

## ANÁLISE DE FATORES QUE INFLUECIAM NA PRODUTIVIDADE DE CANHONEIO EM POÇO REVESTIDO COM BASE NO MODELO SEMI- ANALÍTICO DE KARAKAS E TARIQ

Raquel Costa Lins do Amaral<sup>1</sup>; Patricia do Nascimento Brito<sup>2</sup>; Juliana Maria Gomes da Silva<sup>3</sup>;  
Harlene Cristina Ambrosio Gomes Soares<sup>4</sup>; Flávio Medeiros Junior<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia do Petróleo –  
[raquelc.lins@yahoo.com.br](mailto:raquelc.lins@yahoo.com.br)

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia do Petróleo –  
[patricia\\_nascimento10@yahoo.com.br](mailto:patricia_nascimento10@yahoo.com.br)

<sup>3</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia do Petróleo –  
[juliana\\_mgs@hotmail.com](mailto:juliana_mgs@hotmail.com)

<sup>4</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia do Petróleo –  
[harlenecristina@hotmail.com](mailto:harlenecristina@hotmail.com)

<sup>5</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia do Petróleo –  
[flaviojr\\_eng@hotmail.com](mailto:flaviojr_eng@hotmail.com)

### RESUMO

O canhoneio é um processo importante na fase de avaliação ou completção de um poço. As operações de canhoneio em poços de petróleo consistem basicamente na utilização de cargas explosivas para abrir furos ou túneis que atravessam o revestimento e a cimentação do poço e se estendem na formação rochosa, restabelecendo o contato poço/formação. O canhoneio tem impacto significativo na produtividade do poço e conseqüentemente no resultado econômico de um projeto. Fatores geométricos do poço, do espaço canhoneado, além de propriedades físicas da rocha são relevantes ao processo de canhoneio e interferem diretamente na capacidade de produção do poço. Neste estudo foi empregado o modelo semi-analítico de Karakas e Tariq para estimar dados da produtividade de um poço canhoneado. Os resultados foram validados através de comparação de valores com um programa comercial, o Span. Foi também efetuado um estudo sobre a influência da densidade de tiro, profundidade de penetração e anisotropia na razão de produtividade do poço. Observou-se que o modelo semi-analítico de Karakas e Tariq tem potencial para ser aplicado em projetos comerciais.

**Palavras-chave:** Canhoneio, produtividade do poço, modelo semi-analítico de Karakas e Tariq.

### 1. INTRODUÇÃO

O canhoneio é um processo bastante importante realizado na fase de avaliação ou completção de um poço. O procedimento consiste em realizar um contato entre o poço e a rocha reservatório, através de túneis que são construídos pela explosão de cargas de alta energia. Esse túnel permite a passagem do

fluido entre o reservatório e o interior do poço.

O objetivo desse trabalho é elaborar através do modelo semi-analítico de Karakas e Tariq, planilhas no Excel que estimem a produtividade de canhoneio de um poço revestido. A fim de validar o modelo em estudo, foram comparados os resultados obtidos com os de um software comercial, o



**II CONEPETRO**

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE  
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS  
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

Span, que também simula esses dados de poço.

As propriedades físicas da rocha e uma grande quantidade de fatores geométricos do poço e do túnel são relevantes ao procedimento de canhoneio e interferem diretamente na produtividade do poço. No presente estudo, foi empregado o modelo de Karakas e Tariq para realizar uma análise de alguns desses fatores, a fim de determinar a importância de cada um na produtividade do poço.

## 2. METODOLOGIA

Para obtenção dos resultados da razão de produtividade e dano total de um canhoneio em um poço fictício, através de expressões algébricas do método semi-analítico de Karakas e Tariq, foi necessário criar valores a respeito de dados de poço e formação em que foi realizado o canhoneio, bem como informações do próprio canhão que foi utilizado.

### 2.1. Razão de produtividade

A eficiência de fluxo, ou produtividade, de um canhoneio pode ser definido como razão de produtividade – vazão de um sistema canhoneado mais dano total dividido pela vazão de um poço aberto ideal – a medida de uma queda de pressão real ao redor do sistema

canhoneado comparado com uma queda de pressão ideal, previsto pela teoria de fluxo radial, para a mesma vazão [BELL, SAKUP, TARIK, 1995].

As duas definições são equivalentes e relatada pela Equação 1.

$$J = \frac{q_p}{q_{oh}} = \frac{\ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right)}{\ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) + S_t} \quad [1]$$

Na qual  $J$  é a razão de produtividade (adimensional);  $q_p$  a vazão de um sistema canhoneado ( $m^3/s$ );  $q_{oh}$  a vazão ideal de um poço aberto ( $m^3/s$ );  $r_w$  o raio de poço (ft);  $r_e$  o raio de drenagem do reservatório (ft) e  $S_t$  o dano total (adimensional).

### 2.2. Método semi-analítico de Karakas e Tariq

Karakas *et al.* [1991] discutiram os efeitos de diversos tipos de canhoneio e parâmetros de reservatório na produção (ou injeção) de completações em poço revestido e cimentado. Foi apresentada uma solução semi-analítica para a estimativa do *skin* nessas completações. Os resultados estabeleceram um melhor entendimento do papel relativo de vários parâmetros de canhoneio na simulação de produtividade do poço. Esse modelo semi-analítico de produtividade fornece uma boa

[www.conepetro.com.br](http://www.conepetro.com.br)

**br**

(83) 3322.3222

[contato@conepetro.com.br](mailto:contato@conepetro.com.br)



estimativa do *skin* em completações canhoneadas para uma ampla gama de parâmetros de canhoneio.

Através da expressão algébrica 2, calculamos o dano total (total *skin*) de um sistema canhoneado.

$$S_t = S_{bf} + \frac{1}{bf} \frac{1}{\gamma} (S_p) + \frac{1}{20} (9 + (11 \times bf)) S_{od} \quad [2]$$

Na qual  $S_{bf}$  é o dano causado pela penetração parcial (adimensional);  $bf$  é a fração da formação aberta ao fluxo (adimensional);  $\gamma$  o fator de correção (adimensional);  $S_p$  o dano do canhoneio (adimensional) e  $S_{od}$  o dano causado pelo desvio do poço (adimensional).

Para determinar  $S_t$  é necessário encontrar os valores das parcelas individuais de cada tipo de dano mostrado na Equação 2. Esses danos individuais são determinados a seguir.

### 2.2.1. Dano do canhoneio

O dano resultante do canhoneio, dado pela Equação 3, é composto por vários elementos:

$$S_p = S_H + S_V + S_{wb} + S_{pd} \quad [3]$$

Onde  $S_H$  é o dano horizontal (adimensional);  $S_V$  o dano vertical (adimensional);  $S_{wb}$  o dano causado pelo efeito do poço (adimensional) e  $S_{pd}$  o dano

resultante da zona danificada ao redor do canhoneado (adimensional).

Todos esses elementos discretos que compõe o dano do canhoneio, foram encontrados por expressões algébricas do estudo de Karakas *et al.* [1991].

### 2.2.2. Dano devido ao desvio do poço

Para o cálculo do dano causado pelo desvio do poço, foi utilizada a Equação 4 desenvolvida por Cinco-L. *et al.* [1975] *apud* Bell, Sakup, Tarik [1995].

$$S_{od} = - \frac{\theta'_d}{41} - \frac{\theta'_d}{56} \log_{10} \left( \frac{h_{TD}}{100} \right) \quad [4]$$

Onde,  $h_{TD}$  é dada pela Equação 5:

$$h_{TD} = \frac{h_t}{r_w} \sqrt{\frac{k_H}{k_V}} \quad [5]$$

e  $\theta'_d$  é dado pela Equação 6.

$$\theta'_d = \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{k_V}{k_H}} \tan \theta_d \right) \quad [6]$$

Sendo  $h_{TD}$  a espessura da formação (adimensional);  $\theta'_d$  o desvio do poço ajustado (graus) e  $\theta_d$  o desvio do poço (graus).

### 2.2.3. Dano devido à penetração parcial

A simples expressão para cálculo do dano causado pela penetração parcial da zona produtora é dada por Odeh [1989] *apud* Bell, Sakup, Tarik [1995], Equação 7.



$$S_{bf} = 1,35 \left[ \ln \left( \frac{h_t}{h_p} \right) - 1 \right]^{0,825} \left[ 0,49 + 0,1 \ln \left( h_t \sqrt{\frac{k_H}{k_V}} \right) \ln(r_{wc}) - 1,95 \right]$$

Para  $y > 0$ :

$$r_{wc} = (r_w) \exp \left[ 0,2126 \left( \frac{z_m}{h_t} + 2,753 \right) \right] \quad [8]$$

Para o uso da Equação 8, tem-se algumas condições:

- Para  $0 < z_m/h_t < 0,5$ , utiliza-se a equação original de  $r_{wc}$  (Equação 8);
- Quando  $z_m/h_t > 0,5$ , substitui  $z_m/h_t$  por  $(1 - z_m/h_t)$ .

Para  $\gamma$  igual a zero, considera-se  $r_{wc}$  igual a  $r_w$ .

Onde  $\gamma$  é distância entre o topo da formação e o topo do intervalo aberto (ft);  $h_t$  a espessura da formação (ft);  $h_p$  o comprimento vertical do intervalo canhoneado (ft);  $r_{wc}$  o raio do poço corrigido (ft) e  $z_m$  é uma expressão dada pela Equação 9.

$$z_m = y + h_p/2 \quad [9]$$

## 2.2.4. Dano total

Quando o valor do fator de correção,  $\gamma$ , é determinado, os vários elementos do dano podem ser combinados usando a equação do dano total,  $S_t$ . O valor de  $\gamma$  depende do raio da zona danificada pela perfuração e da razão de anisotropia da formação. Odeh [1989] *apud* Bell, Sakup, Tarik [1995] apresentou um conjunto de expressões simples, mas precisas, para determinar  $\gamma$ , Equação 10.

Se o intervalo aberto para fluxo ( $h_p$ ) começar no topo da zona produtora, ou seja,  $y = 0$ , o fator de correção  $\gamma$  é dado pela Equação 10.

$$\gamma = \log_{10} \left[ \frac{h_p}{r_w} \right]^{0,66} - 0,62 \left[ \frac{r_{dd}}{h_p} \right]^{0,33} + 1,12 \left[ \frac{r_{dd}}{h_p} \right]^{0,33} \quad [10]$$

O fator de correção  $\gamma$  será igual a um, quando:  $r_{dd} \leq (0,13)(h_p/r_w)$ , ou  $h_p \geq (0,85)(h_t)$ .

Se o intervalo aberto não começar no topo da zona produtora, o fator de correção passa a ser dado pela Equação 11.

$$\gamma = \log_{10} \left[ \frac{h_p}{r_{wc}} \right]^{0,66} - 0,62 \left[ \frac{r_{ddc}}{h_p} \right]^{0,33} + 1,12 \left[ \frac{r_{ddc}}{h_p} \right]^{0,33} \quad [11]$$

Onde  $r_{dd}$  é o raio da zona danificada pela perfuração e  $r_{ddc}$  é o raio da zona danificada pela perfuração corrigida pelo efeito da anisotropia, ambos em pé (ft) e são



calculados pelas Equações 12 e 13, respectivamente.

$$r_{dd} = r_w + L_p \quad [12]$$

$$r_{ddc} = r_{dd} \left[ \frac{r_{wc}}{r_w} \right] \quad [13]$$

Anisotropia da formação requer correções adicionais para  $h_p$  e  $h_t$ , que são encontradas através das Equações 14 e 15, respectivamente.

Dados de entrada	Caso 1	Caso 2	Caso 3
$h$	1/6	1/6	1/6
$h_p$	3,3 ft	3,3 ft	3,3 ft
$h_t$	3,3 ft	3,3 ft	3,3 ft
$\theta_d$	0°	0°	0°
$\theta_p$	60°	60°	60°
$k_{dd}$	50 md	50 md	50 md
$k_{pd}$	25 md	25 md	25 md
$k_v$	10 md	100 md	100 md
$k_H$	100 md	100 md	100 md
$L_{dd}$	0	0	0
$L_p$	19,579 in	19,579 in	19,579 in
$r_p$	0,50545 in	0,50545 in	0,50545 in
$r_{pd}$	0	0	1,00545 in
$r_w$	8,5 in	8,5 in	8,5 in
$y$	0	0	0

$$h'_p = (h_p) \sqrt{\frac{k_H}{k_v}} \quad [14]$$

$$h'_t = (h_t) \sqrt{\frac{k_H}{k_v}} \quad [15]$$

Os valores corrigidos,  $h'_p$  e  $h'_t$ , devem ser usados no lugar de  $h_p$  e  $h_t$  nas equações do dano total e fator de correção  $\mathcal{Y}$ .

### 2.3. Metodologia para encontrar o dano total e razão de produtividade do canhoneio

Os cálculos para encontrar os valores de dano total de canhoneio e a razão de produtividade de poços fictícios foram feitos respectivamente com base no método semi-analítico descrito no item 2.2 e na Equação 1.

Para validar o uso do método semi-analítico de Karakas e Tariq foi feito o uso de um programa comercial, o Span. Inserindo no simulador Span os dados de entrada é possível calcular o dano total do canhoneio e a razão de produtividade do poço. Logo, foi comparado e analisado os resultados do dano total para três casos obtidos pelo Span e método semi-analítico de Karakas e Tariq. Os casos analisados do dano total tiveram como dados de entrada os valores da Tabela 1.

Tabela 1: Dados de entrada dos casos analisados para o dano total.

O caso 1 do dano total como mostrado na Tabela 1, não possui dano referente à perfuração ( $L_{dd} = 0$ ), e nem ao canhoneio (



**II CONEPETRO**

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE  
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS  
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

$r_{pd} = 0$ ), e tem uma razão de anisotropia ( $k_H/k_V$ )

) na formação equivalente a 10. O caso 2 difere do caso 1 somente pelo fato da formação não sofrer efeito da anisotropia. O caso 3 não possui efeito da anisotropia na formação, nem dano referente à perfuração, porém possui um dano referente ao canhoneio. Esses casos foram simulados no simulador comercial Span, no método semi-analítico de Karakas e Tariq, e por fim analisados os valores da razão de produtividade encontrados. Estes dados estão representados na Tabela 2 e 3.

2 difere do caso 1 somente pelo fato da formação não sofrer efeito da anisotropia. O caso 3 não possui efeito da anisotropia na formação, nem dano referente à perfuração, porém possui um dano referente ao canhoneio. Esses casos foram simulados no simulador comercial Span, no método semi-analítico de Karakas e Tariq, e por fim analisados os valores da razão de produtividade encontrados. Estes dados estão representados na Tabela 2 e 3.

Tabela 2: **Dano total dos 3 casos simulados pelo Span e pelo método semi-analítico.**

Dano total (St)	Caso 1	Caso 2	Caso 3
<b>Método semi-analítico de Karakas e Tariq</b>			
<b>Simulador Span</b>	-1,0267	-1,40099	-1,19023
	-0,99703	-1,3835	-1,1639

Tabela 3: **Razão de produtividade dos 3 casos simulados pelo Span e pelo modelo não-comercial.**

Razão de produtividade (J)	Caso 1	Caso 2	Caso 3
<b>Modelo não-comercial</b>	1,1579	1,2286	1,1877
<b>Simulador Span</b>	1,1526	1,2251	1,1828

Comparando os resultados obtidos por um modelo comercial e um não-comercial, verificou-se uma boa concordância entre os valores, logo o modelo semi-analítico de Karakas e Tariq mostrou ter potencial para realizar o estudo da produtividade de um poço.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos dos casos simulados pelo método de Karakas e Tariq, mostrando o potencial deste para o estudo de produtividade de poços. Foram avaliados também alguns parâmetros de geometria do canhão, bem como características da formação.

#### 3.1. Dados de entrada

Foi adotado para a simulação dos casos uma entrada de dados padrão, onde a variação entre os casos foi realizada através da mudança de profundidade da penetração na formação, anisotropia e densidade de tiros.

[www.conepetro.com.br](http://www.conepetro.com.br)

br

(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br

Esses parâmetros foram variados com intuito de se obter uma comparação entre eles e assim estudar a influência deles na produtividade do poço. A Tabela 4 mostra os dados de entrada padrão utilizado nos casos.

Tabela 4: **Dados de entradas padrão.**

Dados de entrada	
$h_p$	3,3 ft
$h_t$	3,3 ft
$\theta_d$	0°
$\theta_p$	60°
$k_{dd}$	50 md
$k_{pd}$	25 md
$k_H$	100 md
$L_{dd}$	0
$r_{pd}$	0
$r_w$	8,5 in
$r_e$	660 ft
$y$	0

### 3.2. Análise de sensibilidade

A variação de parâmetros geométricos do poço e propriedades físicas da rocha reservatório é responsável por significativas alterações na produtividade de poços canhoneados. Assim, como medida de influência de todos esses parâmetros, será analisada a razão de produtividade ( $J$ ).

Dentre os vários parâmetros que afetam a produção de um poço canhoneado foram

selecionados alguns para serem estudados nesse trabalho. Os parâmetros escolhidos foram: penetração total na formação, anisotropia e densidade de tiro do canhão.

#### 3.2.1. Penetração total na formação

A profundidade da penetração total na formação é um parâmetro importante na produtividade de um poço, tanto que foi comprovada pelos estudos de Karakas *et al.* [1991] através do uso de modelagem de elementos finitos 2D e 3D. Para comprovar este fato, neste trabalho foram realizadas simulações em que a penetração foi variada nos valores de 10,77 in a 35,066 in para uma comparação. Com esses valores de penetração foram obtidos os resultados demonstrados na Tabela 5.

Tabela 5: **Razão de produtividade para as penetrações adotadas**

Razão de produtividade - Anisotropia 10 Profundidade de penetração total na formação (Lp)	Densidade de tiro (Spf)				
	4	5	6	8	12
<b>10,77 in</b>	0,88	0,92	0,97	1,02	1,08
<b>12,137 in</b>	0,98	1,02	1,06	1,10	1,14
<b>15,602 in</b>	1,00	1,05	1,08	1,12	1,16
<b>20,451 in</b>	1,11	1,14	1,17	1,20	1,23
<b>29,206 in</b>	1,18	1,22	1,24	1,27	1,30
<b>33,544 in</b>	1,23	1,26	1,29	1,31	1,34
<b>35,066 in</b>	1,24	1,28	1,30	1,33	1,35

Com esses valores de razão de produtividade foi criado um gráfico,

representado pela Figura 1, para facilitar a análise de influência da penetração na produtividade do poço.

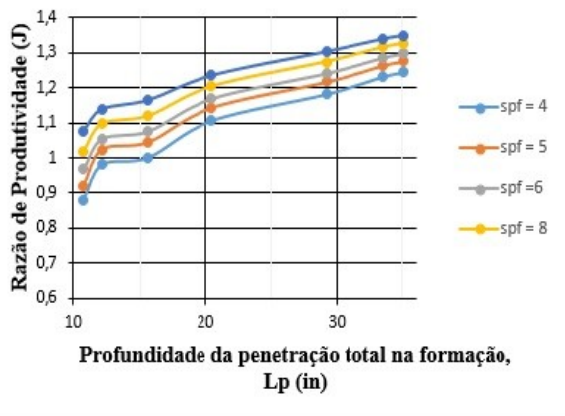


Figura 1: Efeito da penetração total na formação na razão de produtividade do poço.

A Figura 1 permite concluir que para o canhoneio com maior profundidade de penetração total na formação, independente da densidade da carga considerada (spf – número de tiros por pé), existe um acréscimo significativo na razão de produtividade. Concluindo-se também que os maiores incrementos em  $J$  se dão para os menores valores de  $L_p$  (10 a 20 in).

### 3.2.2. Anisotropia de permeabilidade e densidade de tiro

Para analisar a influência da anisotropia de permeabilidade na produtividade do poço canhoneado foi desenvolvido um gráfico apresentado pela Figura 2, que demonstra a comparação da produtividade de um poço para duas diferentes razões de anisotropia.

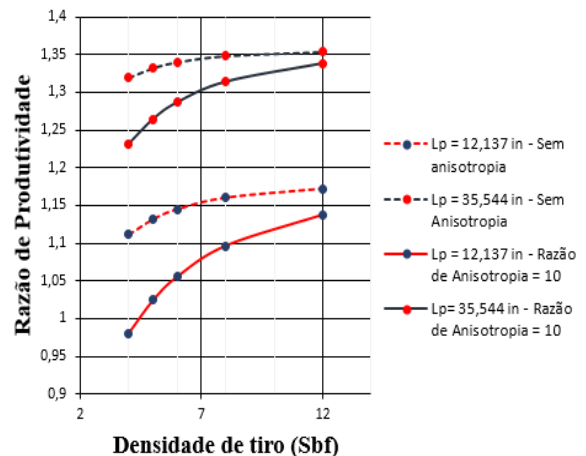


Figura 2: Efeito da anisotropia na razão de produtividade.

Conforme pode ser visto na Figura 2, o efeito da anisotropia na produtividade do poço é mais significativo para baixas densidades de tiros. Com a baixa densidade de tiro o aumento na anisotropia causa uma redução considerável na produtividade do poço. Já com a densidade de tiro alta, como 12 tiros por pé, as produtividades dos poços com e sem anisotropia de permeabilidade permanecem praticamente com o mesmo valor. Isso ocorre, pois, uma formação com anisotropia a permeabilidade vertical é menor que a horizontal, o que dificulta o fluxo no eixo vertical da formação. Com baixas densidades de tiro se tem poucos túneis canhoneados, aumentando a distância vertical entre eles e, conseqüentemente, a dificuldade de fluxo de fluido no eixo vertical, já que o fluido terá que percorrer um caminho maior até chegar ao túnel. Quando se tem o aumento



de densidade de tiros, ocorre uma diminuição na distância vertical entre os canhoneados, facilitando assim o fluxo no eixo vertical.

Os resultados encontrados em termos de razão de produtividade para cada um dos casos analisados no gráfico são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: **Razão de produtividade: efeito da anisotropia para vários níveis de densidade de tiros por pé.**

<b>Razão de Produtividade</b>				
$S_{pf}$	$L_p = 12,137$ in - Sem Anisotropia	$L_p = 12,137$	$L_p = 35,544$	$L_p = 35,544$
		in - Razão de Anisotropia igual a 10	in - Sem Anisotropia	in - Razão de Anisotropia igual a 10
4	1,111725	0,980654	1,319751	1,23143
5	1,132128	1,024305	1,332618	1,26442
6	1,145313	1,055514	1,340428	1,28678
8	1,160465	1,09648	1,348668	1,31423
12	1,172387	1,137642	1,354185	1,33873

#### 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi apresentado o impacto do canhoneio na eficiência de fluxo do poço através de resultados simulados para razão de produtividade de um poço canhoneado. Além disso, foi feito um estudo para avaliar a influência de fatores geométricos do poço e do canhoneio e propriedades físicas da rocha reservatório na produtividade do poço. Todos os resultados obtidos foram para poços fictícios.

A metodologia empregada para obter os dados de razão de produtividade de cada poço

foi baseada no método semi-analítico de Karakas e Tariq. Utilizou-se também outro recurso para validar esse método, o simulador comercial Span.

Com as simulações realizadas pelo método de Karakas e Tariq observou-se que fatores como densidade de tiro, anisotropia e profundidade de penetração têm grande influência na produtividade de um poço. Com o aumento da densidade de tiro e da profundidade de penetração a razão de produtividade do poço se torna maior. Já com o aumento da anisotropia, a produtividade do poço decresce mais significativamente quando se tem baixas densidades de tiro.

Comprovou-se através do estudo elaborado neste trabalho que o método semi-analítico de Karakas e Tariq é útil para análise de produção de poços canhoneados.

#### 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- KARAKAS M., TARIQ S. M. – **Semianalytical Productivity Models for Perforated Completions**, paper SPE 18247, February 1991.
- TARIQ, S. M., Sukup, R. A. and Bell, W. T.. – **Perforating**, First printing, Henry L. Doherty Memorial Fundo of AIME, Society of Petroleum Engineers Inc., Richardson, SPE (1995).



# II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE  
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS  
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO



[www.conepetro.com.](http://www.conepetro.com.br)

**br**

(83) 3322.3222

[contato@conepetro.com.br](mailto:contato@conepetro.com.br)