



Copyright 2005, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

ANÁLISE NUMÉRICA 3D DE CANHONEIO UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

S. M. S. Freitas¹, J. R. Silvestre², B. P. Jacob², A. C. Soares¹, J. A. C. M. dos Santos¹, A. F. Borges¹, L. C. Coelho², P. M. Matta²

¹ Centro de Pesquisas da Petrobras, Cidade Universitária, Quadra 7, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ CEP 23458-000, sergiomsf@petrobras.com.br

² LAMCSO – Laboratório de Métodos Computacionais e Sistemas Offshore – Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Centro de Tecnologia, Bloco I-2000, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ 21945-970, breno@pec.coppe.ufrj.br

Resumo – A tecnologia do canhoneio tem evoluído muito nas últimas duas décadas, com impactos comprovados na produtividade dos poços. A bibliografia especializada mostra investimentos feitos, tanto no projeto de novos canhões e tipos de carga, como também na área de modelagem física e numérica, voltados para subsidiar o dimensionamento das operações de canhoneio.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta numérica 3D, utilizando o método de elementos finitos, para tratamento do problema de fluxo em poços canhoneados verticais. Nesta linha de trabalho foram realizados estudos que abrangem a gradação ou refinamento da malha, a validação do modelo e por fim estudos paramétricos que servem para demonstrar o potencial da ferramenta numérica.

Palavras-Chave: canhoneio, completação, elementos finitos e modelagem 3D.

Abstract – The technology of perforating has been developed very much in the last decades, with impacts on production enhancement. The specialized literature shows investments has been done, either on new perforators projects and type of charges, or in the physics and numerical modeling area subsidize the perforating plane of operations.

This work shows the development of a 3D numerical model, using the finite element method, for the treatment of flux problem in vertical perforated wells. It was carried out studies that enclose gradation or refinement of mesh, a validation of model and finally parametric studies. The parametric studies serve to show the potential of numerical tool.

Keywords: perforation, completion, finite elements and 3D model

1. Introdução

O planejamento efetivo das operações de canhoneio é um fator de grande importância para o sucesso econômico de um poço. Tentando prever a produção de poços canhoneados, modelos matemáticos têm se mostrado uma alternativa para este objetivo. Os primeiros trabalhos nesta área datam das décadas de 60 e 70, quando os programas numéricos e computadores passaram a ser ferramentas disponíveis. Harris (1966), através do método de diferenças finitas, determinou a produtividade de poços canhoneados, simplificando a geometria das perfurações para uma forma de cunha. Hong (1975), aprimorando o processo de Harris, obteve resultados para cargas com diversos ângulos de fase, inclusive considerando a região de dano ao redor do poço. Klotz (1974), implementando o método de elementos finitos, avaliou a produtividade das perfurações considerando um dano causado pelo canhoneio. Locke (1981), realizou estudos considerando a geometria tridimensional do canhoneio, dano na formação e canhoneio. Tariq (1987), por meio de um intenso estudo paramétrico numa geometria tridimensional, elaborou soluções semi-analíticas para o fluxo em poços canhoneados. Ansah (2002), utilizando elementos finitos, realizou estudos paramétricos envolvendo túneis com geometria complexa e reservatórios de grandes dimensões.

Este trabalho tem por objetivo uma representação mais realista do problema de fluxo em poços canhoneados, através da distribuição em forma de espiral das cargas na parede do poço, a adoção de uma forma não cilíndrica para os túneis, anisotropia de permeabilidade e a consideração da existência de danos na formação e no canhoneio. A ferramenta numérica aqui apresentada visa à adequação dos canhoneios as formações e aos poços.

Para solução do problema de fluxo foi criado um aplicativo de geração de malha automático que roda no pré e pós-processador *MSC.Patran* e utiliza como *solver* o programa de elementos finitos *MSC.Marc*. O problema de fluxo foi resolvido utilizando-se as equações do problema térmico pela analogia entre as equações dos dois problemas. A equação de difusividade para o problema de fluxo está descrita na equação (1).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial P}{\partial z} \right) = \phi c \frac{\partial P}{\partial t} \quad (1)$$

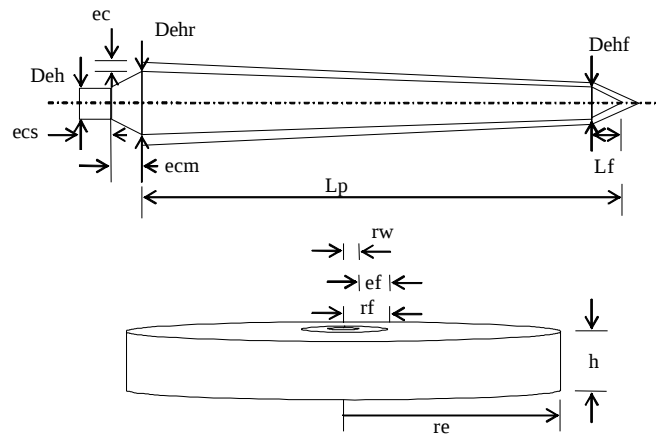
onde P é a pressão no fluido, ϕ a porosidade, c a compressibilidade, t o tempo, K_{xx} , K_{yy} e K_{zz} representam as permeabilidades na direções x , y e z respectivamente.

2. Aplicativo de geração de malhas

A construção de malhas para representação de um poço vertical canhoneado é uma tarefa demorada e que exige pré-processadores de alto desempenho. Visando agilizar este processo e buscando a garantia de se obter modelos padronizados, foi desenvolvido um aplicativo de geração automática de malhas. Este aplicativo escrito na Linguagem *PCL (Patran Language Command)*, trabalhando em conjunto com o pré e pós-processador *MSC.Patran*, permitiu a customização da geração de malhas. Esta customização consistiu na divisão do modelo do poço em alguns sólidos e na identificação de regiões com uma maior necessidade de refinamento, como por exemplo os túneis perfurados. Com este aplicativo, o usuário pode especificar uma configuração de carga pré-definida ou definir todos os parâmetros de uma nova carga. Além dos parâmetros geométricos, podem ser especificadas as propriedades do reservatório e das regiões de dano.

Geometricamente, o modelo do poço vertical canhoneado é descrito como um cilindro de grandes dimensões com raio externo (r_e) muito maior que o raio interno (r_w), constituído por uma série de túneis, dispostos numa forma de espiral, situados ao longo da parede do poço. A geração de danos na rocha-reservatório durante os processos de perfuração e canhoneio do poço, foram bem definidas no modelo. O dano da formação é representado como uma camada na vizinhança do poço. O dano do canhoneio é representado como uma camada ao redor do túnel. Uma representação esquemática do modelo do poço vertical e de um túnel é apresentada na Figura 1.

A forma adotada para o perfil longitudinal do túnel está baseada em ensaios experimentais, sendo indicada por Ansah (2002) como a mais representativa de operações de canhoneio bem dimensionadas. A Figura 2 ilustra alguns detalhes da malha construída com o aplicativo. Na Figura 2a, indicada nas cores verde, vermelho e amarelo estão representados, respectivamente, os túneis e os danos do canhoneio e da formação. Na Figura 2b pode ser vista, de topo, a malha do reservatório.



Deh – diâmetro de entrada do túnel; Ecs – espessura do revestimento; Ecm – espessura da cimentação; Dehr – Diâmetro do túnel na face rocha/reservatório; Ec – espessura do dano do canhoneio; Dehf – Diâmetro da ponta do túnel; Lf – comprimento da ponta do túnel; Lp – comprimento do túnel; Rw – raio do poço; Re – raio externo; Ef – espessura do dano na formação; Rf – raio do dano na formação e a h – altura do poço

Figura 1 – Esquema do modelo do poço vertical e do túnel criado pelo canhoneio

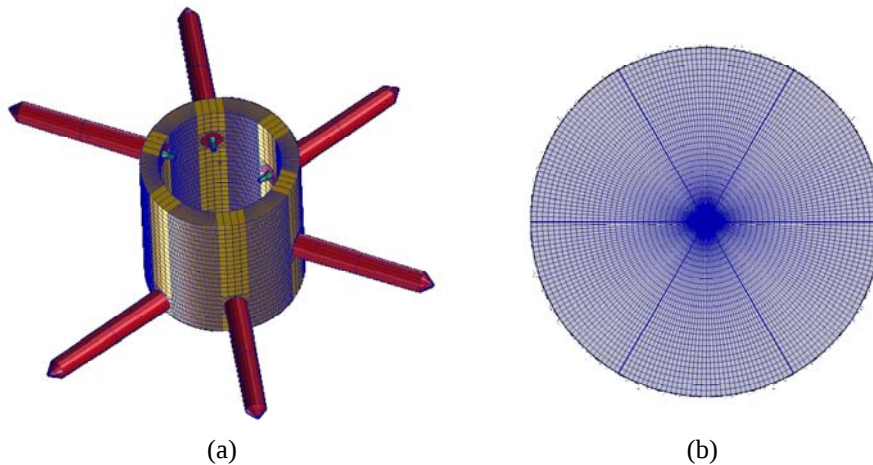


Figura 2 – Malha do poço vertical canhoneado: (a) detalhe da parte interna do poço: túneis e danos da formação e canhoneio e (b) malha do reservatório

3. Estudo de refinamento

Foram construídas dezessete malhas, utilizando os elementos hexaédricos de 8 e 20 nós. O elemento de 20 nós não se mostrou vantajoso para este estudo, uma vez que na simulação de fluxo em um poço, as direções mais sensíveis ao refinamento são a radial e a tangencial. Uma maior discretização ao longo da altura do poço só aumenta o esforço computacional sem grandes diferenças na resposta (Freitas et al., 2004).

O modelo construído tinha as seguintes características geométricas: raio do poço 8,5 in, raio externo 100 vezes o raio do poço, altura do reservatório (h) 3 ft, comprimento do túnel igual (Lp) 11 in, diâmetro de entrada do túnel (Deh) 0,41 in, extensão do dano na formação (ef) e no canhoneio (ec) 1,75 e 0,5 in respectivamente. Foi utilizada uma configuração de carga é de 6 tiros por pé (spf). As propriedades dos materiais foram: permeabilidade de rocha (k) 1000 mD, permeabilidade na zona danificada pelo canhoneio (kc) 100 mD, relação entre as permeabilidades vertical e horizontal 0,1 e viscosidade do fluido (μ) 600 cP. O diferencial de pressão aplicado foi 215 kgf/cm².

A Figura 3 apresenta os resultados de velocidade de fluxo na borda externa do modelo para dois grupos de malhas com elementos de 8 nós com diferentes refinamentos. A diferença entre os dois grupos é o refinamento na seção transversal do túnel, que muda a forma de octogonal para cilíndrica. Cada ponto no gráfico representa um nível de refinamento. Foi adotada a malha com aproximadamente 175.000 nós do grupo túnel cilíndrico.

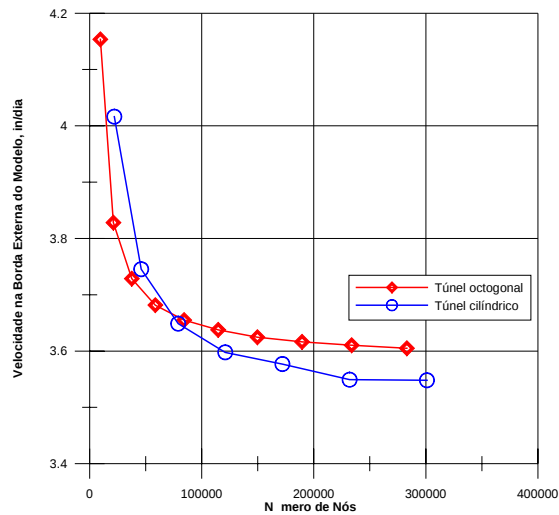


Figura 3 – Gráfico de velocidade na borda externa da malha versus número de nós

4. Validação do Modelo

Selecionada a malha, os resultados obtidos com o solver *Marc* foram comparados com a solução semi-analítica apresentada por Tariq (1987). Elaborada a partir de várias simulações numéricas, esta solução relaciona a influência dos diversos parâmetros geométricos e de material com a produção de poços. O resultado é comparado em termos da razão de índice de produtividade (PR), que é a razão entre os índices de produtividade (J) do poço canhoneado e do poço aberto, definida em (2). O índice de produtividade está definido em (3). Nas equações (2) e (3), q representa a vazão, ΔP a diferença de pressão entre o poço e o limite do reservatório, s_t o *skin* total, k permeabilidade e μ a viscosidade dinâmica.

$$PR = \frac{J_{\text{poço canhoneado}}}{J_{\text{poço aberto ideal}}} = \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) + s_t} \quad (2)$$

$$J_{\text{poço aberto ideal}} = \frac{q}{\Delta P} = \frac{2\pi k h}{\mu \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} \quad (3)$$

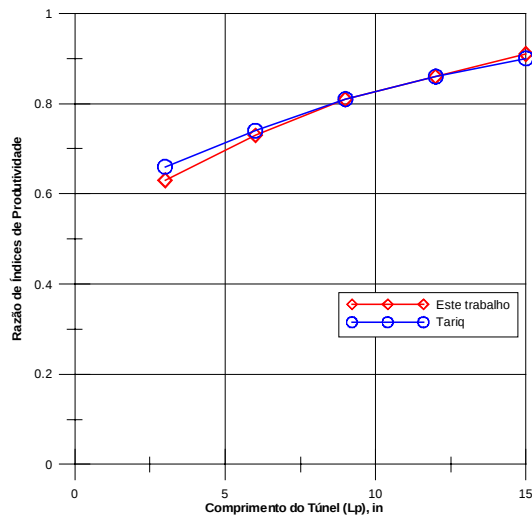


Figura 4 – Validação de resultados com a solução semi-analítica de Tariq

A validação usou uma carga de 4 spf, raio do poço 6 in, raio externo 60 vezes o raio do poço, e diâmetro uniforme dos túneis com 0,4 in. Não foram considerados danos. Neste caso quaisquer valores de permeabilidade e diferencial de pressão podem ser adotados. A Figura 4 ilustra os resultados obtidos para uma faixa de comprimento de túnel de 3 a 15 in. Comparando os resultados, observa-se uma boa concordância. A pequena diferença de valores de PR pode ter sido causada pelo grau de refinamento das malhas e pelas diferenças dos *solvers* utilizados.

5. Aplicações com o Gerador de Malha

Para mostrar o potencial da ferramenta numérica foi realizado um estudo paramétrico envolvendo três parâmetros importantes do problema de fluxo: comprimento do túnel (L_p), diâmetro de entrada no revestimento (Deh) e espessura do dano da formação (ef). Foi utilizada uma configuração de carga de 6 spf com parâmetros geométricos e físicos próximos das situações de campo. Foi um modelo de túnel com o mesmo perfil longitudinal mostrado na Figura 1, com as seguintes dimensões: comprimento de túnel (L_p) 15 in, diâmetro de entrada (Deh) 0,5 in e tip (L_f) 0,5 in. Foi modelado um poço com raio interno (r_w) de 4,25 in, raio externo (re) 100 vezes o raio interno e altura do reservatório (h) de 3 ft. Como propriedades dos materiais foi considerada uma rocha com permeabilidade de 1000 mD, e viscosidade do fluido 600 cP. O diferencial de pressão aplicado foi 50 kgf/cm².

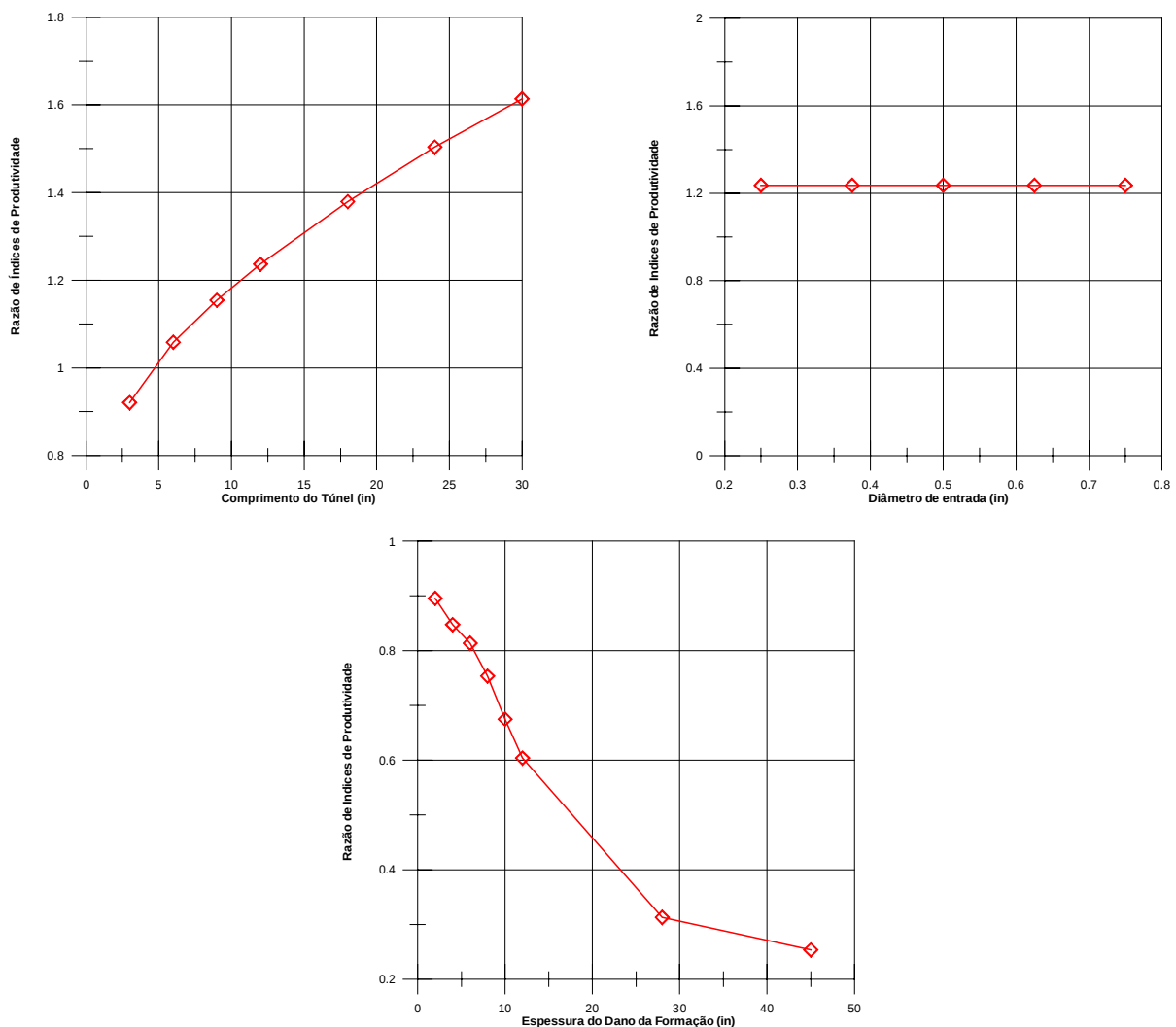


Figura 5 – Resultados obtidos para a Razão de Índice de Produtividade para os parâmetros: (a) comprimento do túnel, (b) diâmetro de entrada do túnel e (c) espessura do dano da Formação

Na Figura 5a está apresentada a relação entre a razão de índices de produtividade e o comprimento de perfuração (L_p), para um intervalo de 3 a 30 in. Nota-se que o crescimento da razão de índice de produtividade está diretamente relacionado ao aumento do comprimento da perfuração, o que está de acordo com o esperado e resultados

encontrados na literatura (Tariq, 1987), (Ansah, 2002). É observado também que as maiores taxas de crescimento na produtividade ocorrem nas baixas penetrações.

Na Figura 5b está apresentada a relação entre a razão de índices de produtividade e o diâmetro de entrada no revestimento (Deh), para um intervalo de 0,25 a 0,75 in. Os resultados mostram que não há variação da produtividade com o diâmetro de entrada. Possivelmente, para vazões altas ou diâmetros muito pequenos, este resultado seja diferente. Deve-se frisar que este exemplo avalia apenas a variação do diâmetro no revestimento, e não dentro do túnel (Dehr), o que produziria um resultado diferente.

A Figura 5c apresenta o efeito do dano na formação sobre a razão de índice de produtividade. Neste estudo foi considerado que o dano na formação tinha provocado uma redução de 90% na permeabilidade original da rocha-reservatório. A extensão do dano varia entre 2 e 45 in. Como pode ser visto, a taxa de redução na produtividade é maior, enquanto o dano cobre uma distância menor do que o comprimento do túnel. Quando o dano é maior do que o túnel, a taxa de redução na produtividade é menor. Porém, em qualquer situação, ocorre uma drástica redução no valor da razão de índice de produtividade. Este resultado é semelhante aos apresentados por Tariq (1987) e Locke (1981). Além disto, o comportamento apresentado indica que cargas que ultrapassam a região de dano, apresentam, em hipótese, um melhor índice de produtividade.

6. Conclusões

O gerador de malhas customizado mostrou ser capaz de gerar modelos completos, bem dimensionados e padronizados, permitindo estudos comparativos com os diversos parâmetros que compõem o problema de fluxo. A flexibilidade do aplicativo permite um amplo manuseio da geometria, propriedades e gradação da malha de poços canhoneados verticais.

Apesar de a relevância e complexidade do problema estudado indicarem a necessidade de prosseguir na realização de estudos paramétricos com mais profundidade e detalhes, os resultados apresentados foram positivos. A comparação dos resultados obtidos com a solução semi-analítica apresentada, associada a estudos de gradação da malha e geometria do modelo, permite a validação do modelo numérico, de modo a demonstrar sua capacidade de representação em situações reais mais gerais.

8. Referências

- ANSAH, J, PROETT, M. A., SOLIMAN M. Y. **Advances in Well Completion Design: A New 3D Finite-Element Wellbore Inflow Model for Optimizing Performance of Perforated Completions.** *SPE 73760*, February 2002.
- BROOKS, J. E., YANG, W., BEHRMANN, L.A. **Effect of Grain Size on Perforator Performance.** *SPE 39457*, *International Symposium on Formation Damage Control*, Lafayette, Louisiana, February 1998.
- FREITAS, S. M., SOARES, A.C, SILVESTRE, J. R., JACOB, B. P., BORGES, A. F., MENEZES, A. P. **Relatório Técnico 601178 – Adequação dos Canhoneios às Formações.** CENPES/Petrobras, setembro de 2004.
- HARRIS, M. H. **The Effect of Perforating on Well Productivity.** *JPT, Trans, AIME 237*, p518-528, April 1966
- HONG, K. C. **Productivity of Perforated Completions in Formations With or Without Damage.** *JPT, Trans., AIME 259*, p 1027-1038, August 1975.
- KLOTZ, J. A., KRUEGER, R. F., PYE, D. S. **Effect of Perforation Damage on Well Productivity.** *JPT, Trans., AIME 257*, p.1303-1314, November 1974.
- LOCKE, S. **An Advanced Method for Predicting the Productivity Ratio of a Perforated Well.** *JPT*, p. 2481-2488, December 1981.
- MARC - MSC.MARC Patran Release Guide, Version 2003
- PATRAN - MSC.Patran Release Guide, Version 2003
- SAUCIER, R. J., LANDS JR., J. F. **A Laboratory Study Of Perforations in Stressed Formation Rocks.** *JPT, Trans., AIME 265*, p. 1347-1353, sept. 1978.
- TARIQ, S.M. **Evaluation of Flow Characteristics of Perforations Including Nonlinear Effects Using Finite-Element Method.** *SPEPE, Trans, AIME 283*, p. 104-112, May 1987.
- THOMPSON, G. D. **Effects of formation Compressive Strength on Perforator Performance.** *Drill & Prod. Prac., API*, p. 191-197, 1962.

