

ESTUDO DE COLAPSO DE POROS ATRAVÉS DA ANÁLISE DO FECHAMENTO DA ENVOLTÓRIA DE RUPTURA

Antonio Claudio Soares

CENPES - Centro de Pesquisa da Petrobrás
Ilha do Fundão, Quadra 7 – Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Cézar Augusto Monteiro Siqueira

FUNCAMP/ UNICAMP
Ilha do Fundão, Quadra 7 – Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Resumo. *A ocorrência de colapso de poros tem sido verificada em campos de calcários que apresentam alta porosidade e baixa permeabilidade. À medida em que se produz o óleo do reservatório, a tensão efetiva atuante na rocha-reservatório aumenta, e não havendo resistência suficiente para absorver esse aumento de tensão, ocorre então, o colapso de poros. A literatura apresenta casos em que foi verificada a ocorrência de colapso de poros nos campos de Ekofisk e Danian (Mar do Norte) e Austin (Costa do golfo). No caso de Ekofisk, a subsidência foi tão grave que provocou afundamento de plataformas de produção, causado pela compressão do reservatório. Para esses campos foram realizados ensaios em laboratórios, ensaios triaxiais e de deformação uniaxial, para verificar a ocorrência de colapso de poros. Entretanto, as metodologias de ensaios utilizadas até então não permitiam utilização de trajetórias de tensões diversas para o reservatório. Este trabalho analisa o fechamento da envoltória de ruptura de um campo onde é esperada a ocorrência de colapso de poros. São apresentados os ensaios realizados assim como as metodologias propostas para tal. Nos ensaios de laboratório foi verificado o fechamento da envoltória, que mostrou-se dependente da porosidade do material.*

Palavras-chave: *Colapso de poros, Fechamento de envoltória, Trajetória de tensões.*

1. INTRODUÇÃO

Estudos de colapso de poros, feitos pelo Laboratório de Mecânica de Rochas (LMR) do CENPES, vem demonstrando a grande importância de se conhecer o que ocorre na estrutura da matriz do carbonato e sua influência no fluxo de fluidos no meio poroso, quando a rocha não suporta o aumento da tensão efetiva nela atuante.

A medida em que se vai produzindo um poço, a pressão estática do reservatório diminui, aumentando, com isso, a pressão efetiva atuante no arcabouço da rocha. Caso a rocha não possua resistência suficiente para absorver este aumento de tensão efetiva, ocorre o

colapso de poros, havendo um rearranjo dos grãos e compactação do meio poroso até que um novo equilíbrio seja alcançado. Uma provável consequência deste fenômeno é a diminuição da permeabilidade, reduzindo o fluxo de óleo para o poço e a recuperação final do reservatório. Como a maior queda de pressão se dá nas imediações da parede do poço, este é o local de maior probabilidade de ocorrência de colapso de poros, provocando um dano permanente.

Os problemas de colapso de poros ocorridos nos diversos campos de petróleo tem sido descoberto somente após o início do processo, o que acarreta custos adicionais não previstos para a exploração do óleo. Os estudos de reservatórios feitos através de simulações em computador ainda não levam em consideração os efeitos das tensões atuantes no meio poroso, bem como o efeito de compactação provocado pelas alterações dessas tensões a medida em que se vai produzindo o óleo, com conseqüente redução da pressão estática.

Uma grande experiência foi adquirida para definição de colapso de poros através de ensaios triaxiais e de deformação uniaxial, entretanto, novas metodologias vem caminhando para o estudo da trajetória de tensões no reservatório, verificando se esta levará para um regime de deformação plástica, com ocorrência de grandes deformações.

Está sendo desenvolvido um modelo de fechamento de envoltória, no qual a estrutura da rocha alcança o colapso através de um caminho de tensões abaixo da envoltória de ruptura. Esse colapso se daria por compressão da estrutura e não por cisalhamento.

O que se pretende com este trabalho é mostrar a nova metodologia a ser adotada e um resultado obtido através de ensaios experimentais realizados em laboratório.

2. PROPOSTA DE UMA NOVA METODOLOGIA

Os estudos de colapso de poros feitos até então não levam em consideração as diversas possibilidades de trajetória de tensão que podem ser seguidas no reservatório. Se a trajetória de tensões for diferente daquela prevista pelo ensaio, o modelo já não mais se aplica ou pelo menos se distancia da realidade. Por outro lado, as tensões próximas a parede do poço ficam bastante alteradas devido a sua perfuração, sendo impossível, por esses modelos, a verificação das tensões de colapso de poros na parede do poço ou na sua vizinhança.

As pesquisas agora se voltam para caracterização do material, através de um modelo de fechamento de envoltória, mais conhecido como *cap model*. Alguns trabalhos experimentais já foram apresentados nesse sentido, verificando modelos teóricos propostos. (Scott Jr, 1998, Yale, 1998). Assim poderá ser verificado se as trajetórias de tensões seguidas pelo reservatório irão levar ao “colapso da estrutura”, ao atingir a curva ou superfície de fechamento, dependendo se o modelo estiver sendo visto num plano ou no espaço. O colapso de poros, quando ocorrer, se dará por compressão da estrutura e não por cisalhamento.

Esse modelo complementa aqueles existentes para os estudos de estabilidade de poços e produção de areia, que trabalham basicamente com ruptura por cisalhamento, devido ao caminho de tensões seguidos nesses casos. A figura 1 mostra o modelo explicado acima. O primeiro ponto marcado representa o estado de tensão inicial do reservatório. Os estudos de estabilidade de poços ou produção de areia fazem a verificação se a trajetória irá atingir ou não a envoltória de ruptura. Se ficar abaixo indica estabilidade, caso contrário instabilidade.

No caso da produção de um poço, a trajetória esperada estaria abaixo da envoltória de ruptura. À medida que a pressão estática diminui (devido à produção de óleo) a tensão média na rocha-reservatório aumenta. Ao atingir a curva de fechamento da envoltória, para a porosidade mais alta do reservatório, inicia-se um processo de plastificação, que está associado ao colapso de poros conforme definido anteriormente. Com a contínua produção do campo se atingiria a curva de fechamento para outras porosidades mais baixas. Logo, o

colapso da estrutura vai ocorrendo gradualmente da maior para a menor porosidade conforme a tensão média vai aumentando.

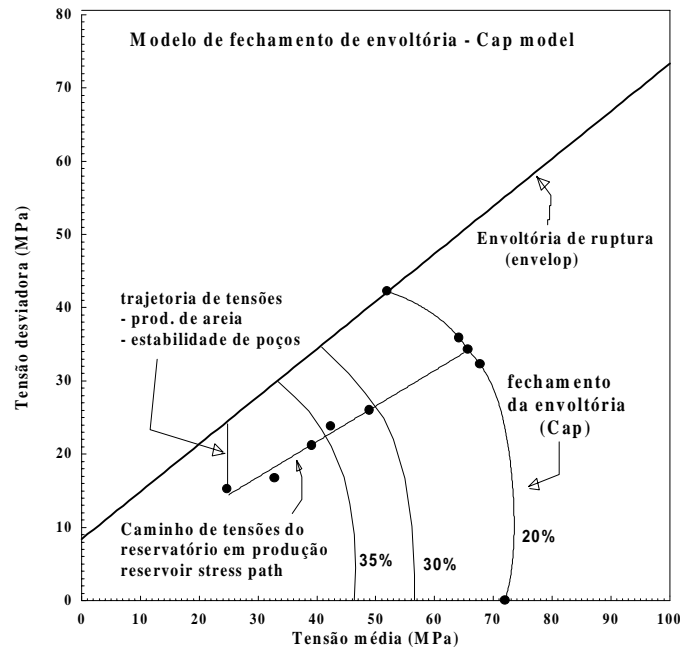


Figura 1 - Modelo de fechamento de envoltória

Para implantação dessa nova metodologia para estudos de colapso de poros foram realizados ensaios de amostras obtidas de um campo da Bacia de Campos, cujo o reservatório é formado por um carbonato com os grãos variando de fino a muito fino. Infelizmente, durante a testemunhagem, conseguiu-se obter apenas uma amostragem bastante fechada, de baixíssima permeabilidade, não representativa da zona produtora do reservatório. Como essa era a única amostragem disponível, utilizou-se a mesma para verificação do modelo.

Os ensaios tiveram por objetivo definir alguns pontos da curva de fechamento. Uma vez obtidos os pontos experimentais, poderá ser verificado os modelos de melhor ajuste.

3. ENSAIOS REALIZADOS

As amostras disponíveis, nove corpos-de-provas (CP) ao todo, eram muito fechadas se comparadas com a zona produtora do reservatório, conforme visto anteriormente. Houve uma pequena variação na porosidade do material, entre 17 à 22%, sendo adotado como representativo de uma porosidade de 20%.

Para a caracterização do modelo, há uma distinção dos ensaios quanto ao seu objetivo: O primeiro seria a obtenção da curva de fechamento da envoltória, objetivo principal do estudo. Como segundo objetivo a obtenção da envoltória de ruptura, para se ter o conjunto completo das curvas.

3.1 Ensaios Para a Curva de Fechamento Características dos ensaios

Para a obtenção da curva de fechamento é necessário fazer ensaios de compressão hidrostático, ensaios de deformação uniaxial e ensaios com trajetórias de tensões pré-definidas. Os ensaios hidrostáticos e os de deformação uniaxial são muito utilizados em

estudos de colapso de poros. Os ensaios com uma trajetória pré-definida, consistem da definição de uma trajetória de tensões nas quais as tensões axiais e laterais variam numa razão constante.

O ensaio de deformação uniaxial por não permitir deformações laterais do CP, não apresenta problemas de atrito da amostra com os caps, não sendo necessário manter a relação altura/diâmetro da amostra entre 2 e 3, conforme é preconizado pelo ISRM (1988).

3.2 Ensaios de Deformação Uniaxial

Como o CP 6 apresentava a maior porosidade, decidiu-se utilizá-lo primeiro. Entretanto, problemas no sistema geomecânico levaram a ruptura prematura do CP, sendo o mesmo perdido para a obtenção de dados. Para o ensaio com o CP 5, decidiu-se evitar o descarregamento na fase linear, pois no ensaio anterior, ainda não se havia conseguido desenvolver um procedimento adequado para a sua execução. Deixou-se para fazer o descarregamento após a fase linear estar bem definida e logo após a tensão do colapso, caso essa viesse a acontecer. A figura 2 mostra o gráfico obtido do ensaio.

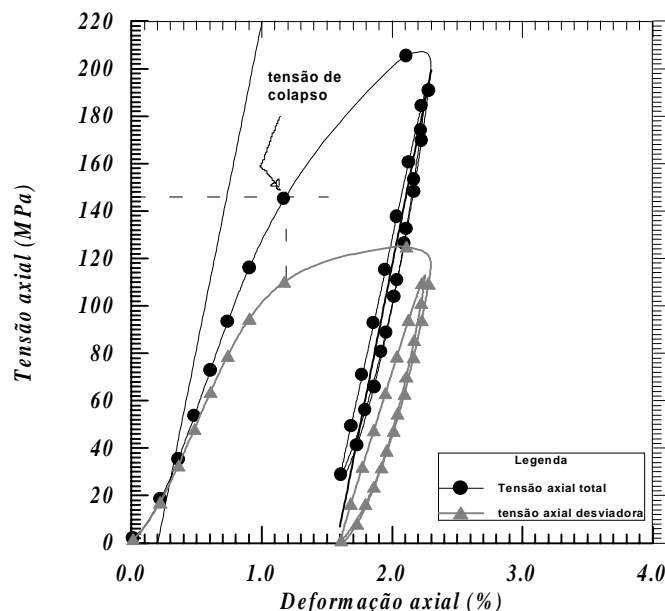


Figura 2 - Ensaio de deformação uniaxial do CP 5

Na figura 2 pode se observar que realmente atingiu-se uma tensão de colapso de poros. A curva tensão axial desviadora *vs.* deformação axial mostra a fase de escoamento com mais nitidez do que a curva tensão axial total *vs.* deformação axial. Para o cálculo da tensão de colapso adotou-se um método análogo ao de Casagrande (1936), que é usado para a obtenção da tensão de sobreadensamento em solos. Este procedimento será utilizado por não se dispor ainda de um método próprio para tensão de colapso de poros. As linhas tracejadas mostram a tensão de colapso de 143,0 MPa, obtida para início de colapso da amostra. Esse valor muito alto ocorreu devido ao tipo de material ensaiado.

Um outro aspecto importante do ensaio é a trajetória obtida. A trajetória é expressa pela razão entre a tensão lateral e vertical, medida na fase linear do ensaio, e é dada por:

$$k = \sigma'_3 / \sigma'_1 \quad (1)$$

Onde :

k = coeficiente de empuxo efetivo;

σ'_3 = tensão lateral efetiva (ensaio) ou tensão horizontal efetiva (se referido ao campo) e

σ'_1 = tensão axial efetiva (ensaios) ou tensão vertical efetiva (se referido ao campo).

A trajetória do ensaio é importante, pois ela é que irá posicionar o caminho de tensões seguido e a tensão de colapso, que irá definir a curva de fechamento. Nesse ensaio, o coeficiente de empuxo medido na fase linear foi de 0,3; dentro da faixa esperada para esse tipo de ensaio (0,25 à 0,30).

A fase de carregamento e descarregamento é importante para verificação do comportamento elástico da amostra. Se a linha média entre o carregamento e descarregamento, no gráfico tensão vs. deformação, for paralela a fase linear do ensaio, então a amostra possui um comportamento puramente elástico nessa fase (Lambe, 1979, Atkinson, 1978). O que não ocorreu, demonstrando que na fase linear existem tanto deformações plásticas quanto elásticas. A observação dessa ocorrência, no entanto, é importante, pois a partir dela poderá ser definido um procedimento para a obtenção da tensão de colapso de poros.

Para o ensaio do CP 2 fez-se um descarregamento na fase linear e outro após a tensão de colapso. A tensão de colapso foi de 124,4 MPa e o k de 0,27. Os resultados obtidos nos dois ensaios foram muito próximos, não sendo necessárias maiores considerações.

3.3 Ensaios Hidrostáticos e com Trajetórias de Tensões Pré-definidas

Para os ensaios hidrostáticos a grande dúvida ficava por conta de se conseguir atingir a tensão de colapso, uma vez que, apesar da grande capacidade de carregamento hidrostático do equipamento, este está limitado a 80 MPa. A figura 3 mostra o gráfico obtido para o ensaio hidrostático do CP 7, onde pode ser visto que realmente não se atingiu a pressão de colapso. Entretanto, confirmou-se que realmente na fase linear ocorrem tanto deformações plásticas, como elásticas. Observa-se que no início do ensaio, para baixas pressões e deformações, há uma fase não-linear, que corresponde ao fechamento de fissuras, provocadas pela retirada da amostra do seu estado de tensão *in situ* (Goodman, 1989). No trecho inicial portanto, existe uma deformação plástica provocada por uma perturbação no material que não deve ser levada em consideração. Será considerado então um prolongamento do trecho linear até alcançar o eixo das deformações. A partir do carregamento e descarregamento da amostra será obtida a reta das deformações elásticas (como feito anteriormente no ensaio oedométrico). Em seguida, translada-se a mesma até o prolongamento do trecho linear da curva tensão axial vs. deformação no eixo da deformação, obtendo-se assim a origem das curvas sem o efeito do fechamento das fissuras. A segunda ilustração da figura 3 mostra os gráficos com as deformações plásticas e elásticas obtidas a partir do primeiro gráfico para o ensaio do CP 7.

Como o CP 7 não apresentou indícios de colapso, decidiu-se fazer um ensaio com uma trajetória de tensões pré-definida, assumindo um k de 0,4, que levaria a um novo ponto da curva de fechamento mais próximo do ensaio de deformação uniaxial. Como a tensão lateral, que é obtida com a pressão confinante, é crescente ao longo do ensaio, confronta-se novamente com a limitação de 80 MPa do equipamento. A figura 4 mostra o gráfico obtido.

Utilizou-se os mesmos procedimentos para a obtenção da tensão de colapso, entretanto, não foram feitos carregamento e descarregamento. Como o caminho de tensões era próximo ao do ensaio de deformação uniaxial, conseguiu-se definir uma tensão de colapso, em torno de 145 MPa.

O ensaio hidrostático do CP 8 apresentou a mesma característica obtida com o CP 7, apresentando apenas a fase linear. Decidiu-se fazer, com essa mesma amostra, um ensaio com trajetória de tensões pré-definida. Desta vez utilizou-se um k de 0,6. A figura 5 apresenta o gráfico obtido do ensaio.

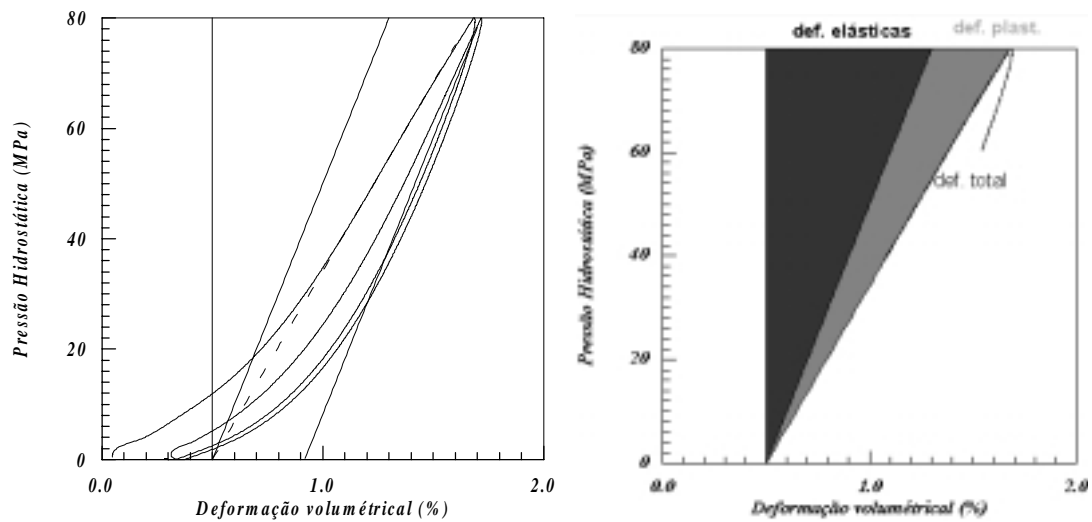


Figura 3 – Ensaio hidrostático com o CP 7 e a obtenção das deformações plásticas e elásticas

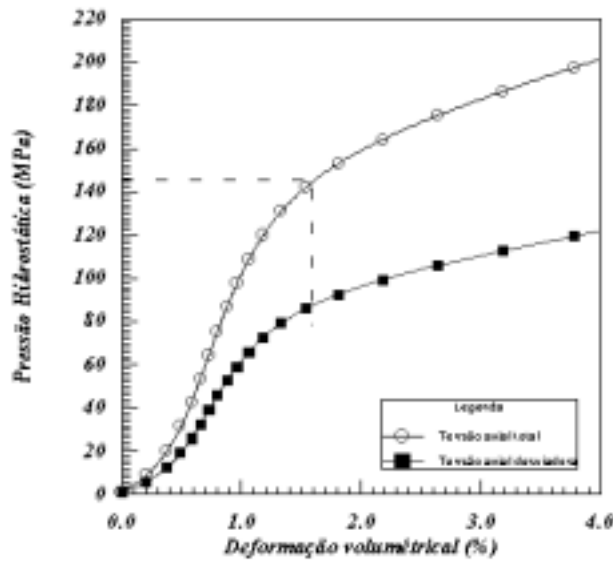


Figura 4 - Ensaio para o CP 7 para $k = 0,4$

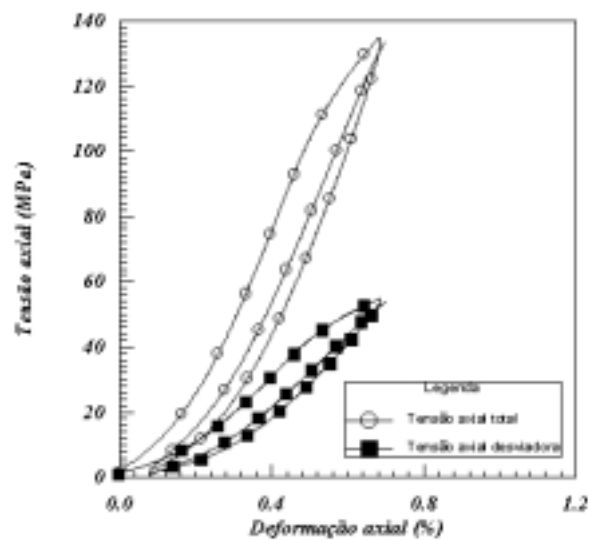


Figura 5- Ensaio para o CP 8 para $k = 0,6$

O ensaio teve que ser interrompido logo no início da caracterização da tensão de colapso devido a pressão confinante ter atingido o valor limite do equipamento. Para este ensaio será considerado como tensão de colapso a tensão máxima obtida, de 133,7 MPa. Na realidade, esse valor deveria ser um pouco mais alto, pois o processo de colapso estava se iniciando. Decidiu-se, por isso, com essa mesma amostra fazer um ensaio com $k = 0,4$. A figura 6 mostra o gráfico obtido. A tensão de colapso ficou bem definida. Quanto menor o valor de k melhor para se configurar a tensão de colapso de poros, para esse material, devido a alta capacidade de tensão axial do equipamento. A tensão de colapso obtida foi de 156 MPa. O valor desta tensão por si só perde o significado se não for referida à trajetória de tensões seguida, conforme será mostrado mais adiante.

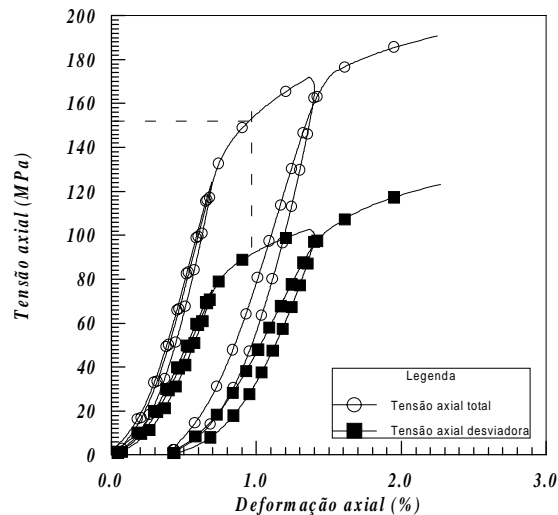


Figura 6- Ensaio para o CP 8 para $k = 0,4$

3.4 Ensaios para a envoltória de ruptura

Para a obtenção da envoltória de ruptura foram realizados três ensaios triaxiais. Apesar de não se ter a preocupação de utilizar, por enquanto, a teoria e os modelos do estado crítico, os ensaios foram feitos com grande quantidade de registro da pós-ruptura.

O primeiro ensaio realizado foi com o CP 1. Utilizou-se uma pressão confinante de 20 MPa. Nesse ensaio (fig. 7) obteve-se uma tensão desviadora de ruptura de 114,7 MPa e uma tensão total axial de 134,7 MPa. Neste ensaio a amostra teve um comportamento frágil, isto é, apresenta um valor máximo de resistência com uma queda logo a seguir. A curva de deformação volumétrica (crescente para esquerda) indica um comportamento dilatante.

O próximo ensaio foi com o CP 4. Utilizou-se uma pressão confinante de 60 MPa. Essa pressão de confinamento é muito alta, tendo o objetivo de se observar o comportamento da deformação da amostra, pois a trajetória de tensão iria atravessar a curva de fechamento. Nesse ensaio, a amostra, diferentemente da amostra anterior, teve um comportamento dúctil, conforme pode ser visto na figura 8. No início do ensaio o comportamento da curva tensão vs. deformação é linear. Entretanto, logo a seguir, a curva começa a assumir um comportamento não-linear, entrando em escoamento. Já no final do ensaio a curva apresenta um sinal de ruptura e a curva de deformação volumétrica apresenta um comportamento dilatante. O início de escoamento, indica que a amostra está atravessando a região da curva de fechamento de envoltória de ruptura. O processo de plastificação continua até a amostra atingir a ruptura. Aparentemente a tensão permanece constante após a ruptura, entretanto esse trecho é muito pequeno. O ensaio poderia ter prosseguido para uma melhor definição.

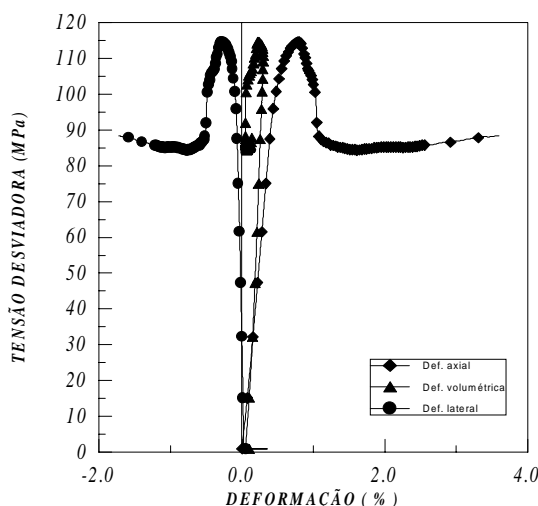


Figura 7- Ensaio triaxial com pressão confinante de 20 MPa, CP 1

Para se obter a tensão de escoamento, o primeiro gráfico da figura 8 não é muito adequado, devido a grande deformação axial, gerando um problema de escala na fase linear. Para facilitar o cálculo da tensão de escoamento, limitar-se-á o gráfico até deformação de 1% e será utilizada apenas a curva deformação axial vs. tensão desviadora. A partir do descarregamento e carregamento do ensaio, pode-se obter a reta de deformação elástica. Transladando esta reta para a origem, verifica-se, mais uma vez, que a fase linear apresenta deformações plásticas e elásticas. A partir da tensão desviadora de 100 MPa, a taxa de deformação começa a aumentar. Neste ponto, portanto, inicia a fase de escoamento. O segundo gráfico da figura 8 mostra o ponto de escoamento.

Para o ensaio triaxial do CP 9, utilizou-se uma pressão confinante de 5 MPa a fim de melhorar os dados da envoltória para baixas tensões. A amostra apresentou um comportamento frágil, como era esperado, tendo a tensão desviadora de ruptura o valor de 52,6 MPa. A tensão desviadora do estado último ficou em 41,0 MPa.

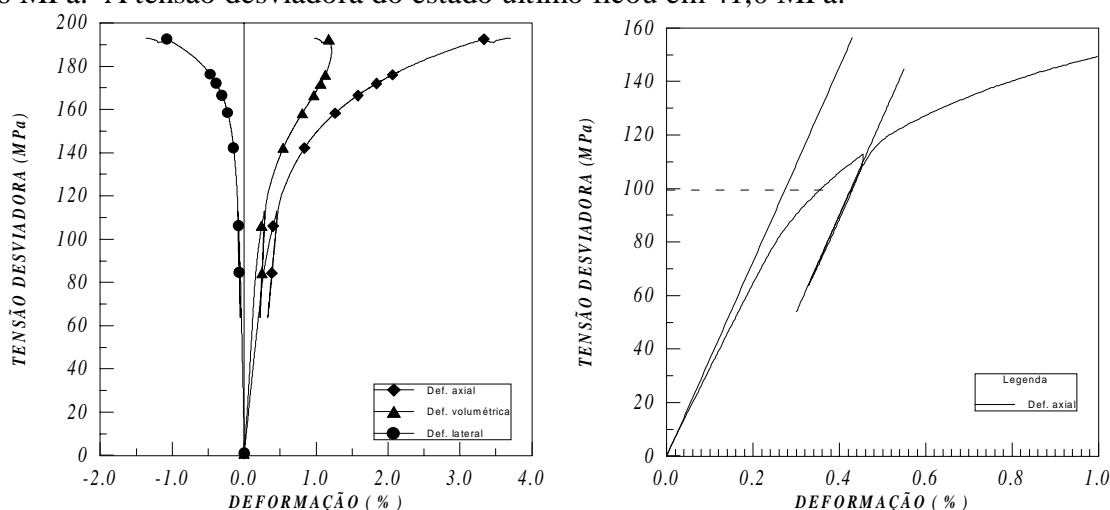


Figura 8- Ensaio triaxial com pressão confinante de 60 MPa

3.5 Resultados

Com todos os pontos de ruptura e escoamento dos ensaios definidos, finalmente pôde-se construir um gráfico semelhante ao da figura 1. Um gráfico muito utilizado para representação de caminhos de tensão tem sido o p vs. q (Lambe, 1979), onde:

$$p = (\sigma_1 + \sigma_3)/2 \tag{2}$$

$$q = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \tag{3}$$

σ'_1 e σ'_3 já foram definidos na equação 1. A figura 9 mostra o gráfico obtido.

A curva de fechamento foi definida pelos ensaios de deformação uniaxial e pelos ensaios de trajetórias pré-definidas. As estrelas indicam o ponto de escoamento de cada ensaio. As trajetórias dos ensaios triaxiais e seus respectivos pontos de ruptura definem a envoltória de ruptura. No ensaio triaxial do CP 4, feito com 60 MPa de pressão confinante, há um ponto que define também a curva de fechamento, seria o ponto equivalente a tensão de escoamento obtida de 100 MPa calculado anteriormente, em que a amostra inicia o escoamento durante o ensaio.

A curva de fechamento de envoltória foi obtida com base nos pontos de escoamento para trajetórias de tensão com valores de k variando entre 0,3 a 0,6. Com a obtenção do ajuste da curva de fechamento, verificou-se o porquê de não ter se conseguido atingir o colapso de poros a partir de ensaios hidrostáticos. O caminho seguido pelo ensaio hidrostático é coincidente com o eixo p . Como a capacidade do equipamento é de 80 MPa, não atingia a curva de fechamento, que, de acordo com a curva de fechamento obtida, estaria por volta de 130 MPa. Isto ocorreu devido ao material ser muito fechado. Portanto havia limitação do equipamento para se obter os pontos da curva de fechamento para valores de k próximos a 1.

Esses pontos seriam representativos da curva referente a porosidade de 20%, que era a média aproximada para os CP ensaiados.

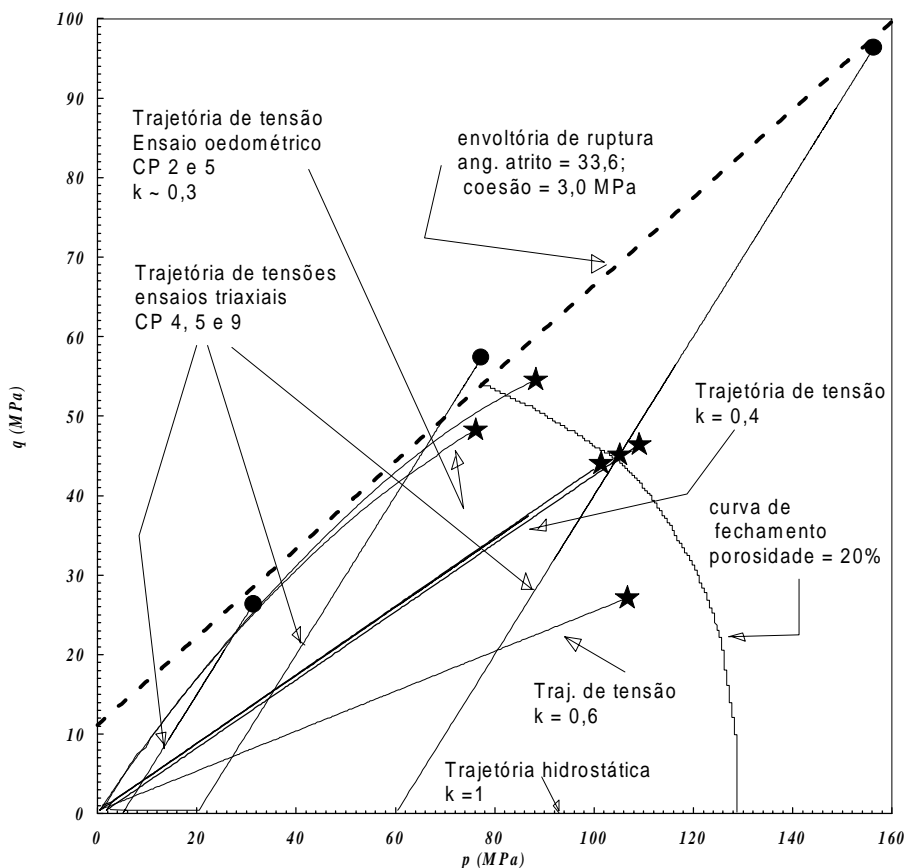


Figura 9 - Envoltória de ruptura e curva de fechamento obtidas partir dos ensaios realizados.

A área de interesse, do ponto de vista do reservatório, é verificar, a partir da trajetória de tensão, se durante a produção o reservatório irá atingir as curvas de fechamento, ocorrendo o colapso da estrutura por esmagamento através de uma deformação plástica permanente. Com a implementação desse modelo, pode-se verificar as trajetórias de tensões tanto na parede do

poço bem como longe da mesma, através de modelagens computacionais, ensaios em laboratórios ou, até mesmo, através de medições das tensões *in situ*.

4. CONCLUSÕES

Nesse trabalho mostrou-se uma nova metodologia para a obtenção da tensão de colapso de poros a partir das trajetória de tensões seguida pelo reservatório. A medida em que se produz o óleo, a pressão estática diminui, aumentando a tensão na rocha-reservatório. A partir de uma determinada tensão a rocha começa a plastificar, ocorrendo grandes deformações. Essas grandes deformações, associadas a um colapso interno da estrutura da rocha, podem levar a uma redução da permeabilidade, com conseqüente diminuição de vazão para o poço e da recuperação final de óleo. Essa região de tensão de colapso é definida por uma curva de fechamento da envoltória de ruptura, cujo o colapso se dá por esmagamento da estrutura e não por cisalhamento. Uma curva de fechamento foi obtida, por meios de ensaios de diversas trajetórias de tensões. Através da curva experimental pode ser verificado um modelo que melhor se ajustasse aos pontos obtidos.

Os ensaios realizados até o momento, apesar de feitos com uma amostragem muito fechada, mostraram que é possível a determinação da curva de fechamento da envoltória da ruptura experimentalmente.

REFERÊNCIAS

- Atkinson, J. H. & Bransby, P.L., 1978, *The Mechanics of Soils an Introduction to Critical State Soil Mechanics*, McGraw-Hill, London.
- Casagrande, A., 1936, *The Determination of the Pre-Consolidation Load and Its Practical Significance*, Proc. 1st Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng, Cambridge, pp. 60.
- Goodman. R. E., 1989, *Introduction to Rock Mechanics*, John Wiley & Sons, New York.
- International Society for Rock Mechanics (ISRM) 1988, *Comission on Standardization of Laboratory Testing Plan, Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials*.
- Lambe, T. W. & Whitman, R. V., 1979, *Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, New York.
- Scott Jr., T. E, Zaman, M. M. & Roegiers, J. C., 1998, *Acoustic-Velocity Signatures Associated With Rock Deformation Processes*, JPT, June, pp. 70-72.
- Yale, D.P., & Crawford, B., 1998, *Plasticity and Permeability in Carbonates: Dependence on Stress Path and Porosity*, EUROCK 98, July, vol. II, pp.485-494.

PORE COLLAPSE STUDY THROUGH CAP MODEL ANALYSIS

Summary. The occurrence of pore collapse has been verified in high porosity and low permeability carbonate reservoirs. The increase in effective stress due to oil reservoir withdrawal may cause rearrangement of the rock matrix, changing the rock geometry if it will not be able to support it. In literature are presented cases where the occurrence of pore collapse were verified, *e.g.*, the fields of Ekofisk and Danian (North Sea) and Austin (Gulf Coast). In the case of Ekofisk field the subsidence was so serious that provoked the settlement of production facilities. For those fields rock mechanics tests were carried out in laboratories using triaxial and uniaxial deformation tests, verifying the occurrence of pore collapse. However those methodologies were not able to use a different stress path than that followed by the test. This work introduces the cap model for studies of pore collapse in carbonates of the Campos Basin using laboratory tests with different stress path.

Keywords: Pore collapse, Cap model, Stress path.