

TRANSPORTE DE PARTÍCULAS DE AÇO GERADAS PELA ABERTURA DE JANELAS EM POÇOS MULTILATERAIS

André Leibsohn Martins – aleibsohn@cenpes.petrobras.com.br

Carla Leonor Teixeira Rezende – rezenc@hotmail.com

Rafael Amorim Ferreira Leal – ramorim@cenpes.petrobras.com.br

Fábio Gustavo Fernandes Lourenço – fabiolou@urbi.com.br

Petrobras, CENPES/DIPLLOT/SETEP

Ilha do fundão, Cidade Universitária, quadra 7 – Rio de Janeiro, CEP 21949-900 Brasil

Resumo. *Este trabalho contempla uma série de simulações computacionais visando definir os requisitos (vazão e propriedade de fluidos) para garantir a remoção das partículas, tanto nos trechos inclinados do poço como no anular do riser, assim como discutir as limitações da análise. Foram também realizados ensaios experimentais, onde são comparadas performances de fluidos de perfuração à base água e sintéticos, comumente utilizados na PETROBRAS, na erosão de um leito de cascalhos formados por areia ou granalha de aço.*

Palavras-chave: Poços de petróleo, Poços multilaterais, Transporte de sólidos.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de diversos campos marítimos e terrestres na PETROBRAS contempla a adoção da tecnologia de poços multilaterais. Tal técnica consiste na perfuração de dois ou mais pernas em um poço previamente perfurado, conforme mostra a figura 1 (Hearn et al., 1996 e Simpson et al., 1997). Um item a ser destacado no projeto de tais operações é o transporte dos sólidos (partículas de aço) gerados pela abertura de janelas no revestimento de poços.

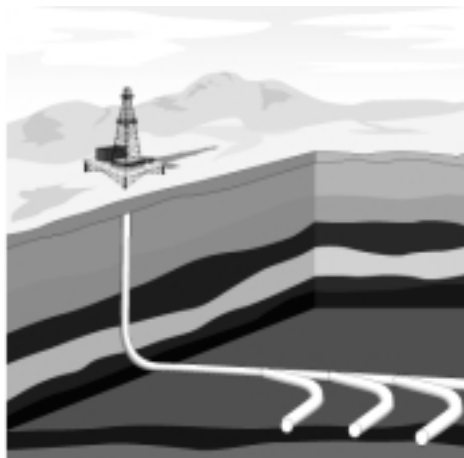


Figura 1- Poços multilaterais

2. CONCEITOS BÁSICOS SOBRE TRANSPORTE DE SÓLIDOS

Basicamente, os sólidos por serem mais densos que o fluido que os arrasta, tenderão a ser transportados com uma velocidade inferior à média do fluido. O problema, em dutos verticais, pode ser caracterizado por uma velocidade de transporte da partícula que seria definida pela diferença entre a velocidade do fluido no anular e a velocidade de sedimentação do sólido no fluido, conforme ilustra a figura 2. Assim, se a velocidade de sedimentação da partícula for maior que a de bombeio do fluido ela irá sedimentar, caso contrário será transportada. Desta forma, o transporte em anulares verticais está plenamente caracterizado pelo fenômeno de sedimentação.

Já para trechos inclinados e horizontais o fenômeno é mais complexo. Neste caso, a força peso e a força de arraste estão em direções distintas: a primeira estará na direção do centro da terra enquanto a segunda está na direção do poço (figura 2).

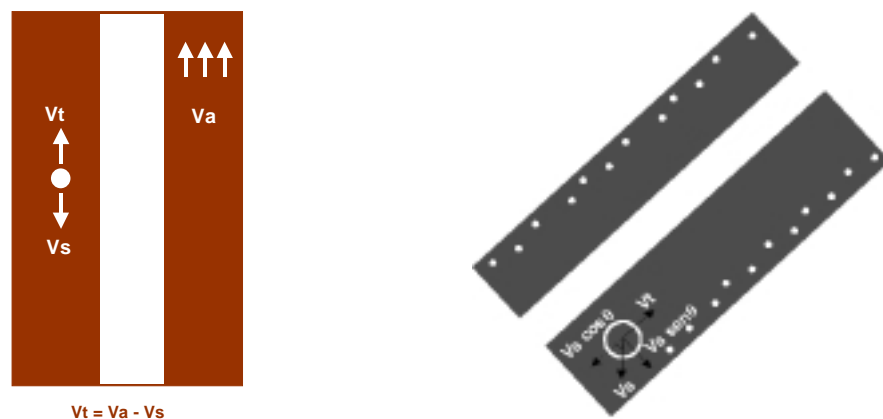


Figura 2- Transporte de sólidos em poços verticais, inclinados e horizontais.

Assim, a força peso decomposta em duas componentes ortogonais irá gerar uma na direção do escoamento (com sentido contrário) e outra na direção perpendicular ao poço. A primeira componente irá atrasar a ascensão dos sólidos em suspensão, enquanto a segunda irá empurrar os sólidos em direção à parede inferior do poço, que tenderão a formar um leito . (figura 3).

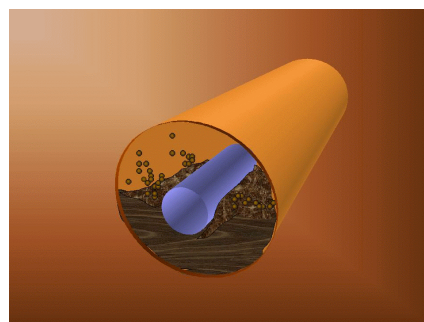


Figura 3- Formação do leito

Desta forma, o fenômeno de transporte de sólidos em poços inclinados/horizontais não está caracterizado somente por uma velocidade relativa do sólido. Neste caso, é necessário aferir a quantidade total de sólidos presentes no anular. Assim, as variáveis mais frequentemente usadas para caracterizar o problema são o padrão de escoamento (existência ou não do leito), a altura do leito e a concentração volumétrica de sólidos no anular.

Finalmente, entende-se que dois fenômenos distintos atuam em poços inclinados: a sedimentação das partículas e a capacidade de erosão do leito de sólidos.

3. ANÁLISE DA REMOÇÃO DE PARTÍCULAS DE AÇO DURANTE O CORTE

Neste item está descrita uma série de simulações realizadas por um simulador computacional para previsão do carreamento de cascalhos, cujas hipóteses e formulações estão detalhadas em Martins e Santana (1992) e Gavignet e Sobey (1986), visando avaliar a remoção das partículas de aço durante o corte das janelas. Trata-se de um simulador bifásico unidimensional que baseado no conhecido modelo de duas camadas. Neste trabalho, o simulador em questão é encarado apenas como uma ferramenta para a análise da remoção de partículas de aço.

As simulações envolveram a variação do perfil reológico do fluido de perfuração, assim como o diâmetro crítico de partículas e algumas inclinações de interesse. As simulações foram realizadas com três fluidos de diferentes perfis reológicos e com viscosidades semelhantes à da água, de um fluido ligeiramente viscosificado e um de alta viscosidade. O fluido de baixa viscosidade procura avaliar a viabilidade do transporte com um fluido de completação enquanto o de alta a remoção por um fluido de perfuração típico. As propriedades reológicas dos fluidos ajustados pelo modelo de potência com limite de escoamento (Heschel-Bulkley).

Tabela 1. Propriedades reológicas dos fluidos simulados.

Propriedades reológicas	Fluido baixa viscosidade	Fluido de alta viscosidade
τ_0 (N/100m ²)Heschel-Bulkley	1,66	8,10
K(N*s ⁿ /100m ²)Heschel-Bulkley	9,58 10 ⁻⁵	2,48
n Heschel-Bulkley	1,60	0,39

As inclinações avaliadas variaram de 10 a 90°, enquanto o diâmetro das partículas geradas na simulação da perfuração do aço variaram de 2,54 10⁻³ m a 2,54 10⁻² m. Considerou-se a densidade do aço igual a 8028,37 kg/m³. O diâmetro do poço foi de 0,216m. Os resultados das simulações mostraram que, para a água e para o fluido de baixa viscosidade, independente do ângulo ou do diâmetro da partícula, são requeridas vazões da ordem de 5,05 10⁻² m³/s para o transporte das partículas. Tal fato se deve à grande diferença de densidade entre sólido e líquido, tornando-se este o parâmetro que governa o fenômeno.

Já para o fluido de alta viscosidade, conforme mostra a Tabela 2, as vazões críticas são significativamente inferiores e dependentes do diâmetro da partícula.

Tabela 2. Vazões Críticas – Fluido de Alta Viscosidade – Poço de 0,216 m

Inclinação (°)	Vazão crítica (10 ⁻² m ³ /s)			
	Diâmetro de partícula (10 ⁻³ m)			
	6,35	12,7	19,05	25,4
10	1,89	3,34	3,47	3,91
50	3,03	3,34	3,47	3,91
90	3,47	3,34	3,47	3,91

Dois outros pontos são levantados: possivelmente o diâmetro das partículas foi superdimensionado nas simulações anteriores. Estima-se que as partículas geradas apresentem diâmetro inferior a 2,54 10⁻³ m. Adicionalmente, quais seriam as vazões necessárias para o

transporte no *riser*? As simulações descritas na tabela 3 contemplam os dois aspectos para os fluidos de baixa viscosidade.

Tabela 3. Vazões Críticas – Partícula de $2,54 \cdot 10^{-3}$ m

Inclinação (°)	Vazão crítica (10^{-2} m ³ /s)			
	Água		Fluido de Baixa Viscosidade	
	Riser	0,216 m	Riser	0,216 m
10	11,99	1,89	10,09	1,39
50	11,99	2,02	10,09	1,45
90	11,99	2,21	10,09	1,58

Os resultados das simulações mostraram que independente do ângulo ou das propriedades do fluido, as vazões críticas para limpeza do trecho de poço aberto são inferiores às usualmente praticadas no campo. Já as vazões críticas para transporte no *riser* são muito superiores às reais, para os dois fluidos.

A Tabela 4 mostra as vazões críticas para o transporte de sólidos de diversos diâmetros pelo fluido de alta viscosidade. O uso de fluidos viscosos parece viabilizar o transporte de partículas de aço em poços marítimos.

Tabela 4. Vazões Críticas – Fluido de Alta Viscosidade – Riser

Diâmetro da partícula (10^{-3} m)	Vazão crítica (10^{-3} m ³ /s)
2,54	3,16
3,81	15,77
5,08	37,85
6,35	69,40

4. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Foram realizados diversos testes experimentais em um Simulador físico, visando a identificação dos parâmetros influentes na remoção de um leito formado por partículas de aço. A seção de testes consiste num tubo de acrílico de 12 m de comprimento e 0,1 m de diâmetro externo, com dois tubos internos de PVC (0,042 m e 0,06m de diâmetro interno) representando duas geometrias anulares típicas em poços horizontais. Um sistema de injeção de sólidos está acoplado na entrada da seção de teste.

4.1 Etapas do teste

- Formação de um leito de sólidos de altura constante na seção de teste; Interrupção da injeção de sólidos e aumento da vazão de fluido: o leito sofre erosão até que uma nova altura de equilíbrio seja obtida;
- Medida e registro da queda de pressão e do perímetro do leito.
- A vazão mássica de fluido é medida por um equipamento do tipo Coriolis, enquanto a queda de pressão foi determinada por um transdutor de pressão diferencial. O perímetro do leito de sólidos foi obtido por medida direta e visual no tubo de acrílico.

4.2 Parâmetros variados nos testes

- Tipo de fluido: base água e sintético (Base óleo).
- Reologia: o fluido sintético foi testado em duas propriedades distintas (baixa e alta viscosidade).
- Densidade do sólido: areia ($2612,22 \text{ kg/m}^3$) e granalha de aço ($8028,37 \text{ kg/m}^3$).
- Diâmetro do sólidos: 10^{-3} m e $1.7 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ (granalha): $2.9 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ (areia).
- Geometria anular: reproduzindo, em escala reduzida uma fase de $3,11 \cdot 10^{-1} \text{ m}$ externo e $1,27 \cdot 10^{-1} \text{ m}$ interno (fase I) e outra fase de $2,16 \cdot 10^{-1} \text{ m}$ externo e $1,27 \cdot 10^{-1} \text{ m}$ interno (fase II).
- Todos os testes foram realizados em geometria anular concêntrica, de modo a permitir a remoção total dos sólidos com a vazão de bombeio disponível (especialmente nos testes com granalha). A excentricidade do anular concêntrica é um fator primordial na remoção dos sólidos. A matriz de testes realizada está descrita na Tabela 5.

4.3 Matriz dos testes

O fluido base água, assim como o base óleo (alta viscosidade) apresentam característica notadamente não Newtoniana. Já o base óleo (baixa viscosidade), obtido através da diluição do base óleo (alta viscosidade) com o óleo base apresentou comportamento próximo ao Newtoniano. Este fato deve-se ao alto percentual de óleo presente no fluido fino. Na verdade os fluidos finos não são característicos de operações de perfuração e abertura de janelas em inclinações elevadas e foram utilizados neste estudo apenas como fonte de comparação.

Tabela 5. Matriz de testes

teste	diâmetro da partícula (10^{-3} m)	fase	Fluido de Bingham		massa específica (kg/m^3)
			τ_0 ($\text{N}/100\text{m}^2$)	μ_P (10^{-2} P)	
A1	2,9	I	1,23	6,86	1198
G2	1,7	I	0,96	6,46	1198
G3	1,0	I	0,96	6,46	1198
G5	1,7	II	7,13	40,16	1078
G6	1,0	II	5,47	43,84	1078
G8	1,7	II	0,25	0,74	1078
G9	1,7	I	0,25	0,74	1007
G10	1,0	I	0,55	7,62	1007
G12	1,0	I	7,42	43,99	1078
G13	1,7	I	10,78	38,75	1258
G14	1,7	II	11,15	40,34	1258
G15	1,0	I	19,01	35,50	1258

5. DESEMPENHO DOS FLUIDOS NA EROÇÃO DO LEITO DE PARTÍCULAS DE AÇO

Para os testes experimentais foram analisados a natureza do fluido, a reologia do fluido, a geometria do escoamento e o tamanho das partículas.

5.1 Efeito da natureza do fluido

A figura 4 representa a influência da natureza do fluido na remoção de um leito de sólidos. Pelo gráfico observa-se que o efeito da natureza do fluido não é um fator

determinante no carregamento, pois o comportamento de ambos os fluidos foram muito parecidos. A figura 5 mostra os maiores números de Reynolds obtidos com o fluido base água para as mesmas rotações da bomba. Tal fato deve-se à maior massa específica, uma vez que as viscosidades dos fluidos são semelhantes. O número de Reynolds informa o grau de turbulência do escoamento, que é proporcional às tensões cisalhantes na interface do leito. São essas tensões que indicam a capacidade de ressuspensão dos sólidos (Martins et al., 1999 e Adari, 2000).

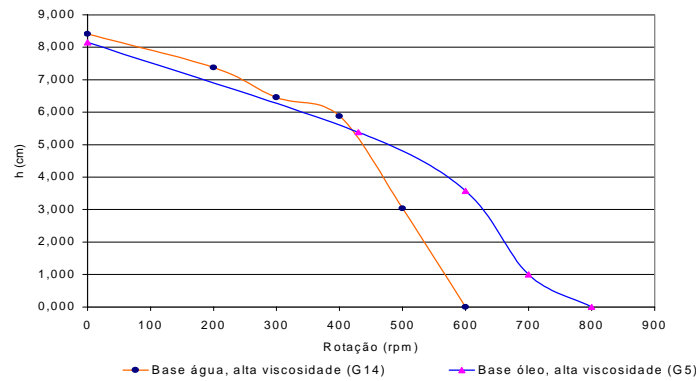


Figura 4- Efeito da natureza do fluido

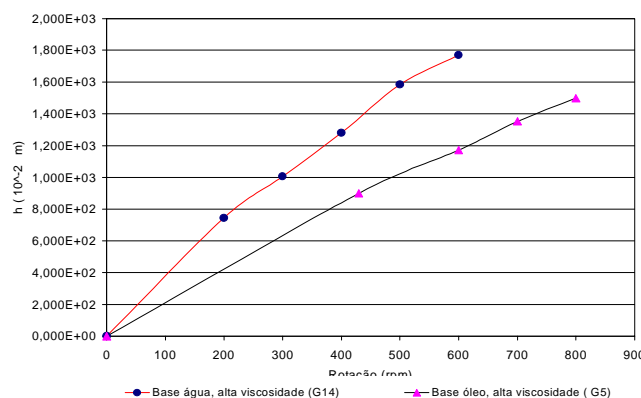


Figura 5- Número de Reynolds dos testes G5 e G14.

5.2 Efeito da reologia do fluido

A figura 6 mostra o efeito das propriedades reológicas do fluido base óleo na capacidade de erosão do leito. O fluido de baixa viscosidade, por ter uma viscosidade plástica inferior, gera números de Reynolds maiores, quando bombeamos numa mesma vazão. Como já foi discutido anteriormente, com um maior número de Reynolds, teremos maiores valores para as tensões de cisalhamento na interface do leito e, conseqüentemente, uma maior capacidade de ressuspensão dos sólidos. Portanto a reologia do fluido apresenta-se como um fator de suma importância para o carregamento dos sólidos.

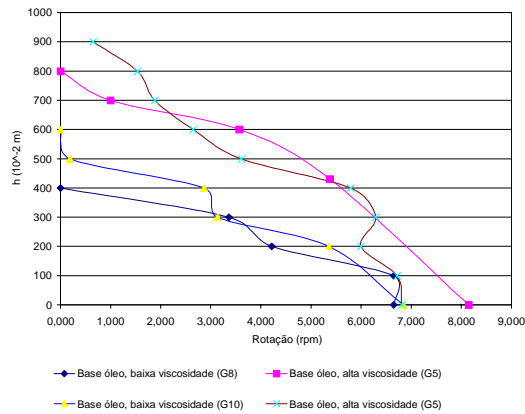


Figura 6- Efeito da reologia do fluido.

5.3 Efeito da geometria do escoamento

A figura 7 mostra a maior dificuldade de erosão de um mesmo fluido (óleos de alta e de baixa viscosidade) quando escoando em um espaço anular. Parar uma mesma vazão, quanto maior a área transversal ao escoamento, menor será sua velocidade. Assim, o anular de $3,11 \cdot 10^{-1}$ m e $1,27 \cdot 10^{-1}$ m apresenta menores valores de velocidade quando comparado ao anular de $2,16 \cdot 10^{-1}$ m e $1,27 \cdot 10^{-1}$ m.

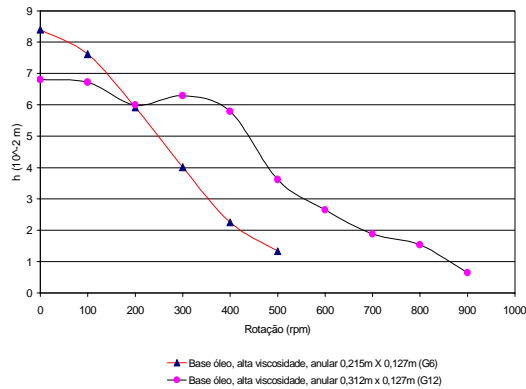


Figura 7- Efeito da geometria do escoamento na remoção do leito de sólidos.

5.4 Efeito da densidade do sólido

A figura 8 mostra a maior dificuldade de remoção das partículas de aço em relação às de areia, devido ao maior peso das primeiras. Trata-se de um efeito predominante.

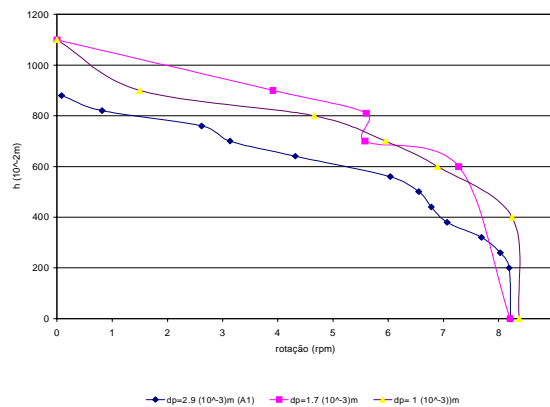


Figura 8- Efeito da densidade das partículas a serem carreadas

5.5 Efeito do tamanho da partícula de Aço

A figura 9 mostra um efeito menor do diâmetro da partícula nas vazões requeridas para a ressuspensão das mesmas. Deve-se observar que para partículas maiores esse efeito pode ser bem mais pronunciado, conforme indicado pelas simulações computacionais.

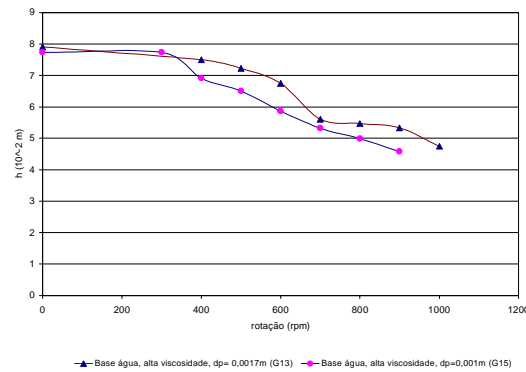


Figura 9– Efeito do tamanho da partícula das partículas a serem removidas.

6. CONCLUSÕES

O simulador computacional indicou vazões da ordem de $5,05 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ para transporte de partículas de aço maiores que $6,35 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ em poços multilaterais (fase de $2,16 \cdot 10^{-1} \text{ m}$) por fluidos de completação (baixa viscosidade). Tratam-se de vazões relativamente altas para a geometria em questão. Já para partículas da ordem de $2,54 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ o transporte no poço seria satisfatório porém deficiente no anular do *riser*. Assim, uma alternativa para a limpeza por meios hidráulicos, seria a utilização de fluidos de alta viscosidade, onde vazões da ordem de $3,47 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ garantiriam a remoção de partículas de até $1,91 \cdot 10^{-2} \text{ m}$.

Deve-se ressaltar que os resultados do programa computacional devem ser olhados com reservas para a interpretação de resultados de transporte de partículas de aço, uma vez que as correlações foram desenvolvidas para areia como fase sólida.

Os testes realizados no simulador físico indicaram que o projeto das propriedades reológicas do fluido é fundamental para o sucesso da operação de remoção dos sólidos decorrentes da abertura de janelas em poços multilaterais. A princípio não há restrições quanto à natureza do fluido a ser utilizado: as mesmas propriedades reológicas podem ser atingidas com fluidos à base água ou à base óleo. Desta forma, não parece ser necessária a substituição de fluidos sintéticos por fluidos base água específicos para essa operação. Os fluidos sintéticos poderiam perfeitamente ser tratados de modo a atingir as propriedades reológicas requeridas.

Como pode-se depreender dos resultados, os requisitos reológicos para o transporte são muito sensíveis aos fenômenos de sedimentação e erosão. Para o primeiro são desejáveis fluidos viscosos que mantenham a partícula em suspensão. Já para o segundo são requeridos fluidos finos que induzam a turbulência no anular favorecendo a erosão. Assim, o deslocamento de um trem de colchões finos e viscosos pode ser uma alternativa interessante.

REFERÊNCIAS

- Adari, R.B., 1999, Development of correlations relating bed erosion to flowing time for near horizontal wells, Master's Thesis, The University of Tulsa, Tulsa, Oklahoma, USA.
- Gavignet, A. A. and Sobey, I.J.: "A Model for the Transport of Cutting in Highly Deviated Wells", SPE paper 15417 presented at the 61 st Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE held in New Orleans, L.A., October 5-8, 1986.
- Hearn, D.D., Blount, C.G., Kamlowky P.E. and Christensen, H., 1996, Coiled Tubing Window Milling, IACD/SPE Drilling Conference, March 12-15, New Orleans, Louisiana.
- Martins, A.L. e Santana, C.C., "Evaluation of Cuttings Transport in Horizontal and Near Horizontal Wells – A Dimensionless Approach", paper SPE 23643 presented at the Second SPE Latin American Petroleum Engineering Conference, Caracas, Venezuela, Mar 8-11, 1992.
- Martins, A.L., Maravilha, C.N. and Batista, J.M., 1999, Effect of non-Newtonian behaviour of fluids in the erosion of a cuttings bed horizontal oilwell drilling, 14th IC on Slurry Handling and Pipeline Transport, Setember 8-10, Maastricht, Netherlands.
- Simpson, M. A. and Latif, S., Liner top milling technique integral to successful drilling of uwaianat horizontal sidetracks in offshore qatar, SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference, November 23-25, Bahrain.

NOMENCLATURA

- V_T - Velocidade de transporte da partícula
- V_S - Velocidade de sedimentação da partícula
- V_a - Velocidade do fluido no anular
- τ_0 - Tensão cisalhante
- μ_p - Viscosidade plástica
- k - índice de consistência
- n - índice de comportamento

Transport of Iron Particles Generated During Milling Operations in Multilateral Wells

***Abstract.** This paper presents a series of numerical simulations aiming the definition of requirements (flow rate and fluid properties) to remove iron particles both in the inclined sections and in the riser annulus. Additionally, experimental work was developed in a pilot scale flow loop in order to compare the behavior of water and synthetic oil based fluids in milling operations*

***Key -words:** Oil wells, Multilateral wells, Solids transport*