

AVALIAÇÃO DA SENSIBILIDADE DE UM MODELO ELASTOPLÁSTICO EM ELEMENTOS FINITOS PARA A ANÁLISE DE ESTABILIDADE EM POÇOS DE PETRÓLEO

Janáína Villela^a, José Luis D. Alves^b

^a LAMCE – Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia. COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia, Bloco I, Sala 214. Cidade Universitária. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, janaina.eng@gmail.com, <http://www.lamce.coppe.ufrj.br>

^b LAMCE – Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia. COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia, Bloco I, Sala 214. Cidade Universitária. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, jalves@lamce.coppe.ufrj.br, <http://www.lamce.coppe.ufrj.br>

Palavras Chave: Carbonatos, Porocolapso, Estabilidade de Poços de Petróleo.

Resumo. Este trabalho de simulação computacional é uma contribuição aos esforços desenvolvidos para a melhoria dos conhecimentos técnicos de engenharia e projeto de perfuração, especialmente à estabilidade de poços perfurados em maciços carbonáticos. Tais rochas, materiais constituintes dos megacampo recentemente descobertos na Bacia de Santos são atualmente, um dos maiores desafios da exploração e perfuração de poços .

O código implementado faz uma análise não linear baseada na teoria da plasticidade. A utilização de uma envoltória de fechamento suave (cap) o qual trata falhas por porocolapso associada ao modelo de ruptura de Mohr-Coulomb (falhas por cisalhamento) evita pontos de singularidade tornando o modelo mais eficiente computacionalmente. A implementação das forças de escavação reproduz a perfuração mais realisticamente para a análise de estabilidade nas formações vizinhas.

Materiais rochosos porosos e pouco consolidados, tipicamente sujeitos a falha por porocolapso (redução brusca da permeabilidade e porosidade devido a elevadas tensões hidrostáticas) trazem conseqüências onerosas durante a perfuração de um poço como queda da taxa de perfuração, prisão de coluna e até mesmo perda da locação.

Neste trabalho, são realizadas simulações variando a sensibilidade do material ao porocolapso, analisando suas respostas. Os resultados indicam que esse tipo de falha produz regiões plastificadas distintas daquelas devido ao cisalhamento comumente encontradas no tratamento elastoplástico de materiais rochosos e deve se constituir uma nova variável de estudos sobre estabilidade de poços de petróleo.

1 INTRODUÇÃO

O Plano Estratégico da Petrobras 2010-2014 (2010) prevê investimentos de US\$ 118,8 bilhões em exploração e produção, demonstrando a relevância de estudos com ênfase em estabilidade de poços. A medição direta de parâmetros necessários para uma análise de estabilidade é, todavia bastante onerosa e em alguns casos extremamente difícil. A utilização de poços de correlação (método mais usual para obtenção dos parâmetros necessários) possui um vasto range de variação dos dados. Com um montante expressivo do número de variáveis envolvidas no problema, os simuladores numéricos se apresentam como uma importante ferramenta para o planejamento e execução de um poço.

Villarroel *et al.* (2004) ressalta que prever e evitar instabilidades é fundamental para minimizar os custos de desenvolvimento de um campo de petróleo. Aproximadamente 10 a 15% do tempo de perfuração de um poço estão relacionados à estabilidade. Mohiuddin *et al.* (2007) menciona que 33% dos poços horizontais perfurados analisados em seu trabalho apresentam instabilidades. De um total de 60 poços, mais de 50% apresentou *breakouts* (ovalizações) sendo que prisão de coluna e *pack-offs* foram problemas frequentemente encontrados durante a perfuração. O custo de uma sonda em atividade *offshore* bem como demais equipamentos e mão de obra especializada é um fator preponderante em um projeto de poço, ficando evidente o interesse da indústria em minimizar e/ou evitar tais problemas.

1.1 Objetivo

Esse trabalho, na área de simulação computacional, é uma contribuição aos esforços realizados para o aprimoramento do conhecimento tecnológico na engenharia de perfuração e projeto, especificamente na avaliação da estabilidade de poços de petróleo em maciços carbonáticos.

O modelo desenvolvido no LAMCE (Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia da COPPE/UFRJ) cuja implementação mais recente foi realizada por Guevara Junior (2006) trata o problema do colapso de poros (redução drástica e irreversível na porosidade do meio) em rochas reservatórios de petróleo se baseando na teoria da plasticidade. A superfície de escoamento suave desenvolvida (capmodel) evita pontos de singularidade (descontinuidade da derivada da função que define a superfície de escoamento) tornando o modelo mais eficiente. Trata-se da continuidade da linha de pesquisa desenvolvida por Coelho (2001) e Tisser (2004).

Neste trabalho apresenta uma análise de sensibilidade do código em elementos finitos (PoroNL), com comportamento não linear elastoplástico, endurecimento isotrópico e plasticidade perfeita.

A partir de resultados encontrados no estado da arte em análise de estabilidade de poços, uma avaliação da sensibilidade de um material rochoso sujeito ao porocolapso foi realizada. Com a utilização de parâmetros referenciados na literatura em modelos equivalentes, foi possível realizar simulações para observação das falhas por porocolapso que ocorrem em materiais carbonáticos, tipicamente encontrados nos campos brasileiros recentemente descobertos.

2 ASPECTOS TEÓRICOS

2.1 Formulação Fraca do Problema Elastoplástico: Discretização em Elementos Finitos

A partir das equações de equilíbrio para problemas envolvendo não linearidade física (pequenos deslocamentos e deformações), como o de estabilidade do poço abordado neste

trabalho, a formulação variacional (Galerkin) pode ser escrita matricialmente através do princípio do trabalho virtual como (Zienkiewicz *et al.*, 1967):

$$\int_{\Omega} \delta \mathbf{u}^T \rho \ddot{\mathbf{u}} d\Omega + \int_{\Omega} \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} d\Omega - \int_{\Omega} \delta \mathbf{u}^T \mathbf{b} d\Omega - \int_{\Gamma_w} \delta \mathbf{u}^T \bar{\mathbf{t}} d\Gamma_w = 0 \quad (1)$$

Sendo no contorno Γ_w (parede do poço), $\bar{\mathbf{t}}$ definida por:

$$\bar{\mathbf{t}} = \boldsymbol{\sigma} \mathbf{n} \quad (2)$$

A aproximação dos deslocamentos e dos deslocamentos virtuais por elementos finitos pode ser escrita como:

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \mathbf{N}(\mathbf{x})\tilde{\mathbf{u}} \text{ e } \delta \mathbf{u}(\mathbf{x}) = \mathbf{N}(\mathbf{x})\delta\tilde{\mathbf{u}} \quad (3)$$

Na forma paramétrica, reescreve-se a Eq. (3) como:

$$\mathbf{u}(\boldsymbol{\xi}) = \mathbf{N}(\boldsymbol{\xi})\tilde{\mathbf{u}}; \delta \mathbf{u}(\boldsymbol{\xi}) = \mathbf{N}(\boldsymbol{\xi})\delta\tilde{\mathbf{u}} \text{ com } \mathbf{x}(\boldsymbol{\xi}) = \mathbf{N}(\boldsymbol{\xi})\tilde{\mathbf{x}} \quad (4)$$

A Eq. (4) pode ser usada para o cálculo das deformações virtuais como:

$$\delta \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{S} \delta \mathbf{u} = (\mathbf{S}\mathbf{N}) \delta\tilde{\mathbf{u}} = \mathbf{B} \delta\tilde{\mathbf{u}} \quad (5)$$

Sendo \mathbf{B} a matriz de transformação, $\tilde{\mathbf{u}}$ denota os deslocamentos nodais e $\delta\tilde{\mathbf{u}}$ os deslocamentos virtuais arbitrários. Para um problema discreto, desconsiderando-se a parcela dinâmica, pode-se então escrever:

$$\mathbf{P}(\boldsymbol{\sigma}) = \mathbf{f} \quad (6)$$

Sendo:

$$\mathbf{P}(\boldsymbol{\sigma}) = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} d\Omega \quad (7)$$

Sabendo-se que as deformações podem ser calculadas a partir do vetor deslocamento, $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B}\tilde{\mathbf{u}}$ logo, pode-se reescrever Eq. (7) como:

$$\mathbf{P}(\boldsymbol{\sigma}) = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} d\Omega \quad (8)$$

2.2 Forças de Escavação

Segundo Costa (1984) em seu trabalho sobre escavação de minas subterrâneas de potássio, os métodos tradicionais utilizados para a simulação de escavações através do Método dos Elementos Finitos (MEF) determinavam o estado de tensões no bordo dos elementos a serem escavados aplicando-se com igual módulo e sentido oposto as tensões do maciço sobre os elementos do perímetro escavado. Segundo estes métodos, as tensões atuantes são adotadas como sendo as originais do maciço considerando-se o devido afastamento da cavidade de tal forma que tenham sido dissipados os efeitos da redistribuição das tensões induzidas pela escavação.

Todavia, este método introduz erros pelo fato de o estado de tensões no contorno entre dois

elementos não se constituir uma função contínua, quando se utiliza o MEF com formulação cuja incógnita é o deslocamento. Conseqüentemente, adota-se como princípio básico o equilíbrio de forças nos pontos nodais dos elementos.

Polillo Filho (1987) que também faz uso desta formulação para perfuração de poços de petróleo, explica detalhadamente a metodologia: as tensões iniciais gravitacionais não participam como forças nodais internas equivalentes, mas têm papel fundamental na verificação da condição de escoamento da rocha e na determinação do incremento de deformação plástica.

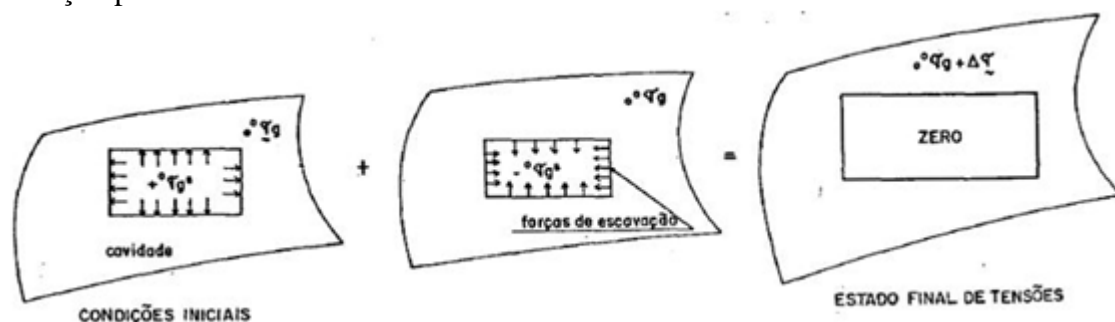


Figura 1 - Forças de escavação implementadas por Costa (1984). Reproduzido de Polillo Filho (1987).

A redistribuição das tensões devido ao efeito da perfuração envolve o cálculo das tensões iniciais efetivas nos pontos de integração, o cálculo das forças nodais equivalentes, ambas considerando o maciço em repouso e, finalmente, aplicando-se, no contorno do furo, as forças nodais em sentido contrário à reação do bloco de rocha a ser retirado (Figura 1).

No código PoroNL, o processo de perfuração provoca um relaxamento das tensões na superfície do poço (as tensões na cavidade resultante são nulas). Para a correta consideração desse efeito, as forças de superfície ou “forças de escavação” são calculadas sobre o conjunto de elementos adjacentes ao poço como forças internas equivalentes ao estado de tensões iniciais nesses elementos. Em seguida tais forças internas são aplicadas como forças de superfície, com o sinal contrário, de forma anular o estado de tensões nessa fronteira (Eq.(9)).

As contribuições de cada elemento adjacente ao poço, isto é, com pelo menos um ponto nodal sobre a superfície do mesmo, são montadas restringindo-se essa montagem apenas àquelas componentes correspondentes aos pontos nodais situados na superfície do poço (Eq.(10)).

As equações não lineares descritas acima que governam o equilíbrio quasi-estático do problema serão solucionadas neste trabalho empregando-se um método incremental iterativo, o método de Newton-Raphson. Para cada incremento de carga obtém-se através do processo iterativo uma solução que anule o resíduo.

Cada iteração do ciclo Newton envolve a avaliação das forças internas, avaliação da rigidez tangente e a solução de um sistema de equações, sendo que para modelos de grandes dimensões, os dois últimos podem ser excessivamente onerosos.

Esse custo computacional se reduz à medida que a matriz de rigidez não é atualizada a cada iteração. Define-se então o método de Newton-Raphson Modificado o qual avalia a rigidez apenas no início de cada passo incremental, não a alterando nas iterações subsequentes. Ressalta-se que sua taxa de convergência é menor havendo, pois, um número adicional de iterações necessárias para a solução. No entanto, para uma mesma tolerância, isto é compensado, via de regra, pelo menor número de operações. Uma variação deste método iterativo é o Método da Rigidez Inicial o qual é utilizado neste trabalho e está detalhadamente descrito por Cook (1989).

$$f_{\text{int}}^e = \int_{\Omega_e} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} d\Omega_e \quad (9)$$

$$f_{\text{esc}} = A_{e \in \text{Adj}\Gamma_w} (-f_{\text{int}}^e / \Gamma_w) \quad (10)$$

2.3 Descrição do Código PoroNL

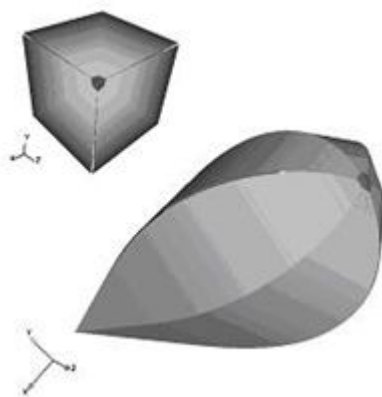
O código PoroNL representa o comportamento volumétrico de materiais independentes da temperatura e sujeitos a pequenas deformações elásticas e/ou plásticas. Para solução do sistema de equações não lineares utiliza-se o método da rigidez inicial. A atualização das tensões é feita através operador Euler avante (subincremental) com preditor tangente e retorno radial, sendo condicionalmente estável.

A aplicação desta envoltória tem sido alvo de vários estudos. Huang *et al.* (1990) salienta que o modelo do cap é particularmente apropriado em virtude de sua capacidade de tratar estado de tensões anteriores, dependência do passo de tensão, variação do volume e efeito da tensão principal intermediária. No entanto, atenção especial deve ser dada a determinação dos parâmetros a serem utilizados na sua formulação.

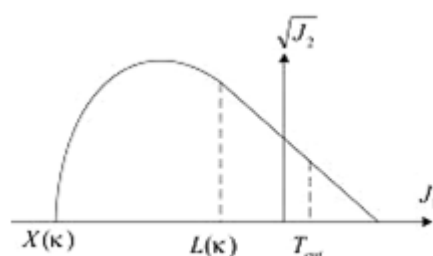
No trabalho realizado por Tisser (2004) e posteriormente implementado tridimensionalmente por Guevara Junior (2006), resultando no código PoroNL em sua versão atual, incorporou à superfície de escoamento a dependência do terceiro invariante de tensões desviatórias, reestruturando o modelo através da formulação do MEF para o elemento tetraedro linear.

Com o gradiente da função de escoamento definido, ou seja, diferenciável ao longo do plano octaédrico, persiste a necessidade de tratar a descontinuidade em $-\pi/6$ e $\pi/6$ no plano desviatório (Figura 2).

O capmodel, baseado no modelo de Shewer e Murray, é formado pela multiplicação entre as funções da superfície de ruptura por cisalhamento (Mohr Coulomb) e a superfície de endurecimento (cap), que resulta em uma função com comportamento suave (derivada contínua), conforme mostrado esquematicamente na Figura 3. Nela, κ é um parâmetro de endurecimento que controla o movimento da superfície do cap, e os parâmetros geométricos do capmodel $L(\kappa)$ e $X(\kappa)$ representam respectivamente, a intersecção da função F_f (função que representa a superfície de ruptura por cisalhamento) com F_c (função do endurecimento isotrópico). A descrição completa da formulação encontra-se no trabalho de Guevara Junior (2006).



**Figura 2 - Superfície implementada no espaço das tensões principais.
Reproduzido de Guevara Junior (2006).**



**Figura 3 - Superfície da função de escoamento do cap suave.
Reproduzido de Guevara Junior (2006).**

O modelo constitutivo implementado, PoroNL, necessita de oito parâmetros: sendo duas constantes elásticas: o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson; dois parâmetros de resistência: a coesão e o ângulo de atrito; dois parâmetros referentes ao cap elíptico: a posição inicial da interseção do cap com o eixo hidrostático X_0 e o fator de forma R , que relaciona o eixo principal maior com o eixo principal menor da elipse e por fim, duas constantes referentes à lei de endurecimento.

A determinação dos parâmetros do cap elíptico, fundamental para calibração do modelo, depende da determinação dos pontos de colapso hidrostático para diferentes caminhos de tensão. Os parâmetros podem ser calculados a partir de ensaios experimentais conforme descrito Soares (2000).

O parâmetro X_0 , que representa qualitativamente a sensibilidade do material ao colapso de poros será especialmente analisado através de sua variação neste estudo.

3 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS RELACIONADAS AO EFEITO DE POROCOLAPSO

Os reservatórios em rochas carbonáticas têm assumido um papel relevante na indústria do petróleo nacional em virtude das descobertas dos megacampamentos na região de Santos denominados pré-sal. Alves *et al.* (2007) realiza um trabalho de análise de estabilidade em poços de petróleo perfurados nesse tipo de maciço associando estudos experimentais a um modelo numérico e ressalta a escassez de estudos dedicados ao processo de compactação gerado por colapso hidrostático que ocorre tipicamente em materiais porosos e não

consolidados.

Apresenta-se uma avaliação da sensibilidade da formação ao porocolapso com variação de X_0 (parâmetro indicativo da resistência ao porocolapso do material, correspondendo a interseção do cap com o eixo hidrostático) com o objetivo de avaliar os modos de falha existentes. Para tal, foi utilizada como referência a análise elastoplástica efetuada por Polillo Filho (1987) em um poço horizontal. A formação é caracterizada pelos seguintes parâmetros, respectivamente descritos na Tabela 1 (módulo de elasticidade, coesão, tensão efetiva vertical, tensão efetiva horizontal mínima, pressão estática do reservatório, coeficiente de Poisson:

Formação	E(Kgf/cm ²)	C(Kgf/cm ²)	S'v(Kgf/cm ²)	S'h(Kgf/cm ²)	Pe(Kgf/cm ²)	v
Arenito	263.463,81	81,59	370,31	174,26	321,86	0,32

Tabela 1 - Parâmetros característicos da formação (Polillo Filho, 1987).

Pela referência, os resultados são obtidos a partir de uma malha de elementos finitos isoparamétricos de oito pontos nodais e infinitos parametrizados (refinamento maior nas proximidades do poço), regra de integração 2x2 e é composta de 620 elementos e 1828 nós. A malha utilizada no PoroNL compõe-se de um modelo em elementos finitos do tipo tetraedro linear, composto por 31500 elementos e 10812 nós, sendo mais refinada próximo ao poço. Trata-se de uma malha gerada em software comercial, ANSYS, para definição da geometria. Em virtude da simetria deste problema, o modelo representa um setor circular de 90°, com os devidos travamentos e carregamentos para simulação das condições de contorno do maciço conforme Figura 4.

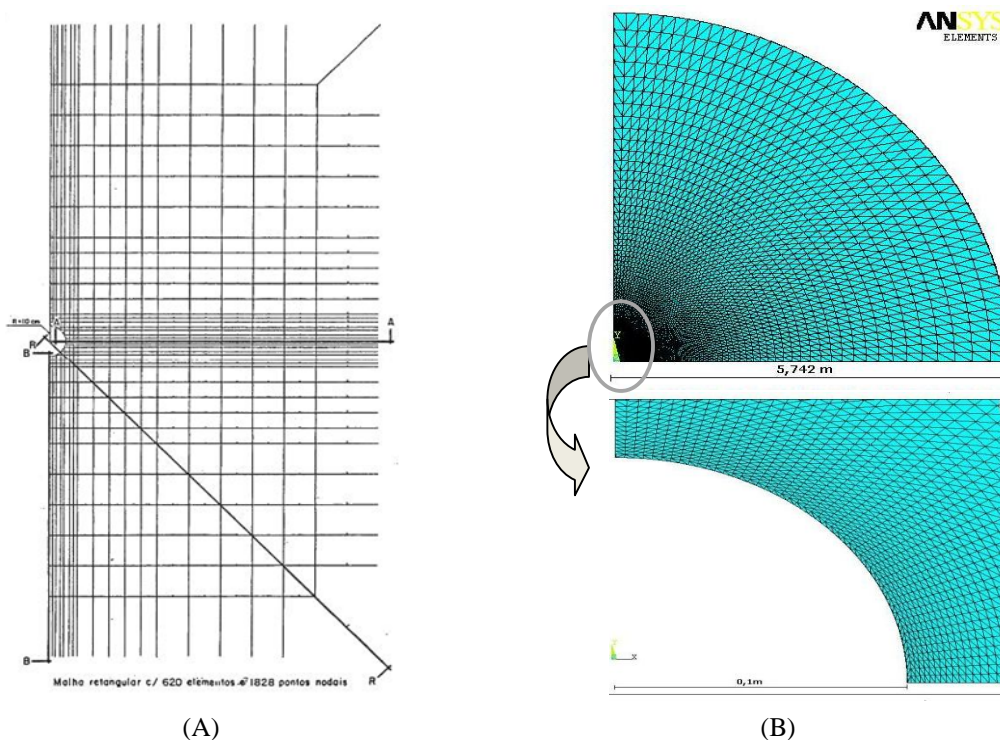


Figura 4 - (A) Malha retangular. Reproduzido de Polillo Filho (1987).

(B) Malha utilizada pelo código PoroNL

Segundo a referência, para um diferencial de pressão poço-formação (ΔP) entre 200-250 kgf/cm^2 , inicia-se um aumento das tensões compressivas, culminando em seu colapso por esmagamento. Para ΔP entre 0-50 kgf/cm^2 , identifica-se uma região plastificada correspondente a falha por cisalhamento.

Para este diferencial de pressão, o aplicativo PoroNL não convergiu, identificando plastificação para valores entre 69,50 kgf/cm^2 e 119,68 kgf/cm^2 . Sujeito a pressões superiores a esta, o material comporta-se elasticamente até o reinício da plastificação por esmagamento a um diferencial de pressão de 185,96 kgf/cm^2 (7% menor que o limite inferior estabelecido pela referência de 200 kgf/cm^2).

3.1 Análise Qualitativa

3.1.1 $\Delta P=0-50 \text{ kgf/cm}^2$

Como mencionado anteriormente, o PoroNL converge inicialmente com plastificação de 398 elementos para $\Delta P=69,75 \text{ kgf/cm}^2$. Este resultado foi comparado com o primeiro resultado apresentado pela referência ($\Delta P=50 \text{ kgf/cm}^2$). Apresenta-se também a superfície de ruptura com os estados de tensões e identificação dos elementos plastificados, no intuito de ressaltar a equiparidade entre os critérios. Com a redução de X_0 até o menor valor convergente (45MPa), associando-se assim a redução da resistência do material ao porocolapso, o número de elementos plastificados aumenta de 398 para 1058.

A [Figura 5](#) compara o estado de tensões representado na superfície de Mohr-Coulomb com a variação da influência do cap de acordo com seu parâmetro X_0 . Já a [Figura 6](#) exibe um comparativo das regiões plastificadas.

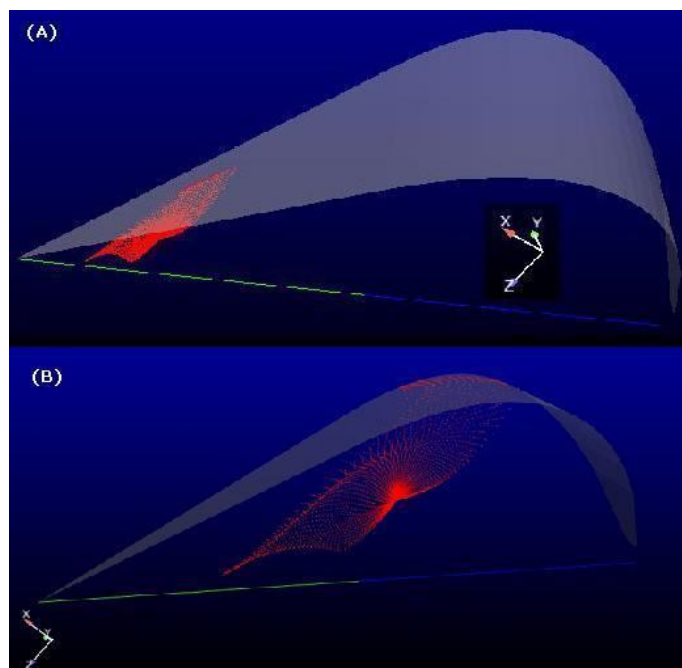
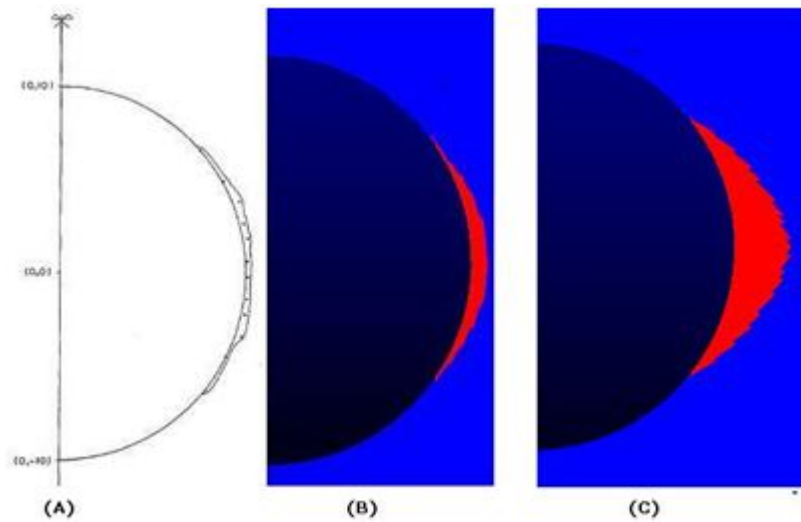


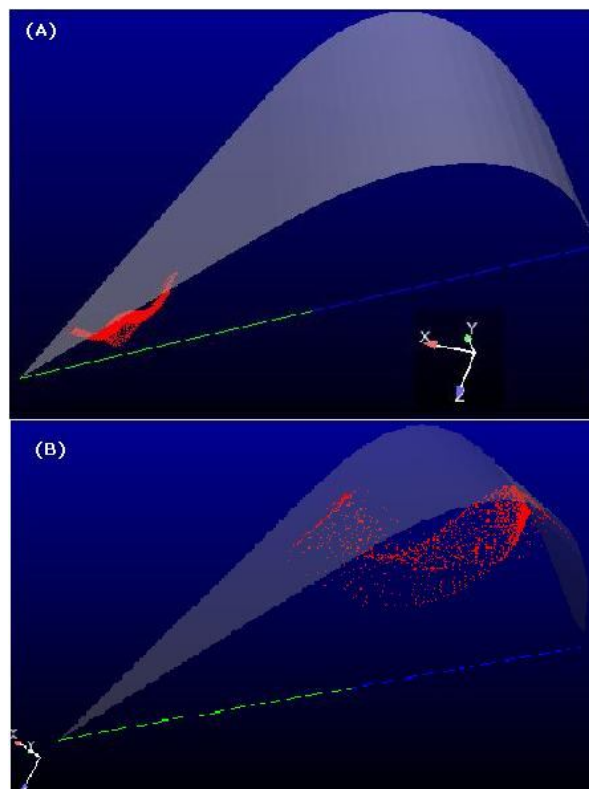
Figura 5 - Superfície de Mohr Coulomb com cap:
(A) PoroNL: $X_0=150\text{MPa}$; (B) PoroNL: $X_0=45\text{MPa}$



**Figura 6 - Áreas Plasticadas: (A) Referência $\Delta P=50\text{kgf/cm}^2$; e $\Delta P=69,75\text{ kgf/cm}^2$;
(B) PoroNL: $X_0=150\text{MPa}$; (C) PoroNL: $X_0=45\text{MPa}$.**

3.1.2 $\Delta P=250\text{ kgf/cm}^2$

Com este diferencial de pressão, o aumento das tensões compressivas gera o esmagamento do solo, culminando na existência de uma área plasticada na região de maior concentração de tensões devido a magnitude da tensão vertical atuante. Ambos os programas indicam esta região. Neste último, identificou-se a plasticificação de 240 elementos. Com a redução de X_0 até o menor valor convergente (25MPa), o número de elementos plasticados aumenta de 240 para 12570, como mostrado na [Figura 7](#).



**Figura 7 - Superfície de Mohr Coulomb com cap $\Delta P=250\text{ kgf/cm}^2$.
Copyright © 2010 Asociación Argentina de Mecánica Computacional <http://www.amcaonline.org.ar>
(A) $X_0=150\text{MPa}$ e (B) $X_0=25\text{MPa}$.**

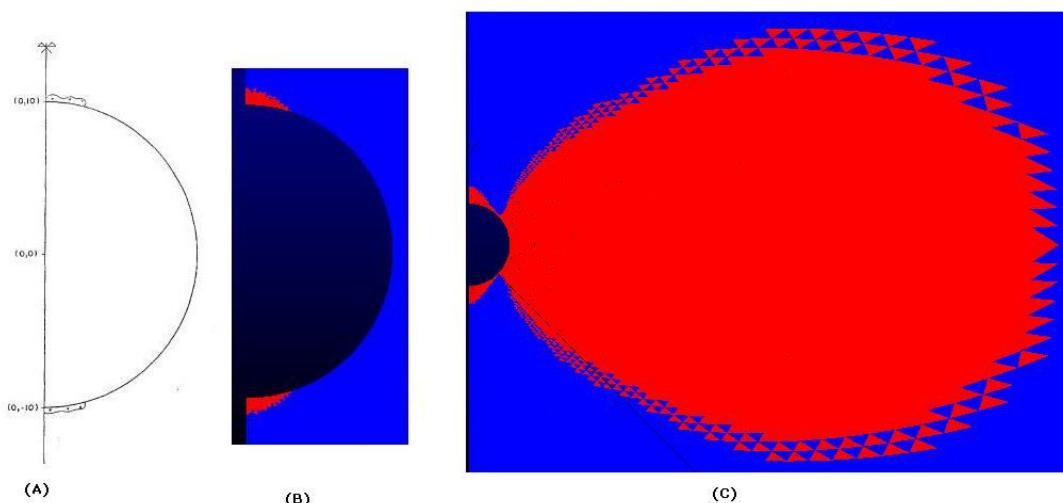


Figura 8 - Áreas Plasticadas $\Delta P=250\text{kgf/cm}^2$: (A) Referência; (B) PoroNL: $X_0=150\text{MPa}$; (C) PoroNL: $X_0=25\text{MPa}$.

Faz-se necessário comentar, a partir da [Figura 8](#), que um aumento de pressão interna no poço potencializa os efeitos de plastificação. Em se considerando somente o critério de Mohr Coulomb, há plastificação somente (na direção da componente vertical do poço), topo e base do poço horizontal, conforme identificado por Polillo Filho (1987) e pelo código PoroNL com a superfície de fechamento (cap) sem interferir no estado de tensões, ou seja, o material sendo resistente ao colapso de poros (X_0 alto). Todavia, em se considerando o material mais sensível ao porocolapso (reduzindo-se X_0), vê-se que ocorre plastificação também nas laterais do poço, numa área de maior extensão, com possibilidades reais de ocorrência de instabilidades.

3.1.3 $\Delta P=400\text{ kgf/cm}^2$

Percebe-se que o aumento do diferencial de pressão aplicado implica em uma maior plastificação, identificada por ambos os modelos. Observa-se que as formas das áreas plastificadas divergem, consequência da diferença entre as malhas utilizadas pela referência e pelo aplicativo PoroNL. Tal comportamento também é observado para um $\Delta P=500\text{ kgf/cm}^2$.

Diferentemente do resultado obtido para um diferencial de 250 kgf/cm^2 no qual houve aumento significativo da área plastificada, para um $\Delta P=400\text{ kgf/cm}^2$, ocorre plastificação nas laterais do poço, porém em menor escala quando o material é considerado mais sensível ao efeito do porocolapso com a redução de X_0 . Com variação de X_0 de 150MPa para 30MPa , houve aumento no número de elementos plastificados de 1551 para 4785 ([Figura 9](#) e [Figura 10](#)).

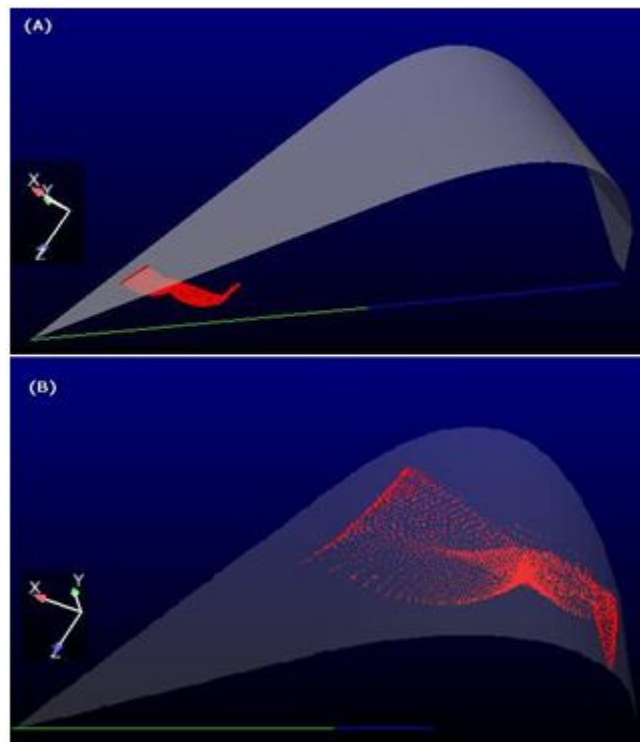


Figura 9 - Superfície de Mohr Coulomb com cap $\Delta P=400 \text{ kgf/cm}^2$.
(A) $X_0=150\text{MPa}$ e (B) $X_0=30\text{MPa}$.

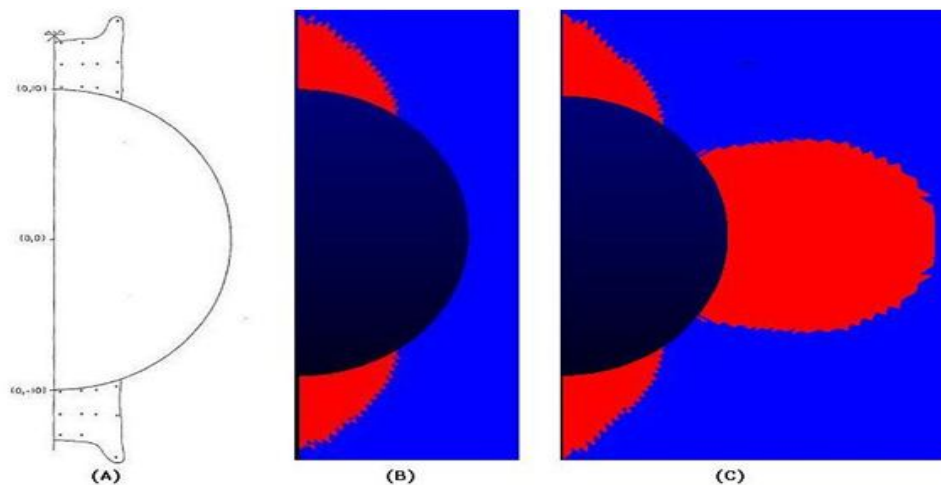


Figura 10 - Áreas Plastificadas $\Delta P=250\text{kgf/cm}^2$: (A) Referência;
(B) PoroNL: $X_0=150\text{MPa}$; (C) PoroNL: $X_0=30\text{MPa}$.

Ensaio realizado em amostras descritos por Tundi *et al.* apud Baud *et al.* (2009) revelam que rochas carbonáticas estão sujeitas a um número complexo de modos de falha envolvendo zonas de compactação e deformação.

Baud *et al.* (2009) realiza experimentos laboratoriais em dois tipos de rochas carbonáticas identificando seus modos de falha e comportamentos. Sob altas tensões de confinamento, segundo seus estudos, o esmagamento dos grãos nas amostras analisadas é identificado como o mecanismo de deformação dominante e o nível de isotropia da falha está aparentemente ligado ao histórico de plastificação da amostra.

Diferentes tipos de rochas carbonáticas e seus respectivos valores de porosidade revelam valores de tensão equivalentes a resistência ao porocolapso (X_0) entre 17 e 60 MPa em ensaios hidrostáticos (Figura 11). Com os valores obtidos para X_0 durante as simulações numéricas variando entre 25 e 45MPa, vê-se que tal comportamento é representativo do que se encontra em campo.

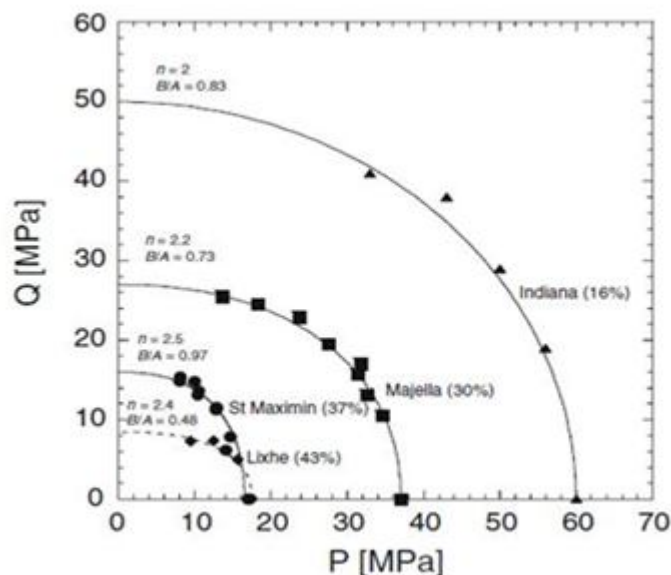


Figura 11 - Envelopes de ruptura em rochas carbonáticas e suas porosidades iniciais.

Reproduzido de Baud *et al.*, 2009.

3.2 Análise Quantitativa

A seqüência de gráficos a (1 a 6) seguir expõe os resultados obtidos para as tensões radiais, circunferenciais e tangenciais ao longo do eixo AA, paralelo ao eixo x à medida que se afasta da parede do poço (Figura 4). Foi considerado $\Delta P = 250 \text{ kgf/cm}^2$ para comparação com os resultados obtidos pela referência e também variação de X_0 no PoroNL de $X_0 = 150 \text{ MPa}$ (valor proposto por Coelho (2001)) para $X_0 = 25 \text{ MPa}$ (menor valor convergente obtido pelo código PoroNL).

Pelas diferenças já observadas nas áreas plastificadas, as tensões apresentam valores diferenciados quando comparadas àqueles obtidos para os materiais menos sensíveis ao porocolapso (superfície de fechamento afastada suficientemente do estado de tensões analisados, equivalendo-se a um critério de Mohr Coulomb isoladamente). Essas distorções são identificadas principalmente na vizinhança do poço.

Essa diferença em módulo nas tensões mostra como a alteração na sensibilidade do material ao porocolapso altera o estado de tensões em todo o material, ressaltando a necessidade de estudos detalhados sobre o colapso de poros bem como a correta caracterização da rocha e seus parâmetros anteriores ao projeto de poço.

Com o afastar do poço, as diferenças se reduzem. No entanto, observam-se instabilidades nos valores principalmente nas proximidades da parede do poço. Os ruídos observados podem ser conseqüência do tripé elemento (tetraedro linear), geometria (não garantia do estado plano de deformação) e da ferramenta utilizada para obtenção dos valores através do pacote de pós-processamento ENSIGHT, denominada "linetool". A primeira em relação à malha deve-se a incapacidade de elementos de baixa ordem representar estados incompressíveis visto que o

código PoroNL utiliza o tetraedro linear de 4 nós, com deformação constante. A segunda, em relação à geometria, em virtude da não representatividade fidedigna do estado plano de deformação cujas hipóteses foram assumidas no trabalho de Polillo Filho (1987) e nas simulações com o PoroNL. A ferramenta de pós-processamento usada, ENSIGHT, através de uma “*linetool*” fornece os resultados ao longo de um segmento de reta sem tratamento prévio algum contribuindo assim para as instabilidades também.

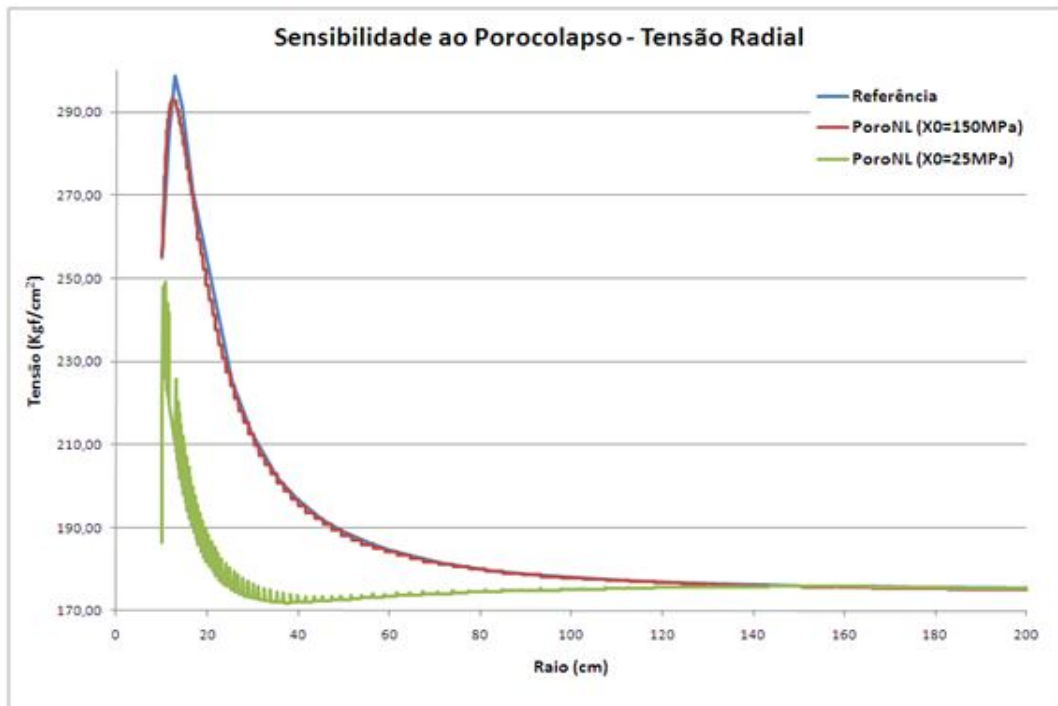


Gráfico 1 - Poço horizontal – tensão radial: visão geral.

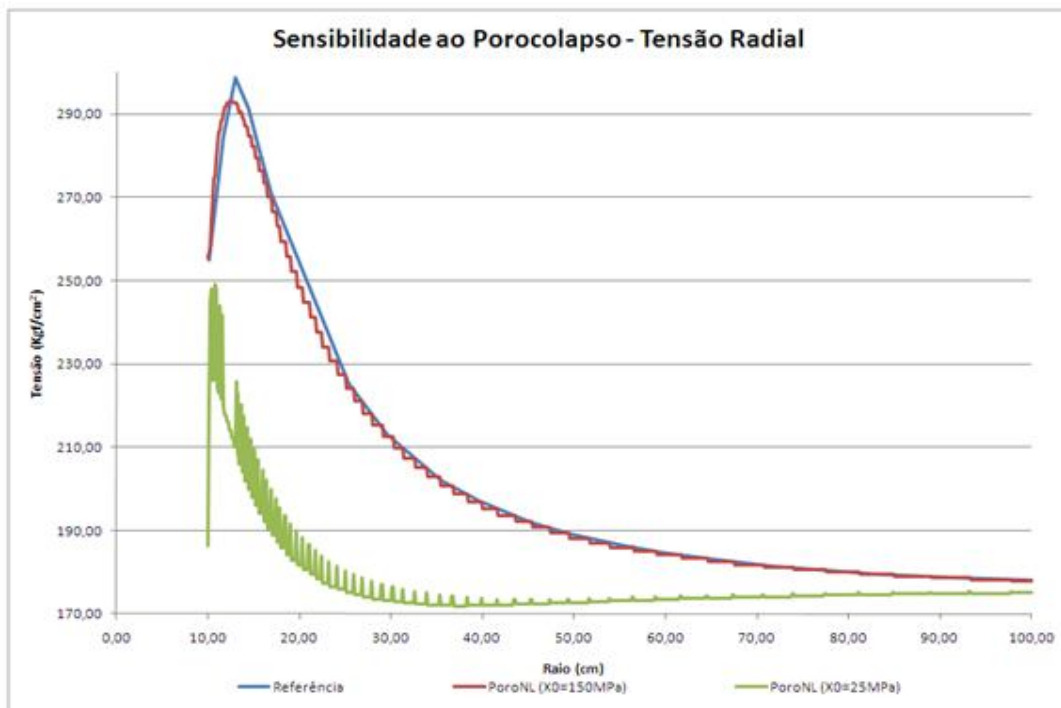


Gráfico 2 - Poço horizontal – tensão radial: detalhe próximo à parede do poço.

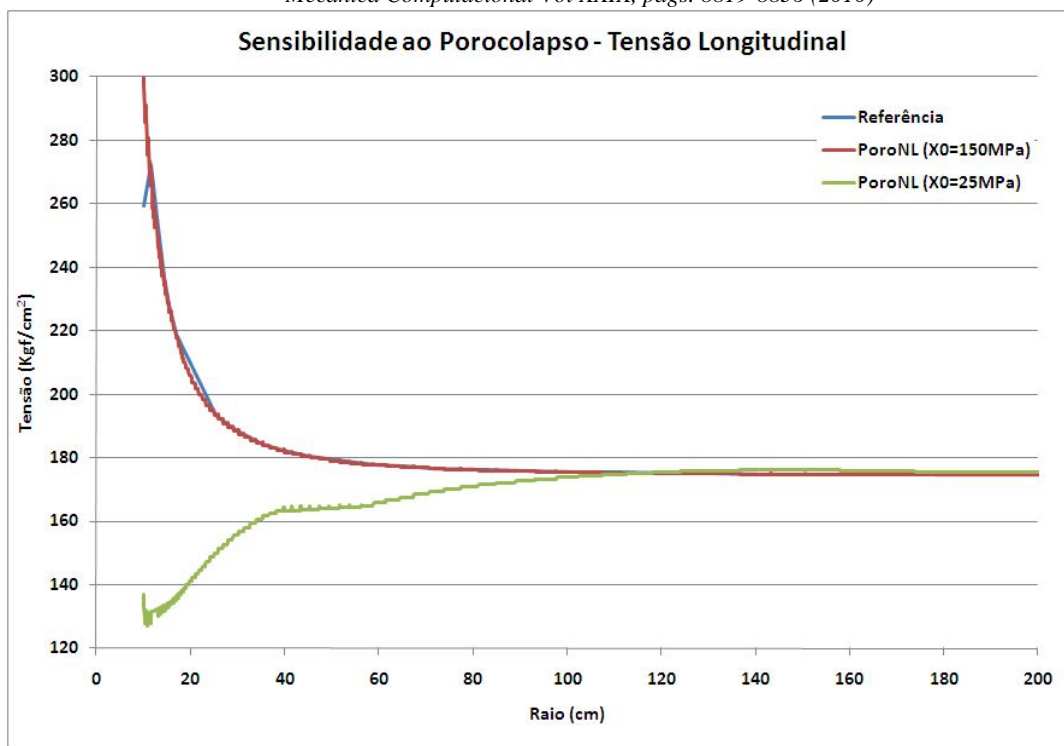


Gráfico 3 - Poço horizontal – tensão longitudinal: visão geral.

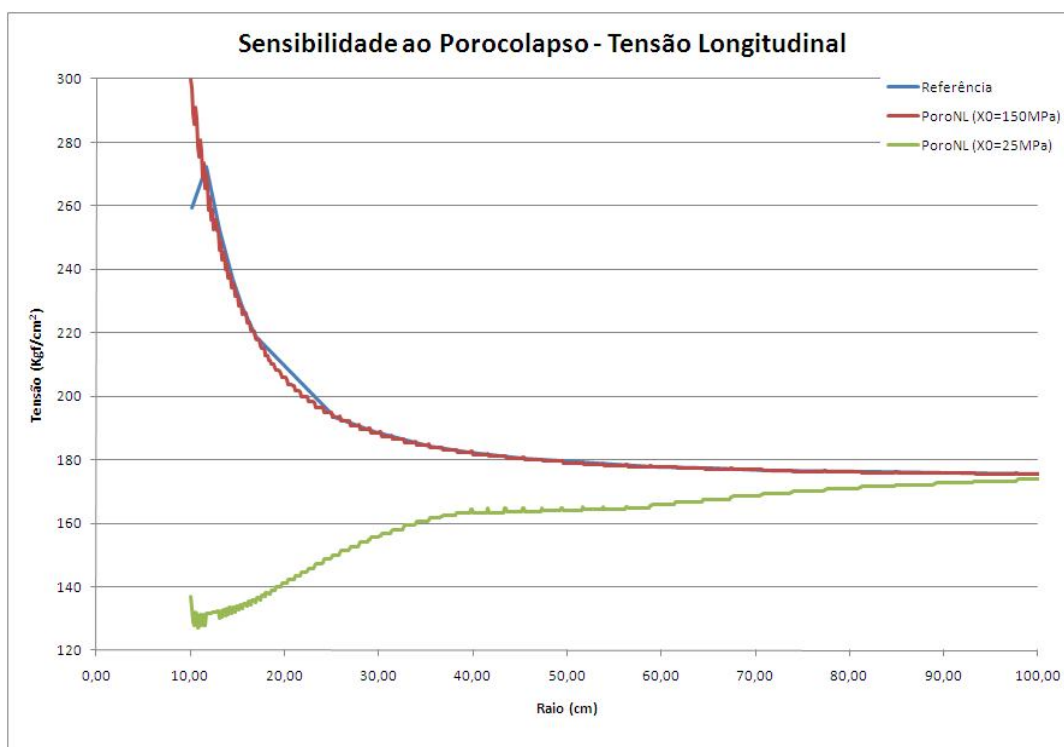


Gráfico 4 - Poço horizontal – tensão longitudinal: detalhe próximo à parede do poço.

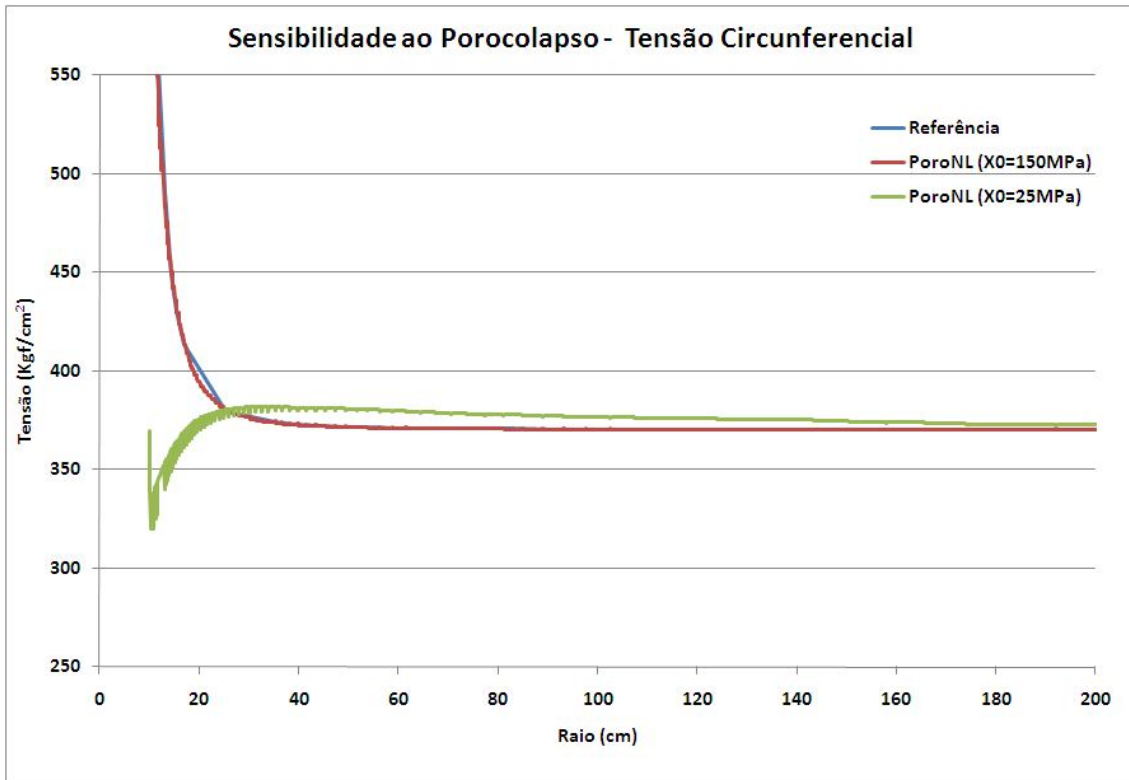


Gráfico 5 - Poço horizontal - tensão circunferencial: visão geral.

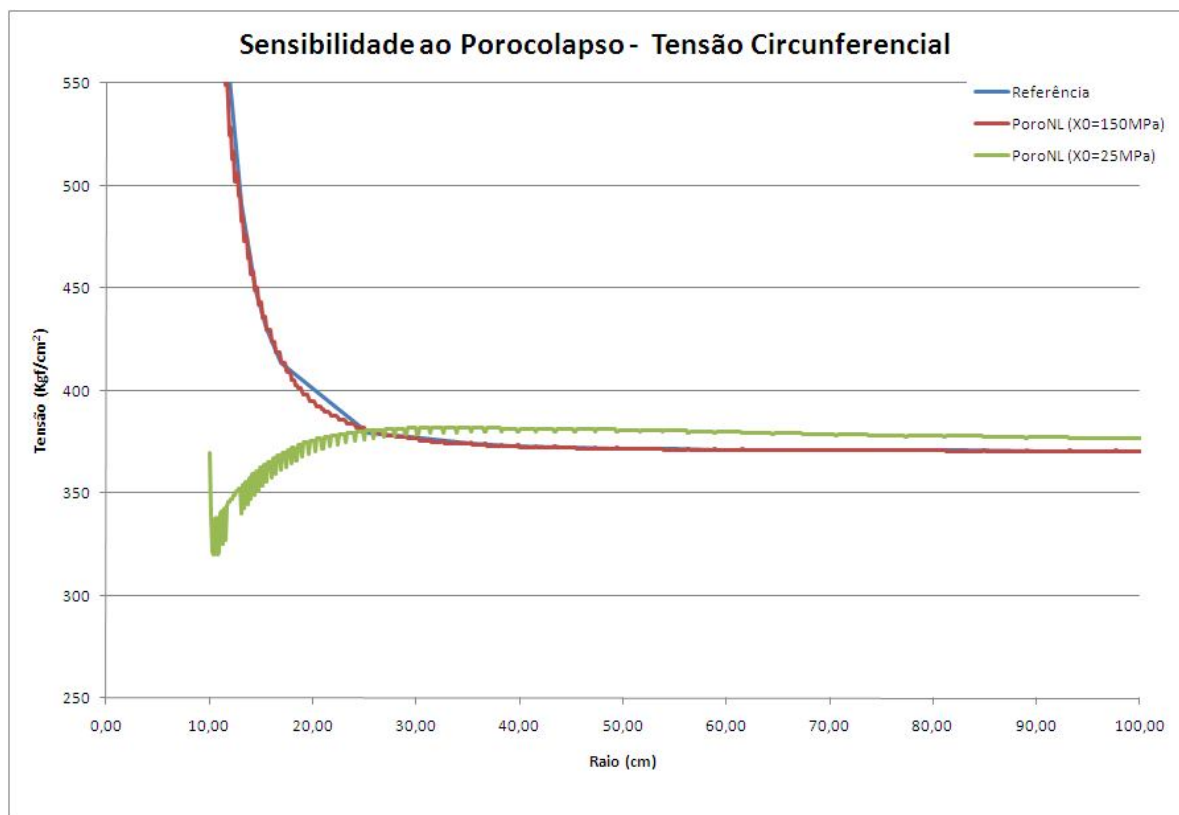


Gráfico 6 - Poço horizontal - tensão circunferencial: detalhe próximo à parede do poço.

4 CONCLUSÕES

4.1 Resumo

Este trabalho apresentou uma avaliação da sensibilidade de um código elastoplástico em elementos finitos, PoroNL, baseada nos mais recentes resultados obtidos pelo estado da arte em estabilidade de poços com ênfase no estudo do porocolapso (fenômeno típico de rochas carbonáticas).

O aplicativo em questão foi implementado computacionalmente: trata-se de uma análise não linear de material isotrópico com plasticidade perfeita. A superfície de ruptura é uma associação entre uma superfície de fechamento (cap) com o modelo de Mohr-Coulomb.

O código PoroNL apresenta como grande vantagem sua versatilidade para geometrias complexas como poços multilaterais, interseção de poços, diversidade de formações, aspecto importante para os recentes desafios da indústria do petróleo.

Os resultados encontrados mostraram falhas por colapso de poros, típicas de maciços carbonáticos, apresentam regiões diferenciadas de plastificação, distintas daquelas comumente encontradas em análises plásticas com cisalhamento puro. Tais resultados enfatizam a necessidade de estudos mais detalhadas neste assunto.

4.2 Conclusões e Contribuições

O código PoroNL, cuja implementação mais recente foi realizada por Guevara Junior (2006), possibilita a análise de diversos materiais e geometrias a partir de seu caráter tridimensional com a suavização do interface entre as superfícies do cap e o modelo de ruptura além da incorporação das forças de escavação realizada por Tisser (2004).

Considera-se que os objetivos desta pesquisa foram atingidos, tendo em vista os resultados da análise de sensibilidade aqui expostos. Como observações complementares, o código PoroNL encontra-se em conformidade com os resultados apresentados por Polillo Filho (1987), principalmente em relação ao estado de tensões à medida que se afasta da parede do poço (Vilella, 2010). Instabilidades próximas a parede foram observadas tendo como possíveis causas o tripé: malha gerada por elementos de baixa ordem, incapazes de representar estados incompressíveis; a geometria do problema e não garantia do estado plano de deformação e a ferramenta utilizada no pós-processamento, o Enight, o qual utiliza, sem nenhum tratamento prévio, os resultados obtidos. Ressalta-se que a malha mais refinada do PoroNL favoreceu a observação de pontos de singularidade de tensão.

Por fim, a avaliação da sensibilidade de um material ao porocolapso (falha do material devido a redução brusca de sua porosidade e permeabilidade devido as elevadas tensões hidrostáticas) identificou uma região de plastificação diferente daquela observada em rupturas típicas de cisalhamento, para materiais não submetidos ao porocolapso (cisalhamento puro).

Baud *et al.*, (2009) apresentou resultados experimentais em porocolapso de rochas carbonáticas com porosidades semelhantes aquela utilizada nos experimentos numéricos deste trabalho, comprovando a veracidade dos parâmetros utilizados na análise numérica.

Para baixos pesos de fluido, houve não-convergência numérica, apesar da identificação da ocorrência de plastificação. Contudo, tal fato não necessariamente implica em ruína total do material visto que o modelo físico se comporta diferentemente do modelo numérico.

REFERÊNCIAS

- Alves, J.L.D., Coelho, L.C., Baud, P., *et al.*, 2007, “Estabilidade de Poços em Rochas Carbonáticas”, 4^o DPETRO.Campinas, São Paulo. Brasil.
- Ansys - Simulation Driven Product Development. Disponível em <http://www.ANSYS>

- [.com/>](#).
- Baud, P., Vinciguerra, S., Cavallo, A., *et al.*, 2009, “*Compactional and Failure in High porosity carbonates: Mechanical data and Microstructural Observations*”, Pure and Applied Geophysics, 166, pp. 869-898.
- Coelho, L. C., 2001, “*Modelos de Ruptura de poços de Petróleo*”, Tese D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Cook, R.D., Malkus, D.S., Plesha, M.E., (1989), “*Concepts and Applications of Finite Element Analysis*” 3th Edition. University of Wisconsin – Madison.
- Costa, A. M., 1984, “*Uma Aplicação de Métodos Computacionais e Princípios de Mecânica das Rochas no Projeto e Análise de Escavações Destinadas à Mineração Subterrânea*”, Tese DSc. do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. Brasil.
- Ensign, ENSIGHT Visualization Software. Disponível em <http://www.ENSIGHT.com/>
- Guevara Junior, N.O., 2006, “*Implementação Computacional de um Modelo Constitutivo para o Tratamento de Poro-Colapso em Meios Porosos*”, Tese MSc. do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. Brasil.
- Huang, T.K., Chen, W.F., 1990, “*Simple Procedure for Determining Cap-plasticity-model Parameters*”, Journal of Geotechnical Engineering, v. 116, No. 3, pp. 492-513.
- Mohiuddin, M.A., Khan, K., Abdurraheem, A., 2007, “*Analysis of Wellbore Instability in Vertical, Directional, and Horizontal Wells Using Field Data*”, 2006, Journal of Petroleum Science and Engineering, v.55, pp. 83-92.
- Petrobras, 2010, “*Plano Estratégico Petrobras 2020. Plano de Negócios 2010-2014*”. Disponível em www.petrobras.com.br. Acesso em 25 de agosto de 2010.
- Polillo Filho, A., 1987, “*Um Procedimento para Análise de Estabilidade e Fraturamento de Poços de Petróleo*”, Tese M.Sc., Escola de Minas/UFOP, Minas Gerais, Brasil.
- Soares, A. C., 2000, “*Um Estudo Experimental para Definição de Colapso de Poros em Rochas Carbonáticas*”, Tese M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Tisser, A. D., 2004, “*Um Modelo Constitutivo para Análise de Estabilidade de Poços de Petróleo*”, Tese M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Villarroel, F.M.G., ARAÚJO, E.M.P., FONTOURA, S.A.B., 2004, “*Parametric Analysis of Wellbore Stability*”, XXV CILAMCE (Iberian Latin American Congress on Computational Methods), Pernambuco, Brasil.
- Villela, J., 2010, “*Avaliação da Sensibilidade de um Modelo Elastoplástico em Elementos Finitos para a Análise de Estabilidade em Poços de Petróleo*”, Tese MSc. do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. Brasil.
- Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., 2000, “*The Finite Element Method – Volume 2: Solid Mechanics*”. 5ª edição.