

## 2. Produção de sólidos em poços de petróleo

A produção de partículas sólidas, em poços de petróleo produtores, durante a extração de fluídos em um campo de petróleo é denominada produção de areia ou produção de sólidos.

Este fenômeno pode ocorrer em diferentes tipos de rochas como, por exemplo, o carvão e as rochas calcáreas, todavia, ocorre mais comumente em arenitos não consolidados.

A produção de sólidos é um processo que depende de maneira geral das características da formação e dos fluídos a produzir. Logo, as forças de coesão intergranular das rochas têm um papel muito importante, visto que a movimentação das partículas ocorre somente se essas forças forem superadas pelas forças que tendem a desagregar os grãos (Silvestre, 2004).

Para que este fenômeno seja mais bem compreendido, será descrito de forma sucinta as etapas de perfuração e completação de um poço de petróleo.

### 2.1. Perfuração de Poços

A perfuração de um poço de petróleo é realizada através de uma sonda, uma grande estrutura que contém diversos equipamentos responsáveis pela elevação do óleo.

Na perfuração do tipo rotativa, as rochas são perfuradas pela ação da rotação e peso aplicados a uma broca existente na extremidade de uma coluna de perfuração. Os fragmentos da rocha são removidos continuamente através de um fluido de perfuração ou lama. Este fluido tem como uma de suas funções limpar o fundo do poço dos fragmentos originados, estabilizar a parede do poço, além de resfriar e lubrificar a broca e a coluna de perfuração.

O fluido é injetado por bombas para o interior da coluna de perfuração através da cabeça de injeção, ou *swivel*, e retorna à superfície através do espaço anular formado pelas paredes do poço e da coluna. Ao atingir determinada profundidade, a coluna de perfuração é retirada do poço e a sapata e o espaço anular entre os tubos do revestimento e as paredes do poço são

cimentados, garantindo o isolamento hidráulico entre as zonas permoporosas e permitindo então o avanço da perfuração com segurança.

Após a operação de cimentação, a coluna de perfuração é novamente descida no poço, tendo na sua extremidade uma nova broca de diâmetro menor do que a do revestimento para o prosseguimento da perfuração.

Concluídas as etapas de perfuração, seguem-se às atividades de completação, que consistem no conjunto de serviços efetuados no poço desde o momento em que a broca atinge a base da zona produtora de produção.

## **2.2. Completação de Poços**

Denomina-se completação a transformação do esforço de perfuração em uma unidade produtiva completamente equipada e com os requisitos de segurança atendidos, pronta para produção.

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. Os tipos de completação são divididos em 3 grupos: quanto ao posicionamento da cabeça do poço; quanto ao revestimento de produção e quanto ao número de zonas explotadas. Para o estudo em questão, nos interessa saber mais sobre a completação quanto ao revestimento de produção que pode ser a poço aberto; com liner rasgado e/ou canhoneado; e por revestimento canhoneado. Dentre as técnicas, a mais comumente utilizada é conhecida como canhoneio, *gun perforation* ou *jet perforation*. Ela se refere à perfuração do revestimento, do cimento e da formação através de cargas explosivas. Abaixo são abordadas de maneira breve as 3 técnicas de completação:

### a) Poço Aberto (Thomas, 2004)

Quando a perfuração atinge o topo da zona produtora, uma tubulação de revestimento é descida no poço e cimentada no espaço anular. Em seguida, conclui-se a perfuração até a profundidade final, e o poço é colocado em produção com a(s) zona(s) produtora(s) totalmente aberta(s). Este tipo de completação é utilizada somente para formações muito bem consolidadas, com pouco risco de desmoronamento. Suas principais vantagens são a maior área aberta ao fluxo e a redução dos custos do revestimento e do canhoneio. Em contrapartida, sua falta de seletividade impede futuras correções.

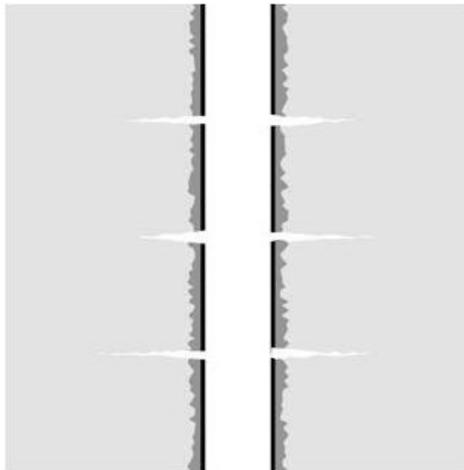
### b) Com liner rasgado ou canhoneado (Thomas, 2004)

O liner pode ser descido previamente rasgado, posicionando os tubos rasgados em frente às zonas produtoras, ou então cimentados e posteriormente canhoneados nas zonas de interesse. Suas vantagens são similares ao poço aberto, acrescidas de poder sustentar as paredes do poço frente à zona produtora.

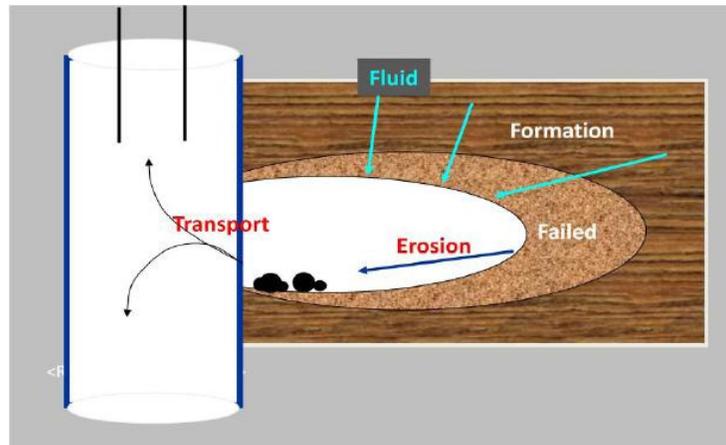
c) Com revestimento canhoneado

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, originando perfurações desde o revestimento até a formação, ou seja, para poço não aberto. Inicialmente, estas perfurações apresentam um orifício de aspecto fino e alongado (figura 1). No entanto, com a exploração do poço, este vai aumentando sua cavidade, implicando na perda de material e originando o processo de produção de sólidos, portanto, deve-se estudar cautelosamente os impactos deste tipo de canhoneio na formação (figura 2).



**Figura 1** - Esboço da perfuração através do tubo e do revestimento do poço (Fjaer, 2008).



**Figura 2** - Etapas da produção de sólidos (Kim, 2010).

### 2.2.1. Mecanismos de Produção de Sólidos

De acordo com muitos dos trabalhos publicados sobre produção de areia, existem dois mecanismos principais responsáveis pela produção de sólidos: ruptura por tração e ruptura por cisalhamento. Estes dois processos estão relacionados com a diferença entre a pressão estática no reservatório e a pressão de fundo de poço (*drawdown*), as forças de percolação e as propriedades do meio poroso (Mendonza, 2003).

A ruptura por cisalhamento é relativa à variação de poro-pressão (*drawdown*) junto às tensões *in-situ* atuantes no sistema. Ela ocorre quando as tensões tangenciais na parede do poço são maiores do que o valor da resistência à compressão da formação.

A ruptura por tração refere-se a força de tração desencadeada exclusivamente à força de arraste causado pela *drawdown*, promovendo a desagregação de grãos da formação (em geral em arenitos não consolidados).

Estes dois mecanismos estão intimamente ligados, por exemplo, a depletação de um reservatório diminui a poro-pressão e, por consequência, aumenta a tensão efetiva. Logo, essa diminuição da pressão no reservatório minimiza o problema de ruptura por tração, porém, aumenta os problemas relacionados à ruptura por cisalhamento (reduz a resistência ao cisalhamento). Segundo Morita (1989), quanto maior a tensão maior a probabilidade de ruptura por cisalhamento.

Em resumo, observa-se que o mecanismo de produção de sólidos está relacionado:

- Ao tipo de formação, ou seja, a resistência da rocha atrelada à magnitude das tensões *in situ* e a plastificação do material devido ao nível de tensões;
- A vazão/ velocidade do fluido devido ao *drawdown*, à permeabilidade local, à viscosidade do fluido; todos esses fatores afetam diretamente a migração de finos;
- Ao gradiente de pressão e forças capilares;
- Ao procedimento de produção e depletação do reservatório;
- Ao tipo de completação (poço aberto ou revestido).

Para poços revestidos, os principais mecanismos de produção de sólidos em rochas são (Dusseault & Santarelli, 1989 *apud* Felipe, 2004):

- O processo de canhoneio provoca deformações que destroem o cimento mineral entre os grãos, disponibilizando as areias para a produção, levando à instabilidade mecânica e à ruptura pela concentração de tensões ao redor do poço (zona plastificada). Esse processo leva ao aumento das tensões efetivas, acarretando o aumento das deformações plásticas e causando uma ruptura por cisalhamento da formação;
- O processo de canhoneio provoca ruptura por tração causada por tamponamento dos poros em fluxo;
- O processo de canhoneio provoca aumento das tensões efetivas de tração na direção radial devido às forças de percolação.

### **2.2.2. Classificação na Produção de Sólidos**

A produção de sólidos pode ocorrer das seguintes formas: os sólidos podem ser produzidos no primeiro fluxo do poço e então cessar; a produção de sólidos pode começar após um período de tempo, geralmente após o início da produção de água ou a areia pode ser produzida continuamente ao longo da vida do poço.

Segundo Fjaer (2008), a produção de sólidos, baseada na observação de campo, pode ser classificada em três tipos:

- Produção de areia transiente - caracterizada, inicialmente, por uma alta taxa de areia que vai diminuindo e equalizando até se tornar constante. É frequentemente observada logo após a perfuração, com a alteração nas condições de produção (geralmente na redução da pressão do poço) e após o avanço da água no poço;

- Produção de areia contínua – produção contínua que segue uma taxa relativamente constante;
- Produção de areia catastrófica – ocorre quando a areia é produzida com taxas muito elevadas que ocasionam o colapso do poço.

É importante salientar que em uma produção contínua de areia, mesmo pequenas gramas por metro cúbico, podem ocasionar centenas de quilos por metro no poço após alguns anos de produção. A remoção desta quantidade de sólidos altera o tamanho e a forma das cavidades da produção.

### **2.2.3. Consequências Decorrentes da Produção de Sólidos**

Dentre os problemas decorrentes da produção de sólidos podem-se destacar os seguintes aspectos (Dusseault & Santarelli, 1989 *apud* Felipe, 2004):

- Colapso da zona produtora e tamponamento do poço;
- Bloqueio parcial das ranhuras do revestimento;
- Abrasão e desgaste de ferramentas, hastes e equipamentos, tanto os internos ao poço como aqueles colocados na plataforma;
- Problemas ambientais derivados da necessidade de disposição de resíduos impregnados por hidrocarbonetos.

Quando o fluxo não tem energia para carrear a areia, pode ocorrer entupimento do canhoneio, acarretando na restrição ao fluxo e levando a necessidade de operações de limpeza. Já quando o fluxo tem energia para carrear a areia, pode ocorrer um entupimento de equipamentos na superfície, levando a uma operação de limpeza, ou podem ocorrer danos aos equipamentos, acarretando em problemas de segurança e meio ambiente (Felipe, 2004).

Entretanto, como aspecto positivo, a produção de sólidos pode remover o reboco do poço, e também criar bandas de alta porosidade, o que aumenta a produtividade do poço em 10 a 30%, sobretudo em reservatórios contendo óleos pesados (Dusseault & Santarelli, 1989 *apud* Felipe, 2004).

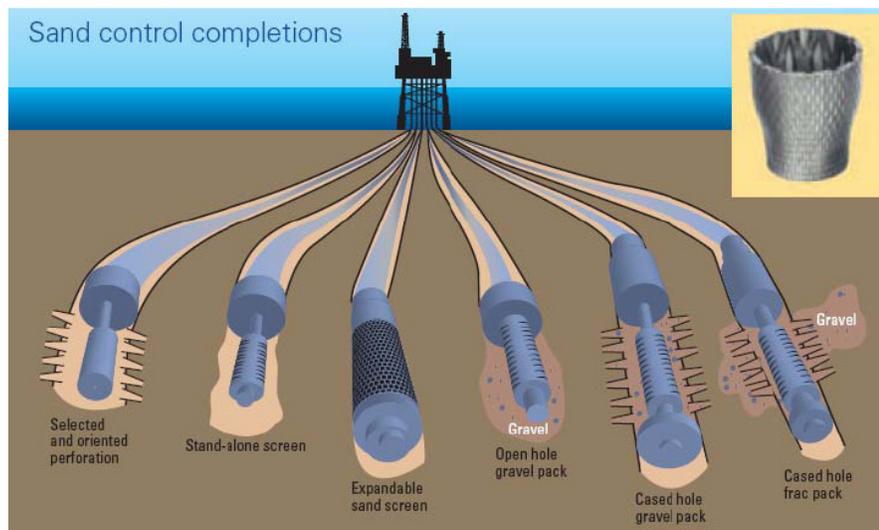
## 2.2.4. Medidas de Controle

Devido à necessidade de minimizar os impactos causados pela produção de sólidos, foram criadas algumas técnicas de controle tais como:

- *Gravel Packing*;
- *Frac-Pack*;
- Consolidação química ou injeção de resina;
- Tubos Ranhurados e Telas (sistema *Stand Alone Screen*);
- Telas Expansíveis;
- Controle da pressão de fluidos entre a formação e o poço e a taxa de produção.

Todos estes métodos, que podem ser observados na figura 3, são aplicáveis em cenários específicos, dependendo da geometria do poço (vertical ou direcional revestido; horizontal aberto), das características do arenito (granulometria, quantidade de finos, laminações, gradiente de fratura, etc), vazão esperada, dentre outros fatores.

Além disso, todas essas medidas de controle de produção de sólidos podem resultar em uma diminuição da produtividade dos poços, e um consequente aumento dos gastos das empresas de petróleo.



**Figura 3** – Medidas de Controle (Silva, 2008).

Dentre as medidas acima citadas, a mais difundida mundialmente é o *Gravel Packing*. Esta consiste no preenchimento dos canhoneados (caso existir) e anular do tubo telado/revestimento com uma areia (*gravel*) de granulometria

bem selecionada que atua como um filtro e impede a movimentação dos grãos da formação.

As técnicas acima apresentadas, apesar de controlarem a produção de sólidos, podem apresentar um alto custo de implementação bem como uma redução na produção do poço. Tornam-se então necessários métodos de predição de produção de sólidos que são baseados em observações de campo, ensaios de laboratórios e/ou modelos teóricos (Morita, 1989).

Com relação a seleção do método de contenção de sólidos, o aspecto fundamental no projeto e dimensionamento é referente a granulometria do agente de contenção. Assim, a metodologia mais utilizada é o critério de Tiffin (1998), no qual ele propôs o Critério de Seleção ( $D_{10}/D_{95}$ ) que indica o grau de seleção de um arenito. No entanto, existem várias outras metodologias tais como Bennett (2000) que foi melhorado por Bianco (2003) e se aproxima de um procedimento mais geral para esta seleção (Santos, 2007).

Este trabalho estará focado no sistema de exclusão de sólidos *Gravel Packing* que será mais detalhado adiante. Na tabela 1 são apresentadas as vantagens e desvantagens das medidas de controle citadas acima.

**Tabela 1** – Comparação dos métodos de contenção de sólidos.

<b>Método de Contenção</b>	<b>Vantagem</b>	<b>Desvantagem</b>
<b>Controle da pressão de fluidos</b>	Custo	Limitação por poder tornar a produção economicamente inviável
<b>Tubos Ranhurados e Telas</b>	Custo	Limitação baixa permeabilidade
<b>Telas Expansíveis</b>	Produtividade	Custo
<b>Consolidação química</b>	Custo; Execução	Limitação de temperatura e aplicação; Impermeabilização
<b>Gravel Pack</b>	Mais difundido; Não deteriora com o tempo; Eficiente	Custo de instalação e remoção; Redução do diâmetro interno do poço

Estas medidas serão abordadas separadamente nos itens a seguir.

#### **2.2.4.1.**

#### **Controle da Pressão de Fluidos Entre a Formação e o Poço e a Taxa de Produção**

O controle da pressão e a taxa de produção podem ser realizados de duas maneiras: aumentando a área de fluxo ou diminuindo a restrição da vazão de produção. No caso de poços com revestimento, o aumento do fluxo está

associado a um maior diâmetro do poço ou a uma maior densidade do canhoneado (maior quantidade de furos em um mesmo intervalo). Quando o poço não possui revestimento, o comprimento da área do canhoneado deverá ser maior.

Com relação a restrição da vazão de produção, esta é limitada pela vazão crítica do poço onde a partir deste ponto a produção de sólidos é excessiva (Villarroel, 2007).

Esta técnica tem como principal vantagem a simplicidade de aplicação e o baixo custo e como desvantagem sua limitação por poder tornar a produção economicamente inviável.

A figura4 exemplifica a densidade do canhoneio na zona produtora.



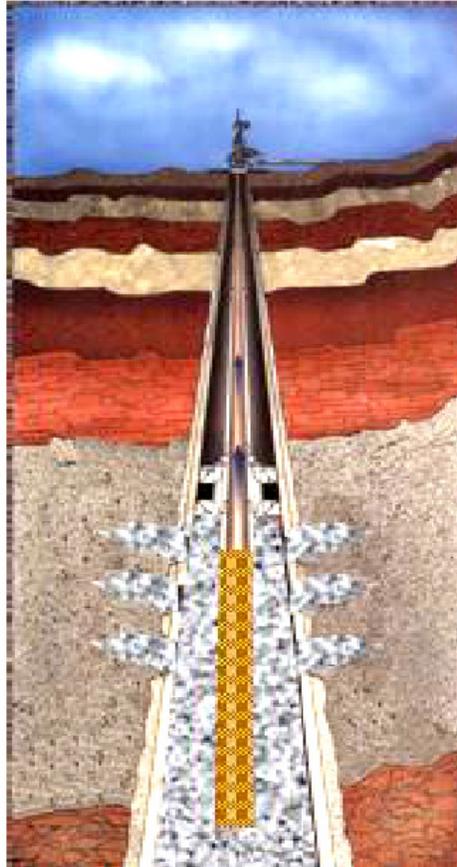
**Figura 4** - Esquema de canhoneio (Villarroel, 2009).

#### 2.2.4.2. Consolidação Química

A consolidação química consiste na injeção, na formação, de resinas especiais no intuito de aumentar a resistência no local de aplicação sem que isto afete a permeabilidade do local (figura 5). É de simples execução e baixo custo,

requer o uso de poucos equipamentos e tem uma razoável durabilidade (Villaroel, 2009).

Apesar destas vantagens, possui limitações de temperatura (máximo de 135°C), limitações de aplicação (intervalos pouco espessos, de 2 a 3 metros), reduz a permeabilidade e torna possível a produção economicamente inviável devido a impermeabilização do arenito (Machado, 2004 *apud* Villaroel, 2009).

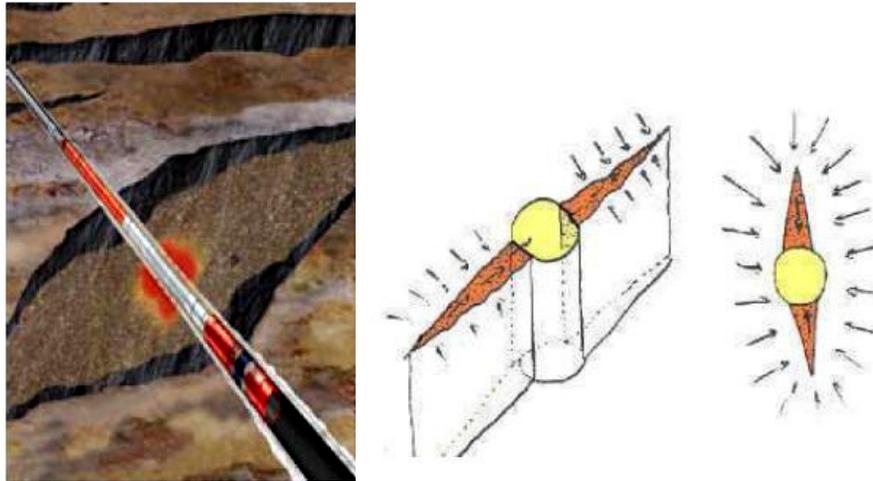


**Figura 5** - Esquema da pré-consolidação do arenito (Borges, 2007 *apud* Villaroel, 2009).

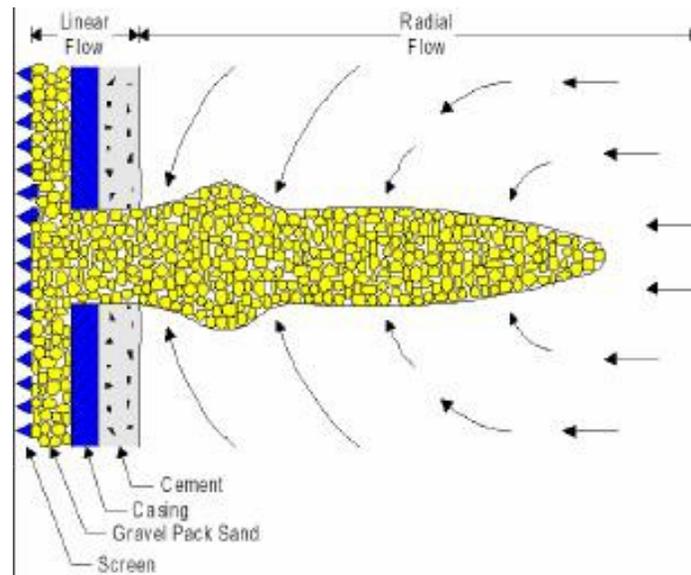
#### **2.2.4.3. Frac-Pack**

O *Frac-Pack* é uma técnica de estimulação e contenção de sólidos, resultante de duas outras técnicas originalmente distintas: o faturamento hidráulico e o *Gravel Pack*. Nesta, o poço revestido é canhonado para permitir a comunicação do poço com o reservatório, por isso, o *Frac-Pack* é muito eficaz em formações de baixa permeabilidade, visto que aumenta a permeabilidade da rocha. Assim, seu objetivo é transformar o fluxo radial do poço em fluxo linear, através da criação de pequenas fraturas, diminuindo então a produção de

sólidos. As figuras 6 e 7 ilustram a transformação do fluxo radial em linear e o esquema do poço com o *Frac Pack* equipado.



**Figura 6** - Frac Pack (apresentação Halliburton – Lorenzo Minissa).



**Figura 7** - Atuação do *Gravel Packing* (Barreto, 2007).

Este método somente pode ser utilizado em poços revestidos e cimentados e além de criar uma alta condutividade hidráulica altera o estado de tensões ao redor do poço e aumenta a compactação da rocha naquela região (Villarreal, 2009).

O *Frac-Pack* é mais utilizado em poços verticais e direcionais. Contudo, atualmente, algumas companhias já estão aplicando estas técnicas em poços horizontais.

Uma das restrições da aplicação deste é a existência de aquífero em contato com a zona produtora. A aplicação do *Frac-Pack*, neste caso, não é

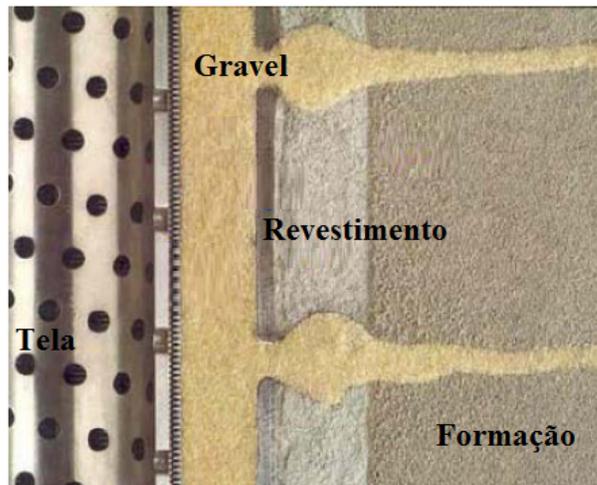
recomendada devido ao risco de comunicação da zona produtora de hidrocarbonetos com o aquífero através da fratura, incorrendo na produção indesejada de água já no início de produção do poço.

Uma das vantagens da utilização de poço direcional equipado com *Frac-Pack* em relação ao uso de poço horizontal equipado com *Gravel Pack* a poço aberto é o seu menor custo.

#### **2.2.4.4. *Gravel Packing***

O *Gravel Packing* é dos métodos mais antigos e mais eficazes no controle de sólidos. Esta técnica basicamente consiste em colocar *gravel* entre peneiras centralizadas, tanto em poços abertos como em poços revestidos e canhoneados ou perfurados onde o *gravel* tem como função reter os sólidos oriundos da formação e as peneiras têm como função reter o *gravel*.

Este sistema, esquematizado na figura 8, apresenta excelentes resultados podendo ser utilizados em combinação com a técnica de fraturamento hidráulico, denominada *Frac-Pack*, como comentada anteriormente. Deve-se ressaltar que ao utilizar a técnica *Frac-Pack*, torna-se necessário a utilização de um material mais resistente, devido as pressões de bombeamento que são superiores as da formação, o que se reflete nos custos da completação.



**Figura 8 - *Gravel Pack*** (Silva, 2008).

As principais vantagens do *Gravel Packing* em relação aos outros métodos são:

- Maior eficiência em longos intervalos;

- Suporta a maioria das reações desenvolvidas em um tratamento químico e não deteriora com o tempo;
- Apresenta melhores resultados nas aplicações em poços antigos com histórico de grande produção de sólidos;
- É menos afetado pelas variações de permeabilidade da formação.

As principais desvantagens do *Gravel Packing* são as seguintes:

- Redução do diâmetro interno do poço;
- Reparos ou workovers requerem a remoção do conjunto;
- As telas estão sujeitas a corrosão devido às altas velocidades de fluxo ou a produção de fluidos corrosivos;
- Apresentam maior dificuldade no isolamento de futuros produtores de água.

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

O tubo telado tem por função manter o pacote de *gravel* na posição adequada. Deve 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 figura 9 mostra um esquema de poço horizontal com o *Gravel Pack*.

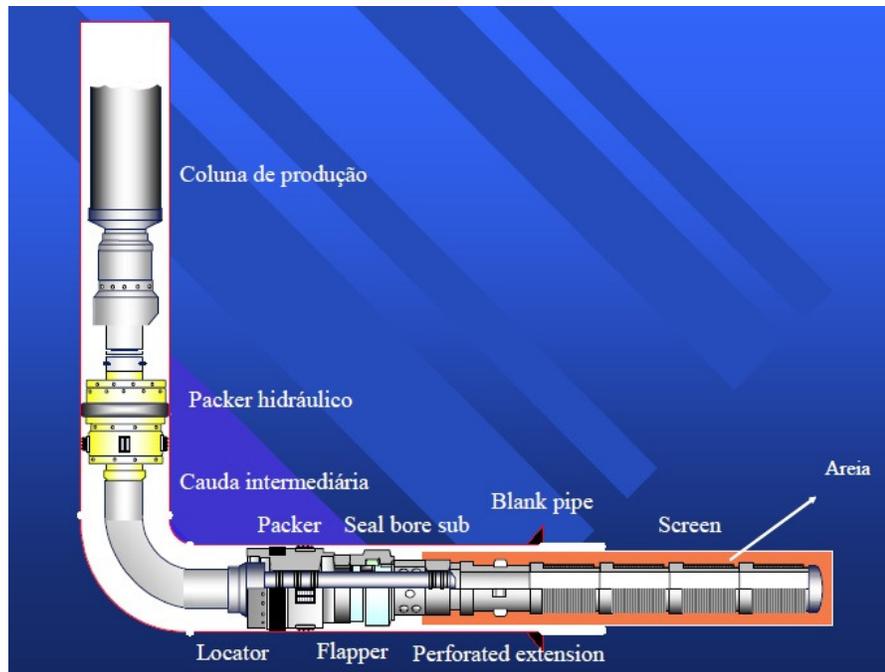


Figura 9 - Poço horizontal com *Gravel Pack* (Silva, 2008).

#### 2.2.4.5. *Stand Alone*

Técnica muito utilizada devido a sua simplicidade de instalação e sua eficácia em formações com granulometria homogênea. Consiste basicamente na utilização de um tubo ranhurado ou uma tela para contenção diretamente com a formação. Vale ressaltar que essas telas devem ser utilizadas em formações com pouca quantidade de finos caso contrário essas partículas podem causar redução da permeabilidade do sistema e consequente da produtividade do poço (Machado, 2004 *apud* Villarroel, 2009).

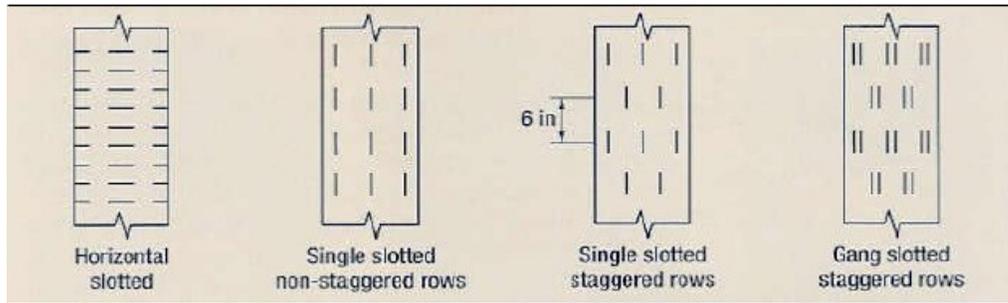
As telas *stand alone* constituem uma alternativa de custo reduzido (quando comparada ao *Gravel Packing* ou expansíveis) para a instalação de sistemas de contenção de sólidos em arenitos moderadamente selecionados (Santos, 2007).

A instalação da tela consiste em sua descida e assentamento no poço sem a instalação do *Gravel Packing*. Neste caso, haverá o contato da superfície da tela com a formação, seguido de um espaço anular no restante do poço. Assim, com o início da produção, haveria o colapso da formação sobre a tela, preenchendo o espaço anular com a areia da formação.

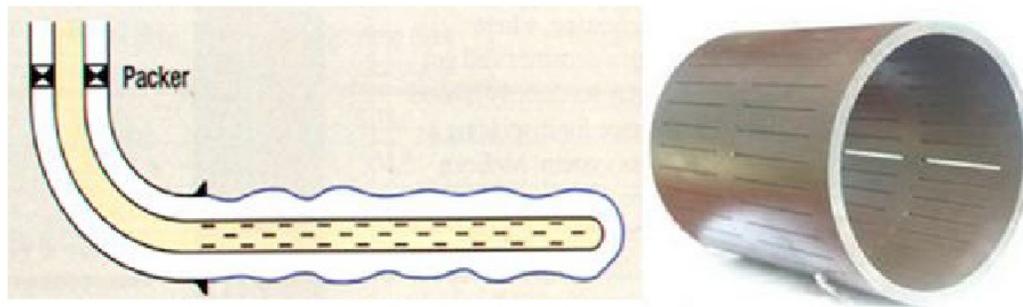
Na indústria de petróleo existem alguns tipos de tubos/telas com apresentadas a seguir.

### 2.2.4.5.1. Tubos Ranhurados (*Slotted Liners*)

São tubos nos quais são feitos cortes longitudinais ou transversais dimensionados em função do diâmetro dos grãos da formação por uma ferramenta de alta precisão, como pode ser observado nas figuras 10 e 11 abaixo.



**Figura 10** - Geometria do tubo ranhurado (Silva, 2008).



**Figura 11** - Esquema de poço aberto com tubo ranhurado e foto do tubo (Villarreal, 2009).

Embora o tubo ranhurado tenha normalmente menor custo comparado com as telas *wire-wrapped*, ele tem uma menor área aberta ao fluxo. Tubos ranhurados também são conectados mais facilmente que as telas e são usados onde a produtividade do poço é baixa e o custo não pode suportar o uso de telas.

### 2.2.4.5.2. Telas Não-Expansíveis

São um grupo formado por telas *wire wrapped*, pré-empacotadas e premium. Apresentam uma maior área aberta para o fluxo, porém reduzem o diâmetro interno do poço.

#### 2.2.4.5.2.1. Telas *Wire-Wrapped*

Esta tela é constituída por um tubo base perfurado envolvida por uma jaqueta (resistente à corrosão) feita com fios de arame de soldagem helicoidal ao redor das hastes (figura 12).

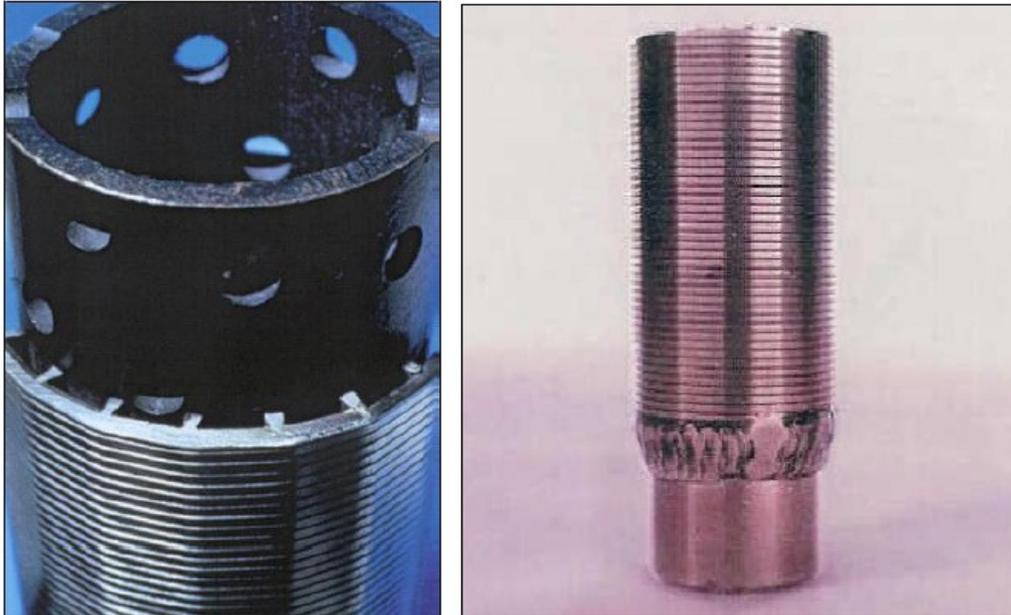
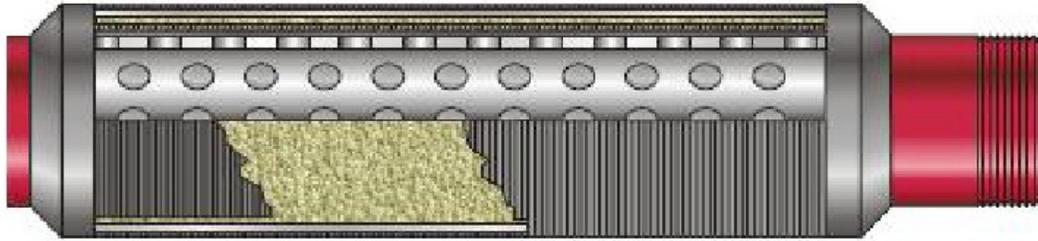


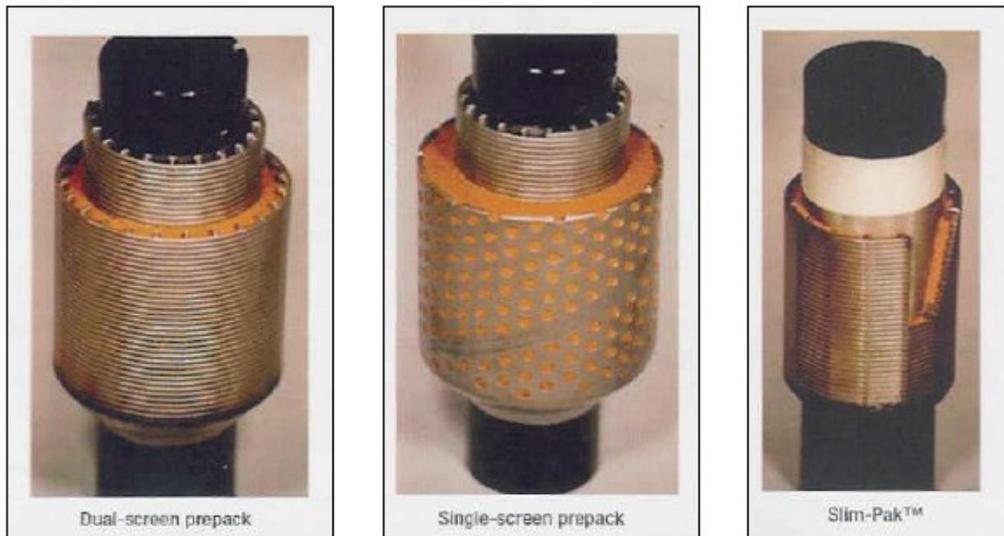
Figura 12 - Tela *wire-wrapped* (Machado, 2003).

#### 2.2.4.5.2.2. Telas Pré-Empacotadas

As telas do tipo pré-empacotadas são compostas por duas camadas de telas de arame concêntricas, com espaço anular entre eles, preenchidas com *gravel* de granulometria selecionada (figuras 13 e 14).



**Figura 13** - Telas Pré-empacotadas (Weatherford, 2008 *apud* Villarroel, 2009).

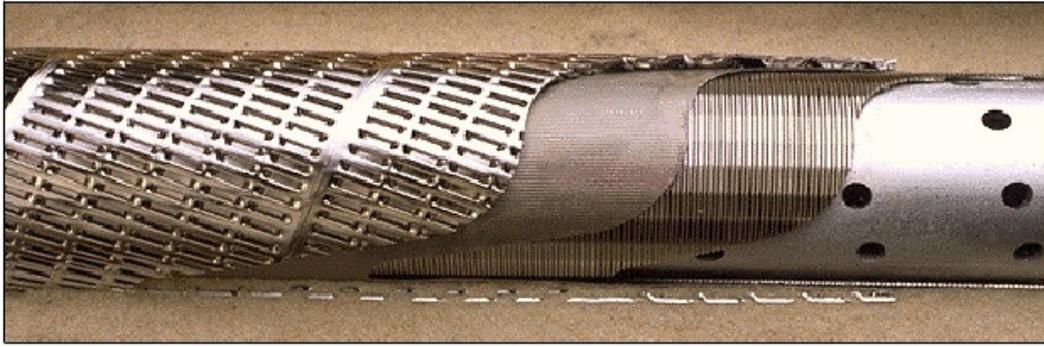


**Figura 14** - Telas Pré-empacotadas (Machado 2003).

#### 2.2.4.5.2.3. Telas Premium

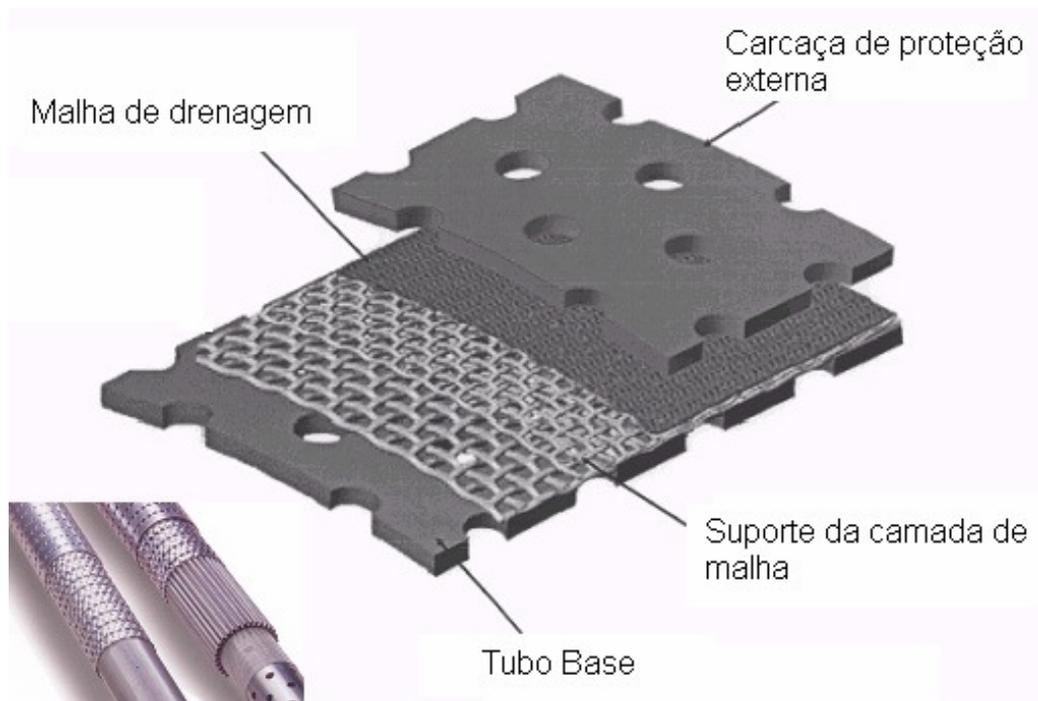
Consiste em um sistema de várias camadas de malha metálica sobrepostas ao redor de uma tela *wire-wrapped*, que confere suporte mecânico ao conjunto. A malha filtrante é protegida por uma carcaça externa instalada para garantir a sua integridade durante a descida, evitando a abrasão da malha pelo contato com o poço aberto (figura 15).

A aplicação destas telas incluem poços de alta pressão, completações de poços abertos ou fechados, poços com raio de curvatura pequeno, *sidetracks* ou multilaterais e poços em reservatórios compactados (Villarroel, 2009).



**Figura 15** - Foto Tela Premium (Machado, 2003).

A figura 16 apresenta uma vista ampliada das camadas que constitui uma tela premium comercialmente disponível no mercado.



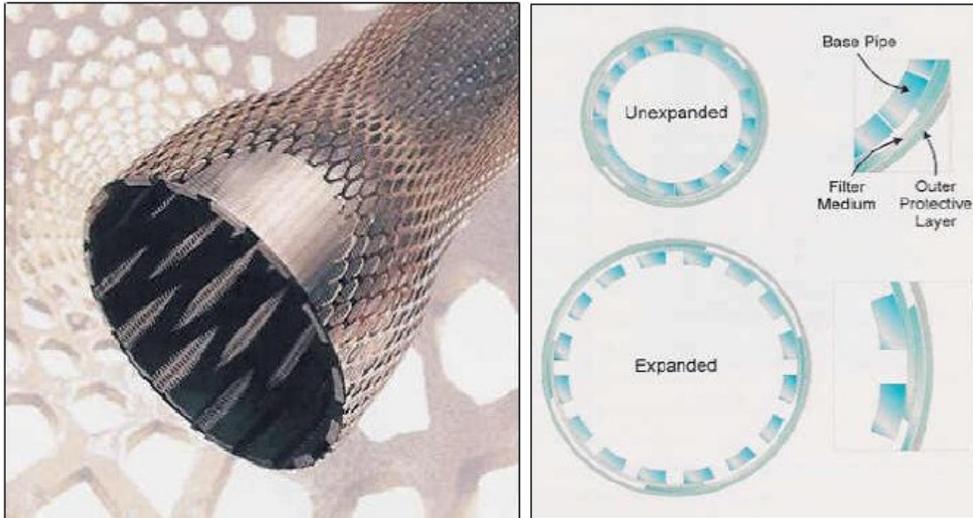
**Figura 16** - Tela premium (Santos, 2007).

### 2.2.4.5.3. Telas Expansíveis

Consiste em uma tela que se deforma plasticamente (figura 17) e ao expandir provoca um empacotamento dos grãos da rocha de formação.

As telas expansíveis são descidas e instaladas após a perfuração do poço aberto sendo posteriormente deformadas à frio até atingirem um diâmetro próximo ao diâmetro final do poço. Assim, podem ser utilizadas em poços que

possuem maior diâmetro e apresentam menor perda de carga por atrito. Todavia, ainda não é muito utilizada nos campos brasileiros.



**Figura 17** - Tela expansível (Santos, 2007).