

2 Produção de Areia

2.1 Principais Aspectos da Produção de Areia

Produção de Areia é o nome que se dá ao processo de produção de partículas sólidas arrancadas da rocha reservatório simultaneamente à produção de óleo e/ou gás. Estima-se que setenta por cento das reservas de petróleo ou gás do mundo são encontrados em reservatórios pobremente ou não consolidados, onde o fenômeno de produção de areia é mais freqüente. Porém, a produção de sólidos (outro nome para produção de areia) pode ocorrer em reservatórios consolidados se os limites de resistência da rochas são atingidos durante as operações de perfuração, produção, injeção e completação. (Bianco,1999).

Dentre os problemas decorrentes da produção de areia pode-se destacar os seguintes aspectos:

- Colapso do poço ou de seu revestimento (*casing*);
- Bloqueio total ou parcial das ranhuras (*slots*) do revestimento do poço , diminuindo a taxa de produção;
- Abrasão e desgaste de ferramentas, hastes e equipamentos, tanto os internos ao poço como aqueles colocados em superfície ou na plataforma, levando à necessidade de substituição ou reparo dos itens mencionados (Fjaer *et al*, 1992);
- Problemas com a extremidade das cavidades canhoneadas no poço, que nos casos extremos pode levar à obstrução e abandono do poço (Fjaer *et al*, 1992);
- Problemas ambientais derivados da necessidade de disposição de resíduos impregnados por hidrocarbonetos (Dusseault & Santarelli, 1989).

A produção de areia pode se apresentar em três padrões distintos (Dusseault & Santarelli,1989):

- i) Pode ocorrer após algum tempo de exploração do óleo ou gás e produzir quantidades variáveis de sólidos;
- ii) O poço pode produzir areia por um determinado período de tempo (curto ou longo) e então cessar a produção;
- iii) O poço pode apresentar significativa e continuada produção de sólidos por longos períodos de tempo, muitas vezes por anos.

Para os poços onde há riscos de produção de sólidos, existem dois grupos principais de métodos de controle possíveis:

a) Completação natural do poço – a produção de areia é controlada pela ação sobre os parâmetros de operação, tais como o *drawdown* (diferença entre a pressão de fluido no interior do poço p_w , e a poropressão na formação p_f) e a taxa de produção;

b) Controle ativo - medidas de exclusão que atuam diretamente no controle da produção de areia, tais como, *gravel packing* (obturadores de cascalho) , consolidação química, perfuração seletiva, utilização de telas e filtros, etc.

Deve-se ressaltar que as medidas de controle têm em comum os elevados custos, tanto de implantação quanto de manutenção. Outro aspecto relevante e freqüentemente citado na literatura é 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 e Barroso,2002) Estimam que 500 milhões de dólares são gastos por ano, apenas na Europa, excluindo-se os países da antiga cortina de ferro, 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 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).

2.2

Mecanismos da produção de areia

De acordo com Barroso(2002) 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. Uma segunda forma de deflagração do processo se dá quando elevadas deformações na rocha reservatório ocorrem associadas a concentração de tensões na parede do 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.

Informações a respeito do comportamento geomecânico das rochas reservatório são de fundamental importância para a previsão da produção de areia. Dusseault & Santarelli(1989) apresentaram uma extensa discussão acerca das prováveis hipóteses envolvidas no processo de produção de areia. Os autores discorrem sobre aspectos relacionados às operações de perfuração, completação e produção que podem dar origem ou contribuir para a deflagração do processo.

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

- O processo de perfuração, promove um descarregamento que provoca deformações que destroem o material de cimentação dos grãos. Este aumento de tensões efetivas provoca deformações plásticas causando uma ruptura por cisalhamento da rocha. A ruptura da face do poço resulta da incapacidade mecânica do material de prover suporte radial e redistribuir tensões. O raio da zona rompida é inversamente proporcional à resistência da rocha e pode ocorrer produção de areia (Dusseault & Santarelli,1989). O material granular oriundo desta ruptura é facilmente arrastado pela lama de perfuração.

- Na fase de completação, segundo Barroso,(2002) o revestimento é assentado e o cimento lançado entre este e a formação. Com a possível retração do cimento, a tensão radial pode tornar-se menor do que a que atuava durante a perfuração. Este descarregamento pode criar uma região de material granular não suportado, que pode ser arrastado pelo fluxo na fase de produção (Dusseault & Santarelli, 1989).(Ver figura 2.01).

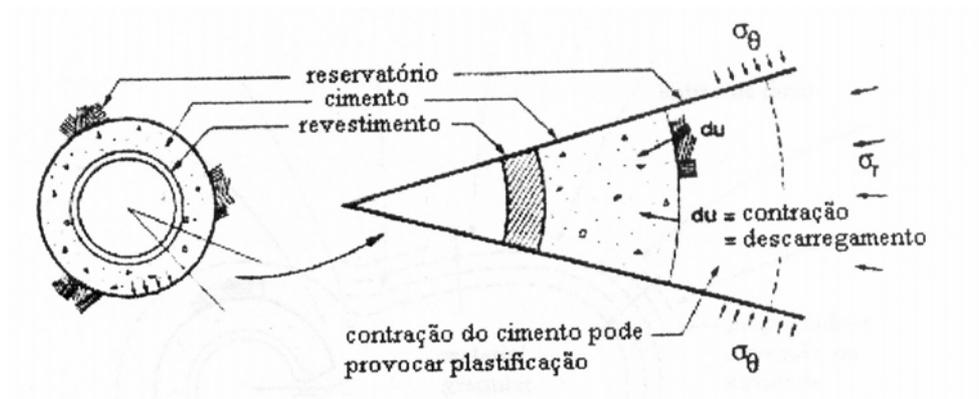


Figura 2.01 – Retração do cimento (Dusseault & Santarelli ,1989).

- Na operação de canhoneio o processo de produção de areia pode ser deflagrado, visto que a estrutura da é destruída, formando uma região plastificada ao redor do túnel canhoneado (Dusseault & Santarelli, 1989).(Ver figura 2.02).

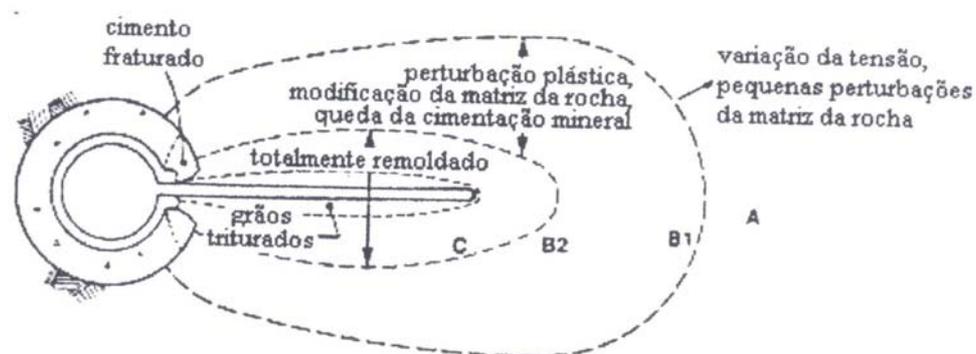


Figura 2.02 –Plastificação no canhoneamento (Dusseault & Santarelli ,1989).

- É na fase de produção de fluido que o potencial de produção de areia se desenvolve mais intensamente, aumentando consideravelmente com a taxa de produção e as forças de percolação (Santarelli et al, 1989 e Monta & Boyd. 1991). Neste processo distinguem-se dois mecanismos principais de ruptura (Santarelli et al, 1989):

1. Ruptura pelas altas tensões de cisalhamento nas vizinhanças do poço, devido aos elevados valores da diferença entre as pressões na formação e na face do poço. O excesso de tensão desviadora, que se desenvolve visto que a pressão na face do poço decresce da tensão horizontal *in situ* à tensão correspondente à pressão interna do poço, deve ser controlada de modo a se maximizar a taxa de produção e a se minimizar a produção de areia

2. Excesso de tensões efetivas de tração na direção radial devido às forças de percolação, provocando tração na cimentação entre grãos.

Ocorre também, que os mecanismos de cisalhamento e tração se desenvolvem simultaneamente e interagem, pois em uma rocha rompida, as forças de percolação encontram menor dificuldade em arrastar o material particulado para dentro do poço. Contudo, se o material rompido não for removido pelo fluxo e ficar contido nas proximidades da parede do poço, este acaba conferindo certa estabilidade à cavidade. Assim sendo, sem carreamento do material rompido, não há expansão da zona plastificada e o processo de produção de sólidos cessa (Dusseault & Santarelli, 1989).

Veeken *et al* , em 1991, realizaram um inventário de parâmetros que influenciam a produção de areia, apresentado na tabela 2.1. Normalmente, somente alguns destes parâmetros são utilizados em uma análise 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.

Tabela 2.01 – Parâmetros que influenciam a produção de areia.

Formação		Completação	Produção
Rocha	Reservatório		
<ul style="list-style-type: none"> • Resistência; • Tensões in situ vertical e horizontal (varia durante a completação); • Profundidade (influencia a resistência e as tensões); 	<ul style="list-style-type: none"> • Poropressão ; • Permeabilidade; • Composição do fluido (gás, óleo, água); • Raio de drenagem; • Espessura do reservatório; • Heterogeneidades 	<ul style="list-style-type: none"> • Orientação e diâmetro do poço; • Tipo de completação (poço aberto ou canhoneado); • Tipo de perfuração; • Medidas de controle da produção de areia; • Fluidos de completação e estimulação; • Tamanho dos tubos; 	<ul style="list-style-type: none"> • Taxa de fluxo; • Pressão de drawdown; • Velocidade do fluxo; • Volume de areia acumulado.

2.3

Estudos Experimentais de Simulação da Produção de Areia

Nesta seção estão relatados modelos experimentais usados para investigar os mecanismos físicos envolvidos na produção de areia e avaliar os impactos relativos de alguns parâmetros operacionais.

Tronvoll & Fjær (1994) investigaram o impacto da resistência da rocha e da circulação de fluxo sobre o processo de ruptura e de produção de areia. Para este estudo os autores desenvolveram o equipamento apresentado na Figura 2.03. Foram ensaiadas amostras de vários tipos de arenitos retiradas de testemunhos de sondagens. A amostra de rocha de forma cilíndrica possui altura de 150mm e diâmetro de 100 mm. Para a simulação de cavidades canhoneadas, é feito nesta amostra um furo coaxial de diâmetro de 20mm e altura 60mm. As principais características deste equipamento são: aplicação de pressões hidrostáticas de até 40 MPa; instrumentação da cavidade (clip-gauge); bomba hidráulica com capacidade de aplicar ao sistema vazões de 4l/min a pressões máximas de 40 MPa e um detetor ultra-sônico para mensuração da produção de areia produzida.

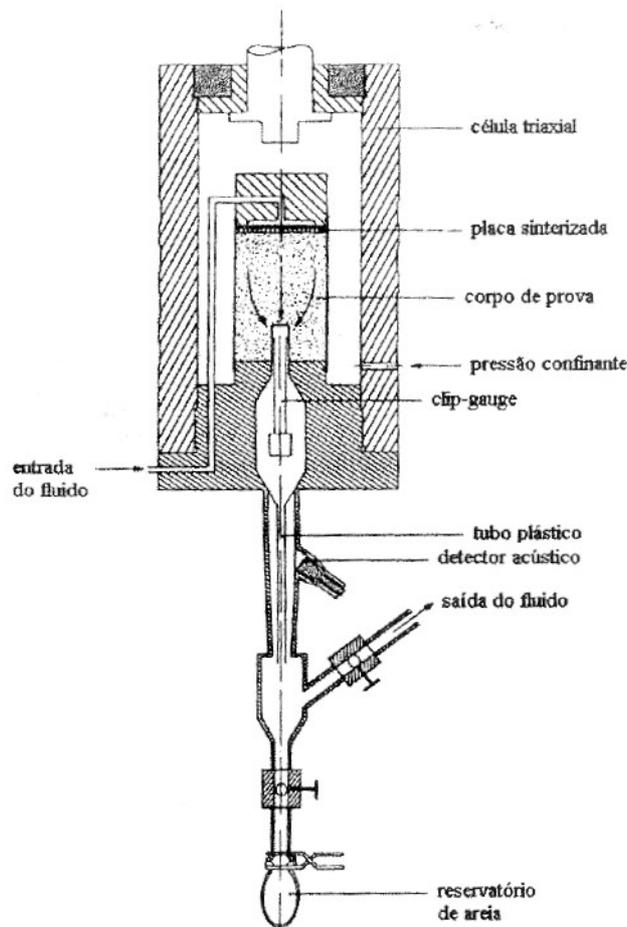


Figura 2.03 – Interior e subestrutura da célula de pressão desenvolvida para os experimentos de ruptura em cavidades com aplicação de fluxo (Tronvoll & Fjær, 1994).

Para a verificação do efeito da resistência da rocha sobre a estabilidade da cavidade, os ensaios foram realizados sem aplicação de fluxo. 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. Santarelli *et al.*, (1989) sugerem que a resistência à compressão simples como um índice geomecânico a ser utilizado em estudos experimentais de produção de areia. Nos experimentos de Tronvoll & Fjær foi observada a formação de *breakouts* perpendiculares ao eixo da amostra.

Em relação ao efeito fluxo de fluido os autores observaram que o começo de limitada quantidade de areia produzida é geralmente associada ao início da ruptura da parede da cavidade. Grande quantidade de areia é produzida somente próximo ao estado de resistência última da rocha, isto é, próximo à sua ruptura global. Para

arenitos brandos, uma considerável quantidade de flocos e lascas de areia permanecem aderidas a rocha intacta. A formação de *breakouts* e de uma zona plastificada se propagando do fundo da cavidade em direção axial das amostras foram verificadas. A evolução da ruptura da cavidade foi significativamente afetada pelo fluxo axial. A tensão inicial de ruptura da cavidade parece não ser afetada pelo fluxo axial, sendo esta fortemente dependente da resistência 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 causados pelo excesso de pressão externa, podendo ocorrer anterior a ruptura global da rocha. Mesmo o para arenitos de baixíssima resistência a 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 μ m) é uniforme em toda a cavidade, e esta permanece circular mesmo terminado o ensaio (Figura 2.04 a). Entretanto, as imagens obtidas a partir de amostras constituídas de grãos finos apresentam bandas de cisalhamento e fraturas de tração radiais. (figura 2.04 b). A produção de areia a partir deste 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.

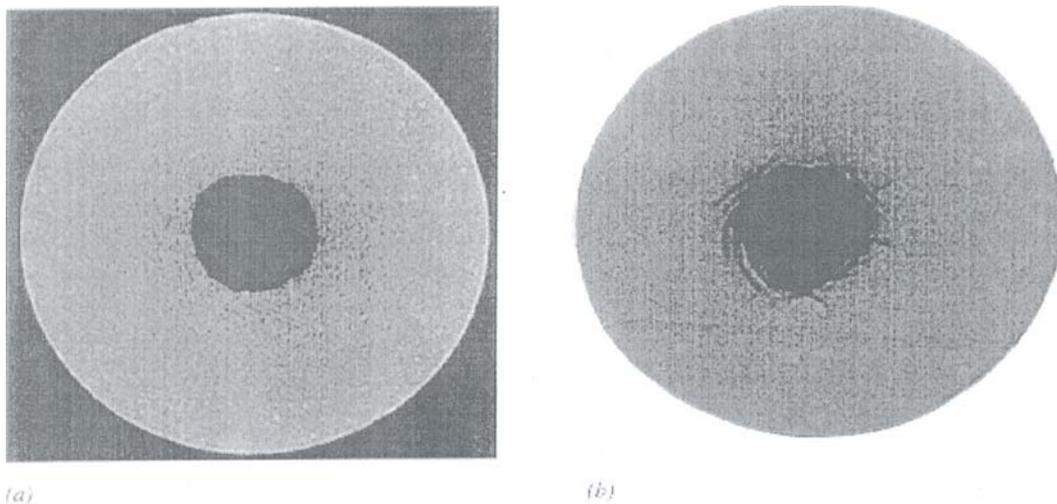


Figura 2.04 – Imagens de seções transversais de duas amostras após o ensaio: (a) tamanho médio de grãos constituinte igual a 250 μm , e (b) 100 μm . (Tronvoll *et al.*, 1997).

O objetivo do estudo realizado por Unander *et al* (1997) foi investigar o efeito da geometria do fluxo no potencial de produção de areia. As amostras empregadas neste estudo foram de afloramento de arenito Red Wildmoor, cujas dimensões estão presentes na figura 2.05. A resistência à compressão simples deste arenito varia entre 10 a 12 MPa. Duas geometrias extremas foram testadas, a primeira com fluxo principal passando pelo corpo de prova em direção ao topo da cavidade (fluxo axial), empregando o mesmo equipamento desenvolvido por Tronvoll & Fjær (1994). A segunda geometria com fluxo radialmente em direção às paredes da cavidade. Para executar o fluxo radial o equipamento sofreu algumas modificações: a membrana de borracha possui oito furos (4 de cada lado), sendo o fluido distribuído nos 2/3 inferiores da amostra.

As figura 2.06 representa as duas geometrias de fluxo empregadas neste estudo.

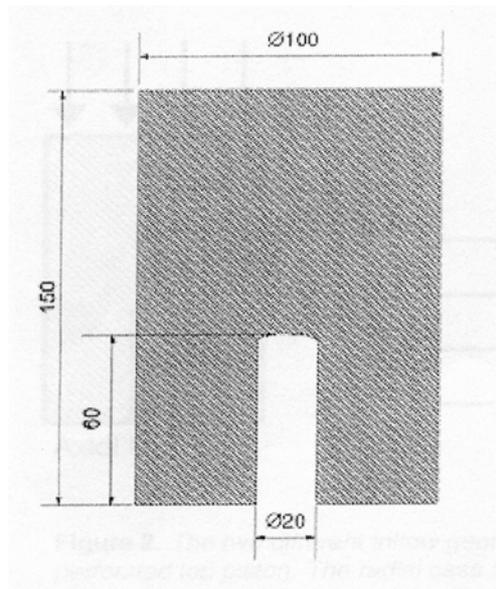


Figura 2.05 – Seção ao longo do eixo axial do corpo de prova de arenito Red Wildmoor . As dimensões são dadas em milímetros (Unander *et al* ,1997).

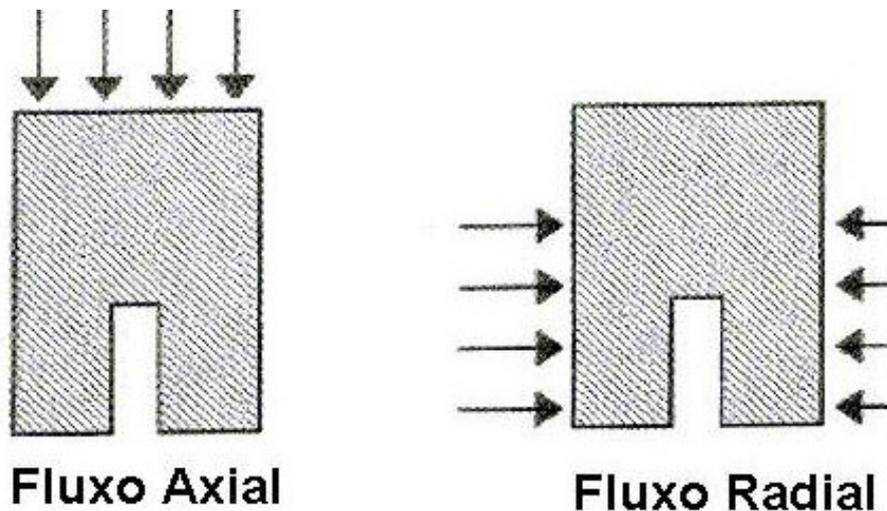


Figura 2.06 – Duas geometrias de fluxo: no caso axial, o fluido entra na amostra através do pistão perfurado do topo. O caso radial é obtido usando uma membrana com oito furos, sendo o fluido distribuído nos 2/3 inferiores da amostra (Unander *et al* ,1997).

A partir destes ensaios foi observado que o fluxo através do fundo da cavidade (fluxo axial) inibiu a produção de areia se comparado ao caso de fluxo radial. Este fenômeno é devido ao fato que a ruptura ao longo da parede da cavidade ocorrer primeiro, enquanto o fundo permanece intacto. Assim, como o fluxo promove a remoção do material rompido, o fluxo radial aumenta o potencial de risco de produção de areia. Além disso, um elevado gradiente de poropressão em direção à parede da cavidade pode ligeiramente reduzir a resistência da rocha.

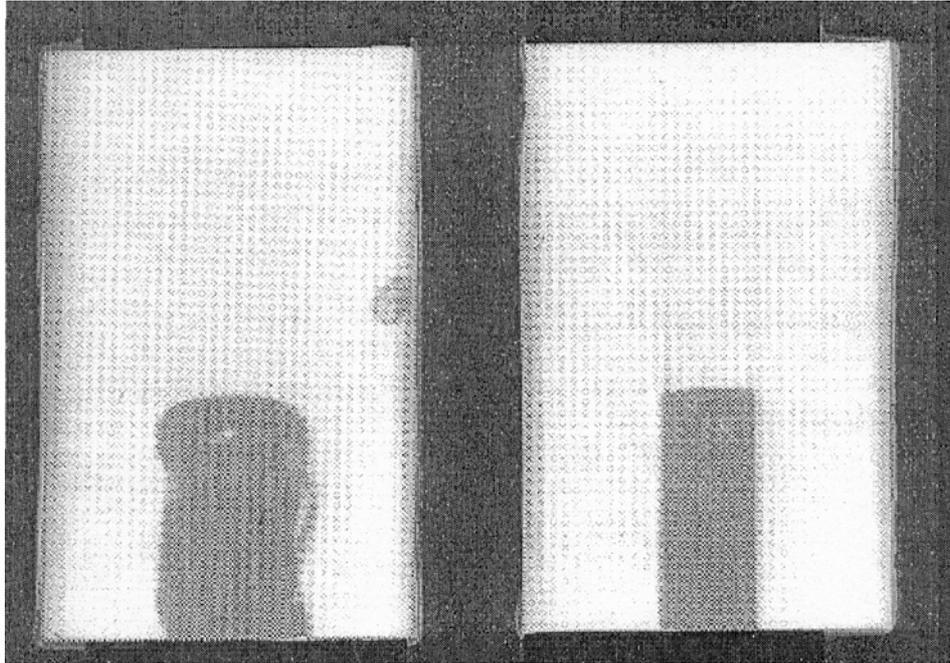


Figura 2.07 – Imagem tomográficas mostrando um padrão típico de dano criado em ambos os fluxos. À esquerda o dano causado pelo fluxo radial e à direita, pelo fluxo axial. (Unander *et al*, 1997).

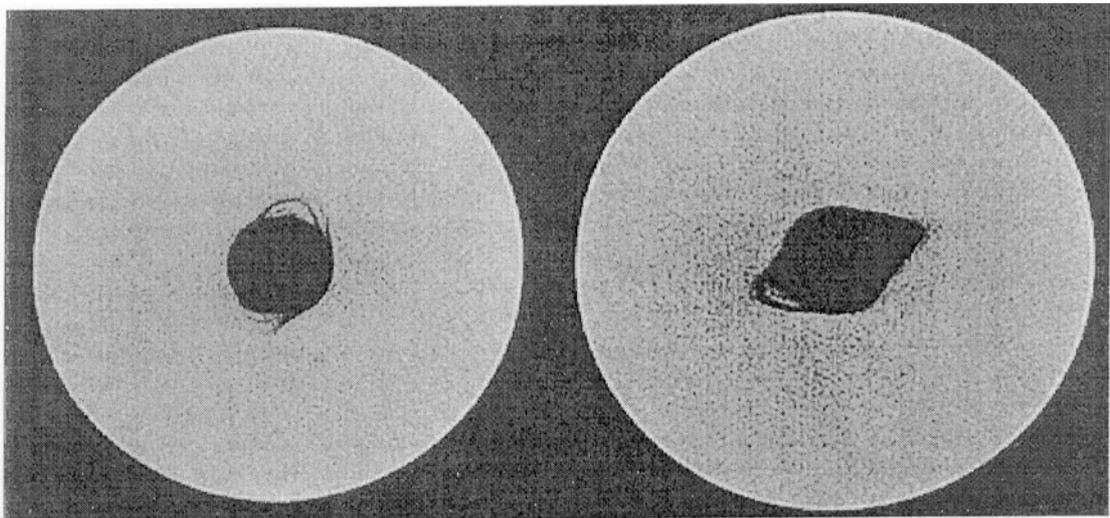


Figura 2.08 – Imagens tomográficas representando como o fluxo de fluido remove o material rompido da cavidade. A amostra da esquerda foi ensaiada sem fluxo, enquanto a imagem a da direita foi ensaiada com fluxo radial. Os corpos de prova foram carregados radialmente no estado plano de deformação até 25,2 e 19,3 MPa, respectivamente (Unander *et al*, 1997).

Papamichos (1999) realizou experimentos em uma variabilidade de amostras de arenitos com resistência uniaxial relatadas na tabela 2.2 com fluxo em radial em todo o comprimento do corpo de prova. Este trabalho visou correlacionar a produtividade do poço com a tensão externa aplicada, a deformação da cavidade e quantidade de areia produzida. Os ensaios foram realizados em aparato experimental representado na figura 2.09 sobre amostras de forma cilíndrica–vazada (TWC–Thick Walled Cylinder). As amostras possuíam diâmetro interno de 20 mm, diâmetro externo de 100 mm e altura de 120 mm. O equipamento é semelhante ao usado por Tronvoll (1994), porém a membrana que envolve a amostra permite a passagem de fluido através de furos como a utilizada por Unander(1997).

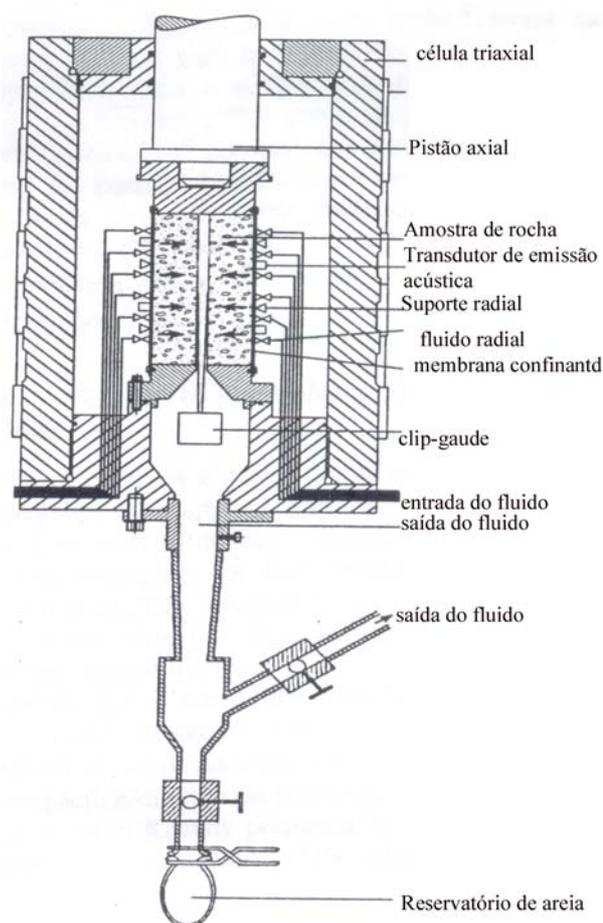


Figura 2.09 – Aparato experimental desenvolvido para ensaios de produção de areia em TWC (Papamichos ,1999).

Tabela 2.02 – Produção de areia com fluxo radial. (Papamichos, 1999)

Arenito	Porosidade (%)	USC⁽¹⁾ (MPa)	SPS⁽²⁾ (MPa)
Red Wildmoor	19,3	12,2	17,1
Sintético	30,0	2,9	6,2
Testemunho A	26,2	4,0	15,0
Testemunho B		3,9	4,0
Testemunho C		9,0	15,4
Testemunho D		20,0	43,1
Testemunho E		30,0	47,8
Testemunho F		50,0	66,5

(1) Resistência à compressão uniaxial

(2) Pressão externa no início da produção de areia.

A redução da produtividade foi constatada em todos os casos. A redução é na ordem de 50% para arenitos com permeabilidade inicial maior que 100md. E na ordem de 90% para permeabilidade inicial menor que 100 md. Notou-se ainda, uma pequena quantidade de areia, na ordem de poucas gramas, produzida antes do colapso da rocha. As análises mostraram um crescimento significativo da produtividade devido a produção de areia, quanto maior quantidade de areia deve ser produzida. As figuras 2.10 e 2.11 representam diferentes configurações de modos de ruptura para cada tipo de arenito.

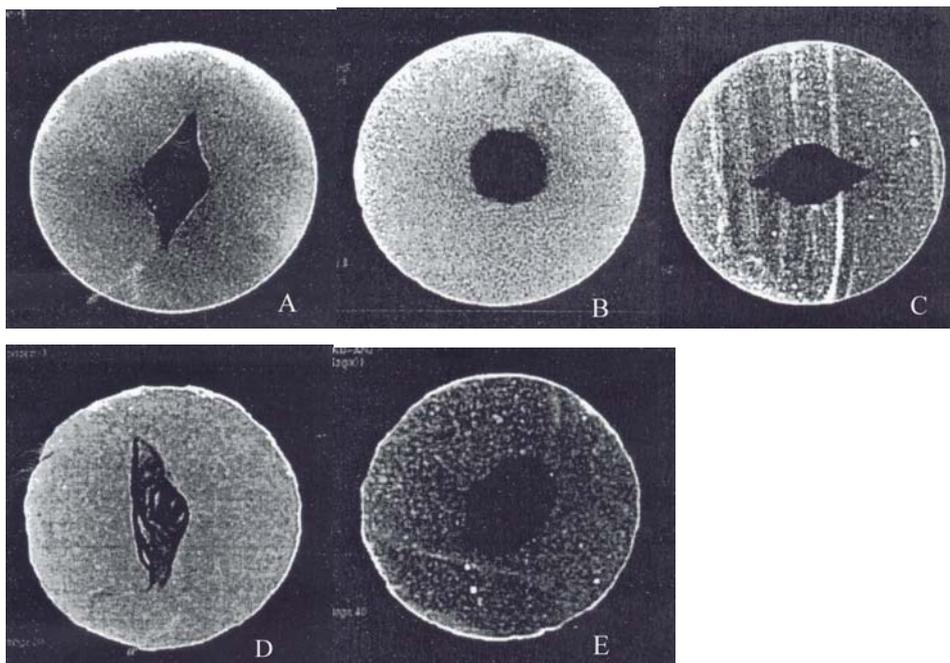


Figura 2.10 – Imagens tomográficas de seções transversais de amostras ensaiadas.(a) Arenito Red Wildmoor; (b) Arenito Sintético; (c) Testemunho A; (d) Testemunho B; e (e) Testemunho C. (Papamichos,1999).

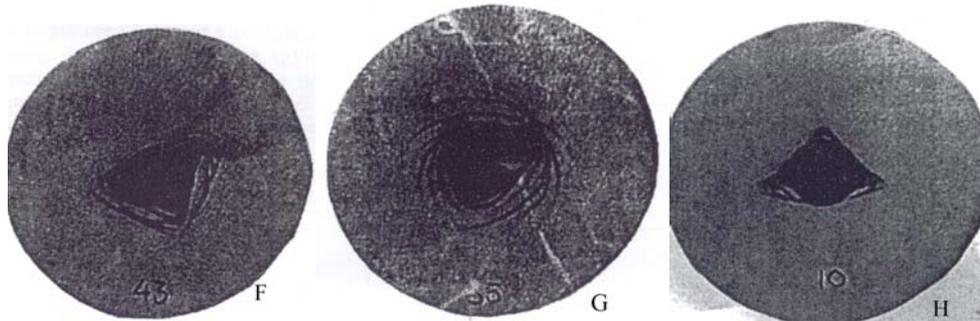


Figura 2.11 - Imagens tomográficas de seções transversais de amostras ensaiadas..(a) Testemunho D, (b) Testemunho E, e (c) Testemunho F (Papamichos,1999).

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, foram utilizadas amostras de arenito sintético pobremente consolidado. Em relação aos estudos anteriores, os corpos de prova para estes ensaios tiveram o diâmetro externo e a altura aumentados para 200mm e enquanto que o diâmetro interno permaneceu com 20 mm. A razão para este acréscimo tem por finalidade evitar os efeitos de extremidades que conduzem as amostras com 100mm de diâmetro externo a uma rápida ruptura global. Os equipamentos para estes testes foram similares ao usados 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 2.12.

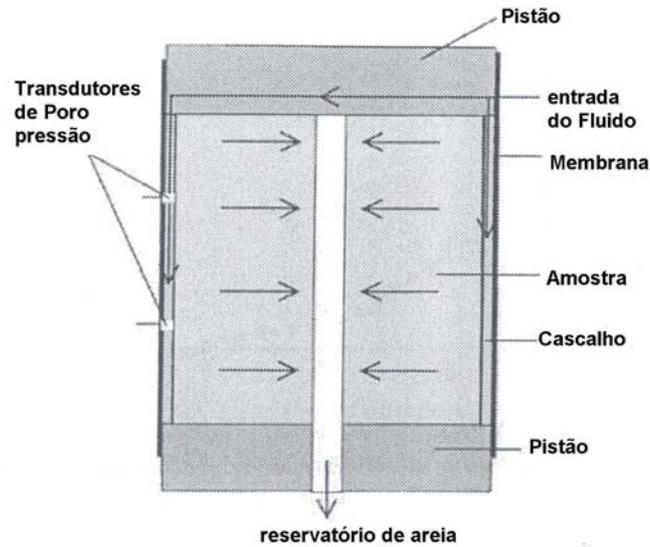


Figura 2.12 – Esquema do fluxo radial no ensaio de produção de areia com amostra de 200mm de diâmetro externo (Vardoulakis *et al*, 2001).

A figura 2.13 mostra a produção de areia versus pressão confinante onde pode-se 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.

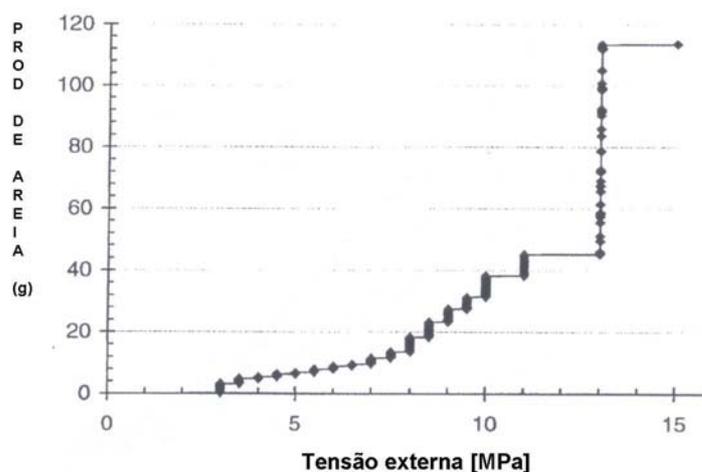


Figura 2.13 – Total acumulado da produção de areia versus tensão externa (Vardoulakis *et al*, 2001).

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 35min. 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 2.14. 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.

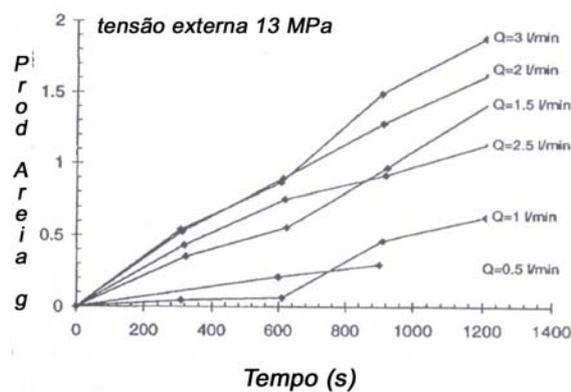


Figura 2.14 – Total acumulado da produção de areia versus tempo com várias taxas de fluxo e pressão confinante igual a 11 Mpa (Vardoulakis *et al*, 2001).

A figura 2.15 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.

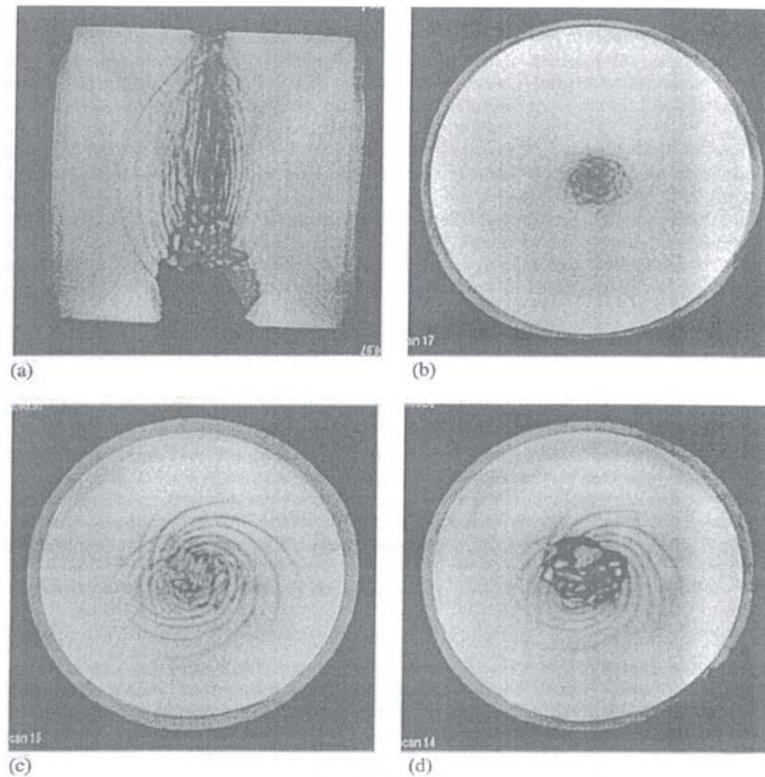


Figura 2.15 – Imagens tomográficas após o ensaio: (a) Seção longitudinal, (b) seção transversal do topo, (c) meio e (d) base do corpo de prova (Vardoulakis *et al*, 2001).

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 consolidadas.