

2.

Fundamentos básicos sobre produção de areia

Neste capítulo, pretende-se agrupar os principais aspectos básicos relacionados ao problema de produção de areia: a descrição do fenômeno, mecanismos de produção, fatores que influenciam o processo assim como fazer uma revisão dos trabalhos mais relevantes publicados na literatura técnica ao longo do tempo.

2.1.

Introdução

Dusseault e Santarelli (1989) definem o processo de produção de areia ou sólidos como a produção de partículas durante a extração de óleo ou gás, de uma rocha reservatório. O fenômeno está referenciado, normalmente, aos arenitos poucos consolidados, porém, a produção de sólidos é observada também em rochas como calcários e arenitos de resistência média a elevada.

A produção de sólidos começa quando a concentração de tensões na parede do poço devida às condições de produção é suficientemente alta para romper a cimentação natural dos grãos, tornando-os livres para serem arrastados pelas forças de percolação que acabam por incorporá-los ao fluxo dos fluidos.

Em poços de petróleo, o fenômeno é prejudicial aos sistemas de condução, elevação e controle de produção. O seu efeito abrasivo acarreta prejuízo para a indústria, implicando em um maior número de paradas operacionais para a substituição de elementos danificados, necessidade de tratamento e descarte de sólidos.

2.2.

Mecanismo de produção de sólidos

Teorias convencionais da produção de areia distinguem o mecanismo de ruptura entre ruptura por compressão e tração. A primeira é produzida pela combinação das tensões *in situ* e o *drawdown*, a segunda induzida pelo gradiente de poro-pressão nas vizinhanças da cavidade.

2.2.1.

Ruptura à compressão ou cisalhamento

A ruptura por cisalhamento é induzida pela ação conjunta das tensões *in-situ* e do diferencial de pressão entre o reservatório e o fundo de poço conhecido como pressão de *drawdown* (ΔP). Assim, quando o valor das tensões *in-situ* ultrapassa o valor da resistência à compressão, e quando baixas pressões de produção no fundo do poço geram elevados valores da pressão de *drawdown* (ΔP), a ruptura por cisalhamento é induzida na parede da cavidade. Este tipo de ruptura cria uma zona de grandes deformações ao redor das cavidades, propagando um processo de produção de areia que pode vir a produzir quantidades catastróficas de sólidos, caso essa zona se expanda.

Hoek et al (2000), conceitua bem a ruptura do material por cisalhamento e compara dados experimentais com os resultados obtidos pelo modelo proposto, concluindo que a teoria reproduz bem os ensaios de laboratório efetuados nos arenitos *Castlegate* e *Red Wilmore*. Vale lembrar que este modelo foi desenvolvido para arenitos friáveis com grandes cavidades, muito embora não faça referência a um tamanho físico de cavidade.

A ruptura do material quanto ao cisalhamento é caracterizada pela formação de bandas de cisalhamento que se iniciam adjacentes à parede do poço e se encontram em duas áreas diametralmente opostas, denominadas de *breakouts* (figura 1) sem ocorrer fratura por tração e sem necessariamente ocorrer desprendimento ou produção de material fragmentado. De acordo com Hoek et al (2000), este tipo de ruptura de serviço pode ser modelada analiticamente empregando-se o contínuo de Cosserat e a teoria da bifurcação.

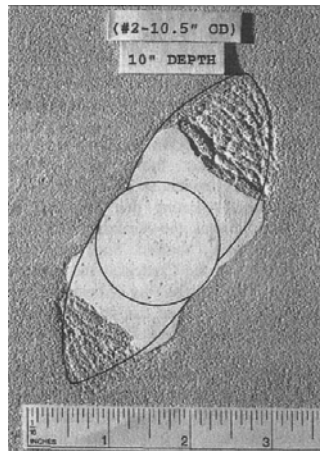


Figura 1.- Breakout observado em corpo de prova com diâmetro interno de 39mm – Berea

2.2.2.

Ruptura por tração (*Spalling*)

A ruptura por tração geralmente se dá quando as forças de percolação geram tensões de tração que, por a sua vez, promovem a desagregação de partículas da rocha reservatório, especialmente aquelas pobremente consolidadas. Esse tipo de instabilidade é freqüentemente verificado em poços com elevadas taxas de produção que levam à dilatação dos sólidos desagregados e a perda das interações mecânicas entre as partículas.

Segundo van den Hoek (1994), em observações feitas no seu trabalho, a ruptura no ensaio de compressão hidrostática em corpo de prova com orifício pode ser caracterizada também por fraturas propagadas por tração nas imediações do orifício, seguida por desprendimento e produção de material. A estrutura final é apresentada, e é identificada por uma forma cúspide (figura 2). Quando as lascas de rocha fraturada não se desprendem da face interna do orifício, o modo de ruptura pode evoluir para *breakout*.

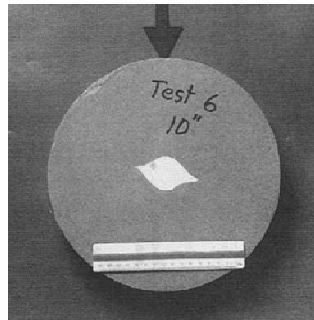


Figura 2.- Fraturamento à tração observado em corpo de prova com diâmetro interno de 39 mm—Castlegate

Morita (1991) sustém que a ruptura por tração só é comum na zona cisalhada quando é diminuída a área aberta ao fluxo e pode ocorrer:

- Quando o intervalo perfurado é menor a $1/3$ do intervalo total;
- Se a densidade do canhoneio é menor do que dois (2) tiros por pé;
- Se as perfurações se encontram obstruídas;
- Durante a limpeza das perfurações.

Os problemas de ruptura por tração podem ser resolvidos re-perfurando com uma maior densidade do canhoneio.

2.3.

Fatores que afetam a produção de areia

Os seguintes subtópicos estão baseados no trabalho de Veeken et al (1991) que realizaram um inventario dos parâmetros que influenciam a produção de areia em poços verticais (ver Tabela 1)

Tabela 1.- Parâmetros que influenciam a produção de areia

Formação		Completação	Produção
Rocha	Reservatório	Inclinação e diâmetro de poço	Vazão
Tensões <i>in situ</i>	Poro-pressão	Tipo de completação (poço aberto ou com revestimento)	<i>drawdown</i>
Resistência	Permeabilidade	Tipo de canhoneio	Velocidade de fluxo
Profundidade (influencia a resistência e as tensões)	Raio de drenagem	Fluidos de completação	Volume de areia acumulado
	Espessura do reservatório	Tipo de controle para produção de areia	

2.3.1.

Fatores relacionados à formação

A magnitude das tensões *in situ* influencia a concentração de tensões na parede do poço e nos túneis abertos pelo canhoneio, afetando a produção de areia.

A figura 3 apresenta o efeito das tensões na envoltória de ruptura, Morita (1989). Quanto maior a tensão, maior probabilidade de ruptura por cisalhamento. A probabilidade de ruptura por tração é menor.

A depleção no reservatório aumenta as tensões efetivas, especialmente a vertical. O problema de produção de areia em rupturas por tração pode ser diminuído com a diminuição da pressão do reservatório, todavia a ruptura por cisalhamento converte-se em um problema sério, ainda mais em formações frágeis

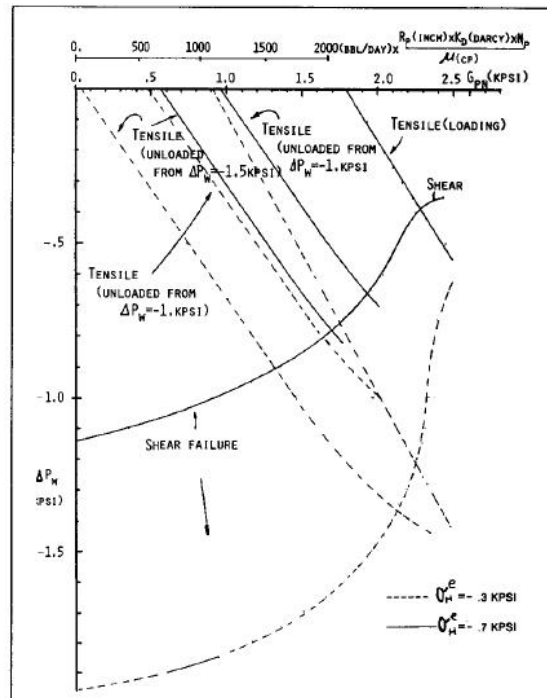


Figura 3.- Efeito das mudanças nas tensões *in situ* em a estabilidade de cavidades esféricas (Morita 1989)

A influência da resistência da rocha sobre a estabilidade da cavidade tem sido estudada tanto experimentalmente, como analiticamente. Observa-se que a produção de areia é gerada por um mecanismo de plastificação e enfraquecimento do material adjacente à cavidade, devida a uma excessiva tensão externa, Tronvoll et al (1997)

A variação da poro-pressão no reservatório submetido a um campo de tensões desviadoras, durante a produção, pode reduzir a resistência ao cisalhamento, favorecendo a produção de sólidos.

2.3.2.

Fatores relacionados à completação

Após o poço ter sido revestido, injeta-se pasta de cimento no espaço anular entre o revestimento e a formação. Devido ao endurecimento da pasta, o cimento poderá sofrer retração e, conseqüentemente, reduzir a tensão radial (σ_r) atuante na parede do poço. A diminuição da tensão radial aumenta a tensão desviadora, possibilitando a criação de uma zona fragilizada, composta por

material similar à areia, susceptível ao transporte pelo fluxo de fluido (ver Figura 4).

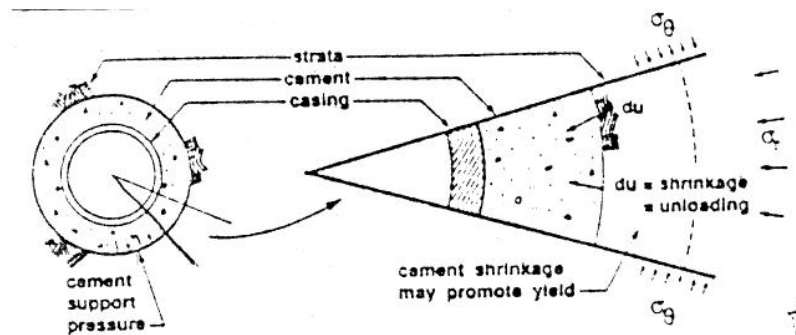


Figura 4.- Plastificação da formação por contração do cimento

(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 5)

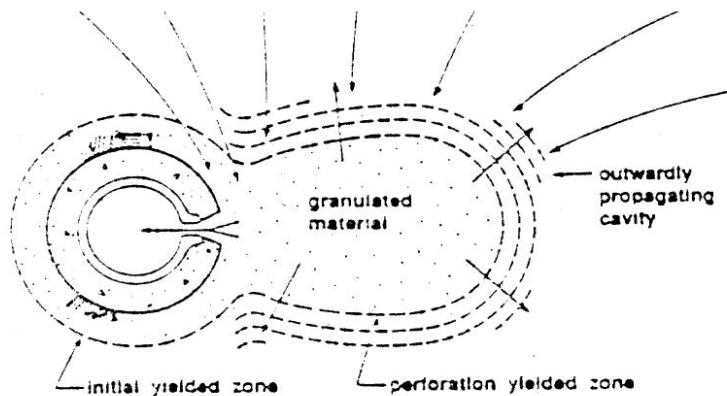


Figura 5.- Plastificação da formação após o canhoneio

(Dusseault & Santarelli, 1989)

A ação do canhoneio cria uma região onde a cimentação mineral é destruída e muitos grãos encontram-se triturados. No entorno da cavidade uma sucessão de regiões comportam-se de diferentes formas. Mais afastado da

cavidade há uma região elástica não afetada pelo canhoneio, uma região elasto-plástica intermediária apresentando um variado grau de dano e uma terceira região, adjacente à cavidade, onde a rocha está completamente desagregada e as deformações devem se comportar de forma completamente plástica.

A geometria do canhoneio é outro item a ser considerado. Há vinte anos quando o sistema de canhoneio era menos eficiente, cavidades de pequena dimensão e uma baixa densidade não tinha sucesso. Isto, no intervalo produtor levava a problemas relacionados à ruptura por tração (Morita, 1987)

2.3.3.

Fatores relacionados à produção

A velocidade do fluido e sua viscosidade afetam diretamente a migração de finos - partículas de pequeno diâmetro das frações silte e argila — através do meio poroso. Esta migração, por sua vez, promove o tamponamento parcial dos poros reduzindo a permeabilidade da formação e incrementando o gradiente de poro-pressão. Como consequência eleva-se as forças de percolação, o que pode levar o arcabouço rochoso à ruptura por tração. (figura 6)

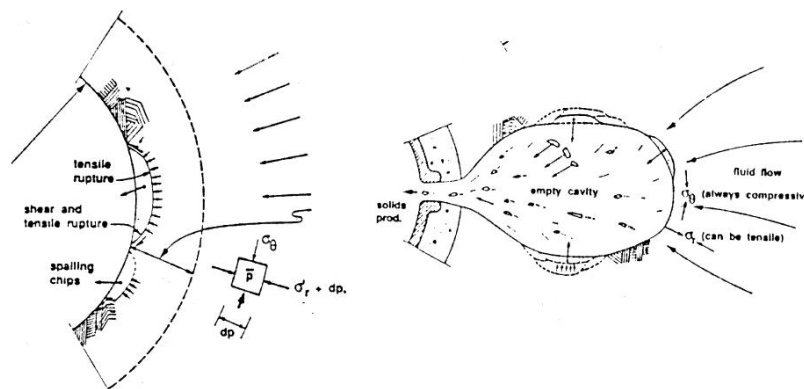


Figura 6.- Rupturas por tração associadas à força de percolação. poço aberto (lado esquerdo) túnel canhoneado (lado direito)

Cook et al. (1994) discutiram a importância relativa do fluxo radial e longitudinal nas cavidades canhoneadas. Baseados em dados de campo, os autores estimaram que a velocidade longitudinal é cerca de 50 a 100 vezes maior do que na direção radial, portanto mais relevante que esta última. O

principal papel do fluxo radial seria alimentar o fluxo que ocorre ao longo da cavidade canhoneada.

O *drawdown*, foi proposto por Morita et al (1989), junto com o gradiente de pressão como parâmetros que governam a estabilidade das cavidades canhoneadas. Para elevados valores de *drawdown*, predominam rupturas por cisalhamento enquanto o alto gradiente de poro-pressão nas vizinhanças das cavidades propicia rupturas por tração

Papamichos (2008) definiu que o volume de areia produzida depende do tipo de ruptura e esta, em função do tipo de arenito como mostrado na Figura 7. Os ensaios revelaram que as rupturas dos cilindros vazados seguem modos que dependem basicamente do tipo de arenito, os quais foram definidos como:

- Classe A, Frágil
- Classe B, Dúctil
- Classe C, Compacta

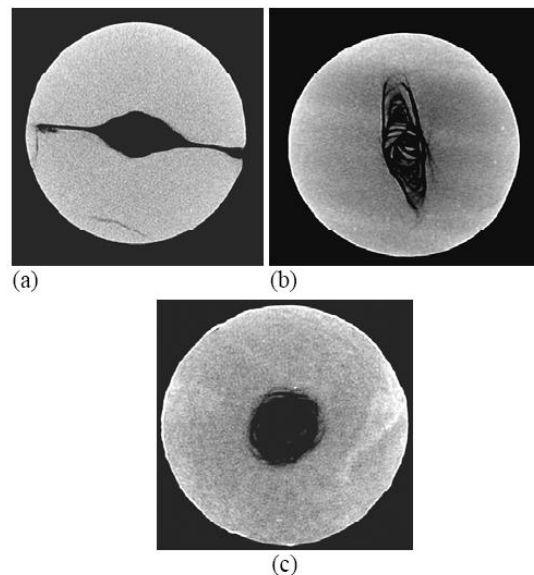


Figura 7.- Formas de rupturas típicas para arenitos. (a) Classe A (e.g Castlegate) (b) Classe B (e.g. Field G), and (c) Classe C (e.g. arenito sintético)

No caso do arenito classe A, a produção de areia aumenta rapidamente com o acréscimo das tensões externas, devido ao rápido desenvolvimento da ruptura tipo fenda. A razão desta rápida evolução deve-se ao fato da rocha

romper como grãos independentes ou pequenas estruturas as quais não tem a possibilidade para formar arcos estáveis.

A produção de areia da amostra B é cíclica, logo de um processo de diminuição na taxa, começa um incremento na produção com os acréscimos de tensão externa. No caso do arenito C, a ruptura caracteriza-se por ser estável, mostrando um aumento da produção de areia mais demorado.

2.4.

Modelos de predição de areia

Morita (1989) e Vekeen (1991) classificaram as técnicas de previsão de produção de areia baseados em observações de campo, ensaios de laboratório e (previsões) de modelos teóricos.

Observações de campo: consiste no estabelecimento de uma correlação entre dados de produção de areia de um poço e parâmetros operacionais.

Modelos semi-analíticos: Ou modelos laboratoriais, são desenvolvidos com base em teorias analíticas simplificadas e expeditas, associadas a correlações empíricas calibradas com os dados de campo e ensaios de laboratório em condições controladas. A modelagem é macroscópica e os efeitos microscópicos são incluídos por estes fatores de correção. Como os ensaios de laboratório são efetuados em menor escala que os fenômenos de campo, estes modelos se baseiam em alguns modelos teóricos para a extrapolação dos dados obtidos. Modelos semi-analíticos existem para predição de início de produção e previsão de taxa de produção.

Como exemplo tem-se os modelos apresentados por Papamichos (2008) para a determinação do volume de areia a partir do tipo de ruptura da rocha.

Esses modelos estão baseadas em análises de ensaios de laboratório feitos através do modelo de erosão de produção de areia, as quais conduziram a um modelo onde a massa de areia produzida é função das tensões, do gradiente de poro-pressão na cavidade, do tempo de ensaio assim como parâmetros do material (Papamichos, 2002).

$$Ms = Ms(dp_c, \sigma_c, t; a_s, dp_s, \sigma_s) \quad (2.1)$$

A desvantagem da função proposta inicialmente é que não diferencia os tipos de arenitos. Por isto, a equação é substituída por três equações que dependem do tipo de arenito.

Classe A:
$$Ms = f \left(\left(\left(\frac{dp}{dr} \right)_c - \left(\frac{dp}{dr} \right)_s \right) \langle \sigma_n \rangle^4, t \right) \quad (2.2)$$

Classe B:
$$Ms = f \left(a_s \left(\left(\frac{dp}{dr} \right)_c - \left(\frac{dp}{dr} \right)_s \right) (0.068 - 0.02 \langle \sigma_n \rangle - 0.18 \langle \sigma_n \rangle^2 + \langle \sigma_n \rangle^3), t \right) \quad (2.3)$$

Classe C
$$Ms = f \left(a_s \left(\left(\frac{dp}{dr} \right)_c - \left(\frac{dp}{dr} \right)_s \right) (0.1 \langle \sigma_n \rangle + \langle \sigma_n \rangle^2), t \right) \quad (2.4)$$

Onde:

Ms , é a quantidade de areia por área da cavidade

σ_n , é o excesso de tensão normalizado

$\left(\frac{dp}{dr} \right)_c$, é o gradiente de poro pressão crítica para produção de areia

a_s , é uma constante de calibração, os colchetes indicam que o resultado e zero se o resultado é negativo.

Van De Hooke, (2000) propôs através da teoria da bifurcação um modelo para a determinação da produção de areia em cavidades cilíndricas e hemisféricas. Os resultados contradizem os resultados de Morita nos anos 80' já que o tipo de ruptura na cavidade não foi influenciado pelas tensões efetivas da cavidade e se pelas dimensões das mesmas.

Outro modelo conhecido e estudado no presente trabalho (Capítulo 7) é o modelo Semi-Analítico de Willson (2002)

Modelagens analíticas ou teóricas: buscam no ferramental da mecânica dos meios contínuos, da mecânica da fratura e da dinâmica dos fluidos a abstração macro e microscópica dos fenômenos envolvidos na estabilidade da cavidade do poço ou canhoneio, conduzindo a um modelo de ruptura. Os modelos de ruptura mais empregados são à tração, ao cisalhamento, à compressão e à erosão. Estes modelos estão relacionados com a predição do ponto inicial de produção. Como exemplo cita-se os modelos de Morita (1989) para cavidades cilíndricas e esféricas.

Os três modelos, quando bem calibradas, apresentam resultados satisfatórios. Devido em parte à grande variabilidade dos dados e em parte aos fenômenos não equacionados nos modelos apresentados, não se observam

vertentes melhores ou piores dentre as apresentadas, mas sim nichos de aplicação (segundo intervalos de resistência mecânica, etc).

2.5.

Experimentos para a simulação da produção de areia

Dentro dos ensaios contemplados para a simulação e a pesquisa dos processos físicos envolvidos no processo de produção de areia tem-se o ensaio de paredes espessas ou TWC entre o mais importante.

2.5.1.

Ensaio em cilindros de paredes espessas, ou TWC (Thick Walled Cylinder)

Em sua forma mais simples, o ensaio baseia-se em um cilindro vazado de paredes espessas o qual é submetido a uma compressão axial e confinado por uma pressão a qual é constante ao redor da seção circular externa. No furo interno, podem se ter fluxo ou simplesmente o fluido estático à pressão atmosférica. Ao longo do ensaio são medidas as deformações do corpo de prova.

A proporção definida como a mais comum é a OD:ID (*outer diameter:inner diameter*) de 3:1, porém, os conhecedores do tema recomendam fazer ensaios em amostras com relações maiores. Em quanto ao comprimento, mantém-se a mesma usada nos ensaios triaxiais, OD:L 2:1.

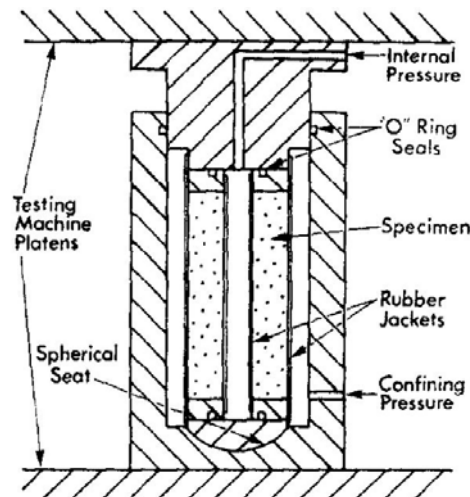


Figura 8.- Configuração do ensaio de cilindro de paredes espessas (TWC)

Existe uma grande variedade de estudos apresentados com relação ao comportamento, tipo de ruptura na rocha, influencia do tamanho assim como as relações entre a resistência à compressão uniaxial, UCS

Van den Hoek (1992) observou que para amostras de 8 mm a 28 mm de diâmetro interno o valor da resistência diminui, embora para diâmetros maiores o valor é mantido praticamente constante, no caso do arenito de Berea e do mar do norte com uma relação OD:ID ao infinito, o máximo valor do fator de correção varia entre 3.0 e 3.8, dependendo do valor pos-pico no amolecimento do material

Wilson et al (2002) afirma que as pesquisas feitas pela BP (British Petroleum) sobre uma variabilidade de amostras com diferentes relações de OD:ID e a sua vez variando o tamanho do ID demonstrarem o efeito no ensaio.

O efeito do tamanho é conhecido como um fator importante em ensaios mecânicos, por exemplo, o ensaio de resistência à tração brasileiro, resistência à compressão uniaxial etc.

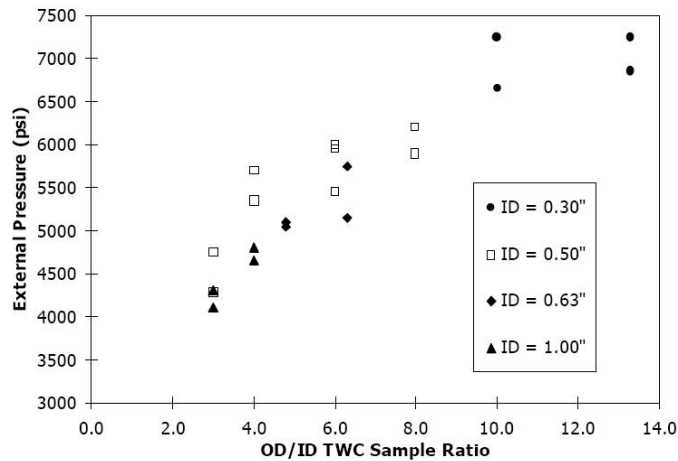


Figura 9.- Relação da pressão externa em função da espessura (relação OD/ID) e diâmetro interno no ensaio TWC (Willson, 2002)

No caso do tipo de ruptura, van den Hoek (1992) observou *breakouts* que crescem pelo mecanismo de cisalhamento em amostras de Berea, entretanto, os arenitos de *Castlegate* apresentaram fraturas à tração.

Barreto (2004) observou a través de tomografia computadorizada o início e desenvolvimento da falha em tempo real assim como a tensão inicial de falha da rocha.

Papamichos (2008) no seu trabalho observou o seguinte comportamento de ruptura:

Arenito classe A: o início da fratura com forma côncava indicando ruptura por tração assim como desenvolvimento de trincas. A largura da fenda permanece constante em todo o comprimento.

Arenito classe B, tem-se o desenvolvimento de *breakouts* convexos devido à ruptura por cisalhamento. Com o acréscimo da tensão externa desenvolvem-se bandas cisalhantes o que faz o *breakout* maior.

Na classe C, se observo o desenvolvimento de uma ruptura uniforme ao redor da cavidade a qual é erodida pelo fluxo do fluido resultando o aumento da cavidade de forma uniforme (Figura 7).

van den Hoek (1992), estabeleceu uma relação do ensaio UCS com o TWC, onde as tensões tangenciais no diâmetro interno do furo de 8 mm superam o valor de UCS por 4.5 e um fator de 9 para arenito do Mar do Norte.

Wu e Tan (2000) estabeleceram uma relação entre os dois valores e concluíram que a resistência nominal do TWC tem um comportamento constante de 1,5 para materiais com UCS maior a 30 (Mpa).