

## RIGIDEZ À FLEXÃO DE CABOS UMBILICAIS SUBMARINOS

**Luiz Antonio Lobianco e Souza, M.Sc.**

Petróleo Brasileiro S.A.- PETROBRAS

**Prof. Murilo Augusto Vaz, Ph.D.**

**Prof. Segen Farid Estefen, Ph.D.**

Programa de Engenharia Oceânica

COPPE/UFRJ– Instituto Alberto Luiz Coimbra para Estudos de Pós-graduação e Pesquisa em Engenharia – Universidade Federal do Rio de Janeiro

***Resumo.** Este trabalho apresenta uma metodologia para determinação experimental da rigidez à flexão de cabos umbilicais submarinos. Estas estruturas são formadas basicamente de um núcleo que acomoda as funções operacionais (hidráulica, elétrica ou ótica), camadas homogêneas cilíndricas termoplásticas que protegem à abrasão e armaduras de arames de aço enrolados contra-helicoidalmente que oferecem resistência mecânica e otimizam o balanceamento axissimétrico. Os resultados de ensaios realizados em três cabos umbilicais utilizados em águas profundas são apresentados e comparados com resultados de formulações analíticas existentes e com valores nominais de projeto. As amostras foram dissecadas para que as propriedades geométricas e dos materiais dos umbilicais "as built" fossem determinadas. As influências das camadas dos umbilicais na rigidez à flexão também foram avaliadas experimentalmente.*

**Palavras chave:** umbilicais, cabos, flexão, rigidez à flexão

### Notação

b = largura do arame;

d = diâmetro dos arames das armaduras.

e = espessura do arame;

EI = rigidez à flexão;

$E_i$  = módulo de elasticidade da camada plástica cilíndrica;

$E_j$  = módulo de elasticidade do material do arame da armadura;

G = módulo de cisalhamento;

$I_i$  = momento de inércia da camada plástica considerada;

$I_j$  = momento de inércia da seção transversal do arame da armadura;

$I_n$  = momento de inércia normal do arame da armadura;

$I_b$  = momento de inércia bi-normal do arame da armadura;

ID = diâmetro interno;

J = momento polar de inércia;  
M = número de camadas de arame das armaduras;  
n = número de arames da armadura;  
N = número de camadas cilíndricas poliméricas;  
OD = diâmetro externo;  
 $\alpha$  = ângulo de assentamento do arame na armadura e  
 $\nu$  = coeficiente de Poisson do material;

## 1 INTRODUÇÃO

Umbilicais são cabos multicamadas flexíveis que podem conter mangueiras poliméricas (ou metálicas), cabos elétricos ou fibras óticas, conforme exemplificado na figura 1. Têm como função transmitir energia hidráulica através de fluidos hidráulicos sob pressão ou conduzir energia elétrica na forma de potência ou de sinal. A energia hidráulica objetiva promover o acionamento de válvulas como, por exemplo, em Árvores de Natal, e com isso permitir a passagem de óleo, gás ou outro fluido. Trabalha normalmente com pressões elevadas, da ordem de 3000 a 5000 psi, podendo chegar, em alguns casos, a até 15000 psi. A energia elétrica na forma de potência tem como função alimentar componentes como, por exemplo, o motor que aciona uma bomba centrífuga submarina de fundo de poço. Na forma de sinal a energia elétrica tem como função transmitir informações de temperatura e de pressão do poço para a superfície.

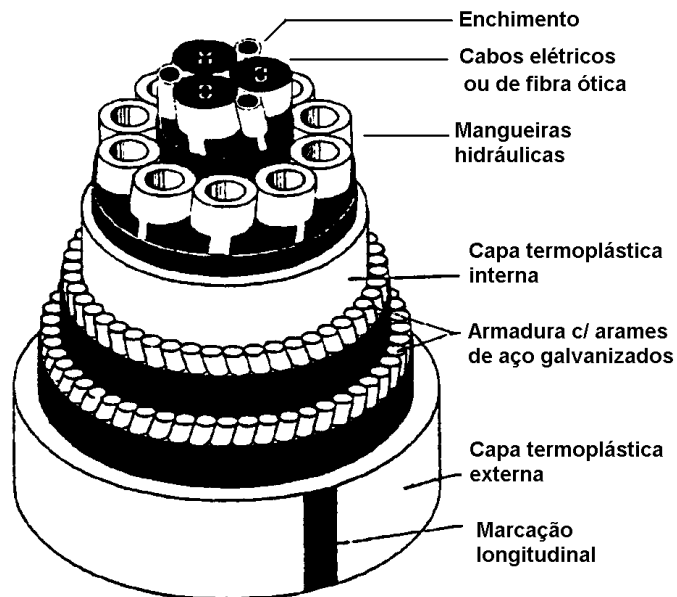


Figura 1: Exemplo de umbilical

Os umbilicais submarinos têm grande importância na atual produção de petróleo *offshore*. Seu custo representa cerca de 5% do custo total médio de um sistema de produção considerado-se poços, árvores de natal, linhas flexíveis, umbilicais, facilidades de produção e a própria plataforma. Assim sendo, trata-se de um investimento entre 10 e 75 milhões de dólares por sistema de produção.

Esse importante elemento do sistema de produção de petróleo *offshore* não tem todas as suas propriedades físicas bem avaliadas, uma vez que encontra-se em constante evolução

para acompanhar a rápida e crescente demanda tecnológica. Uma das mais relevantes propriedades físicas dos umbilicais submarinos é a rigidez à flexão. Não é raro observar fabricantes, que produzem umbilicais com características físicas muito semelhantes e para uso nas mesmas condições de aplicação, informar valores de rigidez à flexão muito distantes. Algumas vezes a relação entre os valores informados por fabricantes atinge valores da ordem do milhar. Qual seria então o valor correto para esta grandeza? Este trabalho visa definir uma metodologia para responder a esta pergunta.

Costello (1977) partindo do comportamento de uma mola sujeita a grandes deformações faz uma avaliação da flexão em tubos flexíveis. Batista e Ebecken (1988) avaliam o comportamento mecânico local de um tubo flexível quando submetido a flexão. Witz e Tan (1992) desenvolvem um modelo para tubos flexíveis, umbilicais e cabos elétricos objetivando avaliar o comportamento de estruturas compostas sujeitas à flexão, considerando estruturas com armaduras compostas por arames de seção retangular ou circular. Outras referências também foram avaliadas, vide Lobianco e Souza (1998), porém apresentaram enfoques e objetivos diferentes deste trabalho.

Este trabalho objetiva desenvolver uma metodologia para determinar os valores de rigidez à flexão de umbilicais submetidos à flexão pura, de modo a minimizar problemas durante e após instalação. Alguns modelos analíticos que objetivam avaliar a rigidez à flexão em cabos elétricos, linhas flexíveis e umbilicais são identificados e então aplicados a oito umbilicais utilizados na Bacia de Campos. Em seguida são apresentados os resultados dos ensaios de rigidez à flexão realizados em três umbilicais no Laboratório de Tecnologia Submarina (LTS), como também a influência das capas plásticas. Comparam-se os valores teóricos com os experimentais, de modo a identificar as formulações que mais se aproximam dos valores obtidos através dos testes laboratoriais.

## 2 MODELOS ANALÍTICOS

O umbilical, por ser uma estrutura composta por diversas camadas, não se comporta como uma simples viga no processo de flexão. Assim, como pode ser visto esquematicamente na figura 2, existem duas inclinações na curva momento fletor  $M$  versus curvatura  $k$ , correspondentes a dois valores para a rigidez à flexão destes materiais. A primeira inclinação indica a rigidez à flexão inicial antes que o atrito entre as armaduras de aço seja vencido (*no slip*). A segunda inclinação, ou segundo estágio, refere-se ao comportamento do umbilical após o escorregamento entre as armaduras (*full slip*). Este trabalho objetiva avaliar a resposta à flexão de cabos umbilicais durante esta segunda etapa.

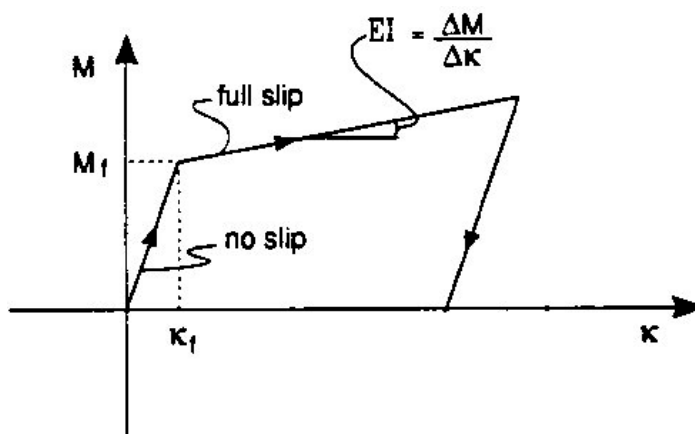


Figura 2: Comportamento à flexão de um tubo flexível com estrutura não aderente

Costello (1977) propõe a seguinte formulação para avaliar a rigidez à flexão em tubos flexíveis:

$$EI = \sum_{i=1}^N E_i I_i + \sum_{j=1}^M \frac{2n_j \cos \alpha_j}{(2 + \nu_j \sin^2 \alpha_j)} E_j I_j \quad (1)$$

Onde “N” é o número de camadas cilíndricas poliméricas e “M” é o número de camadas metálicas helicoidais, “n” é o número de arames da armadura, “ $\nu$ ” é o coeficiente de Poisson, “ $\alpha$ ” é o ângulo de assentamento do arame, “E” é o módulo de elasticidade e “I” é o momento de inércia.

Batista e Ebecken (1988) desenvolvem uma metodologia que avalia a rigidez à flexão de tubos flexíveis com camadas não aderentes. Têm-se parcelas devido às camadas poliméricas cilíndricas e devido às armaduras de tração, sendo as fórmulas para arames retangulares e circulares respectivamente dadas por:

$$EI \cong \sum_{i=1}^N E_i I_i + \sum_{j=1}^M E_j n_j b_j e_j \cos \alpha_j \frac{(b_j^2 + e_j^2)}{12(2 + \nu_j \sin^2 \alpha_j)} \quad (\text{arames retangular - 2.a})$$

$$EI \cong \sum_{i=1}^N E_i I_i + \sum_{j=1}^M E_j n_j \frac{\pi d^4}{32} \frac{\cos \alpha_j}{(2 + \nu_j \sin^2 \alpha_j)} \quad (\text{arames circular - 2.b})$$

Onde “b” e “e” são respectivamente a largura e espessura da seção transversal do arame retangular. Em seções circulares “d” é o diâmetro do arame da armadura.

Witz e Tan (1992) apresentam um modelo para estruturas flexíveis sujeitas à flexão. Para arames com seção transversal retangular a restrição associada com a torção local depende de sua seção transversal. Com seções circulares a torção local está restrita apenas pelo atrito. A rigidez à flexão, considerando arames de seção retangular, é dada por:

$$EI = \sum_{i=1}^N E_i I_i + \sum_{j=1}^M \frac{1}{2} n_j (E_j I_{n_j} + E_j I_{b_j} \cos^2 \alpha_j + G_j J_j \sin^2 \alpha_j) \quad (\text{arames retangular - 3.a})$$

Onde “G” é o módulo de cisalhamento do material e “J” é o momento polar de inércia.

Para arames de seção circular, onde a contribuição da torção local se dissipa após a ocorrência do deslizamento, tem-se:

$$EI = \sum_{i=1}^N E_i I_i + \sum_{j=1}^M \frac{1}{2} n_j (E_j I_{n_j} + E_j I_{b_j} \cos^2 \alpha_j) \quad (\text{arames circular - 3.b})$$

Caso sejam consideradas apenas as camadas poliméricas, a rigidez à flexão é então determinada por:

$$EI = \sum_{i=1}^N E_i \frac{\pi}{64} (OD_i^4 - ID_i^4) \quad (4)$$

Onde “OD” e “ID” são respectivamente os diâmetros externos e internos.

### Contribuição das camadas na rigidez à flexão

As equações (1) a (4) foram aplicadas em oito umbilicais utilizados na Bacia de Campos apresentando a seguinte participação percentual média de seus componentes (vide tabela 1).

Tabela 1: Participação percentual média dos componentes de umbilicais

| <b>Média de todos os umbilicais por formulação</b> |                        |                  |              |
|--|------------------------|------------------|--------------|
| <b>Formulação</b>                                  | <b>Capas Plásticas</b> | <b>Armaduras</b> | <b>Total</b> |
| <b>(1)</b>   | 86                     | 14               | 100          |
| <b>(2)</b>   | 88                     | 12               | 100          |
| <b>(3)</b>   | 84                     | 16               | 100          |
| <b>(4)</b>   | 100                    | 0                | 100          |

Pode-se ver na tabela acima que as capas plásticas têm grande participação na rigidez à flexão do umbilical (85%). Este resultado não inclui a formulação (4). As informações dos fabricantes relativas às espessuras, diâmetros e material polimérico destas capas têm grande importância na determinação da rigidez à flexão total do umbilical.

### 3 TESTES LABORATORIAIS

Os testes foram realizados no Laboratório de Tecnologia Submarina de acordo com o desenho esquemático da figura 3.

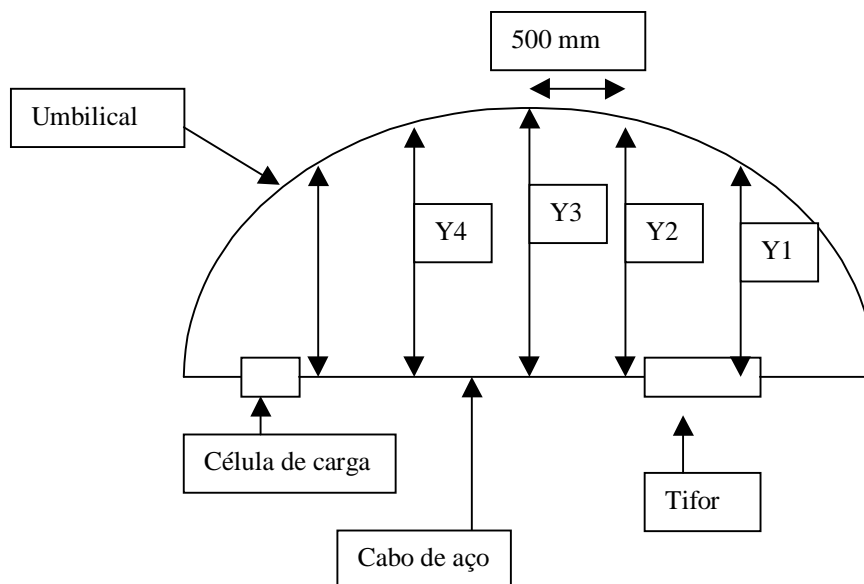


Figura 3 : Representação esquemática do ensaio de rigidez à flexão.

Foram realizados doze ensaios para avaliação da rigidez à flexão em três umbilicais, denominados E, F e G, cujas seções são apresentadas na figuras 4. A repetibilidade dos resultados experimentais e a influência das camadas na rigidez à flexão são avaliadas.

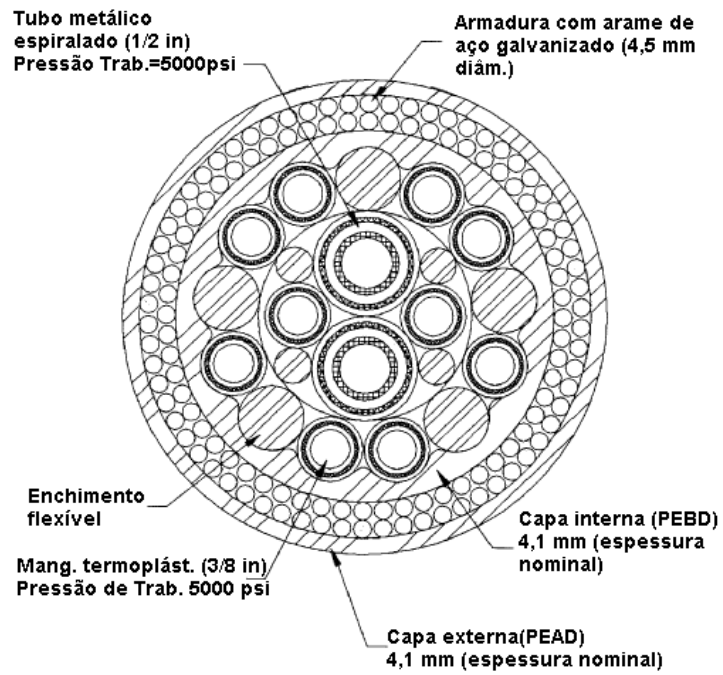
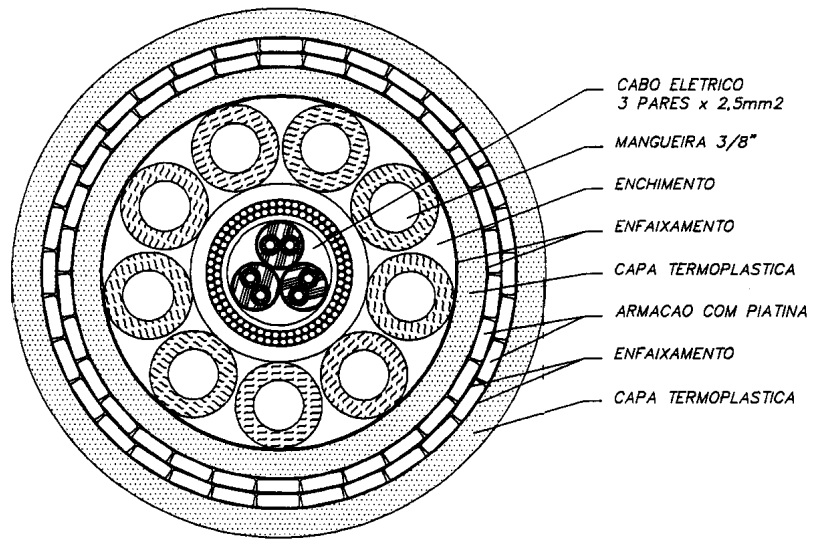
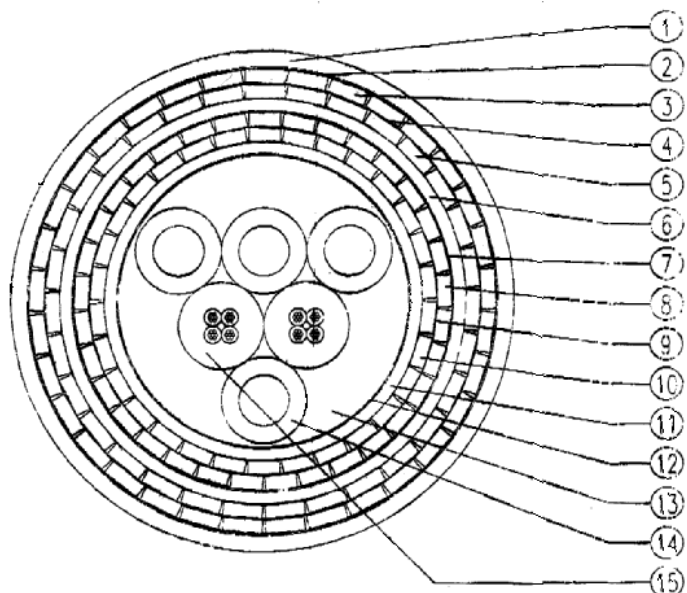


Figura 4a: Seção transversal do umbilical E.

Figura 4b: Seção transversal do umbilical F.



| ITEM           | DESCRIÇÃO                 |
|----------------|---------------------------|
| 1, 6, 11       | Capas poliméricas         |
| 2, 4, 7, 9, 12 | Fita                      |
| 3, 5, 8, 10    | Armaduras de arame        |
| 13             | Núcleo                    |
| 14 e 15        | Mangueira e cabo elétrico |

Figura 4c: Seção transversal do umbilical G.

Para execução dos testes foram colocadas folhas de fórmica sob o umbilical. Um cabo de aço é fixado nas duas extremidades que são tracionadas através de um tifor, provocando acréscimos de curvatura (figura 5). Foram feitas medições da força de tração no cabo e distâncias entre o cabo de aço e o umbilical em cinco pontos previamente determinados sobre a linha de centro do umbilical, a cada etapa do ensaio. Cada ponto do gráfico corresponde a uma leitura ocorrida durante o ensaio.



Figura 5: Foto do ensaio de flexão realizado no umbilical.

Desta forma calcula-se o momento fletor e a curvatura na seção central da amostra e constrói-se o gráfico apresentado na figura 6. A rigidez à flexão pode então ser facilmente calculada pelo ajuste de retas nos pontos obtidos nos ensaios.

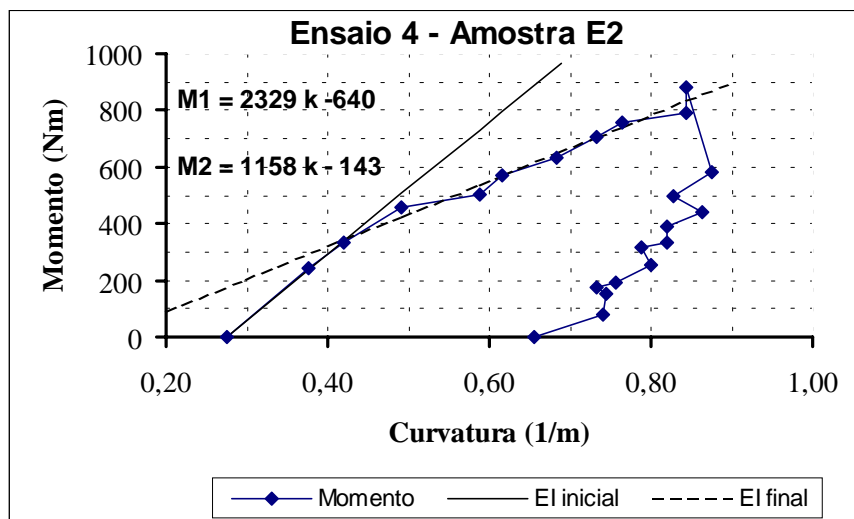


Figura 6: Momento Fletor *versus* Curvatura – Amostra E2.

### Repetibilidade dos resultados

Para avaliação desta característica utilizou-se a amostra E, obtendo-se os resultados da tabela 2:

Tabela 2: Resultados dos ensaios no umbilical E.

| Ensaio                               | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | Média |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|-------|
| Rigidez à flexão (kNm <sup>2</sup> ) | 1,03 | 1,16 | 1,54 | 1,13 | 1,31 | 1,23  |

Em termos de avaliação da repetibilidade dos ensaios, considera-se a faixa de dispersão obtida, aceitável. Observa-se que os resultados dos ensaios apresentam uma boa repetibilidade ou seja dispersão igual ou inferior a 25% da relação entre resultados e média, definido através do quociente (valor ensaio/média dos ensaios).

### Influência das capas poliméricas

Observa-se uma grande participação das capas poliméricas. A principal dificuldade reside na avaliação do seu módulo de elasticidade e na correta determinação de sua geometria devido principalmente, ao processo de extrusão. Realizou-se um ensaio no umbilical “E” sem capa externa, sendo obtida uma rigidez à flexão de 0,51 kNm<sup>2</sup>. A rigidez à flexão para o umbilical completo é 1,23 kNm<sup>2</sup>, o que indica uma participação da capa externa na rigidez à flexão do umbilical em torno de 60%.

### Resultados médios

Os valores apresentados na tabela 3 consideram a média aritmética dos testes de flexão nos umbilicais E, F e G.

Tabela 3: Rigidez à flexão experimental.

| Umbilical                            | E    | F    | G    |
|--------------------------------------|------|------|------|
| Rigidez à flexão (kNm <sup>2</sup> ) | 1,23 | 2,17 | 4,14 |

## 4 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DAS FORMULAÇÕES ANALÍTICAS

Algumas vezes os valores que constam das folhas de dados dos fabricantes não coincidem com os valores medidos nos umbilicais. A tabela 4 apresenta as estimativas de rigidez à flexão feitas através das formulações (1) a (5) considerando-se duas situações:



a) Utilização das propriedades geométricas e dos materiais conforme consta das folhas de dados dos fabricantes.

b) Utilização dos valores medidos diretamente nos umbilicais (“as built”), como por exemplo: módulo de elasticidade e dimensões das capas plásticas, número de arames, ângulo de assentamento.

Tabela 4: Rigidez à flexão considerando dados dos fabricantes e medidos

| <b>Rigidez à flexão (kNm<sup>2</sup>)</b> |                       |          |          |                    |          |          |
|---|-----------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|
| <b>Dados --&gt;</b>                       | <b>(a) fabricante</b> |          |          | <b>(b) medidos</b> |          |          |
| <b>Formulações</b>                        | <b>E</b>              | <b>F</b> | <b>G</b> | <b>E</b>           | <b>F</b> | <b>G</b> |
| <b>(1)</b>                                | --                    | 2,75     | --       | --                 | 3,32     | --       |
| <b>(2)</b>                                | 2,36                  | 2,75     | 5,66     | 1,38               | 3,32     | 5,95     |
| <b>(3)</b>                                | 2,35                  | 2,76     | 5,61     | 1,21               | 3,33     | 5,83     |
| <b>(4)</b>                                | 1,68                  | 2,26     | 3,27     | 0,73               | 2,81     | 2,69     |

Define-se desvio percentual “ $\delta$ ” como sendo a diferença, em termos percentuais, entre os valores calculados e dos ensaios, conforme descrito a seguir:

$$\delta = 100 \left| \frac{(VC - VE)}{VE} \right| \quad (6)$$

Onde:

VC = valor calculado,

VE = valor obtido através de ensaio (tabela 3).

Os seguintes resultados foram obtidos em termos de desvio percentual para os valores de rigidez à flexão dos umbilicais considerados:

Tabela 5: Desvio (%) da Rigidez à flexão entre o valores estimados e ensaiados

| <b>Dados --&gt;</b> | <b>(a) do Fabricante</b> |          |          | <b>(b) medidos</b> |          |          |
|---------------------|--------------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|
| <b>Formulações</b>  | <b>E</b>                 | <b>F</b> | <b>G</b> | <b>E</b>           | <b>F</b> | <b>G</b> |
| <b>(1)</b>          | --                       | 27       | --       | --                 | 53       | --       |
| <b>(2)</b>          | 92                       | 27       | 37       | 12                 | 53       | 44       |
| <b>(3)</b>          | 91                       | 27       | 36       | 1                  | 53       | 44       |
| <b>(4)</b>          | 36                       | 4        | 21       | 41                 | 30       | 35       |

Obtendo-se os seguintes resultados em termos de desvios médios de avaliação:

Tabela 6: Média dos desvios (%) considerando dados dos fabricantes e medidos.

| <b>Média dos desvios (%)</b> |                    |                |
|------------------------------|--------------------|----------------|
| <b>Dados -&gt;</b>           | <b>Fabricantes</b> | <b>Medidos</b> |
| <b>Formulações</b>           | <b>Média</b>       | <b>Média</b>   |
| <b>(1)</b>                   | 27                 | 53             |
| <b>(2)</b>                   | 52                 | 36             |
| <b>(3)</b>                   | 51                 | 33             |
| <b>(4)</b>                   | 20                 | 35             |

## 5 CONCLUSÃO

As formulações analíticas consideradas neste trabalho que avaliam a rigidez à flexão fornecem resultados muito próximos entre si quando aplicadas a umbilicais com arames de seção retangular enquanto que, para arames com seção circular, os resultados podem ser considerados idênticos. Como esperado, o modelo que considera apenas as camadas plásticas deve ser utilizado com ressalvas para avaliação de rigidez à flexão de cabos umbilicais uma vez que não considera as armaduras. A influência das camadas de armadura é maior para arames de seção retangular.

As estimativas feitas utilizando-se nas equações as propriedades medidas nos umbilicais (“as built”) conduzem a resultados melhores que aqueles obtidos utilizando-se dados dos fabricantes.

Para o umbilical “E” foram realizados cinco ensaios, com desvio relativo entre os valores máximo e mínimo de cerca de 50%. O valor médio dos ensaios apresenta um desvio médio de cerca de 7% em relação às formulações específicas para umbilicais com arames de seção retangular ou seja (2) e (3), sendo, portanto, consideradas satisfatórias tais estimativas.

A comparação das estimativas de rigidez à flexão com os resultados dos ensaios para os umbilicais F e G deve ser entendida apenas como uma referência haja vista que somente um ensaio foi realizado com o umbilical completo, para cada um desses umbilicais. Recomenda-se a realização de pelo menos três ensaios para determinação da rigidez à flexão. Outros ensaios realizados com estes umbilicais objetivaram avaliar a contribuição de algumas camadas na rigidez à flexão e por este motivo foram ensaiados sem alguns de seus componentes. A maior parcela da rigidez à flexão é devida às camadas plásticas (cerca de 85%). A contribuição menor das armaduras não pode ser desconsiderada, principalmente em umbilicais com seções retangulares.

## 7 - BIBLIOGRAFIA

- 1 - BATISTA R.C., EBECKEN N.F.F., “Relatório Coppetec sobre Análise do Comportamento Mecânico Local de Tubos Flexíveis”, 1988.
- 2 - COSTELLO G.A., “Large Deflections of Helical Spring due to Bending”, Journal of the Engineering Mechanics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol 103, No.EM3, Junho, 1977.
- 3 - LOBIANCO e SOUZA, “Rigidez à flexão de cabos umbilicais submarinos”, Tese de mestrado, COPPE/UFRJ, Dezembro/1998.
- 4 - WITZ, J.A., TAN, Z., “On the Flexural Structural Behaviour of Flexible Pipes, Umbilicals and Marine Cables”, Marine Structures, pp. 229-249, 1992.

### *Agradecimentos*

À PETROBRAS e aos técnicos do Laboratório de Tecnologia Submarina da COPPE/UFRJ.