



## ANÁLISE DE FORÇAS DE CONTATO E DESGASTE INTERNO DE RISERS DEVIDO AO CONTATO COM TUBOS DE PERFURAÇÃO

Rômulo Lima Barbosa<sup>1</sup>, Murilo Augusto Vaz<sup>2</sup> e João Carlos R. Plácido<sup>3</sup>

Copyright 2006, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2006*, realizada no período de 11 a 14 de setembro de 2006, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas na sinopse submetida pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho Técnico, 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, seus Associados e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2006*.

### Resumo

Este trabalho apresenta uma metodologia para a determinação de desgaste na parede interna de *risers* de perfuração, em virtude do seu contato abrasivo com a coluna de perfuração, através de um estudo comparativo entre o desgaste sofrido quando se trabalha com uma coluna de perfuração com tubos em aço e em alumínio. Utilizando um modelo numérico com base no MEF, um estudo de caso é apresentado simulando um sistema de perfuração em lâmina d'água de 3000 metros e um poço com 1500 metros de extensão. A análise do problema é conduzida de forma estática, na qual se trabalha com a coluna de perfuração acoplada ao *riser* de perfuração. Posteriormente as principais forças de contato obtidas são associadas aos parâmetros operacionais do processo de perfuração, tais como: coeficiente de desgaste, taxa de penetração e rotação da coluna. Por fim, um modelo analítico foi utilizado para determinar o volume de material removido da parede interna *riser*. Com a análise dos resultados observa-se que a coluna de perfuração em aço gerou uma maior força de contato lateral do que a de alumínio devido ao seu maior peso próprio, e com isso um maior volume de material foi perdido na parede interna do *riser*.

### Abstract

This work presents a methodology for determining the interior riser wear, because of the abrasive contact with the drillstring, through a comparative study among the suffered wear while working with drillstring with steel pipes or aluminum pipes. Using a numeric model based in MEF, a case study is presented simulating a drilling system in water depth of 3000 meters and a well with 1500 meters of measured length. The analysis of the problem is driven in a static way, which works with the drillstring coupled to the drilling marine riser. Later the main contact forces obtained are associated to the operational drilling parameters, such as: wear coefficient, penetration rate and rotation of the column. Finally, an analytical model was used to determine the volume of material removed from the internal wall of the marine riser. This analysis resulted that the steel pipes generated higher contact force than the aluminum pipes due to the largest weight, resulting larger material volume removed from the internal wall of the drilling marine riser.

### 1. Introdução

O escopo deste trabalho é apresentar o problema de desgaste localizado devido às forças de contato excessivas entre a coluna de perfuração e o sistema do *riser* de perfuração, que inclui os seguintes componentes: Preventor de *Blowout* (BOP), Junta Flexível (*Flex Joint*), o *LMRP* (*Lower Marine Riser Package*), e o *Riser* de Perfuração. O modo estudado compreende em substituir o material do tubo de perfuração por uma liga mais leve. Baseado em pesquisas anteriores optou-se pela liga de alumínio, por ter resistência axial e à fadiga apropriadas ao ambiente ao qual será submetida, e principalmente por conter menor peso próprio. O objetivo deste estudo é avaliar estruturalmente a susceptibilidade da coluna de perfuração em ALUMÍNIO, fazendo um estudo comparativo com a já tradicional coluna de perfuração em AÇO.

<sup>1</sup> Engenheiro Civil – COPPE / UFRJ

<sup>2</sup> Ph.D., Engenheiro Naval – COPPE / UFRJ

<sup>3</sup> Ph.D., Engenheiro de Petróleo – PETROBRAS / CENPES

O primeiro passo do trabalho foi desenvolver um modelo numérico para determinação das forças de contato entre a coluna de perfuração e o *riser* de perfuração, considerando a ação de peso próprio, flutuação, forças de corrente e o passeio da plataforma, deslocamentos, esforços e principalmente as forças de contato.

O segundo passo foi desenvolver um modelo analítico para a determinação do percentual de material removido pela ação do desgaste por fricção, que é dependente da força de contato máxima encontrada para cada configuração.

Muitos estudos foram realizados em laboratórios para definir os modos de desgaste e como medi-los, de modo que se possa prever ou antecipar a sua extensão. Por causa da complexidade do processo de desgaste, não foi possível formular uma equação universal, então para este trabalho utilizou-se da equação de HALL et al [1].

## 2. Análise Estrutural Estática Acoplada

A extremidade superior do *riser* de perfuração é fixada em um sistema de sustentação que, devido ao passeio da unidade flutuante e às forças de corrente, não permanece alinhado ao poço. A corrente, o passeio e o peso próprio deste *riser* conferem-lhe uma disposição semelhante à catenária. A capacidade da coluna de perfuração alterar a configuração de curvatura causada no *riser* em catenária, também é questão a ser analisada. Na extremidade inferior do *riser* existe uma junta flexível (*flex joint*) que restringe o ângulo em até 10 graus em relação à vertical. A curvatura mais excessiva deve ser encontrada nesta região próxima à junta flexível, e neste trecho os contatos entre o *riser* e a coluna de perfuração podem ser mais expressivos. Neste trabalho serão analisados apenas dois casos que terão uma configuração padrão, alterando apenas o tipo de material do tubo. Portanto, serão feitas análises para uma coluna de perfuração em aço e outra em alumínio.

### 2.1. Força de contato

Para unir os tubos de perfuração são utilizadas conexões denominadas *tool joints*, que são os pontos mais susceptíveis ao contato com o poço ou com o *riser* ao longo da coluna de perfuração. Isto ocorre porque estas conexões têm seu diâmetro até 33% maior que o diâmetro nominal do tubo de perfuração em aço e 29% maior que o do tubo de alumínio. Por este motivo, enquanto não houver uma mudança brusca na curvatura da coluna, a parte mediana dos tubos de perfuração não desenvolve forças de contato. Porém, num sistema de perfuração real, a linha do *riser* e da coluna de perfuração apresentam um período de transição na junta flexível, com uma curvatura excessiva, onde é possível que a porção média de um tubo de perfuração toque em outros elementos externos em determinadas análises.

### 2.2. Modelo de equivalência dentro do poço

A representação da coluna de perfuração dentro do poço é desnecessária, considerando apenas o esforço axial no tubo de perfuração logo abaixo do BOP. Permitiu-se então a substituição do trecho abaixo da cabeça de poço por um bloco único com rigidez aos carregamentos e restrições equivalentes. É de extrema importância ressaltar que as conexões utilizadas para o tubo de perfuração em alumínio são de aço, então, fazer uma substituição por molas lineares destas conexões, obter-se-ia uma rigidez axial bastante elevada.

Naturalmente, a força de tração a ser aplicada no topo da coluna de perfuração deve sustentar seu peso total. Portanto a tração de topo foi determinada somando o comprimento da coluna em lâmina d'água com a tração no tubo logo abaixo do BOP. Assim, a mola equivalente colocada logo abaixo da cabeça de poço deve suportar uma carga de tração igual ao peso da coluna ao qual foi substituído por ela mesma.

### 2.3. Definição da Malha

Para se realizar uma análise global de um sistema de perfuração submetido a esforços externos e peso próprio dos elementos optou-se pela construção de um modelo em elementos finitos, o qual representa a não linearidade do sistema e pode obter resultados bem próximos de um sistema real.

A coluna de perfuração é uma seqüência de tubos e conexões que inicialmente no modelo são divididos em quatro partes: duas correspondentes às conexões nas extremidades, e outras duas correspondentes ao corpo do tubo de perfuração com a geometria da seção nominal. Cada trecho dos elementos tubulares externos (BOP, *Riser*, *LMRP*) equivalentes são divididos em elementos de tubos com espaçamento regular entre os nós. O comprimento de cada elemento depende de uma estimativa da relevância da região para o contato.

### 2.4. Seleção de elementos

O sistema ABAQUS dispõe de vários tipos de elementos capazes de abstrair os componentes da coluna de perfuração e do *riser*, entre outros, em entidades unidimensionais com propriedades mecânicas associadas. Nessa aplicação em particular, opta-se por elementos de viga tridimensional de *Timoshenko* com 2 nós e formulação híbrida, denominados no ABAQUS de "B31H". Todos os elementos do tipo B31H empregados possuem seção circular, cujas propriedades básicas informadas ao programa são o raio externo e a espessura.

O elemento do tipo junta flexível tridimensional é denominado “JOINTC”. Seu emprego visa modelar a interação entre dois nós que são coincidentes ou quase coincidentes geometricamente, e que representam uma junta com uma rigidez interna e/ou amortecimento, de modo que o segundo nó pode se deslocar ou girar em relação ao primeiro. As rotações relativas nessa junta são limitadas pela formulação do elemento, que não recomenda seu uso fora do limite de 90 graus para qualquer das direções.

Elementos de contato de tubo a tubo modelam a interação entre um nó de um elemento de viga e uma linha de deslizamento ao longo de um ou vários elementos de viga, pórtico, cabo ou tubos adjacentes. No programa ABAQUS/Standard, esses elementos são denominados “ITT31”. A interação entre a coluna de perfuração e uma superfície cilíndrica externa é baseada na abertura e fechamento deste elemento de contato que, colocado nos nós da coluna de perfuração, percebe a aproximação e o afastamento de uma linha de deslizamento que está anexada a um conjunto de elementos das juntas de *riser*, do preventor de *blowout* e do revestimento de poço.

### 3. Estudo de casos

O método adotado para avaliar o desgaste é, a priori, estabelecer um caso padrão para realização das análises. Este caso padrão sofrerá alterações do tipo de material dos tubos da coluna de perfuração, aço ou alumínio, e suas respectivas características geométricas. Os casos padrões são compostos basicamente pela sequência de itens listados abaixo:

- Sequência de juntas empregada em FIGUEIREDO [2]
- Junta flexível com rigidez de 5280,3 KN.m/rad e ângulo limite de 10 graus;
- Revestimento de poço vertical representando até 40 metros de comprimento abaixo da cabeça de poço com 9-5/8” de diâmetro;
- Comprimento de coluna de perfuração de 1500 m a ser substituído por mola linear abaixo da cabeça do poço;
- Coluna de perfuração em aço e alumínio com: 5” e 5,15” de diâmetro e com peso de 19,50 lbf/pé e 9,0 lbf/pé, respectivamente, com juntas de acoplamento (*tool joints*) de conexão tipo NC50, e diâmetro de 6-5/8”;
- Deslocamento lateral da embarcação (*Offset*) de 50 m, correspondente a 1,7% da lâmina d’água;
- Perfil de correntes anual, com valor máximo de superfície: 1,6 m/s.

#### 3.1. Especificação das juntas do riser, colunas de perfuração em aço e alumínio, e outros elementos externos

Escolheu-se um *riser* de perfuração de 3000 metros composto pelos trechos apresentados na tabela 1, obtidos de FIGUEIREDO [2]. As juntas J3 a J7 apresentam flutuadores com 1,32 m de diâmetro que lhes reduzem o peso molhado. A coluna de perfuração em aço se apresenta em juntas com 30’ (9,144 m) de comprimento, unidas por conexões do tipo NC 50. As principais propriedades da coluna de perfuração são apresentadas na tabela 2. A coluna de perfuração em alumínio se apresenta em juntas com 30,22’ (9,210 m) de comprimento, unidas por conexões de aço do tipo NC 50, conforme descrito no MANUAL DE OPERAÇÕES [3]. As características das conexões NC 50 são as mesmas citadas para o tubo de perfuração em aço. As principais propriedades deste tubo de perfuração são apresentadas na tabela 3. Apesar do *riser* de perfuração ser o elemento mais citado no que diz respeito ao desgaste, há outros elementos externos à coluna de perfuração com os quais ela pode entrar em contato. Na tabela 4, apresenta-se um resumo das propriedades desses elementos.

#### 3.2. Tração de topo

A tração de topo no *riser* é determinada com o peso das juntas (incluindo o efeito dos flutuadores presentes) adicionando uma força de tração no BOP de 278 kN. Na coluna de perfuração, a tração no topo é igual ao peso de toda a coluna submersa no fluido de perfuração.

#### 3.3. Cargas hidrodinâmicas

Para representar as forças de corrente presentes em um sistema real de perfuração adotou-se a formulação de Morison neste trabalho. Um perfil da corrente anual foi utilizado e na figura 1 são apresentadas suas velocidades de acordo com a profundidade.

Tabela 1 – Características das juntas do riser

| Juntas do riser | L [m]  | $D_{EXT}$ [m] | T [m]  |
|-----------------|--------|---------------|--------|
| Junta J1        | 1,71   | 0,8764        | 0,2001 |
| Junta J2        | 317    | 0,5460        | 0,0254 |
| Junta J3        | 243,84 | 0,5334        | 0,0191 |
| Junta J4        | 487,68 | 0,5334        | 0,0191 |
| Junta J5        | 609,6  | 0,5334        | 0,0175 |
| Junta J6        | 609,6  | 0,5334        | 0,0175 |
| Junta J7        | 609,6  | 0,5334        | 0,0175 |
| Junta J8        | 73,15  | 0,5334        | 0,0175 |
| Junta J9        | 6,86   | 0,5460        | 0,0254 |
| Junta J10       | 5      | 0,5460        | 0,0254 |
| Junta J11       | 18     | 0,6604        | 0,0254 |
| Junta J12       | 7      | 0,6604        | 0,0254 |

Tabela 4 – Dados dos outros elementos do sistema do riser de perfuração

| Designação     | Compr. [m] | $\emptyset_{EXT}$ [m] | $\emptyset_{INT}$ [m] |
|----------------|------------|-----------------------|-----------------------|
| BOP            | 6,49       | 1,800                 | 0,530                 |
| LMR Package    | 6,70       | 1,797                 | 0,467                 |
| Junta flexível | 1,13       | 1,020                 | 0,580                 |

Tabela 2 – Dados da coluna de perfuração de aço

| Designação:       | PIN NC50 | TUBO 5" | BOX NC50 |
|-------------------|----------|---------|----------|
| Diâmetro externo: | 6-5/8"   | 5"      | 6-5/8"   |
| Diâmetro interno: | 3-1/2"   | 4,276"  | 3-1/2"   |
| Compr.:           | 7"       | 28'7"   | 10"      |

Tabela 3 – Dados da coluna de perfuração de alumínio

| Designação:                 | TUBO   |
|-----------------------------|--------|
| Diâmetro externo maior:     | 5,787" |
| Diâmetro externo nominal:   | 5,150" |
| Diâmetro interno:           | 4,126" |
| Comprimento do trecho upset | 3,937' |
| Comprimento total:          | 30' 9" |

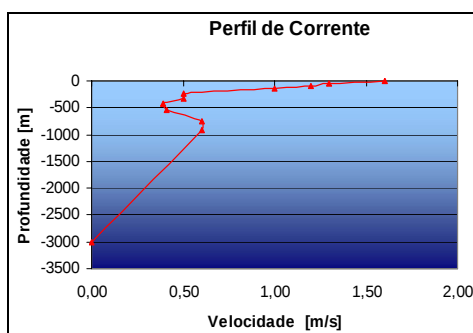


Figura 1 – Perfil de corrente anual

### 3.4. Deslocamento e forças de contato encontradas nas análises

As forças de contato acontecem ao longo de toda a coluna de perfuração, onde em sua maior parte, ou seja, na região mediana, as forças não são de grande magnitude. Porém nota-se que para a região superior (até 200 m de profundidade) e para a região inferior (abaixo de 2900 m de profundidade) estas forças atingem valores maiores de 1kN. As regiões de interesse para o trabalho seriam onde se encontram as maiores forças de contato. Portanto, nota-se um ponto com valor bem expressivo para a coluna em aço e em alumínio que se situa próximo à junta flexível com intensidades da ordem de 25,6 kN e 16,3 kN para as colunas em aço e em alumínio, respectivamente.

Quanto ao deslocamento observa-se que, com a substituição por tubos de alumínio na coluna de perfuração, maior é o deslocamento do conjunto (riser e coluna de perfuração), ocasionando um maior ângulo de abertura na junta flexível inferior (*flex joint*). Isto ocorre porque a força de corrente sobre o riser encontra uma menor resistência (rigidez), fazendo com que o conjunto (riser e coluna) se desloquem mais lateralmente.

Com a tabela 5 pode-se comparar os resultados obtidos para as forças de contato ao longo da extensão da coluna de perfuração, em aço ou em alumínio. As figuras 2 e 3 apresentam gráficos com as forças de contato e o deslocamento das colunas, respectivamente.

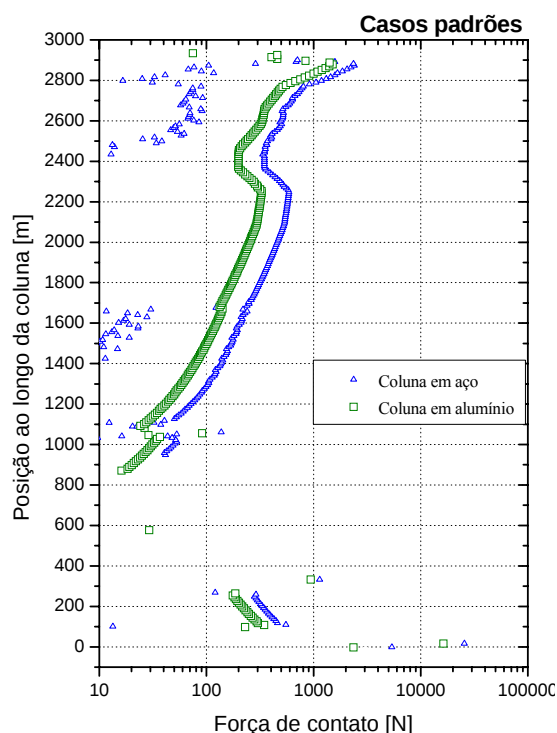


Figura 2 – Forças de contato ao longo das colunas de perfuração em aço e em alumínio

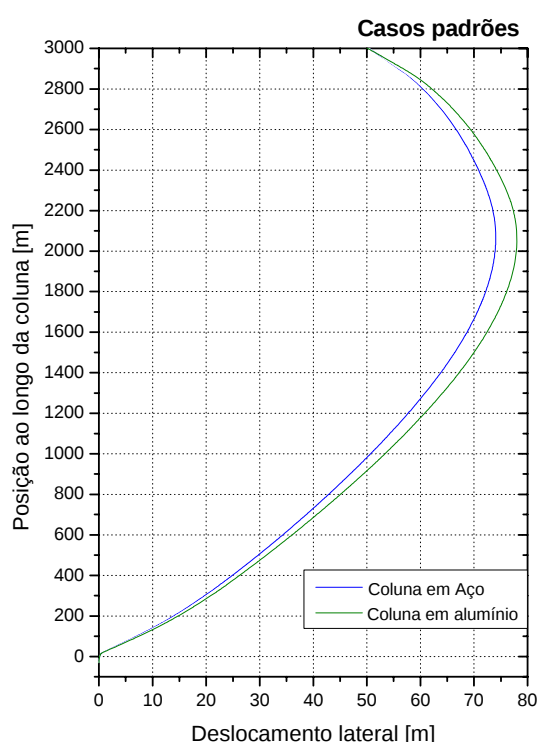


Figura 3 – Deslocamentos das colunas de perfuração em aço e em alumínio

Tabela 5 – Resultados obtidos para a coluna de perfuração com tubos em aço e em alumínio

| Resultados da coluna de perfuração      | Aço    | Alumínio |
|-----------------------------------------|--------|----------|
| Máxima força de contato (inferior) [kN] | 25,649 | 16,314   |
| Posição da máxima força (inferior) [m]  | 16,17  | 15,9     |
| Máxima força de contato (superior) [kN] | 2,417  | 1,510    |
| Posição da máxima força (superior) [m]  | 2873   | 2879     |
| Pontos com forças maiores que 1 kN      | 15     | 8        |
| Pontos com forças maiores que 10 kN     | 1      | 1        |
| Número de pontos de contato             | 328    | 247      |
| Ângulo da junta flexível – [graus]      | 4,50   | 4,69     |

## 4. Desgaste

Em águas profundas e ultras profundas o sistema do *riser* de perfuração fica mais vulnerável às ações deteriorantes como as de desgaste, colapso e rompimento. O desgaste provocado no *riser* de perfuração é causado, assim como nos revestimentos, de forma mais intensa pelas conexões da coluna de perfuração. Esse desgaste causa uma perda na espessura na sua parede interna do elemento. A redução de espessura pode comprometer o elemento quanto à sua integridade estrutural, chegando à paralisação das atividades para sua substituição ou, em caso de rompimento, podendo suceder numa provável contaminação do meio ambiente por parte dos fluidos de perfuração, gerando assim altos custos operacionais.

Com o valor da intensidade das forças e a localização em que ocorrem, faz-se então um estudo quantitativo do desgaste. Como a análise é analítica, é importante ressaltar que o modelo eleito para este trabalho foi obtido através de ensaios laboratoriais por HALL et al. [1], e devem considerar vários parâmetros, tais como: velocidade de rotação da coluna de perfuração (RPM), abrasividade do fluido de perfuração, taxa de penetração (ROP), entre outros.

### 4.1. Método empregado

O processo de desgaste envolve muitas variáveis, tais como: tipos de fluidos e suas características abrasivas, taxa de penetração (ROP), velocidade de rotação da coluna de perfuração, diâmetro externo das conexões (*tool joints*),

coeficientes de desgaste e outras. Em face disso, o processo se torna complexo em sua determinação. HALL et al. [1], consideraram que as superfícies em contato são diferentes em suas características materiais, bem como em suas geometrias. Assim, o desgaste acaba por remover certa quantidade de material (V) que é definida como:

$$V = E \times \frac{\mu \times \Phi \times S_d}{\xi} \quad (1)$$

onde:

V = Volume desgastado;

E = Eficiência do desgaste

$\mu$  = Coeficiente de atrito;

$\Phi$  = Força lateral aplicada;

$S_d$  = Distância deslizada.

$\xi$  = Energia específica do material por unidade de volume;

Para determinação do volume desgastado foi criada uma constante que varia com o material e o tipo de fluido utilizado, e foi denominada de Fator de Desgaste (WF). Este fator é retirado da equação (1) da seguinte maneira:

$$WF = \frac{E \times \mu}{\xi} \quad (2)$$

A distância total que o perímetro da conexão (*tool joint*) desliza sobre a superfície em contato é igual a:

$$S_d = \pi \times D \times N \times t \times 60 \quad (3)$$

onde:

N = Rotação da coluna de perfuração;

D = Diâmetro externo da conexão (*tool joint*);

t = Tempo de contato entre as superfícies.

O tempo de contato é definido como:

$$t = \frac{S.L_{TJ}}{ROP.L_{DP}} \quad (4)$$

onde:

S = Distância perfurada;

$L_{TJ}$  = Comprimento da conexão (*tool joint*);

ROP = Taxa de penetração;

$L_{DP}$  = Comprimento do tubo de perfuração (*drill pipe*) com as conexões.

Para simplificar a equação de determinação do volume desgastado, Hall et al [1] criaram uma variável que continha as variáveis trabalháveis da equação do volume (1). Essa foi denominada de “Função de Trabalho” ( $\psi$ ), a qual pode ser descrita pela equação (5) como:

$$\psi = \Phi \times S_d \quad (5)$$

Finalmente de forma completa, pode-se reescrever a equação (1) da seguinte maneira.

$$V = WF \times \psi \quad (6)$$

#### 4.2. Análise do desgaste

As regiões a serem analisadas são aquelas que apresentaram as maiores forças de contato. Como o estudo visa avaliar a vida útil dos materiais empregados, não faria sentido avaliar elementos de grande espessura como BOP, LMRP e a primeira junta do riser (J1), uma vez que a segunda junta do *riser* apresenta espessura de apenas 2 centímetros. Então, o desgaste sofrido pela segunda junta (J2) será o caso mais crítico a ser avaliado.

O desgaste no *riser* acontece desde o início da perfuração até o primeiro tubo atingir os 1500 metros abaixo da cabeça do poço. Para representar o volume total de material extraído da parede interna do *riser* pelo atrito desde o início da perfuração, serão realizadas avaliações a cada 250 metros. Para analisar o desgaste ocorrido exatamente na segunda junta do *riser*, determina-se a posição da maior força de contato existente sobre ela aos 1500 metros, isso porque quando a coluna se encontra nessa profundidade registra-se a maior força de contato e, conseqüentemente, o maior desgaste ocorrido. Ao se determinar a altura de contato entre a conexão e a segunda junta do *riser*, repete-se esta mesma posição da coluna para as demais análises a cada 250 metros acima, pois estes pontos só colaboraram com a posição final em que se registrou o máximo desgaste.

Nas análises realizadas para a coluna de perfuração em aço e em alumínio, a maior força de contato sobre a segunda junta do *riser* foi encontrada a uma altura do solo marinho de respectivamente: 16,17 e 16,33 metros.

#### 4.3. Determinação das variáveis operacionais

Uma das maneiras de se diminuir o desgaste provocado no *riser* é alterando a composição do fluido de perfuração e as suas características abrasivas. Para as etapas de perfuração, ou seja, para cada profundidade analisada, será utilizado um tipo de fluido diferente e seus respectivos fatores de desgaste. HALL et al [1] em seus ensaios laboratoriais determinaram valores para o fator de desgaste referentes a cada tipo de fluido. Tais valores serão utilizados para a determinação do volume de material removido, conforme descrito na tabela 6. A taxa de penetração (ROP) sofrerá redução natural à medida que a broca avançar, de acordo com a tabela 7.

Tabela 6 – Coeficiente de desgaste relacionado à profundidade

| Cenário       | F. de desgaste<br>[1/Pa] E-14 | Composição<br>da lama |
|---------------|-------------------------------|-----------------------|
| 0 – 250 – 500 | 20,0                          | Base d'água           |
| 750 – 1000    | 9,0                           | Base óleo             |
| 1250- 1500    | 3,0                           | B. óleo – LUBE        |

Tabela 7 – Relação da profundidade com ROP e RPM da coluna de perfuração

| Profundidade<br>e | Taxa de penetração<br>o | Rotação<br>[RPM] |
|-------------------|-------------------------|------------------|
| 250               | 41 ft/h                 | 150              |
| 500               | 37 ft/h                 | 130              |
| 750               | 33 ft/h                 | 110              |
| 1000              | 31ft/h                  | 100              |
| 1250              | 29 ft/h                 | 90               |
| 1500              | 27 ft/h                 | 80               |

## 5. Análise de resultados

Os resultados foram gerados através de uma planilha eletrônica e com auxílio de softwares matemáticos. O volume desgastado segundo a equação (6) de HALL et al [1] é dado em unidade de volume por metro, ou seja, representa uma área desgastada do *riser*, que pode ser melhor explicada com a figura 4.

Para poder especificar a vida útil do *riser* ou qual foi o desgaste sofrido durante a perfuração, é fundamental quantificar a perda de espessura da parede do *riser*. Tal informação pode ser adquirida através de relações geométricas definindo a altura de desgaste (h) conforme equação (7). A figura 5 mostra as variáveis do problema como a largura (W) e altura de desgaste (h).

$$h = \frac{1}{2} * \left( 2r - 2R + \sqrt{4r^2 - W^2} - \sqrt{4R^2 - W^2} \right) \quad (7)$$

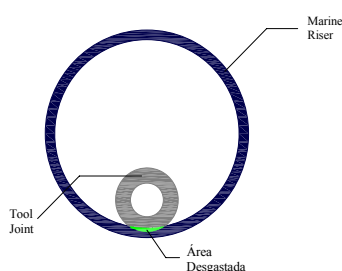


Figura 4 – Área desgastada pela tool joint

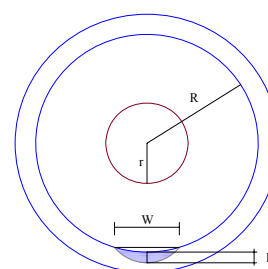


Figura 5 – Variáveis com o avanço do desgaste

A área de desgaste representada pela figura 5 é determinada através de integração, considerando uma função para cada curvatura, *riser* e tool joint. A resolução da integral dá a área de desgaste que é descrita pela equação (8).

$$A_d = \frac{1}{4} * W * \left( 4(h - r + R) + \sqrt{4r^2 - W^2} - \sqrt{4R^2 - W^2} \right) + r^2 \arctan \left[ \frac{W}{\sqrt{4r^2 - W^2}} \right] - R^2 \arctan \left[ \frac{W}{\sqrt{4R^2 - W^2}} \right] \quad (8)$$

A altura (h) é determinada através da resolução de um sistema de duas equações descritas em (7) e (8), pois conhecendo-se o valor de  $A_d$  pelo volume calculado na equação (6), obtém-se um sistema com duas incógnitas, h e W.

Para cada caso de comprimento de coluna analisado, determinou-se um valor de volume desgastado no *riser* pela equação de HALL et al. A soma destes volumes resulta em um volume total e, conseqüentemente no valor de espessura desgastada.

As tabelas 9 e 10 apresentam os resultados das análises nas diversas profundidades para a coluna de perfuração em aço e em alumínio, respectivamente. É importante ressaltar que foram analisadas as máximas forças de contato inferiores sobre a segunda junta (J2) do *riser*, o que não significa dizer que foram as máximas forças de contato atuantes na região inferior das linhas. No percurso, a coluna de perfuração em aço obteve um maior número de forças de contato acima de 1 kN em média, porém com menos pontos de contato na sua extensão quando comparada com a coluna em alumínio, que por sua vez apresentou as maiores aberturas no ângulo da junta flexível inferior.

A tabela 11 traz o resultado do volume desgastado no *riser* em cada profundidade de análise, e a partir do volume total a distância penetrada na parede interna do *riser*. Nota-se que para os casos analisados o principal desgaste acontece no início da perfuração, ou seja, quando a pressão de contato é maior e o fluido de perfuração utilizado é a base de água, aumentando assim o fator de desgaste. O fator de desgaste na equação de HALL et al é o principal responsável pela variação do desgaste no *riser*, como pode ser comprovado pelos resultados. Embora a coluna de perfuração esteja há 1500 metros abaixo da cabeça de poço com a máxima força de contato sobre o *riser*, não significa que tenha maior capacidade de desgastar a parede interna do *riser*, pois pode estar com a menor pressão de contato (o que ?), e com o fluido com maior capacidade de lubrificação.

Analisando o desgaste provocado pela coluna de perfuração em aço e em alumínio pode-se notar que o volume final é bastante representativo. Em quantidade significaria dizer que o volume de desgaste é duas vezes e meia maior quando se trabalha com a coluna de perfuração em aço. Em termos de espessura o *riser* não foi tão afetado, pois conforme mostra a tabela 13 a perda máxima de espessura ocorreu com a coluna de perfuração em aço em serviço, chegando a atingir uma máxima penetração de 1,29 milímetros no *riser*, ou seja cerca de 5% da sua espessura.

Tabela 9 – Resultados obtidos para a coluna de perfuração em aço

| Profundidade [m]                          | 250   | 500    | 750    | 1000   | 1250   | 1500   |
|-------------------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Força de contato (inferior) – [kN]        | 4,852 | 11,011 | 14,970 | 18,699 | 22,461 | 25,649 |
| Posição da força (inf.) – [m]             | 16,04 | 16,04  | 16,04  | 16,19  | 16,04  | 16,17  |
| Máxima força de contato (superior) – [kN] | 2,088 | 2,210  | 2,325  | 2,439  | 2,548  | 2,417  |
| Posição da máxima força (sup.) – [m]      | 2880  | 2881   | 2881   | 2882   | 2882   | 2873   |
| Pontos com força maiores que 1 kN         | 12    | 14     | 14     | 14     | 14     | 15     |
| Pontos com força maiores que 10 kN        | 0     | 1      | 1      | 1      | 1      | 1      |
| Número de pontos de contato               | 253   | 211    | 208    | 208    | 222    | 328    |
| Ângulo da junta flexível – [graus]        | 4,83  | 4,77   | 4,69   | 4,63   | 4,55   | 4,50   |

Tabela 10 – Resultados obtidos para a coluna de perfuração em alumínio

| Profundidade [m]                          | 250   | 500   | 750   | 1000   | 1250   | 1500   |
|-------------------------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Força de contato (inferior) – [kN]        | 1,991 | 2,609 | 3,064 | 11,809 | 13,687 | 15,430 |
| Posição da força (inf.) – [m]             | 16,04 | 16,09 | 16,15 | 16,08  | 16,19  | 16,33  |
| Máxima força de contato (superior) – [kN] | 1,107 | 0,980 | 1,079 | 1,365  | 1,440  | 1,511  |
| Posição da máxima força (sup.) – [m]      | 2887  | 2888  | 2870  | 2879   | 2879   | 2880   |
| Pontos com força maiores que 1 kN         | 4     | 2     | 6     | 7      | 8      | 9      |
| Pontos com força maiores que 10 kN        | 0     | 0     | 0     | 1      | 1      | 1      |
| Número de pontos de contato               | 283   | 258   | 227   | 234    | 243    | 259    |
| Ângulo da junta flexível – [graus]        | 4,88  | 4,83  | 4,78  | 4,77   | 4,74   | 4,70   |

Tabela 11 – Determinação dos volumes desgastados pela equação de Hall et al

| Profundidade de análise                        | Coluna de AÇO<br>Volume [m <sup>3</sup> /m] x10 <sup>-6</sup> | Coluna em ALUMÍNIO<br>Volume [m <sup>3</sup> /m] x10 <sup>-6</sup> |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| 250                                            | 10,00                                                         | 4,01                                                               |
| 500                                            | 21,80                                                         | 5,13                                                               |
| 750                                            | 12,78                                                         | 2,59                                                               |
| 1000                                           | 15,45                                                         | 9,69                                                               |
| 1250                                           | 5,36                                                          | 3,24                                                               |
| 1500                                           | 5,84                                                          | 3,49                                                               |
| <b>VOLUME TOTAL</b>                            | <b>71,23</b>                                                  | <b>28,15</b>                                                       |
| <b>Comprimento Penetrado<br/>no riser [mm]</b> | <b>2,25</b>                                                   | <b>1,21</b>                                                        |

## 6. Conclusão

Este trabalho investiga o impacto da substituição da coluna de perfuração de aço pela de alumínio no processo de desgaste abrasivo na região próxima à junta flexível. Baseado em configurações padrões, alterou-se apenas o material dos tubos de perfuração e determinaram-se as forças de contato existentes entre a coluna de perfuração e os elementos externos. Nos dois casos analisados uma pequena região próxima à junta flexível (*Flex Joint*) domina as máximas intensidades de força de contato, na maioria dos casos observa-se um ponto de contato com intensidade muito alta comparada com os demais. Nestes casos a força máxima de contato é gerada pelo contato de uma conexão (*tool Joint*) com elementos externos como o *riser*, BOP e LMRP.

Um estudo analítico de desgaste foi realizado em face de tal força de contato sobre o *riser*. Para avaliar a espessura perdida da parede interna do *riser* devido ao desgaste, analisou-se a distância penetrada na sua parede interna para os casos da coluna de perfuração em aço e em alumínio. A perda de espessura no *riser* chegou a 1,29 mm e 0,87 mm para a coluna de perfuração em aço e alumínio, respectivamente.

Em vista das análises realizadas e dos resultados obtidos, a substituição por tubos de alumínio na coluna de perfuração se apresentou vantajosa, em aspectos como de redução de peso suportado pela unidade flutuante, maior avanço em poços direcionais e horizontais e redução no volume de desgaste provocado no *riser* em cerca de duas vezes e meia. Pode-se dizer então que a utilização de tubos de alumínio na coluna de perfuração é viável no que consta dos estudos deste trabalho, e de grande importância para a exploração em águas profundas e ultras profundas.

## 7. Referências

- [1] - HALL, Russel W. Jr., et al. "Contact Pressure Threshold" — Russel W. Hall, Jr, Kenneth P. Malloy Sr e Mohr Engineering Division – Stress Engineering Services 2005.
- [2] - FIGUEIREDO, M.W., "Estudo de Cargas em Cabeça de Poço Submarino em Operações de Completação", Tese de Mestrado, Programa de Engenharia Oceânica, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Estudo em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Abril de 2001.
- [3] - OPERATION MANUAL – "Aluminum Drill Pipes ADPPB131x13 and ADPPB150x25 for Oil&Gaz Wells Drilling". Empresa: AQUATIC COMPANY Marine Surveys & Drilling Operations, 2002.
- [4] - CUSTÓDIO, A. – "Análises Estáticas de *Riser* de Perfuração e Coluna de Perfuração". Projeto CENPES: 3053. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Maio de 2003.
- [5] - VAZ, M. A. e BARBOSA, R. L. – "Análises de Forças de Contato e Desgaste em *Risers* de Perfuração". Projeto CENPES: 6632. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Dezembro de 2005.