

ESTABILIDADE DE POÇOS EM ROCHAS CARBONÁTICAS

José Luis Drummond Alves¹ (COPPE/UFRJ), Lúcia Carvalho Coelho¹ (COPPE/UFRJ), Patrick Baud² (CNRS/Université Louis Pasteur), Nestor Oscar Guevara Jr¹ (COPPE/UFRJ), Teng-Fong Wong³ (State University of New York)

¹Caixa Postal 68552-CEP 21949-900-Rio de Janeiro - RJ, [jalves,lucia.guevara]@lamce.coppe.ufrj.br

²Institut de Physique du Globe EOST (CNRS/ULP), 5, rue René Decartes, 64084, Strasbourg, France, pbaud@eost.u-strasbg.fr

³Department of Geosciences, State University of New York at Stony Brook, Stony Brook, New York, 11794-2100 USA, tfwong@notes.cc.sunysb.edu

Reservatórios carbonáticos representam uma grande parte das reservas mundiais de óleo e gás. Reservatórios petrolíferos constituídos por rochas carbonáticas, principalmente por calcários e dolomitas (carbonatos de cálcio e magnésio) sempre exerceram um papel relevante na indústria do petróleo por conterem elevados volumes de óleo e gás natural em muitas bacias sedimentares ao redor do mundo. Estas rochas estão assumindo importância crescente considerando a maturidade exploratória dos reservatórios mais rasos e a necessidade da exploração de reservatórios mais profundos. Enquanto as rochas siliciclásticas apresentam perdas de suas características de reservatório (porosidade e permeabilidade) a altas profundidades, os reservatórios carbonáticos conseguem manter-se efetivos nestas condições. Apesar desta crescente importância, estes reservatórios são bem menos conhecidos no Brasil que os reservatórios siliciclásticos. A escassez de conhecimento sobre estes reservatórios dificulta sua caracterização e previsibilidade, com conseqüente dificuldade de modelagem e simulação. Durante a produção, a extração de hidrocarbonetos reduz a pressão nos poros, o que causa um aumento nas tensões efetivas e a compactação mecânica do reservatório. A contração volumétrica e a ruptura por compactação pode ser extensa ou localizada apenas nas vizinhanças do poço, mas em ambos os casos as conseqüências podem ser severas como a subsidência da superfície, ruptura do poço, produção de areia e outros problemas na produção. A análise da estabilidade do poço e, de forma geral, a deformação e a ruptura em ambientes carbonáticos dependem de modelos constitutivos relevantes de rochas carbonáticas em uma larga faixa de porosidades. Do ponto de vista geomecânico, uma gama ampla de modos de ruptura podem ser observados em ambientes geológicos. A compreensão da mecânica da transição da ruptura frágil para a ruptura dútil, associado ao fluxo cataclástico é fundamental em relação a diversos problemas tais como a compactação de reservatórios, estabilidade de poços e sismicidade em prisma acrecionários. Dados mecânicos indicam que esta transição é dependente não só da tensão efetiva, mas também da porosidade e da história de carregamento. Neste trabalho, recentes dados experimentais sobre o comportamento dilatante e compactante de sete tipos de calcário foram compilados. Suas porosidades variam de 10% a 38%. Estes dados foram obtidos de ensaios triaxiais convencionais executados a temperatura ambiente e taxa de deformação constante em condições secas e saturadas. A tensão de escoamento inicial foi identificada como a tensão crítica no início da compactação induzida por cisalhamento. As tensões de escoamento subseqüentes foram consideradas dependentes do endurecimento verificado durante as deformações plásticas volumétricas. *Cap models* foram aplicados aos dados experimentais. Um estudo de caso de uma análise da estabilidade tridimensional de uma junção multilateral foi efetuada. O poço foi simulado como uma longa cavidade circundada por um material isotrópico elastoplástico independente das taxas e lei de escoamento associativo, com comportamento linear durante as deformações elásticas. O modelo constitutivo utilizado e o desempenho computacional foram avaliados.

Rochas carbonáticas, estabilidade de poços, modelos constitutivos, cap models.

1. INTRODUÇÃO

A perfuração e produção em poços situados em reservatórios de hidrocarbonetos introduzem esforços na rocha que podem atingir a resistência do material, levando a sua ruptura. A teoria elasto-plástica vem sendo amplamente utilizada para avaliar a estabilidade do poço. Dois modos de ruptura são amplamente considerados em análises de estabilidade: ruptura por tração ou por cisalhamento na condição compressiva. Muitos modelos constitutivos foram propostos para avaliar a estabilidade do poço, com critérios de ruptura lineares ou não lineares (McLean e Addis, 1990). Embora modelos sofisticados estejam disponíveis para representar o comportamento da rocha, a ausência de dados disponíveis limitam sua utilização, levando o analista ao emprego de modelos simples como os modelos elásticos com um critério de ruptura ou aos modelos elasto-plásticos de Drucker-Prager ou Mohr-Coulomb com leis de escoamento associativas ou não-associativas.

Um mecanismo de ruptura pouco avaliado nas análises de estabilidade de poços é o compactação por colapso hidrostático. Esta compactação se refere à severa redução da porosidade e da permeabilidade da matriz rochosa provocada por pressões hidrostáticas altas. Do ponto de vista microscópico, este fenômeno pode estar associado à perda de cimentação e quebra de grãos (Mowar *et al.*, 1996). Em reservatórios, esta região compactada atua como uma barreira ao fluxo de fluidos. Na vizinhança do poço, o material desagregado pode gerar produção de areia (Haimson, 2007). O fenômeno pode ser mais severo durante a produção: a extração de fluidos aumenta a tensão efetiva da rocha. Estes esforços podem atingir a resistência à compressão hidrostática da rocha. Os modelos constitutivos elasto-plásticos para este fenômeno baseiam-se nos *cap models* da teoria da plasticidade, nos quais uma superfície de ruptura por cisalhamento é associada a uma superfície tipo *cap*, que delimita a tensão hidrostática admissível. Estudos experimentais vêm sendo conduzidos no sentido de avaliar a resistência à compressão hidrostática das rochas, sobretudo arenitos. Estudos sobre rochas carbonáticas são mais recentes e ainda foco de investigação.

Este trabalho propõe-se a associar estudos experimentais sobre rochas carbonáticas a um modelo numérico que utiliza a teoria da plasticidade em um programa de elementos finitos. Os estudos experimentais foram conduzidos no Institut de Physique du Globe, EOST (CNRS/ULP), França, e em SUNY em Stony Brook. A modelagem é desenvolvida no Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia da COPPE/UFRJ. Recentes dados experimentais sobre o comportamento dilatante e compactante de sete tipos de calcário foram compilados. Suas porosidades variam de 10% a 38%. Estes dados foram obtidos de ensaios triaxiais convencionais executados a temperatura ambiente e taxa de deformação constante em condições secas e saturadas. Os modelos numéricos já implementados foram avaliados e ajustes a estes modelos foram propostos para melhor representar o comportamento das rochas em estudo.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A observação de campo em arenitos de alta porosidade constatou a existência de regiões estreitas de deformação compressional localizadas, sem indícios de cisalhamento em seu interior. Estas regiões foram denominadas por Mollema e Antonellini (1996) de *compaction bands* (faixas de compactação). No interior destas faixas, observa-se a ocorrência de poro-colapso e quebra de grãos. Uma redução da porosidade e da permeabilidade em relação à massa de rocha circundante foi observada. A ocorrência destas estruturas pode criar barreiras ao escoamento de fluidos. Desde então, diversos estudos vêm sendo conduzidos para reproduzir este fenômeno em escala de laboratório e estudos microestruturais para sua melhor compreensão, bem como modelos constitutivos vêm sendo propostos para prever este fenômeno.

Estudos sobre a compactação de arenitos com porosidades variando de 13% a 23% foram conduzidos por Baud *et al.* (2006) e fornecem indicações necessárias ao desenvolvimento de modelos constitutivos para representar mais realisticamente o comportamento de tais materiais. Vajdova *et al.* (2004) apresentam um estudo sobre a micromecânica dos modos de deformação e ruptura em rochas carbonáticas de porosidades entre 3% e 45%.

Haimson (2007) relata um estudo sobre os micromecanismos de *breakouts* em poços perfurados em diversos tipos de granito, calcário e arenito em escala de laboratório, considerando uma grande variedade de campos de tensão. Todas as rochas testadas, exceto os arenitos ricos em quartzo, desenvolveram *breakouts* em forma de cunha ao longo da linha de tensão horizontal mínima, embora os mecanismos em escala de grão sejam diferentes para o desenvolvimento deste tipo de *breakout* (Figura 1a e 1b). Já os arenitos ricos em quartzo apresentaram um mecanismo ainda desconhecido: *breakouts* em forma de fenda estreita, com uma largura que se mantém constante ao longo de um comprimento extenso, semelhante a uma fratura (figura 1c). Estes *breakouts* resultam de um micromecanismo que consiste em desagregação e reempacotamento dos grãos, com a formação de uma faixa de compactação com porosidade reduzida ao longo da tensão horizontal mínima. Os *breakouts* se formam a partir da remoção, com a ajuda dos fluidos em circulação, dos grãos soltos e fragmentos. Em casos de poços reais, a ocorrência deste mecanismo é potencial gerador de produção de areia.

Para modelar o fenômeno de faixas de compactação, Issen e Rudnicki (2001) apresentaram uma modificação nas condições da teoria da localização de Rudnicki e Rice (1975), sugerindo uma superfície de escoamento única que contém um *cap* para delimitar as tensões hidrostáticas admissíveis. O coeficiente de dilatância da superfície de potencial plástico controlaria o regime de deformação: se for positivo, o material se encontra no regime de cisalhamento dilatante; caso o coeficiente seja negativo, o material compacta. Posteriormente, Issen (2002) compara este modelo a *cap models* com duas superfícies desacopladas, uma para simular o comportamento dilatante e outra para o comportamento compactante. Sua conclusão é que este último modelo se ajusta melhor aos dados experimentais.

Uma boa revisão dos modelos elasto-plásticos tipo *cap models* está disponível em Coelho (2001). Do ponto de vista da implementação numérica, Coelho *et al.* (2005) utilizaram um modelo baseado no *cap* elíptico de Sandler *et al.* (1976) para ajustar os dados de um calcário da Bacia de Campos e avaliar a estabilidade de um poço perfurado neste material. Tisser (2004) modificou este modelo para eliminar o ponto de singularidade na

interseção entre as duas superfícies, simplificando o código computacional. Guevara (2005), partindo do modelo de Tisser, implementou uma versão tridimensional deste modelo. Este modelo numérico serve de base para o presente estudo.

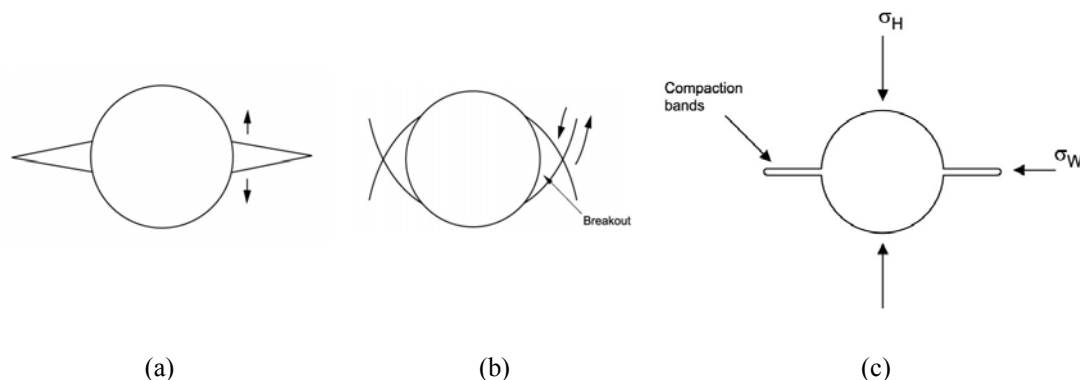


Figura 1. Tipos de *breakouts* verificados em escala de laboratório (Haimson, 2007)

3. METODOLOGIA

Foram compilados dados de ensaios triaxiais convencionais, executados à temperatura ambiente e com taxa de deformação constante em condições secas e saturadas em amostras de calcário de vários níveis de porosidade. A partir destes ensaios, foram definidos os parâmetros das superfícies de escoamento a serem utilizadas na análise numérica.

3.1 Estudo experimental

Amostras de grandeza centimétrica, com razão de aspecto (altura/largura) 2, foram extraídas de forma que a largura fosse paralela ao acamamento. Elas foram comprimidas em temperatura ambiente e deformação constante em condições secas e pressões de confinamento variando de 5 a 435 MPa. Estes estudos foram conduzidos no Institut de Physique du Globe, EOST (CNRS/ULP), França, por Baud *et al.* (2000) e em SUNY em Stony Brook, Nova York, por Vajdova *et al.* (2004) e Walker (2006).

A descrição petrofísica das rochas está apresentada na tabela 1.

Tabela 1. Dados de calcários coletados

Rocha	Porosidade (%)	Tamanho do grão (μm)	Composição	Origem	Fonte
Solnhofen	3	5	>98% Calcita	Alemanha	Baud <i>et al.</i> (2000)
Tavel	10,4	5	>98% Calcita	França	Vajdova <i>et al.</i> (2004)
Indiana	15,6	300	>98% Calcita	EUA	Vajdova <i>et al.</i> (2004)
Comiso	17	10	Calcita+ Dolomita	Itália	Walker (2006)
Majella	30			Itália	Baud <i>et al.</i> (2007)
St Maximin	37			França	Walker (2006)

A figura 2a apresenta a resposta mecânica para o calcário Tavel, cuja porosidade é 11%. A transição da ruptura frágil para a ruptura dútil foi observada a uma pressão de confinamento de 50 MPa. A figura 2b mostra os pontos característicos que definem a transição entre os regimes de deformação. A dilatância, que corresponde ao ponto marcado como C', foi observada para pressões de confinamento relativamente baixas. A pressões confinantes mais altas, a compactação induzida pelo cisalhamento foi observada a partir de um ponto marcado como C*. O ponto denominado C*' marca a transição da compactação inelástica para a dilatância e P* marca a pressão crítica do início da quebra dos grãos e do colapso de poros no ensaio hidrostático. A figura 2c apresenta os pontos de início da deformação permanente (C', C*, C*', P*). Estes pontos definem quatro superfícies de escoamento: ruptura frágil, dilatância, compactação e a transição da compactação para a dilatância.

A figura 3a apresenta as tensões de pico para as amostras deformadas no regime frágil. As envoltórias de ruptura são lineares neste regime. A resistência frágil dos carbonatos porosos diminui com o aumento da porosidade e dos grãos. As tensões de escoamento para a compactação induzida por cisalhamento são inicialmente descritas por uma superfície de escoamento compactante com inclinação negativa (figuras 3b e 3c).

Vários autores definem o formato desta superfície como um arco de elipse (Issen e Rudnicki, 2001). Segundo Baud *et al.* (2006), o arco de elipse representa bem o comportamento compactante dos arenitos, mas não das rochas carbonáticas. Gruenishow e Rudnicki (2006) propõem a seguinte forma generalizada:

$$\left(\frac{P}{A}\right)^n + \left(\frac{Q}{B}\right)^n = 1$$

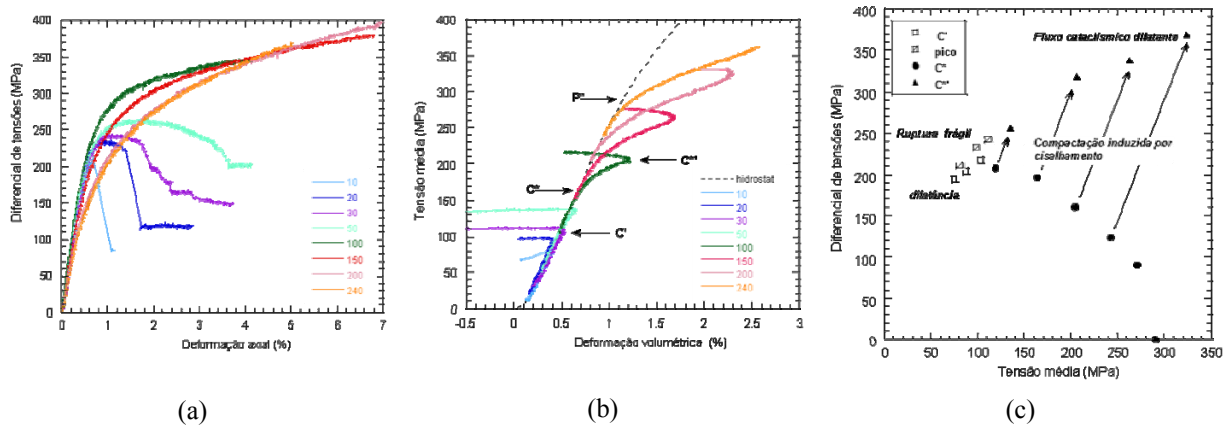


Figura 2. Resposta mecânica do calcário Tavel (Vajdova *et al.*, 2004)

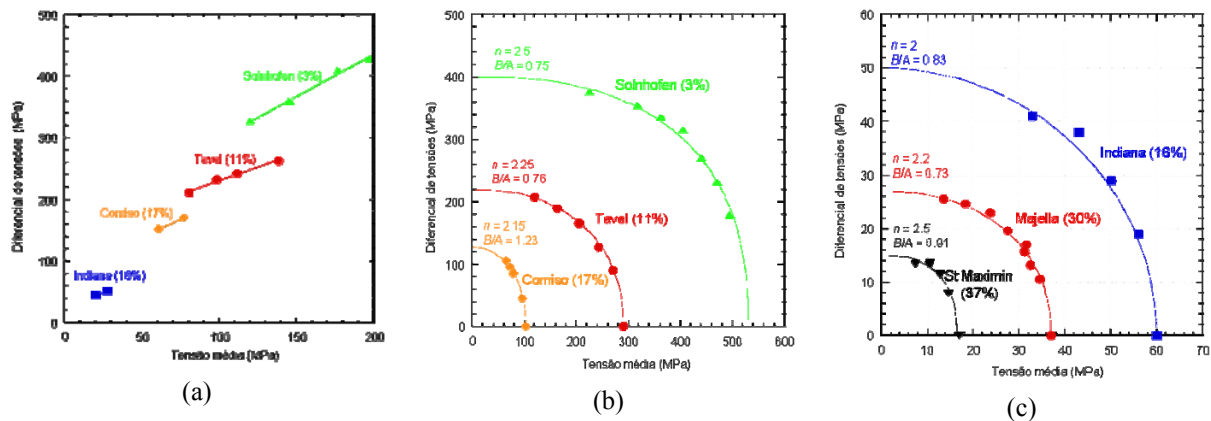


Figura 3. Envolvórias de ruptura para os calcários estudados (Baud *et al.*, 2000; Vajdova *et al.*, 2004; Walker, 2006)

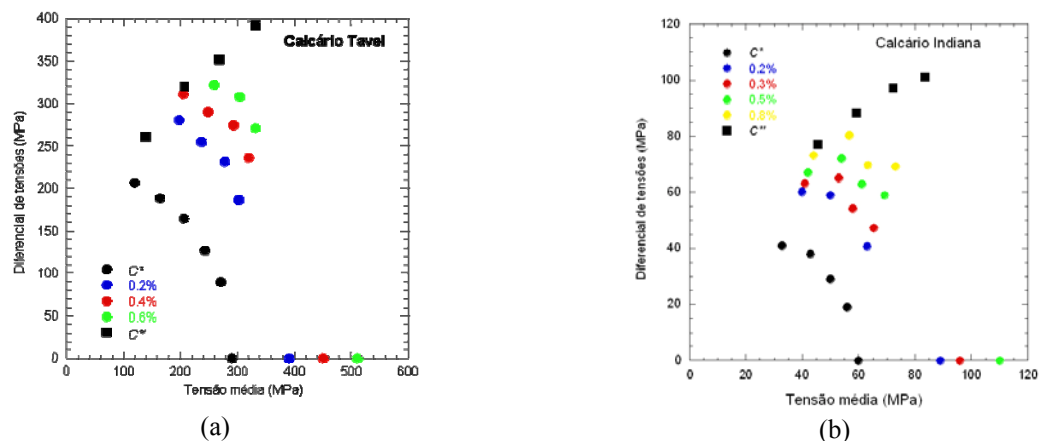


Figura 4. Contornos da deformação plástica volumétrica (Vajdova *et al.*, 2004)

Após atingir a envoltória de escoamento, o material enrijece apresentando *strain-hardening*. A envoltória de ruptura se expande em direção ao eixo hidrostático até evoluir para um comportamento dilatante. Para os calcários Tavel e Indiana, a transição da compactação para a dilatância foi observada a uma deformação

volumétrica plástica menor que 1,5%. Os contornos da deformação plástica volumétrica têm forma similar aos *caps* iniciais (Figura 4).

3.2 Modelo numérico

Segundo Rubin (1991), as superfícies de escoamento podem ser expressas através da seguinte forma generalizada:

$$f(I_1, J_2, J_3) = \sigma_e - r(I_1, J_3)Y(I_1)$$

onde I_1 é o primeiro invariante de tensões, $I_1 = 3p = \sigma_{ii}$, J_2 e J_3 são o segundo e terceiro invariantes de tensões desviatórias respectivamente, descritos por:

$$J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij}$$

$$J_3 = |S_{ij}| = \det S_{ij},$$

$S_{ij} = \sigma_{ij} - p\delta_{ij}$ são as tensões desviatórias.

$r(I_1, J_3)$ é uma função que define a forma da interseção da superfície de ruptura com o plano octaédrico, Y é a envoltória de ruptura usualmente definida por ensaios triaxiais e $\sigma_e^2 = 3J_2$.

Partindo do modelo de Rubin, Schwer e Murray (1994) propuseram um ajuste ao *cap model* de Sandler *et al.* (1976) para incluir o terceiro invariante de tensões desviatórias na relação constitutiva e eliminar a descontinuidade na interseção do cap com a superfície de cisalhamento. Esta superfície tem a seguinte expressão:

$$f(I_1, J_2, \kappa) = J_2 - r^2(\beta) F_f^2(I_1) F_c(I_1, k)$$

onde:

$$F_f(I_1) = \alpha - \gamma e^{-\eta I_1} + \theta I_1$$

$$F_c(I_1, k) = \begin{cases} 1, & I_1 \leq L(k) \\ 1 - \frac{[I_1 - L(k)]^2}{[X(k) - L(k)]^2}, & I_1 > L(k) \end{cases}$$

α , θ , η são parâmetros de ajuste da superfície de cisalhamento, $X(k)$ e $L(k)$ são os valores de I_1 que definem os limites do arco de elipse que define o *cap* (Figura 5).

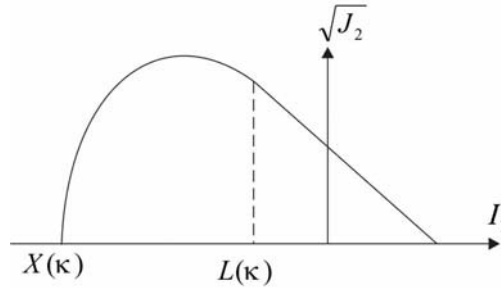


Figura 5. Superfície de escoamento no plano $I_1 \times \sqrt{J_2}$

Seja β o ângulo que se relaciona ao ângulo de Lode pela relação (Figura 6):

$$\cos 3\hat{\theta} = -\sin 3\beta = \hat{J}_3 = \frac{27J_3}{2\sigma_e^3}, \quad \sigma_e^2 = 3J_2$$

$r(\beta)$ é a função que define a forma da interseção da superfície de ruptura com o plano octaédrico, dada por:

$$r(\beta) = \frac{\sqrt{3Q_2}}{(1 + Q_2)\cos(\beta) - \sqrt{3(1 - Q_2)}\sin(\beta)}, \quad Q_2 = \frac{3 - \sin \phi}{3 + \sin \phi}$$

Desta forma, o *cap model* utilizado neste trabalho constitui-se de uma superfície de ruptura por cisalhamento de Mohr-Coulomb associada a um *cap* elíptico que no plano octaédrico possui a mesma forma que a superfície de Mohr-Coulomb (Figura 7).

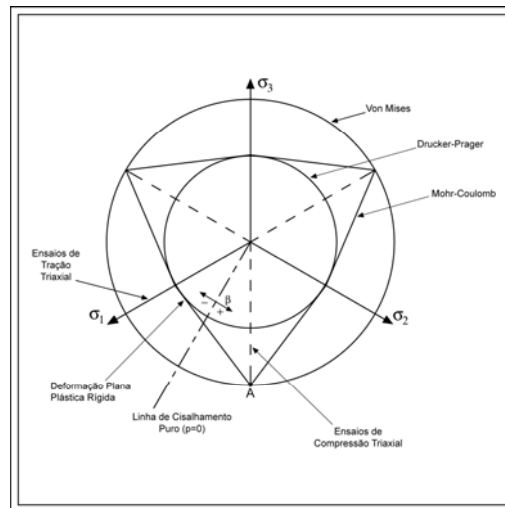


Figura 6. Superfícies de escoamento no plano octaédrico



Figura 7. Cap model no espaço de tensões $I_1x\sqrt{J_2}$

Implementações numéricas em um programa de análise bidimensional de estabilidade de poços foram efetuadas a partir do modelo descrito acima. Coelho *et al.* (2005) implementaram uma adaptação do modelo de Sandler *et al.* (1976), com duas superfícies desacopladas: uma superfície de ruptura de Mohr-Coulomb associada a uma superfície elíptica para representar a tensão hidrostática admissível. Este modelo ajusta a superfície de Sandler à superfície de Mohr-Coulomb no plano octaédrico. A lei de endurecimento que controla a expansão do cap é uma função linear da curva pressão vs deformação plástica volumétrica. A partir deste trabalho, Tisser (2004) implementou a superfície única proposta acima para análise bidimensional. Guevara (2006) estendeu esta implementação para análises de modelos de poços de geometria complexa em 3 dimensões.

4. RESULTADOS

Os dados experimentais forneceram os dados para ajustar o modelo numérico. Para o estudo padrão, selecionou-se o calcário Comiso. Analisando os dados experimentais, verificou-se que o modelo de uma superfície única com cap elíptico não representa o melhor ajuste dos dados experimentais. O cap model com duas superfícies tem mais flexibilidade na reprodução destes dados (figura 8). Buscando-se uma função de escoamento generalizada para o cap, pode-se alterar a função para a seguinte forma:

$$f(I_1, J_2, \kappa) = J_2 - r^n(\beta) F_f^n(I_1) F_c(I_1, k)$$

Observa-se que utilizando esta forma generalizada para o cap, obtém-se um melhor ajuste, conforme a figura 8. Neste caso, a potência n utilizada é 1,5.

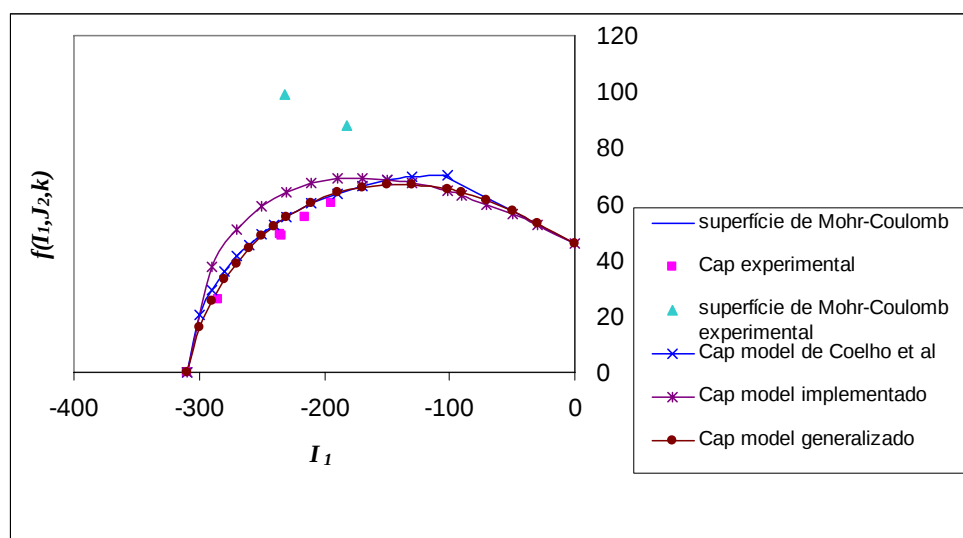


Figura 8. *Cap models* x dados experimentais

Tabela 2. Tensões in-situ e pressão no poço

σ_h (MPa)	σ_H (MPa)	σ_v (MPa)	Pressão estática do reservatório (MPa)	Pressão na parede do poço (ppg)
39,69	30,88	32,35	0.0	13.0

Tabela 3. Parâmetros do material

Módulo elástico (GPa)	Coeficiente de Poisson	Ângulo de atrito (graus)	Coesão	$X(\kappa)$ (MPa)	$L(\kappa)$ (MPa)
25,0	0,245	13°	48,00	-296,00	201.00

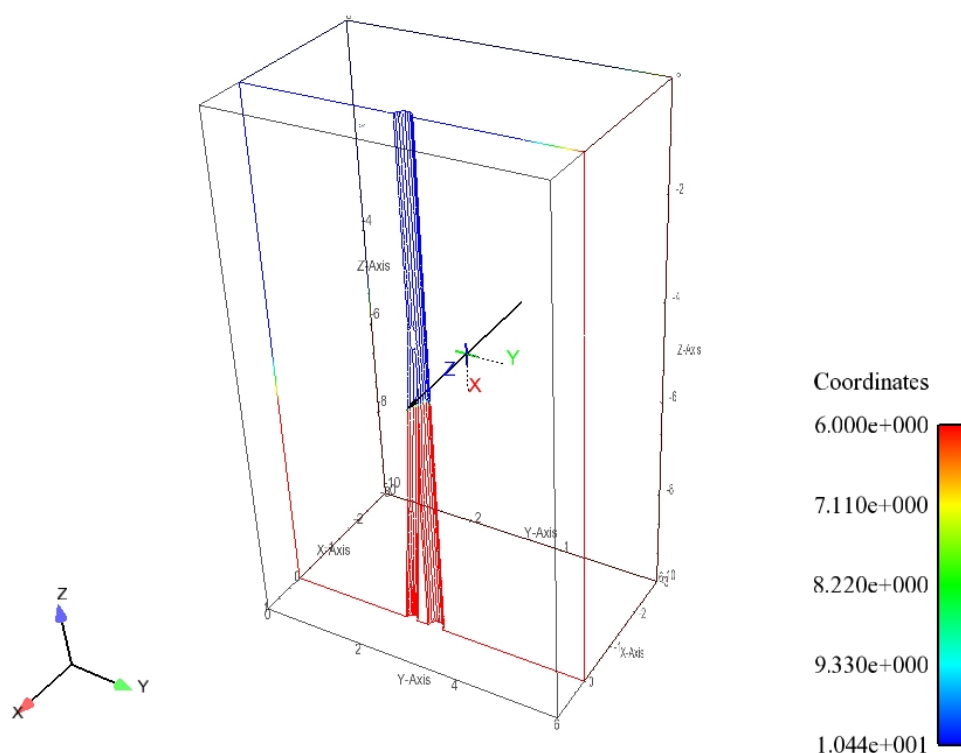


Figura 9. Geometria da junção multilateral.

Os dados para o calcário Comiso foram utilizados para uma análise de junção multilateral de um poço, utilizando-se os dados de um reservatório conforme a tabela 2. O modelo constitutivo utilizado é o *cap model* elíptico já implementado, cujos parâmetros estão descritos na tabela 3.

A geometria do problema consiste em um poço de 21 cm de diâmetro perfurado a partir de um poço vertical de 31 cm, com ângulo de inclinação de $2,5^\circ$ (figura 9). A geometria do problema é representada por um bloco com 10 metros de profundidade, 6 metros de largura e três metros de espessura.

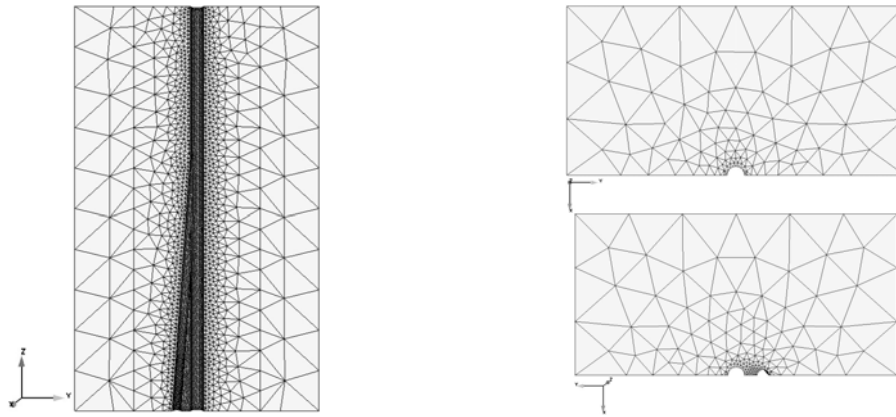


Figura 10. Vista frontal, superior e inferior da malha de elementos tetraedros.

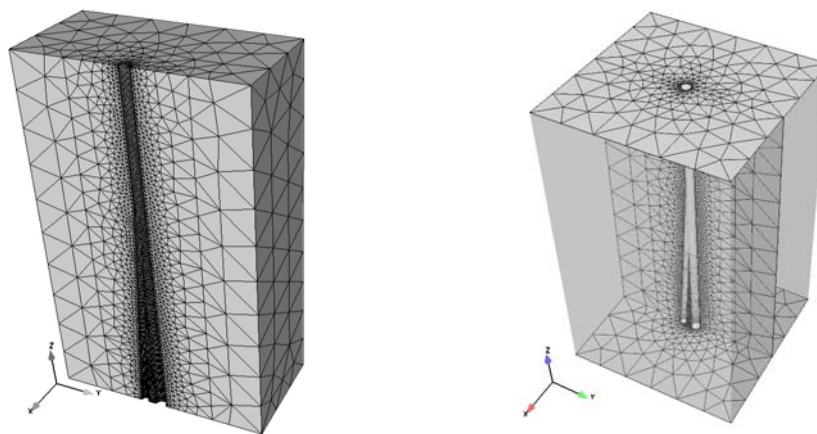


Figura 11. Malha de elementos tetraedros em perspectiva

As figuras 10 e 11 mostram a malha de elementos finitos utilizada na modelagem do problema. 9908 nós e 45990 elementos tetraédricos lineares foram utilizados. A pressão de fluido no interior do poço é 13 ppg, com 4567 faces sob pressão. As condições de contorno foram dados por deslocamentos nulos prescritos nas faces vertical e lateral nas três direções.

A figura 12 mostra os resultados em termos de fluxo plástico para a análise. Esta análise mostra a capacidade do simulador em desenvolvimento em representar geometrias complexas.

O modelo constitutivo será modificado para obter um melhor ajuste dos dados experimentais. A representação do endurecimento após plastificação será incorporada ao modelo, bem como um tratamento do fenômeno da localização das deformações.

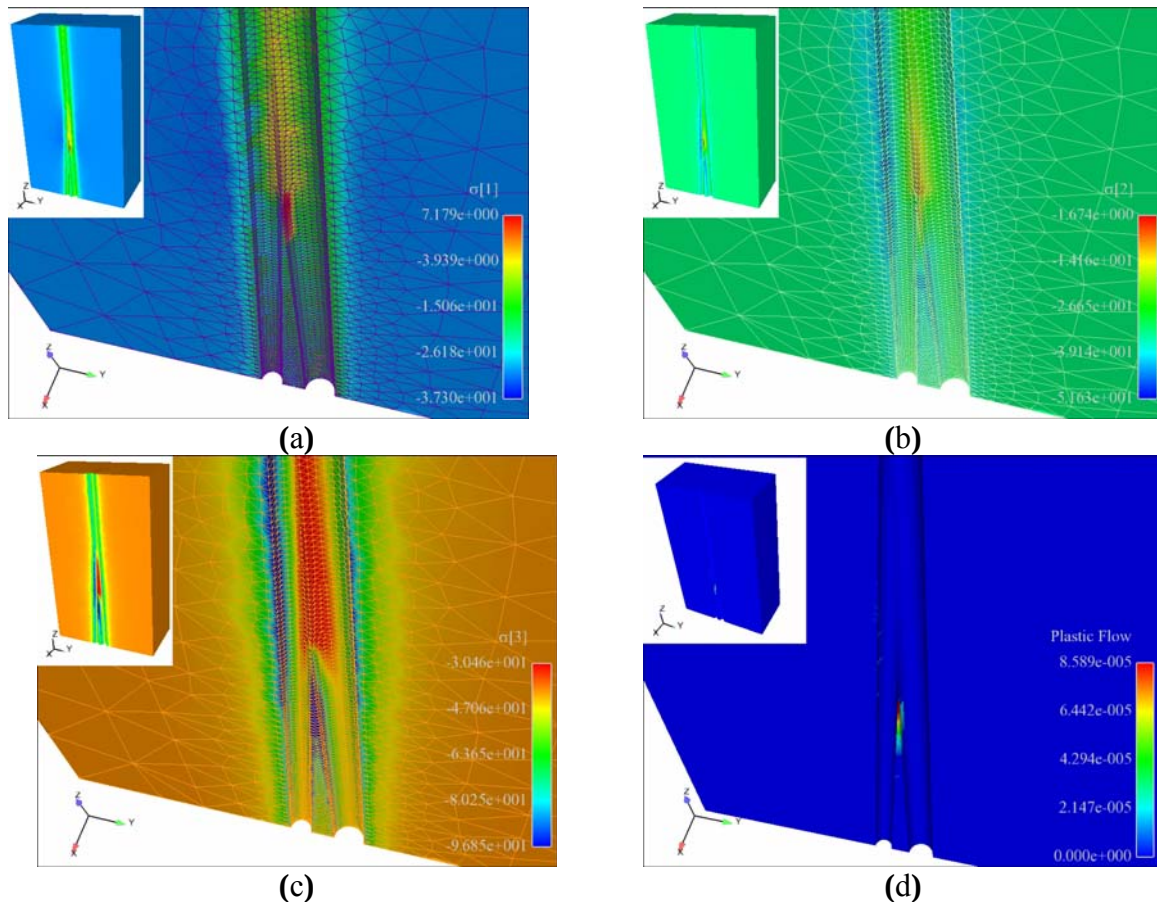


Figura 12. Tensões principais (a) σ_1 , (b) σ_2 , (c) σ_3 (d) Fluxo plástico

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta estudos sobre a mecânica das rochas carbonáticas porosas, sobretudo no domínio da deformação compactante. Estudos sobre a compactação do meio poroso ainda são escassos. São poucos os dados experimentais disponíveis na literatura. Este trabalho recolhe dados de calcário com diversos níveis de porosidade que delineiam sua resistência mecânica.

Observa-se que a resistência destes materiais é dependente da porosidade. Quanto mais poroso o material, menor a resistência. Cap models foram utilizados para ajustar os dados experimentais. Observa-se que o formato do *cap*, no caso dos calcários estudados, pode não ser um arco de elipse, mas assumir a forma genérica de Gruenshow e Rudnicki (2006).

Melhoras no simulador numérico de estabilidade de poços foram efetuadas, através da implementação de uma superfície de escoamento suave e sua extensão para geometrias tridimensionais. A análise numérica foi utilizada para prever a ocorrência de plastificação nas vizinhanças de uma junção de poco multilateral. Esta implementação possibilita a solução de um amplo espectro de problemas de mecânica computacional. No caso de análises de estabilidade de poços de geometria complexa, análises deste tipo fornecem informações a respeito do risco de instabilidades no poço e problemas correlatos, como a produção de areia.

Os estudos conduzidos ainda não contemplam o comportamento após a plastificação por compactação do modelo. Estes estudos estão em andamento para sua incorporação ao modelo.

Novas implementações estão sendo desenvolvidas para contemplar uma generalização da superfície de escoamento de forma a ajustá-la aos dados experimentais coletados para rochas carbonáticas. Além disto, um tratamento do problema da localização das deformações será desenvolvido.

6. AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa está sendo parcialmente financiada pelo convênio de cooperação internacional entre o CNPq e o CNRS (França), projeto project n°18927, que envolve o Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia da COPPE/UFRJ e o Institut de Physique du Globe de Strasbourg da Université Louis Pasteur, França.

7. REFERÊNCIAS

- BAUD, P.; SCHUBNEL, A.; WONG, T-F.. Dilatancy, compaction, and failure mode in Solnhofen limestone, **Journal of Geophysical Research**, Washington: AGU Publications, v. 105, n. B8, 19, p. 289-19,303, August 2000.
- BAUD, P.; VAJDOVA, V.; AND WONG, T-F. Shear-enhanced compaction and strain localization : Inelastic deformation and constitutive modeling of four porous sandstones, **Journal of Geophysical Research**, Washington: AGU Publications, v. 111, B12401, doi:10.1029/2005JB004101, December 2006.
- COELHO, L. C. Modelos de ruptura de poços de petróleo. Março 2001. 167 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). COPPE/UFRJ, Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2001.
- COELHO, L., SOARES, A., EBECKEN, N., ALVES, J.L., AND L. LANDAU. The impact of constitutive modeling of porous rocks on 2-D wellbore stability analysis, **Journal of Petroleum Science and Engineering**, Amsterdam: Elsevier., v. 46, p. 81-100, February 2005.
- GRUESCHOW, E.; RUDNICKI, J.W. Elliptic yield cap constitutive modeling for high porosity sandstone, **International Journal of Solids and Structures**, Amsterdam: Elsevier, v. 42, p. 4574-4587, August 2005.
- GUEVARA Jr., N. O. **Implementação computacional de um modelo constitutivo para o tratamento de poro-colapso em meios porosos**. Junho 2006. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). COPPE/UFRJ, Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2006.
- HAIMSON, B. Micromechanisms of borehole instability leading to *breakout* in rocks. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Amsterdam: Elsevier, v. 44, p. 157-173, February 2007.
- ISSEN, K. The influence of constitutive models on localization conditions for porous rock. **Engineering Fracture Mechanics**, Amsterdam: Elsevier, v. 69, 1891– 1906, November 2002.
- ISSEN, K.; RUDNICKI, J. W. Theory of compaction bands in porous rocks. **Physics and Chemistry of the Earth (A)**, Amsterdam: Elsevier. v.26, p. 95-100, Jan-Fev 2001.
- MCLEAN, M.R.; ADDIS, M.A.. Wellbore stability analysis: a review of current methods of analysis and their field applications. In: IADC/SPE Drilling Conference 1990. **IADC/SPE Drilling Conference Proceedings**. Houston, 1990. p. 261-274.
- MOLLEMA, P. N.; ANTONELLINI, M. A. Compaction bands: a structural analog for anti-mode I cracks in aeolian sandstone. **Tectonophysics**, Amsterdam: Elsevier, v. 267, p. 209– 228, December 1996.
- MOWAR, S.; ZAMAN, M.; STEARNS, D.W.; ROEGIERS, J.-C. Micromechanisms of pore collapse in limestone. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, Amsterdam: Elsevier, v. 15, p. 221–235, August 1996.
- RUBIN, M.B., Simple, Convenient Isotropic Failure Surface, **Journal of the Engineering Mechanics Division**, Reston: ASCE Publications, v.117, p. 348-369, February 1991.
- RUDNICKI, J.W., RICE, J.R. Conditions for the localization of deformation in pressure-sensitive dilatant materials. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, Amsterdam: Elsevier, v. 23, p. 371–394, December 1975.
- SANDLER, I. S; DIMMAGIO, F. L.; BALADI, G.Y. Generalized cap models for geological materials. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, Reston: ASCE Publications. v. 102, p. 683-699, July 1976.
- TISSER, A. D. **Um modelo constitutivo para análise de estabilidade de poços de petróleo**. Março 2004. 119 p. Tese (Mestrado em Engenharia Civil). COPPE/UFRJ, Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2004.
- VAJDOVA, V.; BAUD, P.; AND WONG, T-F. Compaction, dilatancy and failure in porous carbonate rocks, **Journal of Geophysical Research**, Washington: AGU Publications, v. 109, B10406, doi: 10.1029/2003JB002942, 2004.
- WALKER, E. **The mechanical behavior of high porosity limestone**, *Master thesis*, 2006.

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo.