionamento dos equipamentos de segurança;
- Certificar-se de que o tanque de mistura, linhas, bombas, mangueiras e demais equipamentos necessários são adequados ao tipo de serviço a ser executado;
- Providenciar água de boa qualidade para a diluição do ácido e adicionar ao tanque de mistura $\frac{3}{4}$ do volume total da água requerida;
- Adicionar ao tanque de mistura os aditivos especificados;
- Adicionar à mistura, o volume de ácido concentrado necessário e homogeneizar o sistema;
- Adicionar o restante da água e homogeneizar a mistura através de vigorosa agitação;
- Imediatamente antes de bombear o ácido para o poço, deve-se homogeneizar o sistema;
- Verificar o cálculo e as quantidades de aditivos e reportá-los no relatório de operação.

5.8.2 - Instalação e Testes de Linhas

- Verifique se foram seguidas as recomendações para a montagem das linhas.
- Dê especial atenção à instalação das linhas.
- Instalar “Y” com linhas de descarga de ácido.
- Recomenda-se cobrir as linhas de injeção com capa para que eventuais rupturas lancem ácido, sob forma de spray, sobre o pessoal.
- Todas as pessoas envolvidas na operação, próximas a tanques, unidades de bombeio e linhas devem usar óculos protetores.

5.9 - Tratamentos Matriciais de Arenitos

5.9.1 - Objetivos

Usa-se, normalmente, nos tratamentos matriciais de arenitos, uma mistura de ácido fluorídrico (HF) e ácido clorídrico (HCl), conhecida como mud acid. A função do tratamento é remover dano causado por sólidos dos fluidos injetados na formação ou pelas próprias argilas contidas na rocha reservatório, que podem inchar ou migrar e obstruir as gargantas de poros.

5.9.2 - Sistemas Ácidos mais Utilizados

Um tratamento matricial em arenitos com mud acid constitui-se, basicamente, de quatro estágios principais: o pré-tratamento (preflush), o tratamento (mud acid), o pós-tratamento (overflush) e o deslocamento.

5.10 - Método para Seleção dos Fluidos de Tratamento

Os fluidos de tratamento, ácidos e coadjuvantes são escolhidos em função da mineralogia e propriedades petrográficas da rocha, dos mecanismos de dano atuantes, dos mecanismos de remoção de dano selecionados e das condições do poço.

5.10.1 - Reações Químicas Previstas

O estudo das reações químicas presentes numa acidificação de arenitos é bastante complexo mas a compreensão destas reações é fundamental para a modelagem matemática do processo e para o posterior projeto do tratamento ácido.

5.10.2 - Aspectos da Divergência nos Tratamentos Ácidos

Uma das causas principais de insucesso dos tratamentos ácidos é a incapacidade de injetar o ácido nas zonas que se encontram danificadas. Os fluidos injetados na formação tendem a seguir os caminhos de menor resistência, os quais se tornam ainda mais permeáveis.

5.10.3 - Técnicas de Divergência

Existem vários métodos para controlar a distribuição do ácido, que podem ser mecânicos, através do isolamento da zona a ser tratada, ou químicos, através do tamponamento temporário das zonas já tratadas.

A seleção da técnica de divergência é baseada nas condições mecânicas do poço, nos fluidos produzidos e injetados, nas características do reservatório e na experiência de campo. Dentre essas técnicas podem ser citadas:

- **Métodos Mecânicos:**

- 1 – Ferramenta de Lavagem;
- 2 – Obturador para Cimentação e Tampão Mecânico Recuperável;
- 3 – Bolas Selantes;
- 4 – Flexitubo;

- **Métodos Químicos:**

- 1 – Agentes Divergentes Particulados;
- 2 – Espuma e Gel Reticulado;

5.10.4 - Tratamento em Estágios

Quando se usra qualquer técnica química de divergência em tratamentos com HF, deve-se subdividir o tratamento em vários estágios, alternando-se tratamento e o agente divergente, que é bombeado ao final de cada estágio. O numero de estágios depende da espessura da formação.

5.10.5 - Aditivos para Sistemas Ácidos

Um aditivo para acidificação é um produto químico adicionado ao ácido com a finalidade de modificar suas propriedades, aumentando sua eficiência.

A falta de um aditivo ou o excesso de outro podem por a perder toda a operação. Assim sendo, é importante reconhecer os principais tipos de aditivos.

5.10.6 - Tipos de Aditivos

- Inibidores de Corrosão;
- Surfactantes:
 1. Surfactantes aniônicos;
 2. Surfactantes catiônicos;
 3. Surfactantes não-iônicos;
 4. Surfactantes anfóteros;
- Solventes Mútuos;
- Agentes Sequestradores;
- Estabilizadores de Argila.

5.10.7 - Critérios para Utilização

Um dos problemas mais comuns em acidificação é o uso excessivo de aditivos. Além de ser um desperdício de recursos, o excesso de aditivos pode causar danos à formação. Os únicos aditivos cujo uso é obrigatório são o inibidor de corrosão e o surfactante.

5.10.8 - Sistemas Especiais

Além dos sistemas convencionais de tratamento, existem sistemas especiais que objetivam adaptar-se a condições ainda mais particulares. Com isso obtém-se um resultado ainda melhor caso estes sistemas sejam bem aplicados. Segue alguns tipos de sistemas especiais:

- Sistemas Ácidos Energizados/Sistema Gerador de N₂ in situ (SGN)
- Sistemas ácidos Retardados

5.11 - Outros Sistemas Não-Convencionais

De modo a atender situações de maior grau de especificidade, apresenta-se os seguintes sistemas não-convencionais de tratamento:

- a) Ácido Fluobórico (HBF₄);
- b) Ácido Fosbórico (H₃PO₄);

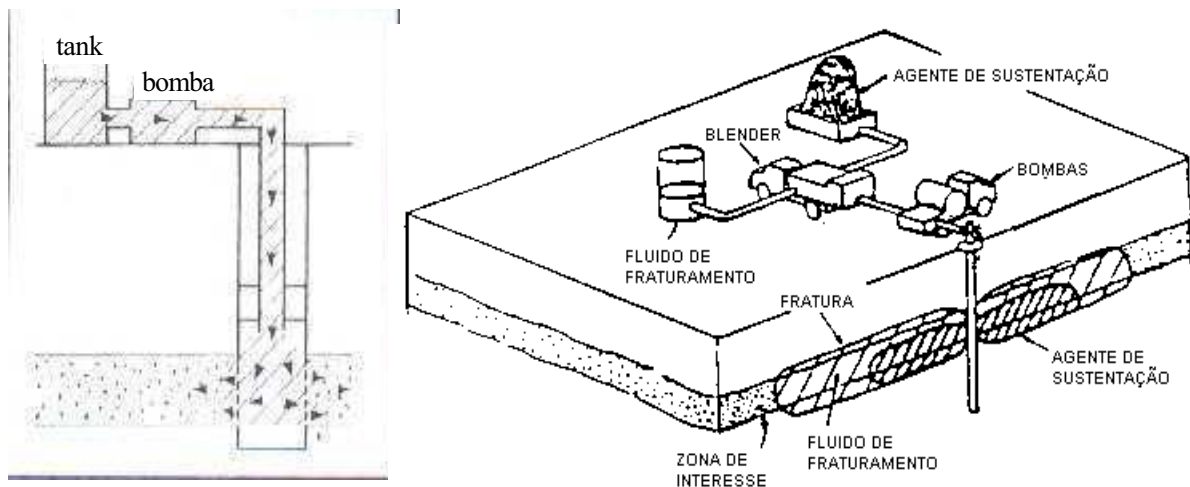
6 - Fraturamento Hidráulico

6.1 - Introdução:

O fraturamento hidráulico é uma técnica de estimulação usada para aumentar a produtividade ou injetividade de poços de petróleo. Tratamentos de estimulação podem ser altamente eficazes duplicando ou até mesmo quadruplicando as taxas de produtividade. É o tratamento mais eficaz para os arenitos encontrados em sedimentos mais antigos e consolidados. Abaixo, as razões do aumento de produtividade:

- Modifica o modelo do fluxo
- Ultrapassa regiões danificadas
- Pode atingir áreas do reservatório com melhores condições permo-porosas
- Em reservatórios lenticulares ou naturalmente fraturados pode haver inter-conexão de áreas não produtivas inicialmente.

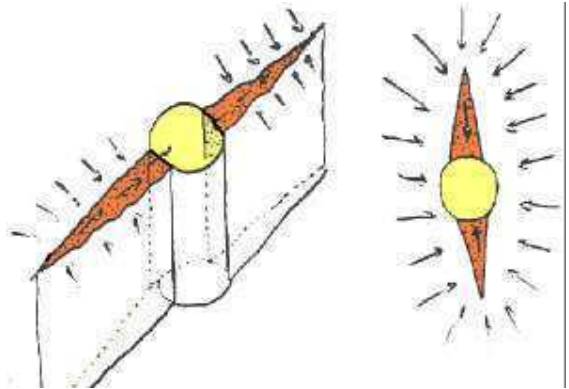
O processo constitui-se na aplicação de diferencial de pressão que provoca quebra da formação e bombeio de um determinado volume de fluido e agente de sustentação com pressão superior a de fechamento da fratura. Operações de estimulação consistem no bombeamento de líquidos, (provenientes de tanques localizados na superfície), ao longo da tubulação sustentado pelo packer. Por fim, esses fluidos penetram na formação. As figura abaixo mostram o que ocorre:



Dimensionamento da Estimulação:

- Configuração mecânica do poço: revestimento, coluna de perfuração e cabeça do poço
- Configuração dos equipamentos de subsuperfície
- Profundidade dos canhoneados
- Estabelecimento das características necessárias aos fluidos de tratamento e agentes de sustentação
- Estabelecimento das vazões, volumes e pressões
- Experiência na área

De uma maneira geral, o processo funciona melhorando o acesso dos fluidos do reservatório ao poço. A geometria do fluxo radial é ilustrada na figura ao lado. O fluxo representado pelas setas vai encontrando maior interferência a medida que se aproxima do poço, o que reduz o volume de fluido que alcança o poço.



A zona ao redor do poço também é crítica porque danos de formação podem ocorrer, os quais pode consistir em redução da permeabilidade causada pelo contato da formação com o fluido do reservatório. Dois tipos de danos ocorrem:

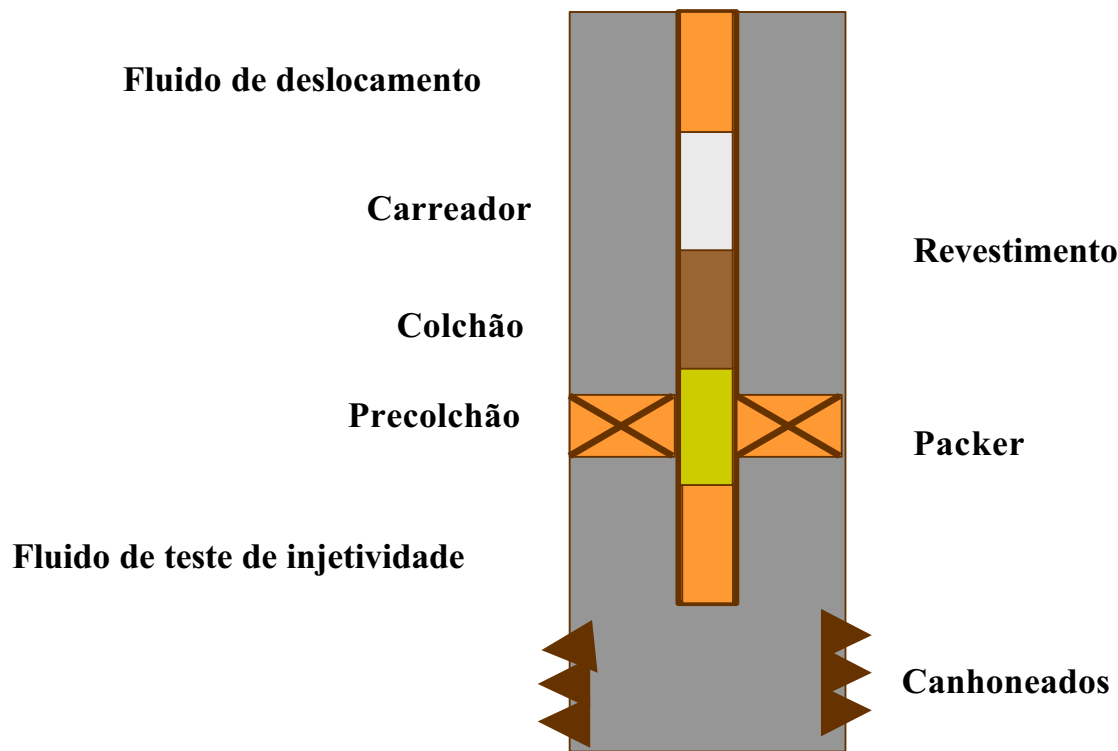
- Algumas formações contêm argilas que absorvem o filtrado e expandem, diminuindo a permeabilidade.
- Infiltração de sólidos no espaço poroso, ou seja, sólidos do fluido ficam “presos” nos poros da formação, diminuindo a permeabilidade.

Um fraturamento bem sucedido, na visão operacional, pode ser definido como “aquele tratamento que foi bombeado sem problemas” ou, segundo Warembourg, “aquele tratamento que forneceu a produção de óleo ou gás prevista no projeto”. Esta última, tratando-se de uma visão econômica, enquanto a primeira possui um enfoque mais operacional.

Existem, porém, algumas razões para a falta de hábito de se otimizar um fraturamento. Primeiramente, se os métodos para determinarem-se certas variáveis críticas in situ não estavam disponíveis no passado ou custam demasiadamente caro atualmente. Uma segunda razão poderia ser: fraturamentos padronizados e repetitivos forneciam e fornecem resultados aceitáveis, mas não necessariamente ótimos. Por fim, mudanças são difíceis quando é assumido que os resultados da estimulação numa dada área são os melhores disponíveis.

O processo é constituído da seguinte seqüência operacional:

- Efetuar limpeza da coluna de trabalho
- Assentar o packer e efetuar o teste de injetividade
- Desassentar o packer
- Descolocar o pré-colchão
- Descolocar o colchão
- Descolocar o carreador
- Posicionar o pré-colchão na extremidade da coluna
- Assentar o packer
- Injetar os fluidos na vazão
- Acompanhar a carta de pressão
- Despressurizar e induzir surgência para limpeza do poço



6.2 - Mecânica das Rochas

6.2.1 - Conceitos

Vamos abordar algumas noções de mecânica das rochas aplicadas ao fraturamento hidráulico, enfatizando a relação entre tensão (σ) e deformação (ϵ), iniciando com uma breve descrições de alguns parâmetros elásticos:

- Módulo de elasticidade (E): constante de proporcionalidade entre a tensão aplicada (σ) e o alongamento longitudinal relativo (ϵ) na mesma direção da tensão, permanecendo constante as tensões nas outras direções.

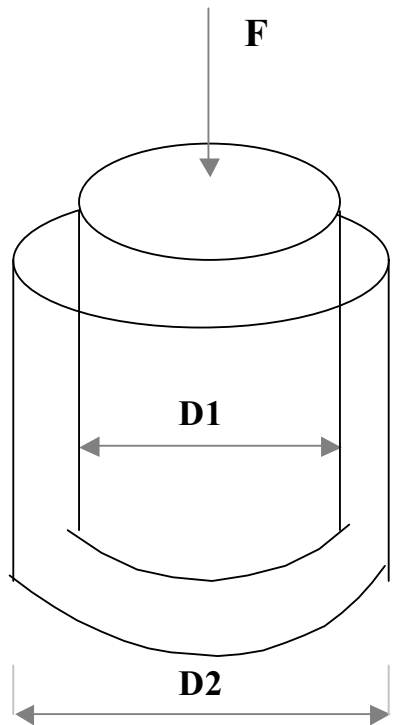
$$\text{Lei de Hooke } \sigma = E \cdot \epsilon$$

- Coeficiente de Poisson (ν): relação entre as deformações transversal e longitudinal, ou seja, a relação entre as deformações perpendicular e paralela à direção da tensão aplicada.

$$\nu = \frac{\Delta d / d}{\Delta l / l}$$

- Módulo de rigidez (G): relação entre a tensão de cisalhamento e a deformação resultante.

$$G = \frac{\gamma}{\tau}$$



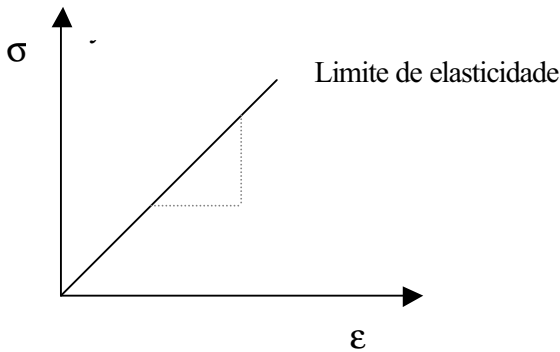
$$\epsilon_x = \frac{D2 - D1}{D1}$$

$$\epsilon_z = \frac{L2 - L1}{L1}$$

$$\nu = \frac{\epsilon_x}{\epsilon_z}$$

VALORES TÍPICOS DE ν	
Metais	0,25 – 0,35
Arenitos	0,15 – 0,27
Areia inconsolidada	0,28 – 0,45

Lei de Hooke



$$\sigma = E \epsilon$$

Lei de Hooke generalizada

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} \left[\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z) \right]$$

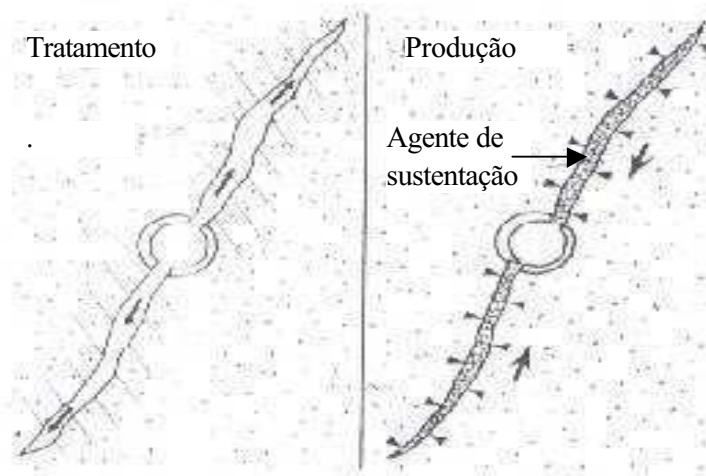
$$\epsilon_y = \frac{1}{E} \left[\sigma_y - \nu (\sigma_x + \sigma_z) \right]$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} \left[\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y) \right]$$

6.3 - Fluidos de Fraturamento

Os fluidos de fraturamento têm duas funções principais: abrir e propagar a fratura, bem como transportar o agente de sustentação. Para a seleção do fluido ideal, também devem ser levadas em considerações as seguintes características/funcionalidades:

- Minimizar o dano no agente de sustentação e nas faces da fratura
- Formar reboco para reduzir as perdas de fluido através das faces da fratura
- Alta viscosidade na formação, durante a propagação da fratura, a fim de evitar a decantação do agente de sustentação
- Baixa viscosidade na coluna, para reduzir perdas de carga por fricção e, posteriormente ao tratamento, facilitar o clean-up (limpeza do poço)
- Ser econômico



Podemos destacar as seguintes características dos fluidos que compõem as várias fases de um fraturamento hidráulico :

- **Pré-colchão:** Nesta fase, o fluido abre e esfria a fratura, além de promover uma perda inicial criando condições para reduzir a perda de fluido do colchão e carreador. Deve possuir média viscosidade.
- **Colchão:** Estende a fratura criada e promove uma abertura mínima de modo que a fratura possa receber o agente de sustentação. Também auxilia na redução da perda de fluido do carreador, promovendo a formação do reboco. Possui alta viscosidade.
- **Fluido carreador:** Nesta fase, transporta e distribui o agente de sustentação. No interior da fratura e o mantém suspenso até o fechamento da mesma. Possui alta viscosidade.

Os fluidos base água possuem como principais aditivos as seguintes substâncias: gelificante, reticulador, ativador, quebrador, controladores de filtrado, surfactante, estabilizador de argila, estabilizadores térmicos.

7.0 - Gravel Pack

7.1 - Introdução

O Gravel Pack é uma técnica para controle da produção de areia de formações com problemas de consolidação.

A extração do óleo em arenitos friáveis tem apresentado constantes desafios à indústria do petróleo, nem tanto pela necessidade da contenção da produção de areia propriamente dita, mas pelas altas perdas de carga impostas pelo processo, que podem abreviar em alguns anos, a vida produtiva de um poço.

Os principais problemas causados pela produção de areia são:

- Deposição de areia no poço encobrindo os canhoneados, ou formação de “bridge” na coluna de produção, reduzindo ou até mesmo causando a interrupção do fluxo;
- Erosão de equipamentos de superfície, como linhas e chokes, e de subsuperfície como DHSV e mandris de gaslift;
- Acumulação de areia nos equipamentos de superfície;
- Criação de grandes vazios por trás do revestimento, onde desmoronamentos poderão causar redução drástica da permeabilidade nas imediações do poço ou colapso do próprio revestimento;
- Perda de isolamento.

7.2 - Arenitos friáveis

A condição primordial para identificação de arenitos friáveis é a definição de seu modelo de deposição geológico. Com este conhecimento escolhe-se a melhor técnica de contenção de areia a ser adotada para o reservatório em análise.

A friabilidade de um arenito está diretamente relacionada às forças de compactação, ao tipo de cimentação e à dissolução dos grãos nos pontos de contato.

A cimentação é o fator preponderante na determinação da consolidação de um arenito. Os agentes cimentantes mais comuns são o quartzo, a calcita (carbonato de cálcio) e a dolomita (carbonato de magnésio). Se considerarmos que o agente cimentante reduz a porosidade e a permeabilidade pelo preenchimento dos poros da rocha, podemos deduzir que formações confinadas em ambientes com baixa geração de minerais cimentantes, comumente resultarão em reservatórios de alta permeabilidade, que se por um lado possuem grande potencial para produção de óleo, também o têm para a produção de areia.

A coesão é uma característica de uma formação produtora de se manter íntegra diante das condições de pressão e vazão utilizados na produção. Quanto maior a coesão de uma formação, maior a consolidação, porém, menor a permeabilidade.

Uma classificação para os arenitos é a seguinte:

- **Quicksand:** formação extremamente inconsolidada. Não possui qualquer tipo de agente cimentante. Fluidos produzidos de tais arenitos são caracterizados por apresentarem uma concentração alta e constante de areia.
- **Parcialmente consolidado:** caracterizado pela presença de algum agente cimentante, entretanto de fraca atuação. Os testemunhos deste tipo de formação se desagregam com grande facilidade. A presença de areia nos fluidos se dá de forma intensa e intermitente.
- **Friável:** apresenta testemunho aparentemente consolidado, no entanto areia é prontamente produzida quando ocorre fluxo para o poço. Este tipo de formação suporta completação a poço aberto, na medida em que a área aberta ao fluxo é consideravelmente maior, reduzindo as forças de arraste geradas pelo deslocamento do fluido. É comum, em completações a poço revestido, o teor de areia se reduzir a traços após horas ou dias de produção. Isto ocorre devido à formação de cavernas atrás do revestimento, aumentando a área aberta ao fluxo, reduzindo assim a ocorrência de erosão; entretanto, alterações como a redução da pressão do poro, incremento de vazão, produção de água, etc., poderão fazer com que a produção de areia atinja níveis intoleráveis.

7.3 - Técnicas de Predição de Produção de Areia

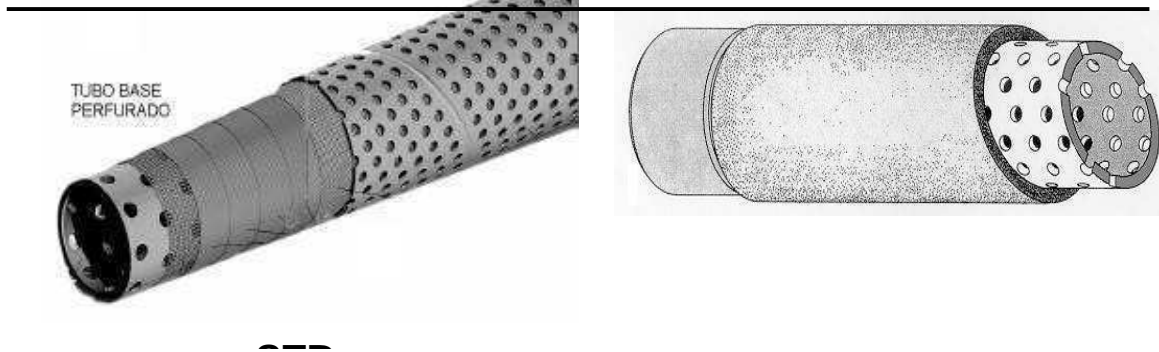
Existem quatro fontes principais de informação com as quais trabalhamos para estreitar a margem de erro de uma previsão de produção de areia:

- **Teste de formação:** deve ser planejado com a preocupação de se simular as situações encontradas durante a vida produtiva do intervalo.
- **Análise testemunho:** é um trabalho subjetivo. Os de Quicksand são facilmente identificáveis enquanto que os outros dois necessitam de análise mais cuidadosa. Além da identificação do agente cimentante, a simulação de fluido através dos testemunhos pode dar uma resposta definitiva em relação ao comportamento da formação durante a produção. Do testemunho deve-se obter: a permeabilidade, a porosidade, a composição mineralógica e a areia para análise granulométrica.
- **Perfilagem:** gera dados importantes que auxiliam a determinação do intervalo a ser canhoneado e do drawdown máximo a que determinada formação pode ser submetida.
- **Dados de produção:** é fundamental que haja um acompanhamento da vida produtiva do intervalo, complementando o banco de dados com os tipos e quantidades de fluido e sólidos produzidos.

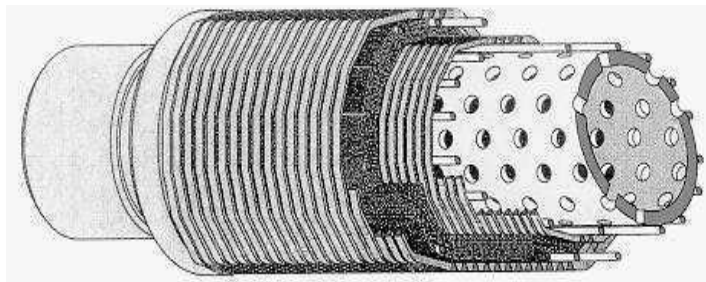
7.4 - Métodos para Controle da Produção de Areia

Os métodos são:

- **Tubos rasgados (Slotted Liner):** são usados em poços com baixa produtividade ou em longos intervalos produtores, incluindo-se os poços horizontais. Existem novos equipamentos desenvolvidos para maior área aberta ao fluxo e aplicação específica para poços horizontais, dos quais são destacados: Sinterpack, Stratapack e Excluder.



- **Tela pré-empacotada:** são dois tubos selados, concêntricos, tendo o espaço anular entre eles preenchido com areia ou cerâmica. É recomendável somente em poços com longos intervalos canhoneados e altamente desviados, ou horizontais.



- **Areia resinada:** consiste no preenchimento de espaços criados atrás do revestimento, devido à produção de areia com gravel pré resinado. Após a pega da resina é descida a broca para remoção do excesso de gravel dentro do poço. Esta técnica se restringe a ser aplicada em poços com pequena extensão canhoneada, sendo também recomendada para poços antigos que já produziram grandes volumes de areia.
- **Gravel pack:** é a mais difundida mundialmente. Consiste no preenchimento dos canhoneados e anular tubo telado/revestimento com uma areia (gravel) de granulometria bem selecionada, formando um pacote compacto, que impede a movimentação da areia da formação.

7.5 - O Mecanismo de Gravel Pack

Esta técnica, empregada em poço aberto ou revestido, pode variar desde a simples utilização de um único tubo telado à uma complexa completção múltipla.

Após o condicionamento do revestimento, é descido um sump packer, formando o fundo necessário para a ancoragem da colinas de gravel pack, em seguida o poço é canhoneado e o conjunto de gravel pack, composto de tubos telados, tubos cegos, wash pipes, crossover tool e packer é instalado.

Após a instalação do conjunto, é feito o bombeio e deslocamento do gravel, que conterà a produção de areia da formação.

7.5.1 - Vantagens e Desvantagens do Gravel Pack

As vantagens do Gravel Pack em relação aos outros métodos alternativos são:

- Mais efetivo no controle de areia em longos intervalos, em intervalos com pequenas intercalações de folhelhos, e em zonas com alto teor de argila e silt;
- Suporta a maioria das reações desenvolvidas em um tratamento químico, e não se deteriora com o tempo;
- Apresenta melhores resultados nas aplicações em poços antigos com histórico de grande produção de areia;
- É menos afetado pelas variações de permeabilidade da formação.

As desvantagens do Gravel Pack são:

- Redução do diâmetro interno do poço, pela utilização de tubos telados;
- Reparos ou recompletações requerem a remoção do conjunto;
- As telas estão sujeitas à corrosão e/ou erosão devido às altas velocidades de fluxo ou à produção de fluidos corrosivos.
- Apresenta maior dificuldade no isolamento de futuros intervalos produtores de água.

Pode-se seguir vários procedimentos para o dimensionamento dos componentes mecânicos do conjunto, mas a utilização de uma técnica não adequada para a colocação do gravel poderá trazer sérios prejuízos ao sucesso da operação.

Water Pack e Slurry Pack são os sistemas mais utilizados, mas não existe consenso na definição de qual seria o mais indicado. O primeiro trabalha com fluidos de baixa viscosidade (água ou soluções salinas) e o segundo emprega alta concentração de gravel e fluido viscoso.

Para se obter uma boa performance numa operação de Gravel Pack deve-se dimensionar o gravel para conter completamente a movimentação de areia na formação, formar um pacote compacto de gravel, com o maior raio possível e maximizar a produtividade minimizando os danos à formação.

A tubo telado tem por função manter o pacote de gravel na posição adequada. Devem conter centralizadores no meio e em cada extremidade.

A quantidade de gravel utilizada deve ser prevista para preencher o volume do anular do tubo telado, os canhoneados e os espaços atrás do revestimento.

A preparação do poço deve ser feita da seguinte forma: raspador e circulação intermitente de colchões lavadores e fluidos gelificados devem ser usados para remover lama e resto de cimento no revestimento. É recomendável usar uma coluna com o maior

diâmetro possível, com o objetivo de aumentar a velocidade no espaço anular, maximizando o arraste e o carreamento.

A pasta de gravel possui grande poder abrasivo, exigindo exclusividade dos equipamentos e linhas, e uma manutenção cuidadosa principalmente nas superfícies em contato com a pasta.

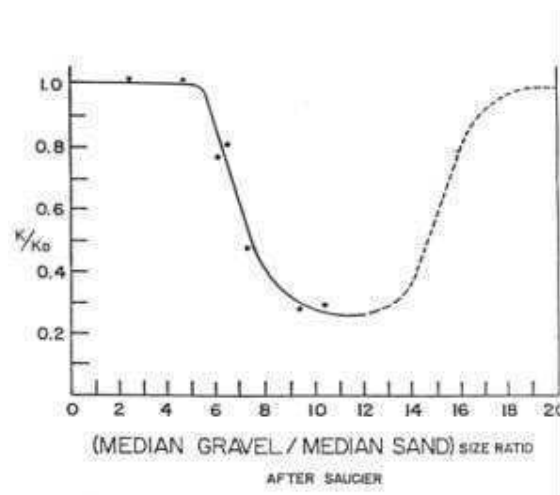
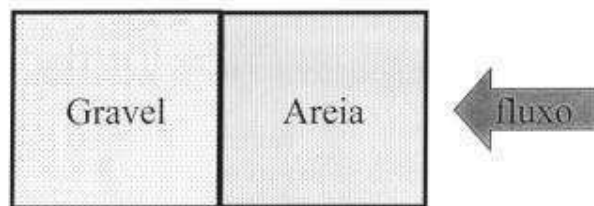
O sistema de fluidos também deve ter atenção especial, principalmente se o fluido já tiver sido utilizado para lama de perfuração.

Um ponto mais importante no projeto de um Gravel Pack é a definição da granulometria da areia (gravel) para reter a areia da formação, uma vez que ela deve reter a areia da formação com a menor interferência possível na produtividade do poço.

A figura abaixo apresenta o experimento realizado por Saucier: uma célula contendo gravel e areia da formação foi submetida a um fluxo linear, medindo-se a perda de carga para várias vazões e diversas relações de granulometria, entre gravel e areia. Nos casos em que houve invasão de areia no pacote de gravel, foi registrada a redução da permeabilidade com conseqüente aumento da perda de carga.

A figura 6 representa as conclusões alcançadas pelo experimento realizado. O gráfico mostra que uma relação de granulometria do gravel e a da areia da formação sendo > 6 , existe uma rápida perda da permeabilidade. Caso a relação seja maior que 14, a areia não é mais contida. Logo, Saucier recomenda que “o tamanho médio do grão do gravel seja até 6 vezes maior que o tamanho médio do grão de areia da formação”.

Durante a produção, a areia despreendida da formação invade o gravel provocando redução da permeabilidade



Completação - Série Concursos Públicos
Curso Prático & Objetivo

A granulometria recomendada para o gravel é determinada multiplicando-se o diâmetro de partícula correspondente aos 50% acumulados em peso (D_{50} - obtido na análise da peneira) por 4 e 8, adotando o gravel comercialmente disponível com diâmetro imediatamente inferior ao calculado.

Um exemplo: a análise da peneira indicou que o diâmetro médio (D_{50}) de uma areia de formação é 0.0045, então:

Granulometria inferior (G_{inf}) = $0,0045 \times 4 = 0,018$

Granulometria superior (G_{sup}) = $0.0045 \times 8 = 0.036$

De acordo com a tabela 1 obtemos: Para 0,018 => 38 mesh
 Para 0,036 => 19 mesh

Da tabela 2 temos:

Areia	G_{sup}	G_{inf}
30/50	0,0230	0,0120
20/40	0,0330	0,0165
16/30	0.0470	0,0230

O gravel recomendado é então o de 20/40 mesh. Verificando:

- diâmetro médio do gravel é de 20/40 => $(0,033 + 0,0165)/2 = 0,02475 \approx 0,025$
- diâmetro médio do gravel/ diâmetro médio da areia => $0,025/0,0045 = 5,56$

O resultado indica que, segundo Saucier, não haverá invasão de areia que possa afetar a permeabilidade do pacote.

U S MESH		
US Mesh	Diâmetro Partícula(mm)	Diâmetro Partícula (pol)
4	4,760	0,1870
5	4,000	0,1570
6	3,360	0,1320
7	2,830	0,1110
8	2,380	0,0940
10	2,000	0,0790
12	1,680	0,0660
14	1,410	0,0560
16	1,190	0,0470
18	1,000	0,0390
20	0,841	0,0330
25	0,707	0,0280
30	0,595	0,0230
35	0,500	0,0200
40	0,420	0,0170
45	0,354	0,0140
50	0,297	0,0120
60	0,250	0,0098
70	0,210	0,0083
80	0,177	0,0070
100	0,149	0,0059
120	0,125	0,0049
140	0,105	0,0041
170	0,088	0,0035
200	0,074	0,0029
230	0,063	0,0025
270	0,053	0,0021
325	0,044	0,0017
400	0,037	0,0015

Refer: Carver, Robert E. - "Procedures in Sedimentary Petrology".
 Wiley Interscience, 1971

Completação - Série Concursos Públicos Curso Prático & Objetivo

Gauge das Telas para os Vários Sizes de Gravel

Size do Gravel (US mesh)	Size do Gravel (pol)	Gauge da Tela (pol)	Gauge da Tela
40/60	0,0165-0,0098	0,008	8
30/50	0,0230-0,0120	0,010	10
20/40	0,0330-0,0165	0,012	12
16/30	0,0470-0,0230	0,016	16
12/20	0,0660-0,0330	0,020	20
8/16	0,0940-0,0470	0,028	28

8.0 - Completação Submarina

8.1 - Introdução - Perfuração de poços no mar

Antes de iniciar os estudos sobre completação no mar é importante que façamos uma breve revisão sobre a etapa da perfuração. A perfuração de poços no mar pode ser feita de duas formas básicas: através de plataformas fixas ou sub-elevatórias (apoiadas no fundo do mar), ou através de unidades flutuantes (semi-submersíveis ou navios-sonda) em unidades ancoradas ou com posicionamento dinâmico.

Na perfuração através de plataformas fixas ou auto-elevatórias, a coluna de revestimento se estende até a superfície, onde o BOP fica instalado, já que não existem movimentos da plataforma em relação ao fundo do mar. Na perfuração através de unidades flutuantes o BOP fica submerso conectado á superfície por uma coluna denominada riser, já que a plataforma está em constante movimentação em relação ao fundo do mar. Nesse caso, as colunas do revestimento não se estendem até a superfície sendo apoiadas ao nível do fundo do mar. A perfuração através de unidades flutuantes ancoradas é limitada em função da capacidade de ancoragem podendo ocorrer até 300 m de lâmina d'água ou até 1000 m para as mais modernas. A perfuração através de unidades flutuantes de posicionamento dinâmico(DP) é limitada em função do comprimento do riser de perfuração, podendo operar com lâminas superiores a 1000 m, sem a utilização de cabos guias.

8.1.1 - Sistema de perfuração mud-line (ML)

São estruturas moduladas instaladas no local de operação com estacas cravadas no fundo do mar, dessa plataforma são perfurados os vários poços. O revestimento é sempre ancorado no fundo do mar para evitar sobrecarregamento da estrutura da plataforma, visando garantir sua estabilidade e facilidade de abandono dos poços.

8.1.2 - Sistema de perfuração com cabos guia (guideline – GL)

Este sistema é o sistema convencional de perfuração com flutuantes, que utiliza de 4 a 6 cabos guias ligando a unidade flutuante á cabeça do poço. É utilizado também com plataformas semi-submersíveis, que possuem grande volume submerso de modo a garantir estabilidade durante as operações.

8.1.3 - Sistema de perfuração sem cabos guia (GLL)

São usados em lâminas d'água profundas na perfuração a partir de unidades flutuantes com posicionamento dinâmico (DP).

Em alguns desses tipos de perfuração faz-se o uso de templates, que são gabaritos submarinos a partir do qual são furados os poços da plataforma. Pode ser usado tanto com unidades flutuantes como com unidades apoiadas no fundo do mar. Entre as vantagens na utilização de templates estão: permite fácil localização do poço, fornece espaçamento regular, fornece guia vertical para as árvores de natal, etc.

Bibliografia :

A COMPLETAÇÃO NO MAR, Garcia, José Eduardo de Lima, CEN-NOR, Petrobrás, Maio/97.

APOSTILA DE GRAVEL PACK, Figueira, José Fernando Bastos, 1995
Atualizado por Calderon, Agostinho, 1996

TRATAMENTOS QUÍMICOS NA COMPLETAÇÃO, Motta, Eduardo Ponce, Petrobrás , Rio de Janeiro, 1996

OPERAÇÕES COM CIMENTO NA COMPLETAÇÃO, Vicente, Ronaldo; Ferreira Rodrigues, Valdo; de Lima Garcia, José Eduardo; de Paula, José, Petrobrás, 1995
2ª edição

WELL COMPLETION DESIGN AND PRACTICES, Pearson, Robert M., International Human Resources Development Corporation, 1987