

Análise numérica da pressão de ruptura de tubos à base de borracha e cordoneis poliméricos

Numeric analysis of the burst pressure pipe based on rubber and polymeric cords

Maikson Luiz Passaia Tonatto^{1*}, Maria Madalena de Camargo Forte¹, Sandro Campos Amico¹, Pedro Barrionuevo Roese² e Ricardo Teles Araujo²

¹Laboratório de Materiais Poliméricos – LAPOL, Departamento de Materiais – DEMAT, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil

²PETROBRAS E&P, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

*maikson.tonatto@ufrgs.br

Resumo

Este trabalho tem como objetivo estudar o efeito de cordoneis de poliéster, poliamida, poliaramida e híbrido poliamida/poliaramida como reforço de elastômeros utilizados na fabricação de mangotes. O comportamento do tubo elastomérico reforçado com cordoneis sob pressão interna foi simulado com análise por elementos finitos (FEA) utilizando-se elementos chamados reinforcement bars. Foram realizados ensaios para se obter as propriedades em tração dos cordoneis para alimentar o modelo. O cordoneis de poliaramida apresentou a maior tensão de ruptura, o de poliamida maior deformação na ruptura, e o híbrido apresentou valores intermediários. O critério de falha adotado para o tubo consistiu na análise do nível de carga no cordoneis. Foram avaliadas, principalmente, a pressão e a deformação de ruptura do tubo elastomérico simulado frente à variação do ângulo de orientação dos cordoneis. Os resultados mostraram que ângulos próximos a 55° tornam o tubo mais resistente porém menos rígido no sentido longitudinal.

Palavras-chave: cordoneis polimérico, propriedades em tração, ângulo de reforço, FEA, pressão de ruptura.

Abstract

This work investigates the effect of polyamide, polyester, polyaramid and hybrid (polyamide and polyaramid) cords as reinforcement for elastomers used in the production of marine hoses. The behavior of the elastomeric pipe reinforced with these cords under internal pressure was simulated with finite element analysis (FEA) using elements called reinforcement bars. To obtain input data for the model, tensile properties of the cords were evaluated. The polyaramid cord showed the highest ultimate stress, the polyamide the largest elongation at break, and the hybrid cord showed intermediate values. The failure criterion adopted for the pipe consisted of examining the allowable force in the cord. The analyses focused on the variation of pressure and strain at burst of the pipe with the orientation angle of the cords along the elastomeric tube. The results showed that angles close to 55° yielded stronger pipes but less rigid in their longitudinal direction.

Keywords: polymeric cord, tensile properties, reinforcement angle, FEA, burst pressure.

1. Introdução

Tecidos para reforço de elastômeros são normalmente produzidos com cordoneis fabricados com fibras sintéticas de poliamida e poliéster ou uma combinação destas, com trama de fios de algodão ou outro material similar. Esse tipo de reforço é muito utilizado na produção de pneus, artefatos de borracha diversos, bem como em mangotes flexíveis para o transporte de petróleo, sendo empregado para conferir propriedades como rigidez e resistência adequadas^[1,2]. Os tecidos de fibra sintética são fabricados pelo processo de tecelagem a partir de cordoneis obtidos pela torção das fibras, que confere ao cordoneis propriedades sob medida, destacando-se para a maioria das aplicações o comportamento em tração. Anteriormente à incorporação

de fibras, cordoneis, ou tecidos nos elastômeros, estes são submetidos ao processo de dipagem, que consiste no tratamento com agentes químicos, propiciando melhor adesão entre os componentes e melhores propriedades físico-mecânicas^[2].

A poliamida (Nylon[®]) e o poliéster (Dacron[®]) são tradicionalmente empregados em tubos ou mangotes pois possuem elevado alongamento na ruptura (20% e 13,5%, respectivamente), reduzindo a rigidez do equipamento. No entanto, possuem uma baixa resistência (cerca de 950 MPa e 1160 MPa, respectivamente) em relação a fibras de alto desempenho disponíveis atualmente. As fibras de carbono e E-glass possuem baixo alongamento na ruptura (cerca de

2,0%), sendo pouco utilizadas para esse conceito, enquanto a poliaramida (Kevlar®, Nomex®, Twaron®) garante resistência elevada, por volta de 2800 MPa^[3-6].

Estudos já publicados avaliaram as propriedades mecânicas dos tecidos de cordoneis/borracha pela micromecânica de compósitos. Por aproximação linear, foram analisadas as constantes de engenharia para diversos tipos de tecido, dentre eles, o tecido de poliéster/borracha apresentou $E_{11} = 841$ MPa, $E_{22} = 13,4$ MPa, $\nu_{12} = 0,49$ e $G_{12} = 3,45$ MPa, enquanto o tecido de aramida/borracha, apresentou $E_{11} = 5230$ MPa, $E_{22} = 13,5$ MPa, $\nu_{12} = 0,49$ e $G_{12} = 3,45$ MPa^[7,8].

A condição crítica quanto à resistência de tubos ou mangotes ocorre quando avaliados na pressão de ruptura. Especialmente, em tubos compósitos, um fator crítico que influencia esta propriedade é o ângulo em que estão dispostas as fibras, ou os cordoneis, em relação ao eixo axial (longitudinal) do tubo. O estudo desse comportamento em componentes com materiais rígidos, como o epóxi/E-glass, entre outros^[9,10], é comum, sendo bem menos comuns para matrizes elastoméricas.

O ângulo ideal de orientação pode ser estimado por cálculos analíticos para geometrias e carregamentos simples, e para cilindros submetidos à pressão interna, a relação entre a tensão radial e a axial (σ_r/σ_a) é igual a 2. Esta análise negligencia a contribuição da borracha e somente considera a tensão na direção do cordoneil (σ_p). As tensões radial e axial são dadas pelas Equações 1 e 2, respectivamente:

$$\sigma_r = \sigma_f \cdot \sin^2(\alpha) \quad (1)$$

$$\sigma_a = \sigma_f \cdot \cos^2(\alpha) \quad (2)$$

Se $\frac{\sigma_r}{\sigma_a} = 2$, então o rearranjo do sistema com as duas equações torna-se $\sin^2(\alpha) = 2\cos^2(\alpha)$, e pode-se identificar o ângulo de $\alpha = 54,7^\circ$. Esse ângulo maximiza o volume do cilindro e gera a tendência de aumento do comprimento equivalente ao raio do cilindro quando da incidência de pressão interna^[10,11].

Em 1990, Lotveit et al.^[12] estabeleceu um método para prever tensões em tubulações flexíveis com carregamento combinado. O método prevê de forma analítica os carregamentos em cada camada de tubulações do tipo “*unbonded*”, ou seja, onde o reforço é independente da matriz, e não do tipo “*bonded*”, onde o reforço é embestado na matriz. Alguns trabalhos posteriores foram publicados focando na avaliação do comportamento de tubulações flexíveis do tipo “*unbonded*”, entre os quais pode-se citar, Gu et al.^[13], que descreve um modelo analítico para prever as deformações e tensões das camadas da tubulação sob pressão interna, Alfano et al.^[14], que desenvolveu leis constitutivas para prever o comportamento das tensões e deformações sob carregamento de flexão, e Sævik^[15], que comparou resultados analíticos e experimentais do tubo.

Neste trabalho, cordoneis de poliaramida, poliéster, poliaramida e híbrido (poliaramida + poliaramida) foram

ensaiados em tração para o levantamento das propriedades com características não lineares, que foram aproximadas por modelo hiperelástico e inseridas de forma discretizada no modelo numérico axi-simétrico de um tubo elastomérico do tipo “*bonded*” de butadieno-acrilonitrila reforçado com estes cordoneis na intenção de prever a pressão de ruptura e a deformação axial do tubo em função do ângulo de orientação dos cordoneis.

2. Experimental

2.1 Materiais

Cordoneis de poliaramida (densidade linear: 10000-20000 denier), poliaramida (3000-10000 denier), poliéster (2000-9000 denier) e híbrido de poliaramida/poliéster (3000-10000 denier) foram adquiridos já com acabamento superficial ou dipagem. Como matriz, utilizou-se um composto elastomérico de butadieno-acrilonitrila de uso geral disponível no mercado nacional.

2.2 Ensaio de tração de cordoneis

O ensaio de tração dos cordoneis foi realizado em máquina universal Instron modelo 3382 (Figura 1a), com garras Instron específicas para ensaios de cordoneis (Figura 1b), com capacidade de 5 kN. O ensaio dos cordoneis de poliaramida e poliéster, com diâmetro de aprox. 2,4 e 1,5 mm, respectivamente, foi feito segundo a norma ASTM D885, enquanto para os cordoneis de poliaramida e híbrido (ambos com diâmetro de aprox. 1,0 mm) seguiu-se a norma ASTM D7269. Os corpos de prova (CP) de poliaramida, em especial, foram pré-condicionados em ambiente climatizado a $45 \pm 5^\circ\text{C}$ por 5 h. O ensaio de tração foi realizado a $24 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $55 \pm 2\%$. Foram ensaiados 10 CPs para cada amostra de cordoneil e os resultados foram empregados para compor uma curva média utilizada na análise por elementos finitos, e comparados com dados da literatura^[16,17].

2.3 Ensaio de tração do composto de borracha

O ensaio de compressão do elastômero (corpo de prova: $28,6 \pm 0,1$ mm de diâmetro e $12,5 \pm 0,5$ mm de altura), baseado na norma ASTM D575, foi realizado em uma máquina de ensaio universal com dispositivo do tipo placa. Para o ensaio de tração do elastômero, baseado na norma ASTM D412, um dispositivo específico de fixação do corpo de prova foi acoplado à máquina para o ensaio. Os dados obtidos foram inseridos no software de elementos finitos onde foram avaliados e aproximados por uma curva de modelo numérico de Arruda-Boyce para materiais hiperelásticos. A escolha deste modelo foi baseada na aproximação dos dados experimentais em toda a faixa de interesse^[18].

3. Modelamento por Elementos Finitos

A análise por elementos finitos (FEA) foi realizada utilizando um modelo axi-simétrico de tubo cilíndrico com diâmetro interno de 254 mm e comprimento de 500 mm, ilustrado na Figura 2. O software utilizado para a confecção do modelo foi o Abaqus/CAE® 6.13. Para representar

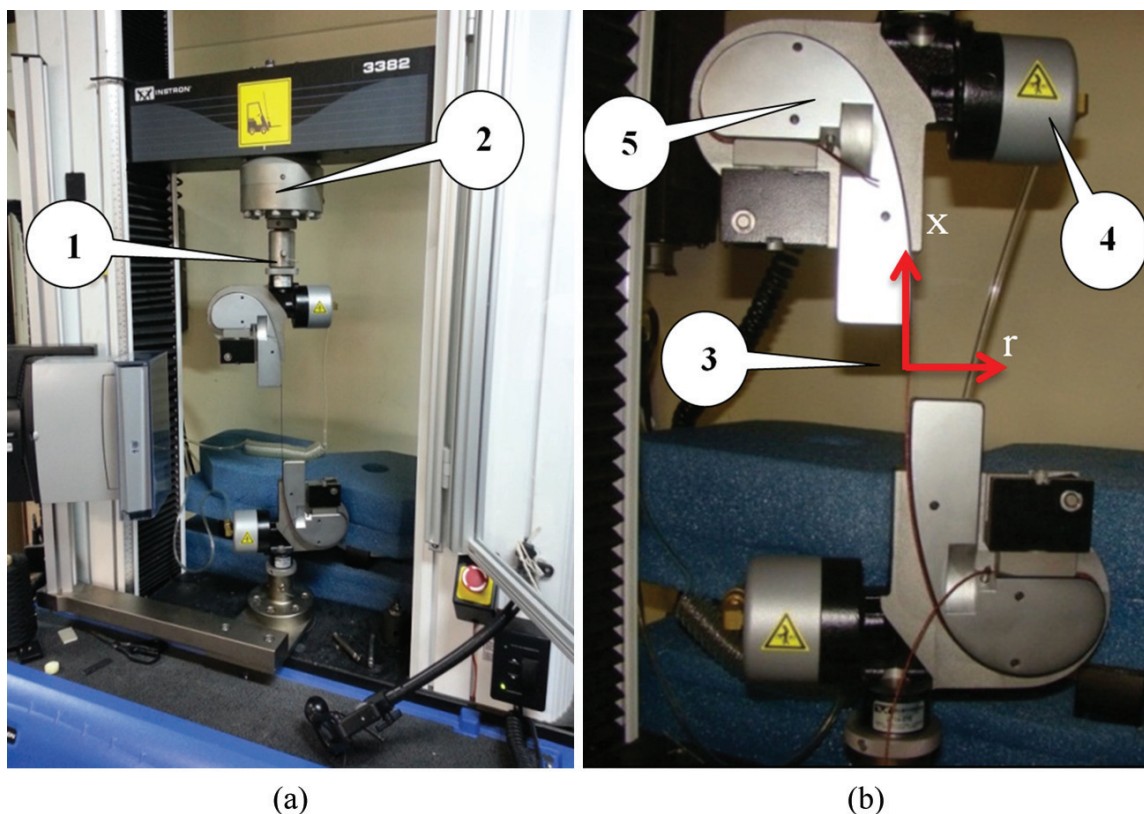


Figura 1. Imagens da máquina universal Instron (a) e das garras para ensaio de cordonéis (b). Componentes: (1) Encaixe da garra; (2) Célula de carga, (3) Cordonel; (4) Conexões pneumáticas; (5) Mordente.

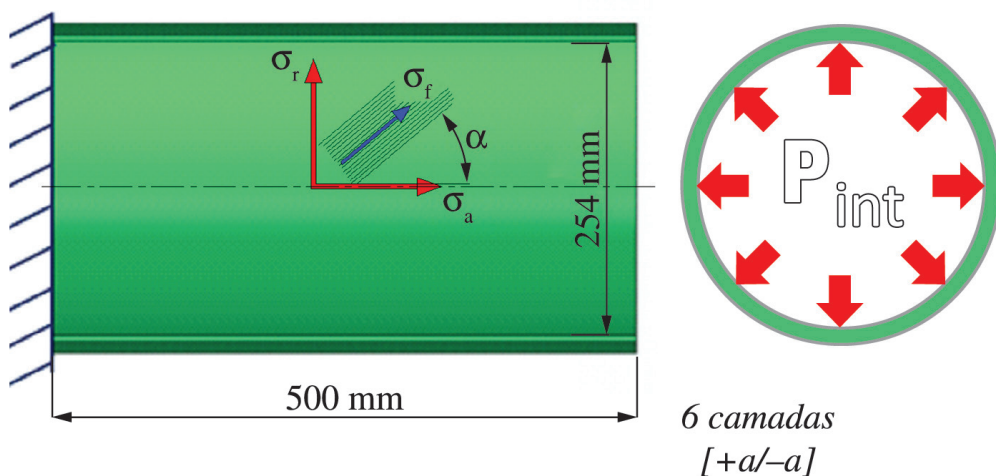


Figura 2. Ilustração da geometria do modelo do tubo submetido à pressão interna

os cordonéis, foram utilizados elementos denominados *reinforcement bars* (REBARs). A malha utilizada continha 900 elementos do tipo CAX4R e SFMAX1 para a borracha e as camadas de reforço, respectivamente. Foram modelados tubos com 6 camadas de reforço dos diferentes cordonéis estudados, sendo que estes foram dispostos em diferentes pares de ângulos de orientação ($\pm 49^\circ$, $\pm 51^\circ$, $\pm 53^\circ$, $\pm 54^\circ$, $\pm 55^\circ$, $\pm 56^\circ$ ou $\pm 57^\circ$) em relação ao eixo longitudinal do tubo.

As camadas de reforço foram embebidas na matriz elastomérica e foram utilizadas as seguintes condições de contorno: Em uma das extremidades, aplicou-se restrição de deslocamento e rotações em todas as direções, e na outra extremidade, aplicou-se a componente axial da pressão de modo a causar um alongamento no tubo utilizando uma força axial concentrada em uma das extremidades do tubo. Dessa forma, foi possível representar as cargas geradas pelos flanges

tradicionalmente colocados nas extremidades do tubo em um ensaio hidrostático. No interior do tubo, aplicou-se uma pressão interna suficiente para atingir a máxima resistência dos cordoneis.

4. Resultados e Discussão

4.1 Comportamento em tração dos cordoneis e do composto elastomérico

A Figura 3 mostra os pontos experimentais médios de tensão vs deformação em tração dos diferentes cordoneis e as curvas de ajuste do modelo hiperelástico de Marlow^[19] do Abaqus, selecionado por ser numericamente mais estável ou robusto, e por ajustar muito bem os dados experimentais em toda a faixa de deformação avaliada.

O cordonel de poliéster apresentou tensão e deformação de ruptura de 207 MPa e 12,6%, respectivamente, enquanto

o cordonel de poliamida gerou 193 MPa e 29,1%, respectivamente. O cordonel de poliaramida apresentou o maior módulo, com tensão e deformação de ruptura de 1607 MPa e 4,5%, respectivamente, enquanto o cordonel híbrido poliamida/poliaramida apresentou 1164 MPa e 5,8%, respectivamente. Vê-se que os cordoneis com poliaramida apresentaram tensão de ruptura bastante superior à do poliéster atualmente utilizado como reforço em muitas aplicações. O cordonel híbrido apresentou deformação bem inferior à observada para o poliéster, no entanto, a sua maior resistência confere uma grande vantagem em termos de desempenho global^[20,21].

A Figura 4 mostra a curva de tensão vs deformação construída a partir de dados experimentais obtidos. O ajuste desses dados foi feito utilizando o modelo hiperelástico de Arruda-Boyce^[19] disponível no Abaqus^[22] e observa-se que houve uma excelente correlação desta curva com os dados experimentais da literatura tanto na

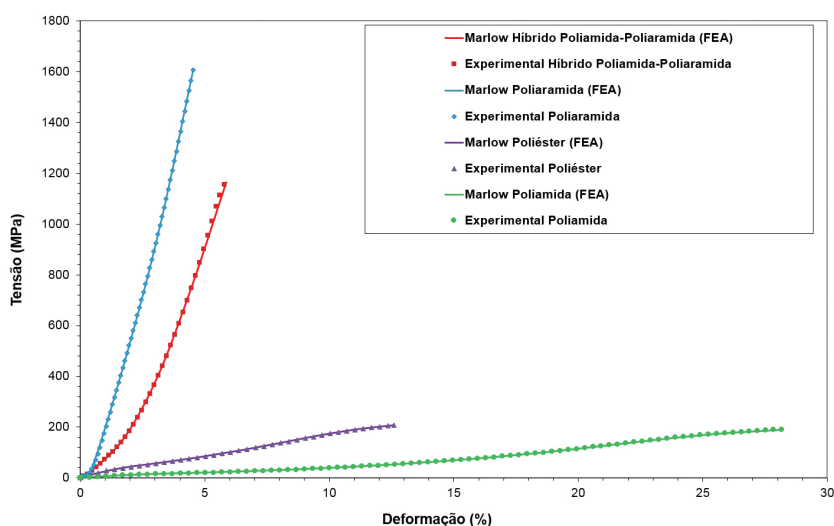


Figura 3. Tensão vs deformação em tração dos cordoneis de poliéster, poliamida, poliaramida e híbrido, e ajuste pelo modelo de Marlow (linhas)

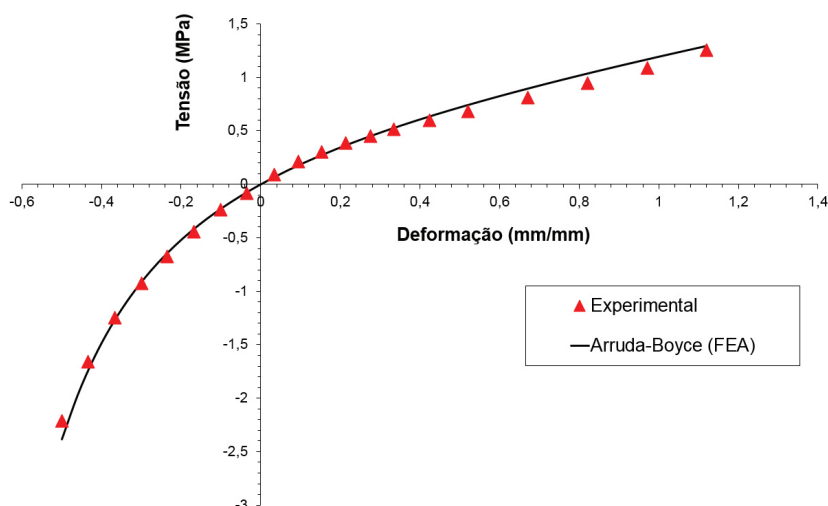


Figura 4. Curva de tensão vs deformação do elastômero obtida por dados experimentais e teórico (modelo Arruda-Boyce).

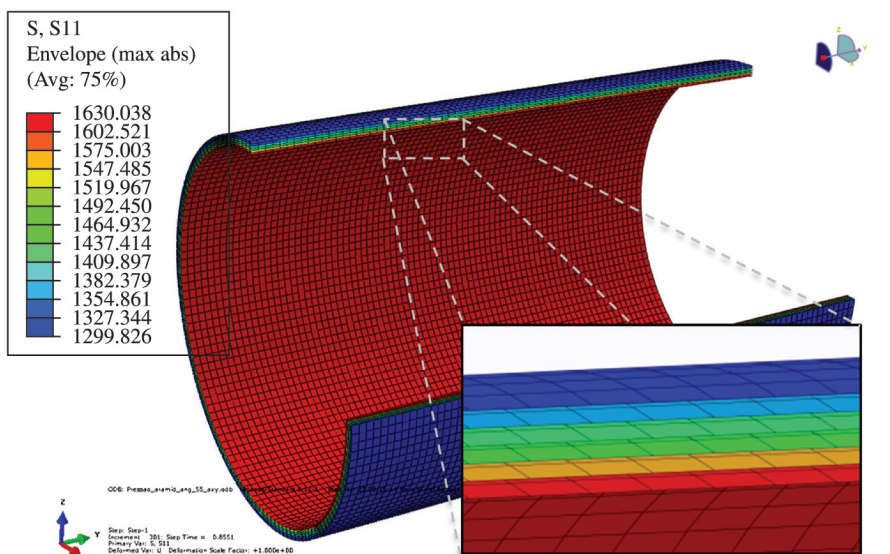
zona de compressão (deformação negativa) como de tração (deformação positiva). Os dados apresentados são similares aos disponíveis na literatura^[18,23] para este composto elastomérico.

4.2 Avaliação da pressão de ruptura dos modelos de tubos por elementos finitos

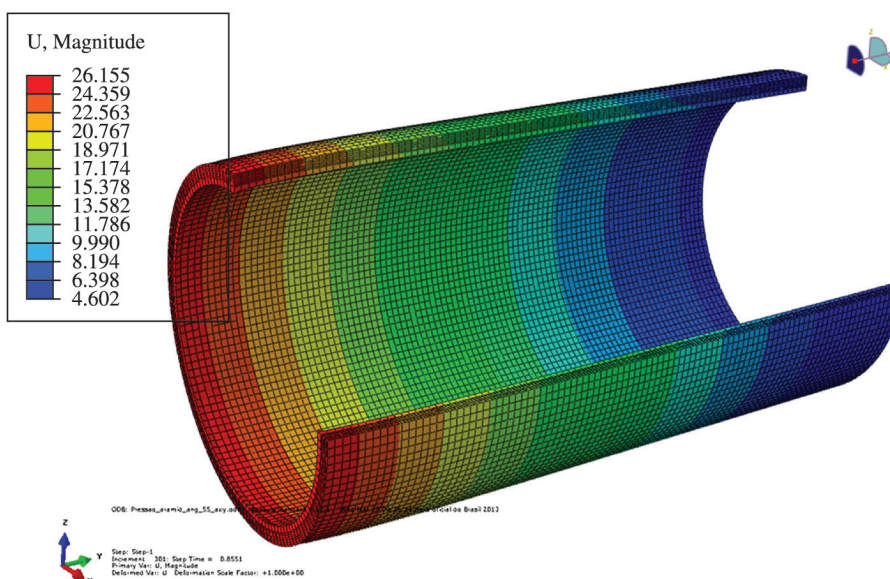
Através da análise por elementos finitos ou FEA, buscou-se identificar em qual pressão interna do tubo os cordoneis atingiriam sua carga de ruptura, em que região a falha ocorreria e o alongamento axial provocado no tubo.

Para tal, foi avaliada a variável tensão no sentido axial dos cordoneis (S_{11} , MPa) e a variável *Spatial Displacement* (U, mm), relativa ao deslocamento axial do tubo.

As Figuras 5a, b mostram imagens 3D do tubo elastomérico reforçado com cordoneis de poliaramida com ângulo de 55° submetido a uma pressão hidrostática de 171 bar. Sob essa pressão, os cordoneis estão sujeitos a uma tensão próxima à de ruptura (i.e. 1607 N, na Figura 3). Pelo modelo, o rompimento previsto para os cordoneis ocorre a uma pressão próxima a 170 bar (obtida por interpolação linear). O espectro de carregamento em



(a)



(b)

Figura 5. Imagem 3D do tubo elastomérico com cordoneis de poliaramida 55° submetido à pressão interna de 171 bar: (a) Tensão S11 (MPa); (b) Deslocamento axial (mm).

cada uma das seis camadas do tubo elastomérico reforçado pode ser visto no detalhe da Figura 5a, onde se nota um maior carregamento na camada mais interna, alcançando cerca de 1630 MPa, enquanto a camada mais externa sofre uma menor sollicitação, tensão de 1299 MPa, 25% menor que a anterior. Estes valores revelam que a falha teria início na camada mais interna e se propagaria para as camadas mais externas. Para o nível de pressão analisado, o tubo apresentou alongamento axial em torno de 26 mm Figura 5b, resultando em uma deformação de 5,3%.

As Figuras 6 e 7 mostram as curvas de pressão vs deformação geradas nas simulações do tubo em função do tipo e ângulo de orientação (de $\pm 49^\circ$ a $\pm 57^\circ$) dos cordonéis. Observa-se que há um afastamento das curvas relativas aos ângulos de 49° a 54° em relação à curva de 55° para todos os tubos (independentemente do tipo de cordonel utilizado). No início das curvas de 49° a 54° , nota-se que a deformação é nula ou próxima de zero até a faixa entre 15-30 bar. Tal comportamento indica que nestes tubos os cordonéis rotacionam para um ângulo de equilíbrio maior que o de construção, provocando uma diminuição do comprimento do tubo. Já para tubos com ângulos de 55° a 57° , ocorre o aumento do comprimento do tubo no início do carregamento. Estes resultados mostram que a definição de um ângulo ideal, pelo menos nesta faixa de exatidão, é

uma característica puramente geométrica, sendo este um parâmetro extremamente importante em um carregamento devido à pressão interna.

De uma forma geral, observa-se que os tubos elastoméricos com cordonéis orientados com ângulo de 49° apresentaram menor deformação axial, ou seja, uma maior rigidez axial. Por outro lado, os tubos com cordonel a 55° apresentaram maior resistência à ruptura, garantindo o melhor desempenho geral do tubo. Tal resultado corrobora dados já divulgados na literatura^{9,24}. No entanto, o baixo módulo de elasticidade do composto de elastômero faz com que a rotação dos cordonéis fosse facilitada, sendo a diferença da pressão de ruptura para os diferentes ângulos menor do que seria notada para uma matriz mais rígida. Por outro lado, nos tubos com cordonéis a 57° , ocorre uma diminuição significativa de rigidez, pois estes estão menos alinhados em relação à direção axial do tubo.

É importante também ressaltar que a discretização entre cordonéis e borracha no modelo tornou essa análise mais precisa e que as curvas de simulação dos tubos elastoméricos apresentaram tendência bastante similar às curvas dos cordonéis, pois grande parte da rigidez do tubo é proveniente da rigidez dos cordonéis.

A Figura 8 compila os dados de pressão de ruptura dos tubos elastoméricos em função do tipo e ângulo dos

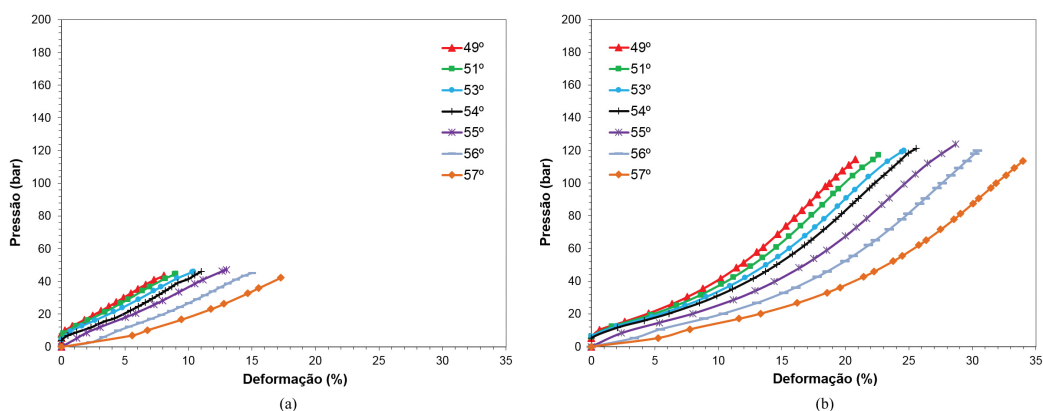


Figura 6. Pressão vs deformação dos tubos elastoméricos em função do ângulo de distribuição dos cordonéis de: (a) poliéster e (b) poliamida.

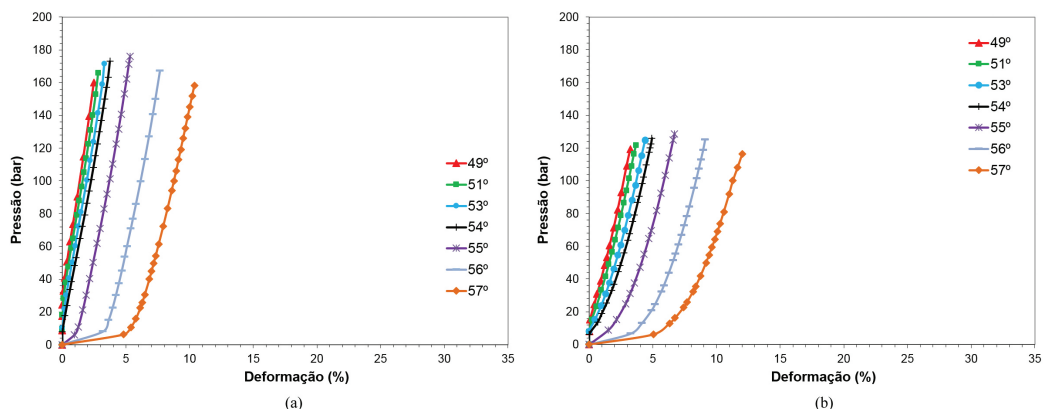


Figura 7. Pressão vs deformação dos tubos elastoméricos em função do ângulo de distribuição dos cordonéis de: (a) poliamida e (b) híbrido.

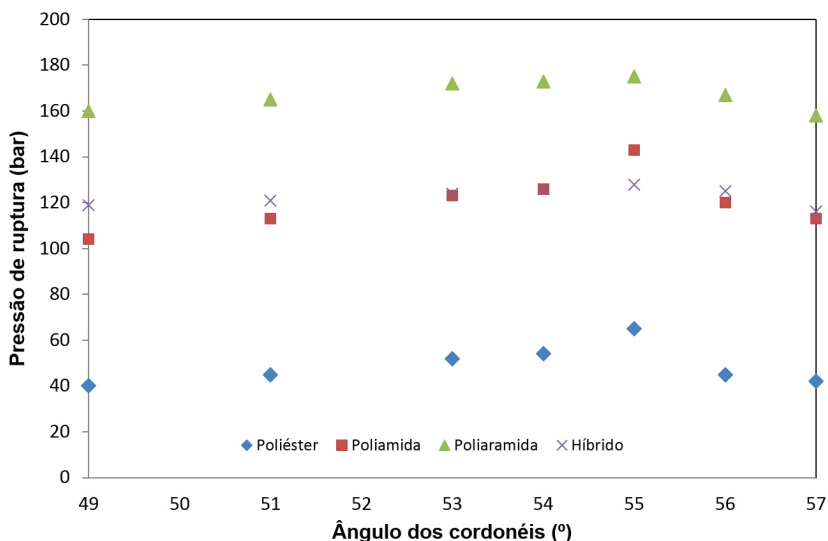


Figura 8. Pressão de ruptura dos tubos elastoméricos em função do tipo e ângulo dos cordoneis.

cordoneis. O tubo reforçado com cordoneis de poliéster apresentou os menores valores de pressão de ruptura para todos os ângulos analisados, de 40 bar (para 49°) a 65 bar (para 55°). O tubo reforçado com cordoneis de poliamida apresentou o maior valor de pressão na ruptura (170 bar em 55°), enquanto os tubos reforçados com cordoneis de poliamida e híbridos, apresentaram valores de pressão de ruptura similares e intermediários. Assim, os tubos elastoméricos reforçados com cordoneis híbridos, e os reforçados com cordoneis de poliamida, com o mesmo número de camadas, apresentam, respectivamente, resistência cerca de 2,0 e 2,7 vezes superior à dos tubos com cordoneis de poliéster, deixando clara a vantagem de se utilizar fibras de melhor desempenho para reforço dos elastômeros.

5. Conclusões

O cordoneis de poliamida apresenta módulo superior e deformação máxima inferior aos demais cordoneis avaliados, o que é uma desvantagem em aplicações que envolvam elevada deformação na ruptura. Já o cordoneis de poliéster apresenta baixa carga de ruptura, conferindo ao tubo elastomérico uma menor pressão de ruptura quando usado como reforço, enquanto os cordoneis de poliamida apresentam carga na ruptura levemente inferior ao poliéster, mas sua elevada deformação na ruptura favorece o uso em aplicações onde esta propriedade é importante. Por outro lado, a combinação entre elevada carga de ruptura do cordoneis de poliamida e a elevada deformação na ruptura da poliamida conferem ao cordoneis híbrido um melhor desempenho global.

A análise por FEA de tubos elastoméricos reforçados com diferentes cordoneis mostrou-se bem sucedida, sendo validada por resultados analíticos e comparação com dados da literatura. O ângulo de orientação ideal dos cordoneis é o de 55°, permitindo uma maior pressão e deformação de ruptura ao tubo. O melhor desempenho deste ângulo é

explicado pelo melhor equilíbrio entre as forças radiais e axiais provocadas pela aplicação de pressão no interior do tubo. Para disposição de cordoneis com ângulos diferentes deste há uma perda de eficiência, pois à medida que a pressão interna é aplicada, as fibras tendem a sofrer rotação até um ponto de equilíbrio. No caso do ângulo de 57°, por exemplo, a rotação gerou encolhimento do tubo, diminuindo sua deformação na ruptura.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem à Petrobras pelo apoio ao desenvolvimento deste estudo e ao CNPq pelo apoio à pesquisa.

7. Referências

1. Aytac, A., Yilmaz, B., & Deniz, V. (2009). Effect of Twist Level on Tyre Cord Performance. *Fibers and Polymer*, **10**(2), 221-225. <http://dx.doi.org/10.1007/s12221-009-0221-7>.
2. Oil Companies International Marine Forum. (2009). *Guide to manufacturing and purchasing hoses for offshore moorings*. London: Ocimf.
3. Hahn, C. (2000). Characteristics of p-Aramid Fibers in Friction and Sealing Materials. *Journal of Industrial Textiles*, **30**(2), 146-165. <http://dx.doi.org/10.1177/152808370003000205>.
4. Kovac, F. J., & Kersker, T. M. (1964). The Development of the Polyester. *Textile Research Journal*, **34**(1), 69-79. <http://dx.doi.org/10.1177/004051756403400112>.
5. Papero, P. V., Kubu, E., & Roldan, L. (1967). Fundamental Property Considerations in Tailoring a New Fiber. *Textile Research Journal*, **37**(10), 823-833. <http://dx.doi.org/10.1177/004051756703701002>.
6. Naskar, A. K., Mukherjee, A. K., & Mukhopadhyay, R. (2004). Studies on tyre cords: degradation of polyester due to fatigue. *Polymer Degradation & Stability*, **83**(1), 173-180. [http://dx.doi.org/10.1016/S0141-3910\(03\)00260-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0141-3910(03)00260-X).
7. Tabaddor, F. (1985). *Mechanical Properties of Cord-Rubber Composites*. Ohio: Composite Structures.
8. Pidarti, R. M. V., & May, A. W. (1996). A micromechanical analysis to predict the cord-rubber composite properties.

- Composite Structures, **34**(4), 361-369. [http://dx.doi.org/10.1016/0263-8223\(95\)00133-6](http://dx.doi.org/10.1016/0263-8223(95)00133-6).
9. Önder, A. (2007). *First failure pressure of composite pressure vessels* (Tese de doutorado). Graduate School of Natural and Applied Sciences of Dokuz Eylül University, Izmir.
 10. Kavekar, M. M.; Khatawate, M. V. H.; Patil, M. G. V. (2013). Weight reduction of pressure vessel using FRP composite material. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, **4**, 300-310.
 11. Grove, S. (1999). Optimum fiber orientation in filament wound structures. *Journal of Materials Science Letters*, **18**(15), 1203. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1006694000701>.
 12. Lotveit, S. A.; Ofte, O. (1990). Increased reliability through a unified analysis tool for bonded and non-bonded pipes. *Advances in subsea pipeline engineering and technology*, **24**, 81-110.
 13. Gu, F., Huang, C.-K., Zhou, J., & Li, L. (2009). Mechanical Response of Steel Wire Wound Reinforced Rubber Flexible Pipe under Internal Pressure. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, **14**(6), 747-756. <http://dx.doi.org/10.1007/s12204-009-0747-2>.
 14. Alfano, G., Bahtui, A., & Bahai, H. (2009). Numerical derivation of constitutive models for unbonded flexible risers. *International Journal of Mechanical Sciences*, **51**(4), 295-304. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2009.02.002>.
 15. Sævik, S. (2011). Theoretical and experimental studies of stresses in flexible pipes. *Computers & Structures*, **89**(23-24), 2273-2291. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruc.2011.08.008>.
 16. Gopez, F. (2008). Aramid yarn as a textile member in products. *Rubber & Plastics News*, **1**, 14-16.
 17. Zandiyeh, A. R. K. (2008). *Mangueira resistente ao esmagamento*. PI 0512531-6A. Rio de Janeiro: Instituto Nacional da Propriedade Industrial.
 18. Rahiman, K. H., Unnikrishnan, G., Sujith, A., & Radhakrishnan, C. K. (2005). Cure characteristics and mechanical properties of styrene-butadiene rubber/acrylonitrile butadiene rubber. *Materials Letters*, **59**(6), 633-639. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2004.10.050>.
 19. Abaqus, I. (2008). *Analysis User's Manual Volume V, Prescribed Conditions, Constraints & Interactions*. Journal of Biomedical Science and Engineering, **6**(11), 898.
 20. Wardle, M. (1978). Aramid Fibers for high performance coated fabrics. *Journal of Industrial Textiles*, **7**(4), 334-356. <http://dx.doi.org/10.1177/152808377800700408>.
 21. Lambillotte, B. D. (1989). Fabric Reinforcements for Rubber. *Journal of Industrial Textiles*, **18**(3), 162-179. <http://dx.doi.org/10.1177/152808378901800303>.
 22. Behrooz, M., Olatunbosun, O. A., & Ding, W. (2011). Finite element analysis of aircraft tyre – Effect of model complexity on tyre performance characteristics. *Materials and Design*, **35**, 810-819.
 23. El-Lawindy, A. M. Y., & El-Guiziri, S. B. (2000). Strain energy density of carbon-black-loaded rubber vulcanizates. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **33**(15), 1894-1901. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/33/15/320>.
 24. Arikan, H. (2009). Failure analysis of ($\pm 55^\circ$)₃ filament wound composite pipes with an inclined surface crack under static internal pressure. *Composite Structures*, **92**(1), 182-187.

Enviado: Mar. 03, 2014

Reenviado: Jul. 27, 2014

Aceito: Set. 12, 2014