



# 2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS

## Caracterização das Propriedades Mecânicas das Camadas de um Riser Flexível

Carlos Henrique Oliveira da Costa<sup>1</sup>, Ney Roitman<sup>2</sup>, Carlos Magluta<sup>3</sup>, Gilberto Bruno Ellwanger<sup>4</sup>

<sup>1</sup> COPPE/UFRJ, Cidade Universitária, Centro de Tecnologia, Bloco I – Labest,  
chocosta@pec.coppe.ufrj.br

<sup>2</sup> COPPE/UFRJ, Cidade Universitária, Centro de Tecnologia, Bloco I – Labest,  
Roitman@labest.coc.ufrj.br

<sup>3</sup> COPPE/UFRJ, Cidade Universitária, Centro de Tecnologia, Bloco I – Labest,  
magluta@labest.coc.ufrj.br

<sup>4</sup> COPPE/UFRJ, Cidade Universitária, Centro de Tecnologia, Bloco I – Labest,  
gbe@pec.coppe.ufrj.br

**Resumo** – Risers Flexíveis são estruturas largamente empregadas na indústria do petróleo, nos últimos 30 anos. Diante das sucessivas marcas alcançadas, nos últimos anos, das profundidades de exploração de petróleo em alto mar, torna-se necessário um maior conhecimento do comportamento estrutural destas linhas flexíveis. Este comportamento estrutural somente é possível de se prever quando as propriedades mecânicas dos materiais constituintes das diversas camadas de um Riser Flexível são conhecidas. O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados de ensaios de tração realizados para corpos de prova retirados das camadas metálicas de uma linha flexível rugosa de 4”. O que se deseja mostrar é que os processos de fabricação do riser alteram as propriedades mecânicas dos materiais constituintes.

Palavras-Chave: Riser Flexível; Materiais; Integridade Estrutural

**Abstract** – Flexible Risers have been widely used in the oil industry, mainly in the last 30 years. Because of the successive records in deep water exploitation, a greater knowledge on their structural behaviour has become necessary. The prediction of this behaviour is only possible by studying the mechanical properties of the different materials that compose the flexible riser's layers. This article presents the tensile properties for the metallic layer's materials. The purpose is show that fabrication processes have great influence over the mechanical properties of the materials that compose the flexible riser.

Keywords: Flexible Riser, Materials, Structural Integrity

## 1. Introdução

Risers Flexíveis são estruturas utilizadas na indústria do petróleo para conduzir fluidos do fundo do mar para uma unidade flutuante de produção. Como características gerais destas estruturas pode-se enumerar: alta flexibilidade, o que justifica o seu uso acoplada a estruturas complacentes e capacidade de ser armazenada em rolos, que reduz o custo de transporte e instalação.

Um Riser Flexível é composto por várias camadas de diferentes materiais, que interagem entre si. Podem ser divididas em dois grupos: linhas de camadas não-aderentes (*unbonded*) e linhas de camada aderente (*bonded*). A diferença está baseada na liberdade de movimento das camadas, umas em relação às outras. A Figura 1 ilustra uma típica linha flexível não aderente.



Figura 1. Riser Flexível de Camadas não-aderente.

As camadas ilustradas na Figura 1 são compostas por materiais metálicos e poliméricos. Na Tabela 1 encontram-se as descrições das funções estruturais pertinentes a cada uma destas camadas.

As camadas metálicas são espiras de diferentes perfis de seção transversal, dispostas no tubo em forma de hélice com diferentes ângulos de assentamento.

Tabela 1. Descrição das Camadas de um Riser Flexível não-aderente.

Camadas	Função Estrutural
A – Carcaça Intertravada	Resistir à pressão externa
C – Camada Plástica	Estanqueidade
D – Camada zeta	Resistir a esforços radiais devido à pressão externa
F – Camada Plástica	Estanqueidade e diminuição do atrito
G – Armaduras de Tração	Rigidez a torção e aos carregamentos axiais
H – Adesivo	Aderência das camadas G e I
I – Camada Plástica Externa	Protege a linha e assegura estanqueidade

Como foi apresentado por Neto e Maurício (2001), o grande desafio da exploração e produção de petróleo no Brasil é o desenvolvimento de tecnologia e conhecimento suficientes para alcançar maiores profundidades de lâminas d'água, onde se encontra a maior parte da reserva nacional.

Maiores profundidades significam maiores carregamentos nas linhas flexíveis em operação, maiores custos de instalação e operação e como apresentado por Sousa (2002), maiores cargas de instalação. Deste modo, o conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais que compõem uma linha flexível torna-se ponto crítico na compreensão do seu comportamento estrutural.

Diante destas perspectivas, o objetivo deste trabalho é apresentar os resultados de ensaio de tração realizados em corpos de provas retirados de materiais provenientes da carcaça intertravada de um riser flexível de 4”.

Os resultados apresentados fazem parte de um trabalho maior de pesquisa relacionada ao estudo dos efeitos das cargas de instalação sobre linhas, analisados através de abordagens numéricas e experimentais, sendo que os ensaios de tração apresentados aqui serão estendidos a todos os materiais, inclusive os poliméricos.

## 2. Ensaio de Tração – Considerações Gerais

A maior dificuldade para a realização destes ensaios foi a retirada dos corpos de prova. Basicamente isto se deve a dois problemas: a curvatura existente nas camadas devido à linha ter uma estrutura tubular e o fato da seção transversal possuir uma geometria muito complexa. Sendo assim, os corpos de prova não obedecem a uma norma específica. Como o intuito deste trabalho é servir de base para pesquisas futuras, todo o procedimento realizado é sucintamente descrito. Os corpos de prova foram levemente retificados, mas toma como hipótese que o encruamento provocado pelo processo de fabricação seja muito maior que o trabalho de retificação, de modo que este é considerado desprezível.

O diagrama obtido dos ensaios foi o convencional, uma vez que não foi medido a estricção do corpo de prova. A decisão foi tomada tendo em vista a dificuldade de medição da estricção e o diagrama convencional ser mais comum na prática de engenharia.

A seguir são descritos os ensaios de tração para a Carça Intertravada.

### 2.1. Carça Intertravada

O material constituinte, bem como as propriedades mecânicas nominais podem ser encontradas em Berge et al. (1992). Estes valores estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades Nominais para a Carça Intertravada – Risers Flexíveis.

Aço	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Deformação na Ruptura	Módulo de Elasticidade (MPa)
AISI 304	269	550	0,55	207000

Este Aço AISI 304 é um inoxidável austenítico. Na Figura 2 está ilustrada a seção transversal da Carça Intertravada. Foram retirados 10 corpos de prova da posição A e 5 corpos de prova da posição B ilustradas na figura.

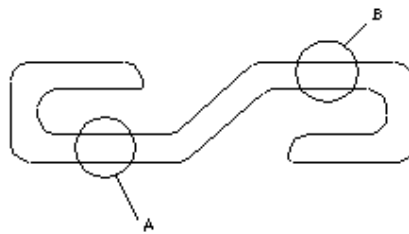


Figura 2. Seção Transversal da Carça Intertravada.

Os corpos de prova possuem seção transversal nominal, na área do pescoço, de 4,20mm de largura por 0,80mm de espessura. A Figura 3 ilustra as medidas (em mm) para os corpos de prova.

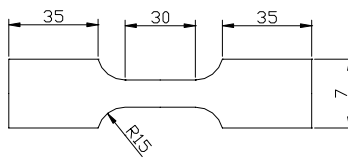


Figura 3. Corpo de Prova para a Carça Intertravada.

### 2.1. Procedimento Experimental

A máquina de ensaio utilizada é do tipo “dura”, imprimindo no corpo de prova uma taxa de deformação constante, que segundo Souza (1974) são adequadas para medidas precisas do estudo do escoamento. A velocidade de ensaio utilizada foi de 1mm/min, suficientemente alta para não afetar o patamar de escoamento do material (devido ao fenômeno da inércia), e nem tão baixa a ponto do material encruar, sucessivamente, durante a execução do ensaio.

Uma célula de carga foi utilizada para registrar as cargas desenvolvidas. Para a medição da deformação foi usado um extensômetro de resistência elétrica. O braço do extensômetro é de 25mm, ou seja, próximo do tamanho do comprimento útil do corpo de prova – 30mm. A Figura 4 ilustra o posicionamento do sensor no corpo de prova.



Figura 4. Detalhe do Sensor preso ao Corpo de Prova.

O sensor foi utilizado até o material começar a escoar. Após o escoamento ele é retirado para evitar a sua avaria junto com a ruptura do corpo de prova. A Figura 5 mostra uma foto dos corpos de prova antes do ensaio.



Figura 5. Corpo de Prova antes do Ensaio.

### 2.3. Resultados e Análise

Foram realizados 15 ensaios, sendo escolhidos seis corpos de prova como conjunto representativo do material. A Figura 6 mostra corpos de prova rompidos após a realização dos ensaios.



Figura 6. Corpos de Prova rompidos.

Como o material não apresenta patamar de escoamento definido, foi calculado no seu lugar o limite convencional  $n$ , onde o valor de  $n$  adotado foi de 0,2%, que segundo Sousa (1974) é o valor adequado para materiais dúcteis.

Para o cálculo do valor do Módulo de Elasticidade, foi utilizada a Equação 1:

$$E = \frac{Q \cdot L_0}{S_0 \cdot \Delta L} \quad (1)$$

,onde  $Q$  é a carga que produz uma deformação de 0,1%,  $S_0$  é a seção transversal inicial do corpo de prova e  $L_0$  é o braço do extensômetro. O valor de 0,1% foi escolhido por ser a metade do caminho da deformação de 0,2% utilizada para o cálculo do limite convencional  $n$ .

A Figura 7 apresenta um típico gráfico Tensão x Deformação obtido dos ensaios realizados.

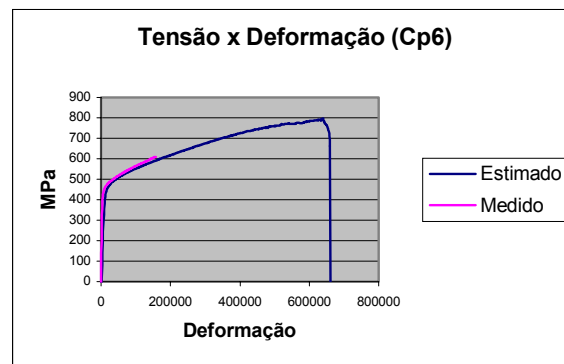


Figura 7. Diagrama Tensão x Deformação.

Na Figura 7, os valores estimados são obtidos através da medida do deslocamento relativo dos travessões da máquina de ensaio, enquanto os valores ditos “medidos” são aqueles em que a deformação é dada pelo extensômetro.

Na Tabela 3, estão dispostos os valores das propriedades obtidas, com base nos ensaios, para os seis corpos de prova representativos: Corpos de prova 6, 7, 8 e 9 da região A (ver Figura 2), e os corpos de prova 11 e 12 da região B.

Tabela 3. Propriedades Mecânicas obtidas através de Ensaios de Tração – Carcaça / Riser Flexível de 4”.

Corpo de Prova	E (MPa)	$\sigma_n$ (MPa)	$\sigma_r$ (MPa)	$\epsilon_u$ (%)
6	181513,5	405,8	796,9	52,3
7	178546,5	436,4	831,8	56,3
8	166694,0	412,8	806,1	55,5
9	159350,6	448,0	798,5	55,3
11	140498,6	488,6	821,6	55,2
12	158559,6	409,2	745,0	46,2

, onde E é o Módulo de Elasticidade,  $\sigma_n$  é o Limite Convencional n (0,2%),  $\sigma_r$  é o Limite de Resistência e  $\epsilon_u$  é a deformação última percentual.

Na Tabela 4, apresenta-se uma comparação dos resultados deste trabalho com os valores apresentados na Tabela 2 (valores tidos como nominais), e os valores apresentados por Souza (2002) e Alves (1998). Os dados são comparados pela média do conjunto de corpos de prova representativos.

Tabela 4. Comparação dos Resultados com outros Autores.

Propriedades	E (MPa)	$\sigma_n$ (MPa)	$\sigma_r$ (MPa)	$\epsilon_u$ (%)
Berge et al. (1992) <sup>1</sup>	207000	269	550	55
Alves (1998) <sup>2</sup>	140600	579,3	802,7	-
Souza (2002) <sup>3</sup>	-	530,0	802,3	27,3
Valores Encontrados	164193,8	433,5	800,0	53,5

Observando os dados resumidos na Tabela 4, pode-se tirar algumas conclusões relativas tanto a qualidade do ensaio, como dos valores aplicáveis ao material da carcaça intertravada. As Tensões de Ruptura e de Escoamento apresentam-se maiores que as respectivas tensões nominais. No caso da Tensão de Ruptura há uma boa repetibilidade dos valores apresentados, o que dá uma confiança em relação ao uso destes resultados. Para a Tensão de Escoamento, o que se observa é uma dispersão dos valores experimentais em relação aos nominais. Tomando como base o valor nominal encontrado em Berge et al. (1992), a Tensão de Escoamento aqui obtida apresenta um desvio de 61%, enquanto para o valor encontrado por Alves (1998) este desvio foi de 115% e finalmente, para o valor encontrado por Souza (2002), o desvio foi de 97%. Apesar desta variação de desvio percentual, observa-se que a Tensão de Escoamento do material retirado da carcaça é maior que a mesma propriedade para o material antes do processo de fabricação da linha. Além disso, como a Tensão de Escoamento encontrada neste trabalho é menor que a Tensão de Escoamento que é apresentada por Souza (2002), as deformações últimas correspondentes resultaram diferentes. Contudo, ambas as Deformações Últimas são menores que a nominal.

O Módulo de Elasticidade do material obtido experimentalmente é menor do que o nominal, significando que o material tem comportamento menos rígido após a fabricação da linha.

### 3. Conclusões Finais

Através dos resultados presentes aqui, verificamos que as propriedades mecânicas do material da carcaça possuem valores diferentes daqueles correspondentes ao material antes do processamento fabril. Tendo em vista que o trabalho a frio modifica a microestrutura do material e o encrua, era esperado que esta mudança nos valores das propriedades ocorresse. A questão que se propõe é determinar estes novos valores para todos os materiais constituintes da linha flexível. Através deste conhecimento é possível determinar com segurança os seus limites de utilização.

### 6. Agradecimentos

Aos orientadores pelo auxílio no trabalho, aos amigos e funcionários do Programa de Engenharia Civil, ao Laboratório de Propriedades Mecânicas do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, ao Instituto de Macromoléculas e a ANP e FINEP pelo apoio financeiro à pesquisa.

### 7. Referências Bibliográficas

ALVES, T. M. J. Reanálise de Tubos Flexíveis em Estoque de 4”, estrutura 101.5070. *Programa Experimental – Petrobras/Cenpes/Diplot/Semec*, 1998.

- BERGE, S., ENGSETH, A., FYLLING, L., LARSEN, C. M., LEIRA, B. J., NYGAARD, I., OLUFSEN, A. Handbook on Design and Operation of Flexible Pipes. *Research Program FPS 2000 / Flexible Risers and Pipes*, 1992.
- NETO, E., MAURÍCIO, J., WACLAWEK, I. Flexible Pipe for Ultra-Deepwater Applications: The Roncador Experience. In: *Proceedings of the 33rd Offshore Technology Conference, Houston, USA*, 2000.
- SOUSA, J. R. M., ELLWANGER, G. B., LIMA, E. C. P. An Analytical Model to Predict the Local Mechanical Behaviour of Flexible Risers Subjected to Crushing Loads. Em: *XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural*, Brasília, Brasil, 2002.
- SOUZA, A. P. F. Colapso de Dutos Flexíveis sob Pressão Extrema. *Tese D. Sc. – COPPE/UF RJ*, 2002.