

# 1

## Introdução

Produção de areia é o termo dado ao fluxo simultâneo de óleo e de partículas sólidas durante os estágios de produção de poço num campo de produção de óleo, que causa vários problemas operacionais e considerável perda de dinheiro (Bianco, 1999). Este problema pode ocorrer tanto em rochas pouco consolidadas (principalmente arenito) quanto em rochas consolidadas por causa da alta pressão. Processos de produção de areia na parede do poço são geralmente precedidos de formação de *breakouts*, zonas de dano de rochas ao seu redor (Dusseault & Sntarelli, 1992).

A produção de partículas de sólidos é um dos mais freqüentes e graves problemas observados durante a extração de petróleo. Ela está associada à perda da coesão e, plastificação de uma região ao redor do poço e/ou do canhoneio, a qual é mobilizada pelas forças hidrodinâmicas do fluxo.

De fato, dados da Sociedade de Engenheiros de Petróleo (SPE) indicam que 70% das reservas mundiais de gás e óleo estão contidas em arenitos e, que portanto, estão potencialmente sujeitas à ocorrência desse fenômeno em algum estágio da sua vida produtiva.

A formação de *breakouts* segundo Santos (2004) tem sido objeto de numerosos estudos nos últimos anos, sobretudo na indústria de exploração de petróleo. Perda de partículas e lascas de material podem se destacar da rocha durante a ruptura do poço, progressivamente preenchendo-o e danificado equipamentos ou adversamente afetando a produção. Portanto, o conhecimento dos mecanismos de ruptura de cavidades é necessário para minimizar o potencial de dano do poço e perda na produção, e para compreender o processo de produção de areia. (Holloway *et al* , 2003).

Medidas de exclusão, que evitem a entrada de areia no interior do poço, em geral reduzem a sua produtividade, além de comprometer, do ponto de vista econômico e produtivo, a vida útil do poço. Por esta razão, uma previsão do comportamento do reservatório em termos da quantidade de areia produzida é de fundamental importância.

A Tomografia Computadorizada de Raios X é uma técnica que permite a avaliação da estrutura interna dos objetos de modo não destrutivo, baseando-se na atenuação de raios X pela matéria. A tomografia vem revolucionando os ensaios executados em laboratório pois permite a visualização e o acompanhamento da progressão do dano nos corpos de prova em tempo real.

Neste trabalho serão realizados ensaios para visualizar a formação de danos (breakouts) em torno das cavidades dos corpos de prova. Estes ensaios têm como objetivo identificar a pressão de início da ruptura na cavidade interna da amostra, bem como a evolução da ruptura no decorrer da aplicação do carregamento externo. Para a realização deste carregamento, será testado um novo equipamento chamado Pressurizador. Na utilização deste equipamento, também será preciso identificar a taxa de carregamento a ser aplicado para cada tipo de amostra, e com isso, tornando possível a visualização da propagação da ruptura na cavidade durante o carregamento. Com o Pressurizador é possível aplicar carregamentos de pressões confinantes e pressões axiais de forma gradativa e contínua nas amostras colocadas no interior da célula de pressão. Estes ensaios são conduzidos em tempo real dentro de um Tomógrafo Computadorizado de Raio X.

No Capítulo 1 faz-se uma breve revisão da literatura a respeito dos principais mecanismos envolvidos na produção de areia. Procurou-se também apresentar alguns estudos experimentais de simulação física do problema.

No Capítulo 2 teve por objetivo relatar fundamentos teóricos da tomografia computadorizada de raios X, e citar algumas de suas aplicações em ensaios com rochas.

Foram utilizados neste estudo dois tipos de arenitos, Sergi e sintético, devido à baixa disponibilidade de amostras de reservatórios verdadeiros. No Capítulo 3 estão relatadas as técnicas utilizadas para caracterização destes arenitos e o programa experimental desenvolvido neste trabalho com equipamentos e metodologia empregados nos ensaios.

Os resultados obtidos nos ensaios estão apresentados no Capítulo 4.

No Capítulo 5 são mencionadas as conclusões finais deste trabalho e sugestões para futuros trabalhos nesta área.

## 1.1

### Produção de Areia

#### 1.1.1

#### Problemas Decorrentes da Produção de Areia

A Produção de areia ocorre quando a relação hidromecânica, antes estável, entre o fluido e o meio poroso torna-se instável ao atingir o limite de resistência da matriz porosa, ocasionando a desagregação da mesma. Mais especificamente, observações de campo indicam que mudanças no gradiente de pressão de fluidos e nas tensões efetivas, atuantes na matriz porosa, provocam o arrancamento de pequenas lascas da formação.

Dusseault e Santarelli (1989) detectaram 3 padrões distintos de produção de areia:

- Uma quantidade variável de areia, após algum tempo de exploração;
- Uma quantidade contínua de areia, em toda vida útil do poço;
- Uma quantidade de areia é observada durante o início da vida útil do poço, e cessando após um período de tempo.

Quando a Produção de areia é grande podem causar:

- Colapso da zona produtora e tamponamento do poço;
- Abrasão e desgaste de ferramentas, hastes e equipamentos, tanto os internos ao poço como aqueles colocados na plataforma, levando à necessidade de substituição ou reparo dos materiais.
- Problemas ambientais derivados da necessidade de disposição de resíduos impregnados por hidrocarbonetos (Vaziri & Lemoine, 2000).
- Quando o fluxo não tem energia para carrear a areia, pode ocorrer entupimento do canhoneio, acarretando a restrição ao fluxo e levando à necessidade de operação de limpeza. Já quando o fluxo tem energia para

carrear a areia, pode ocorrer um entupimento ou dano de equipamentos na superfície.

Veeken *et al*, em 1991, realizaram um inventário de parâmetros que influenciam a produção de areia. Normalmente, apenas alguns destes parâmetros são utilizados nas análises de previsão da produção de areia, devido a dificuldades práticas de monitoramento e obtenção de dados durante vários anos de todos os poços envolvidos no estudo.

De acordo com Santos (2004), Outro aspecto relevante e frequentemente citado na literatura, são os elevados custos de implantação e manutenção do controle e a redução de 40% a 50% na produtividade do poço que, em geral, as medidas de exclusão da produção de areia provocam (Morita & Boyd, 1991; Fjaer *et al*, 1992; Ramos *et al*, 1994; Economides *et al*, 1998 e Barroso, 2002, Bol *et al* 1992, *apud* Santarelli, 1994).

Estima-se que 500 milhões de dólares são gastos por ano, apenas na Europa ocidental, com os problemas de instabilidade de poços e produção de areia. Estes dados ilustram a importância econômica que este tema representa para a indústria do petróleo. Neste sentido, previsões confiáveis do potencial de produção de areia dos reservatórios são fundamentais para a indústria do petróleo.

Para poços de baixa produtividade, sobretudo aqueles que produzem óleos pesados (alta viscosidade), um certo grau de produção de sólidos pode ser tolerado para elevação da produtividade, desde que boas práticas de gestão e controle da produção sejam adotadas (Papamichos, 1999; Vaziri & Lemoine, 2000; Dusseault *et al*, 1995 e Barroso, 2002).

Quando no poço a ser explorado existe risco de produção de areia o controle pode ser feito pela completação natural do poço ou o controle ativo. Na completação natural, haverá um controle nos parâmetros operacionais, como o drawdown (que é a diferença entre a pressão no interior do poço e a poropressão na formação e a taxa de produção). Já no controle ativo será utilizada medida de exclusão como: Gravel packing, utilização de telas e filtros etc...

### 1.1.2

#### Mecanismos da Produção de Areia

Estão descritos na literatura dois mecanismos básicos que levam à produção de areia. No primeiro, as partículas são arrancadas do reservatório por tensões de tração induzidas pelas forças de percolação devidas ao fluxo. A atuação exclusiva deste mecanismo é responsável pela produção de areia em reservatórios de rochas pobremente consolidadas, em geral, arenitos muito brandos. Uma segunda forma de deflagração do processo se dá quando elevadas deformações na rocha-reservatório ocorrem associadas a um significativo incremento de *drawdown* ( $p_w - p_f$ ), onde  $p_f$  é a poropressão na formação e  $p_w$  é a pressão de fluido no poço. O resultado deste mecanismo é a formação de uma região plastificada na vizinhança do poço que, quando associada ao primeiro mecanismo descrito, torna os grãos do reservatório suscetíveis ao arraste pelo fluido. Este tipo de mecanismo é descrito por Sanfilippo *et al* (1995) para explicar a produção de areia observada em arenitos medianamente resistentes em poços profundos no Mar Adriático.

Barroso (2002) apresentou uma revisão bibliográfica, reproduzida a seguir, sobre os mecanismos de produção de areia, com ênfase nos modelos propostos por Dusseault & Santarelli (1989), que descrevem os principais processos nas diferentes fases de um poço de petróleo, ou seja, perfuração, completação e produção.

Utiliza-se aqui o modelo conceitual apresentado por Dusseault & Santarelli (1989) para ilustrar os prováveis mecanismos envolvidos.

Os principais mecanismos de produção de areia em rochas com alguma consolidação são os seguintes:

- Na operação de Perfuração, uma alta velocidade de rotação pode promover um descarregamento na cimentação dos grãos e ocasionar o fraturamento da formação, devido à vibração causada pela broca e componentes da coluna. Este aumento de tensões permite que os grãos entrem na fase plástica e, conseqüentemente rompam por cisalhamento. E quando as diferenças entre o diâmetro do poço e o diâmetro externo da coluna de perfuração são mínimas, existe um efeito de pistom no poço

durante a retirada da coluna, causando tensões que superam a resistência à tração na formação, causando fraturamento. Às vezes é necessário aumentar o peso do fluido de perfuração com objetivo de conter as altas pressões dos poros e evitar a ruptura por colapso. Em compensação, um aumento excessivo do peso pode levar ao fraturamento da parede do poço.

- Na completação, para fixar-se o revestimento à formação, utiliza-se cimento que pode sofrer contração e conseqüente redução da tensão radial ( $\sigma_r$ ). Cria-se assim, uma zona fragilizada, composta por material similar à areia, susceptível a ser arrastado pelo fluxo de produção (Figura 1.01).

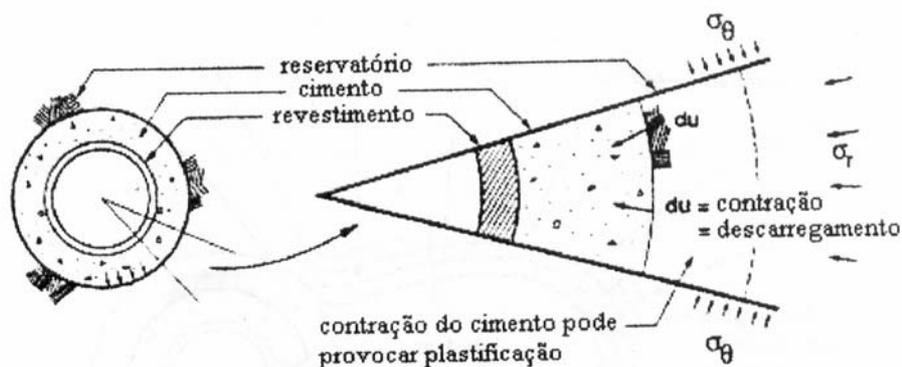


Figura 1.01 – Retração do cimento ( Dusseault & Santarelli, 1989).

- A operação de canhoneio, realizada após a cimentação, também leva à desintegração da estrutura da rocha reservatório. Esse procedimento provoca a produção de sólidos a partir das paredes plastificadas das pequenas cavidades formadas (Figura 1.02). A destruição da estrutura da rocha ao redor das cavidades canhoneadas produz zonas com diferentes comportamentos mecânicos, como descrevem Dusseault & Santarelli (1989). Na zona mais afastada, observa-se uma região elástica não afetada pelo canhoneio.

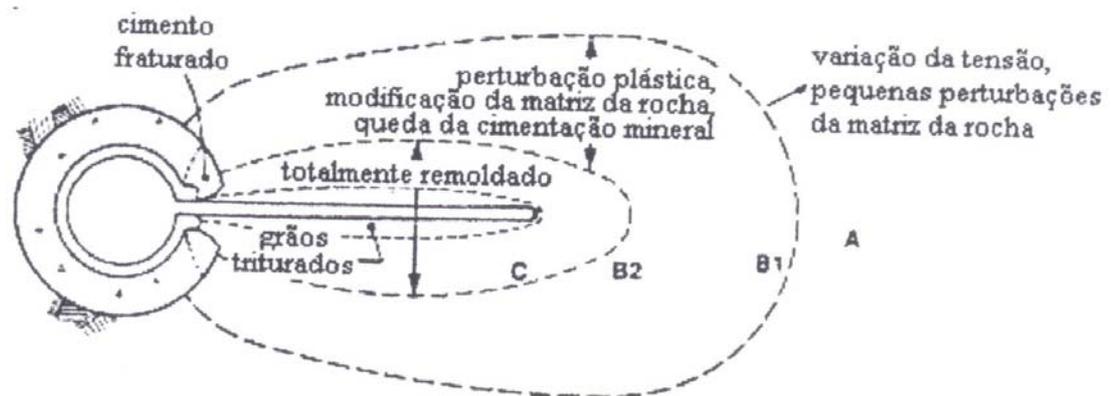


Figura 1.02 – Plastificação no canhoneamento (Dusseault & Santarelli, 1989).

- É na fase de produção de fluido que o potencial de produção de areia se desenvolve mais intensamente, aumentando muito com a taxa de produção e as forças de percolação, por dois mecanismos principais de rupturas, cisalhamento e tração, como dito anteriormente (Santarelli et al, 1989 e Monta & Boyd, 1991).

### 1.1.3

#### Estudos Experimentais de Alguns Autores a Produção de Areia

Relevantes avanços têm sido alcançados em recentes estudos, sobretudo no que diz respeito à compreensão do efeito das vazões e do estado de tensões na produção de sólidos.

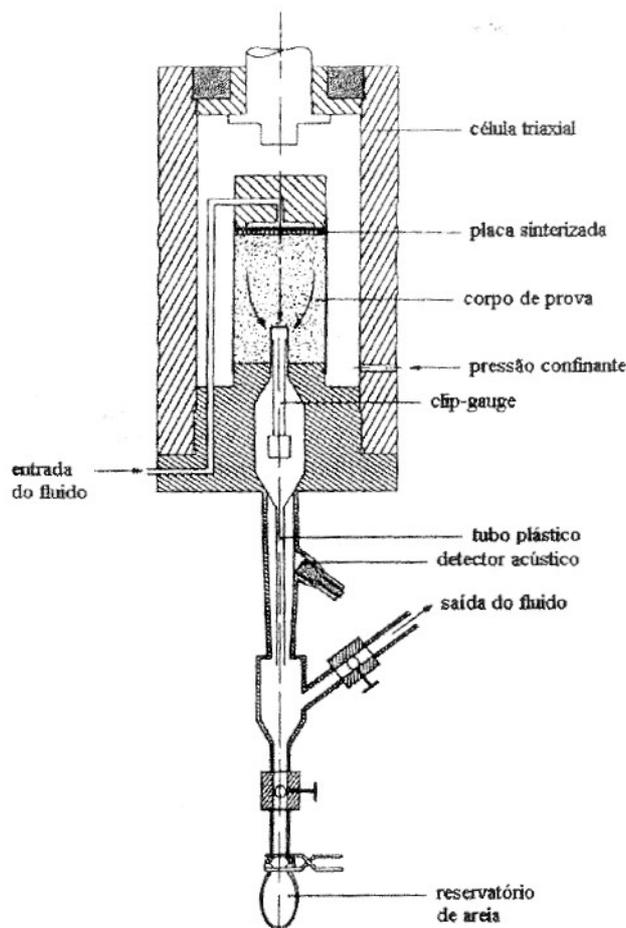


Figura 1.03 – Vaso de pressão aplicado em experimentos de cavidades com aplicação de fluxo (Tronvoll & Fjær, 1994).

De acordo com Barroso (2002), Tronvoll & Fjær (1994) Investigaram o efeito da resistência da rocha sobre a estabilidade de cavidades. Eles elaboraram um extenso programa experimental através de um equipamento figura 1.03. Como pode ser visto a simulação da resistência da cavidade na rocha é feita com um furo perfurado sem a aplicação de fluxo, cujas dimensões são 60 mm de comprimento e 20 mm de diâmetro. A amostra de forma cilíndrica possui altura de 150 mm e diâmetro de 100 mm. As principais características do equipamento são: aplicação de pressões hidrostáticas nominais de 40 Mpa, possibilidade de aplicação de fluxo axial, instrumentação das deformações internas da cavidade com um clip-gauge, sistema hidráulico capaz de aplicar vazões de 4 l/min e um sistema para mensuração da areia produzida.

Os autores apresentaram uma relação entre a resistência à compressão uniaxial da rocha e a tensão de início da ruptura da cavidade. Esta relação é válida

uma vez que, na ausência de pressões internas na cavidade, a parede está submetida a um estado de tensões que se aproxima do uniaxial. Nos experimentos de Tronvoll & Fjær foi observada a formação de *breakouts* perpendiculares ao eixo da amostra.

Os autores observaram que o começo de uma quantidade limitada da produção de sólidos está associado ao início da ruptura da parede da cavidade. Grande quantidade de areia é produzida somente próxima ao estado de resistência máxima, que ocasiona a ruptura global. Para arenitos brandos, uma considerável quantidade de flocos e lascas de areia permanece aderida à rocha intacta. Formação de *breakouts* e de uma zona plastificada se propagando do fundo da cavidade na direção axial das amostras foram verificadas. As evoluções das rupturas das cavidades foram significativamente afetadas pelo fluxo axial. A tensão inicial de ruptura da cavidade parece não ser afetada pelo fluxo axial, sendo esta fortemente dependente da resistência à compressão uniaxial da rocha.

Em 1997, Tronvoll *et al.* utilizaram o mesmo equipamento do estudo anterior, com o objetivo de avaliar a produção de areia em arenitos sintéticos, fabricados com base no método de Holt *et al.* (1993), com resistência à compressão simples em torno de 2 MPa e porosidade em torno de 30%.

Os resultados demonstraram que a produção de areia inicial é provocada pela plastificação e enfraquecimento do material, causada pelo excesso de pressão externa, podendo ocorrer antes da ruptura global da rocha. Mesmo para arenitos de baixíssima resistência à compressão uniaxial, o enfraquecimento do material é condição necessária para o início da produção de areia devido a forças de percolação de baixa intensidade.

Outro aspecto relatado neste estudo foi em relação ao efeito do tamanho médio dos grãos constituintes das amostras, cuja principal influência foi quanto ao modo de ruptura da rocha. Esta constatação foi obtida através de imagens adquiridas por tomografia computadorizada de raios X após os ensaios. A deformação em amostras moldadas com areia de granulometria grosseira (tamanho médio dos grãos igual a 250 $\mu$ m) é uniforme em toda a cavidade, e esta permanece circular mesmo terminado o ensaio (Figura 1.04 a). Entretanto, as imagens obtidas a partir de amostras constituídas de grãos finos apresentam bandas de cisalhamento e fraturas de tração radiais (figura 1.04 b). A produção de

areia a partir destes dois tipos de amostras também reflete os diferentes modos de ruptura. A produção de areia a partir de amostras constituídas por grãos finos se deu através de lascas e flocos destes grãos, enquanto que somente grãos individuais foram produzidos a partir de amostras confeccionadas com areia grossa.

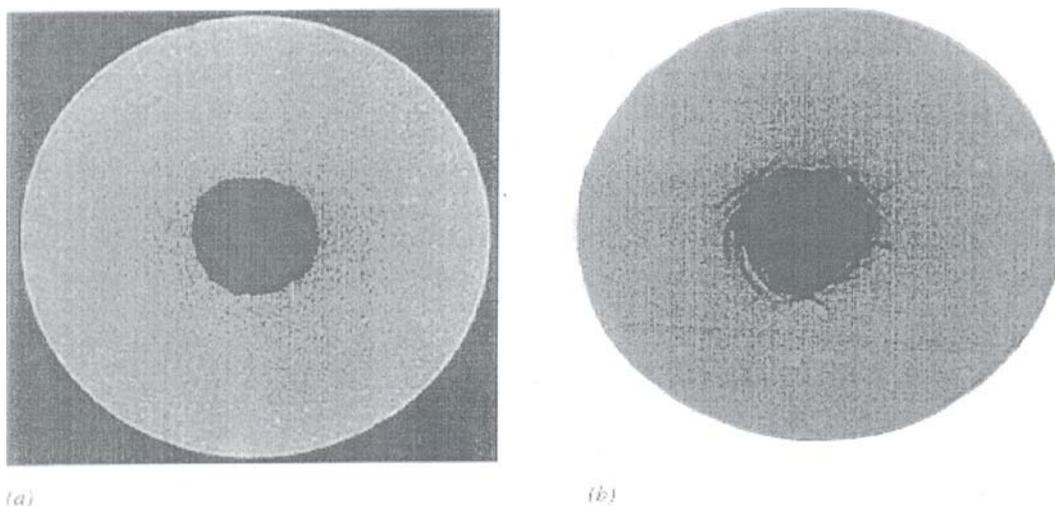


Figura 1.04 – Imagens de seções transversais de duas amostras após o ensaio: (a) tamanho médio de grãos constituinte igual a 250  $\mu\text{m}$ , e (b) 100  $\mu\text{m}$ . (Tronvoll *et al.*, 1997).

De acordo com Santos (2004), Vardoulakis *et al* (2001) desenvolveram um modelo de previsão volumétrica da produção de areia, que leva em consideração a pressão externa e a taxa de fluxo.

Para os ensaios em laboratório desenvolvidos para este modelo, foi utilizada amostra de arenito sintético pobremente consolidado. Em relação aos estudos anteriores, os corpos de prova para estes ensaios tiveram o diâmetro externo e a altura aumentada para 200mm e enquanto que o diâmetro interno permaneceu com 20mm. Isso foi feito de forma a evitar os efeitos de extremidades que conduzem as amostras com 100mm de diâmetro externo a uma rápida ruptura global. Os equipamentos utilizados para estes testes foram semelhantes aos equipamentos utilizados nos estudos anteriores, porém com alterações óbvias nas dimensões. Para a execução do fluxo radial neste caso foi colocado um material com alta permeabilidade (*gravel*) entre a superfície externa do corpo de prova e a

membrana. O fluido entra no pistão do topo e distribuído pelo *gravel*. O esquema do fluxo radial está apresentado na figura 1.05.

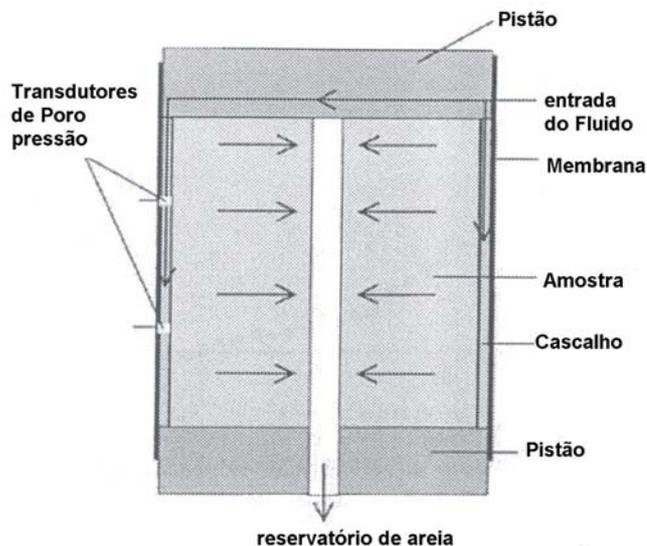


Figura 1.05 – Esquema do fluxo radial no ensaio de produção de areia com amostra de 200mm de diâmetro externo (Vardoulakis *et al*, 2001).

A figura 1.06 mostra a produção de areia versus pressão confinante onde se pode observar que uma quantidade limitada de areia foi produzida entre 3 e 7,5 MPa. Parte desta quantidade é provável ser decorrente do processo de perfuração do furo interno da amostra. Entre 7,5 e 8 MPa a taxa de produção de areia aumenta até 13 MPa onde ocorre o colapso da rocha. A taxa de fluxo utilizada neste ensaio foi igual a 0,5 l/min. A partir deste testes foi possível concluir que a produção de areia é diretamente proporcional ao carregamento externo.

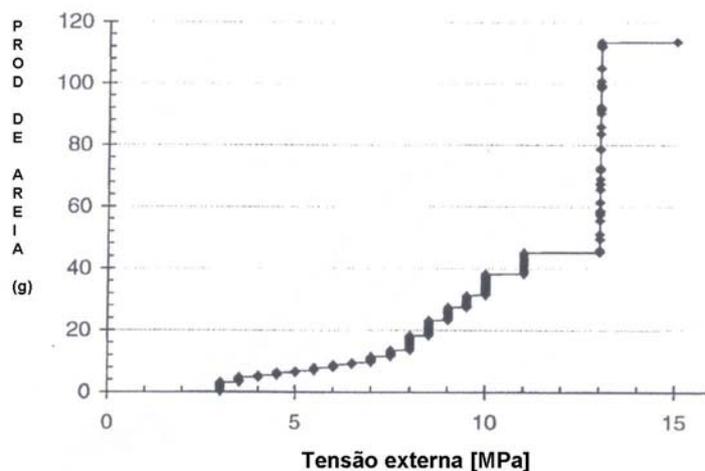


Figura 1.06 – Total acumulado da produção de areia versus tensão externa (Vardoulakis *et al*, 2001).

Para verificar a influência da taxa de fluxo na quantidade de areia produzida, fixou-se um pressão confinante e a taxa de fluxo variou de 0,25 l/min à 3 l/min em passos de 0,25 l/min. O tempo gasto para cada taxa de fluxo foi de 20-25 minutos. O tempo total do ensaio foi de 31h e 35 min. Amostras do fluido com areia produzida foram coletadas para cada taxa de fluxo para estimar a taxa de produção de areia. Este ensaio pode ser representado pela figura 1.07. Pôde-se concluir deste último ensaio que para um determinado nível de carregamento externo, quanto maior a taxa de fluxo, maior será a produção de areia.

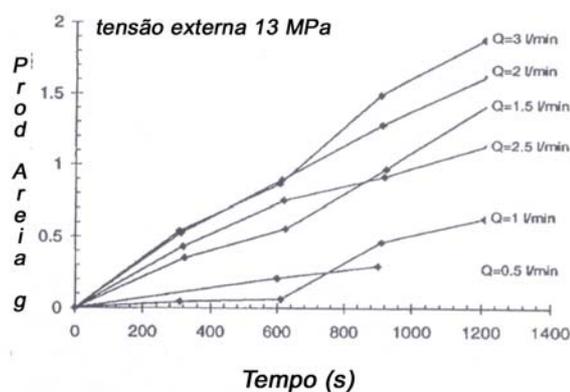


Figura 1.07 – Total acumulado da produção de areia versus tempo com várias taxas de fluxo e pressão confinante igual a 11 Mpa (Vardoulakis *et al*, 2001).

A figura 1.08 apresenta imagens tomográficas de um corpo de prova após o ensaio. Pôde-se notar que a parte mais afetada pela produção de areia foi a base da cavidade interna.

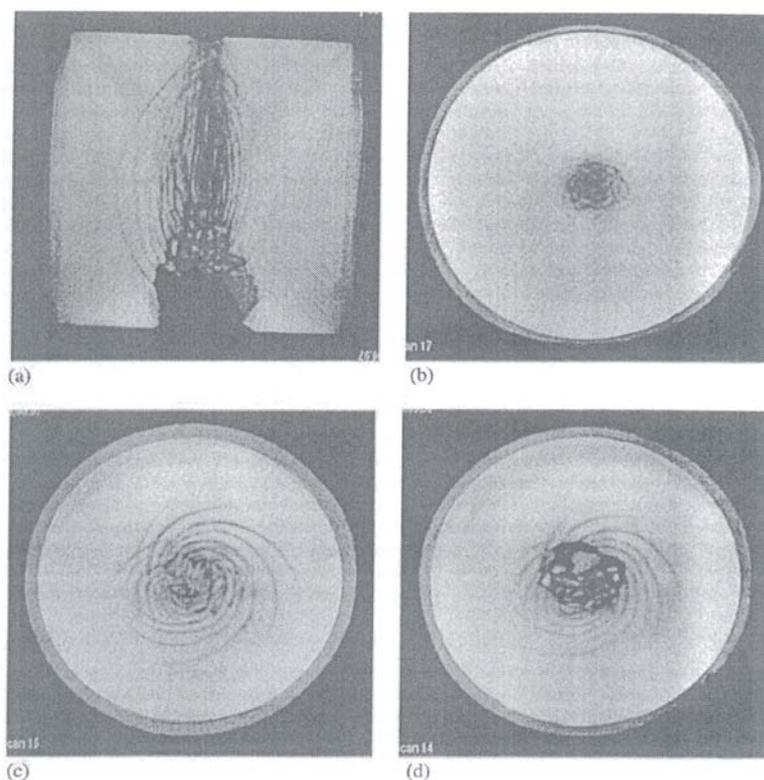


Figura 1.08 – Imagens tomográficas após o ensaio: (a) Seção longitudinal, (b) seção transversal do topo, (c) (meio) e (d) base do corpo de prova (Vardoulakis *et al*, 2001).

Este trabalho de pesquisa tem por objetivo avaliar a formação de breakouts quanto ao carregamento externo, sem utilização de fluxo, com o acompanhamento em tempo real da tomografia computadorizada de raios X, visando, com isto, simular fisicamente os estágios iniciais da produção de areia em amostras de arenitos.