

INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE ORIENTAÇÃO DE CORDONÉIS POLIMÉRICOS NA PRESSÃO DE RUPTURA DE TUBOS ELASTOMÉRICOS

Maikson L. P. Tonatto^{1*}, Felipe R. S. Gabbardo¹, Maria M. C. Forte¹, Ricardo Teles Araújo², Sandro C. Amico¹

¹GCOMP/LAPOL/PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, 91509-900
Porto Alegre, RS, Brasil (maikson.tonatto@ufrgs.br)

²PETROBRAS E&P, Av. Chile, 330, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Resumo– Este trabalho investiga as propriedades em tração de cordonéis de poliamida, poliéster, poliaramida e híbrido (poliamida e poliaramida) e o efeito do uso desses materiais em um tubo elastomérico reforçado com esses cordonéis. O cordonel de poliaramida apresentou a maior tensão de ruptura, o de poliamida a maior deformação na ruptura, e o cordonel híbrido apresentou o melhor balanço nessas propriedades. Um tubo elastomérico reforçado com cordonéis, submetido à uma pressão interna e utilizando-se elementos chamados *Reinforcement Bars* (REBARs), foi simulado por análise de elementos finitos (FEA), com o software Abaqus/CAE 12. O critério de falha utilizado consistiu na análise do nível de carga contido no cordonel. Observou-se principalmente a pressão e a deformação de ruptura do tubo frente à variação do ângulo de distribuição dos cordonéis. As simulações mostraram que ângulos próximos a 55° tornam o tubo mais resistente e menos rígido em seu sentido axial.

Palavras-chave: *Cordonel polimérico, Propriedades de tração, Ângulo de reforço, FEA, Pressão de ruptura.*

Introdução

Tecidos para reforço de elastômeros são normalmente produzidos por cordonéis de fios sintéticos, tais como poliaramida, poliamida, poliéster ou uma combinação destes, 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 transporte de óleo. Tal componente tem a finalidade de fornecer as propriedades de rigidez e resistência necessárias a esses artefatos elastoméricos [1], [2].

A produção de tecidos inicia com o processo de torção do cordonel para alcançar as propriedades mecânicas desejadas no fio, sendo a mais importante na maioria das aplicações a resposta tensão *vs* deformação em tração, seguido do processo de tecelagem. Por fim, o tecido é submetido ao processo de dipagem, no qual é tratado com agentes químicos para atingir propriedades físico-mecânicas finais [1] e propiciar a adesão necessária entre cordonel e borracha [3].

Neste estudo, cordonéis de poliamida, poliéster, poliaramida e híbrido (poliaramida + poliamida) foram ensaiados em modo tração para determinação e inserção de suas características no modelo numérico 3D de um tubo elastomérico reforçado com tecido capaz de prever a pressão de ruptura e a deformação axial em função do ângulo de distribuição dos cordonéis no tecido [4].

Parte Experimental

Ensaio de tração de cordonéis

Para o ensaio de tração dos cordonéis foram utilizados corpos-de-prova torcidos e dipados fornecidos pelos fabricantes DuPont, Kordsa e Teijin. Foi utilizada uma máquina universal de tração Instron 3382 tendo acoplada garras Instron 2714-010 com capacidade de até 5 kN (Fig. 1). Para o ensaio dos cordonéis de poliamida e poliéster, utilizou-se a norma ASTM D885, sendo que a relação de área transversal dos cordonéis foi de 1,0 e 0,58, respectivamente. Para o ensaio dos cordonéis de poliaramida e híbrido, utilizou-se a norma ASTM D7269, tendo ambos relação de área transversal de 0,41.

Os corpos de prova contendo poliaramida foram pré-condicionados em ambiente climatizado a uma temperatura de $45 \pm 5^\circ \text{C}$ [$113 \pm 40^\circ \text{F}$] durante 5 h. O ensaio das amostras foi realizado a $24 \pm 2^\circ \text{C}$ [$60 \pm 5^\circ \text{F}$] e umidade relativa de $55 \pm 2\%$. Para cada amostra de cordonel, foram ensaiadas 10 corpos de prova, cujos resultados foram utilizados para compor uma curva média utilizada na análise por elementos finitos e comparados com dados disponíveis na literatura [5] [6].

Construção do modelo de 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 500 mm. Para representar os cordonéis utilizou-se elementos chamados *Reinforcement Bars* (REBARs). A malha possui 900 elementos do tipo CAX4R e SFMAX1 utilizados para representar a borracha e as camadas de reforço, respectivamente. Foram modeladas 6 camadas de reforço onde os cordonéis foram orientados em pares de ângulos de distribuição variados em $\pm 49^\circ$, $\pm 51^\circ$, $\pm 53^\circ$ ou $\pm 55^\circ$ em relação ao eixo central do tubo, para os 4 materiais ensaiados. Além da aplicação da pressão interna, com o auxílio de uma força axial concentrada em um dos extremos do tubo, foi possível simular a componente axial da pressão capaz de alongá-lo.

Além dos valores das propriedades tensão vs deformação dos cordoneis, obtidos no laboratório, foram utilizados valores das propriedades do composto elastomérico disponíveis na literatura [7] [8]. Foi feito um ajuste dos dados obtidos ao modelo hiperelástico de Arruda-Boyce [4] para descrição do seu comportamento mecânico. Devido à hiperelasticidade da borracha e o comportamento elástico não linear dos cordoneis foram utilizadas simulações não lineares, com incrementos de força menores que 0,00125.



Fig. 1: Imagem da garra pneumática Instron durante o ensaio de tração dos cordoneis.

Resultados e Discussão

Os resultados foram avaliados quanto ao comportamento em tração e ruptura dos cordoneis quando simulados no modelo do tubo sob pressão interna. O modelo hiperelástico de Marlow foi escolhido para este estudo por ser numericamente mais estável (robusto) e por se ajustar facilmente aos dados experimentais [4] obtidos neste trabalho.

Curvas de tensão versus deformação

A Fig. 2(a-b) mostra as curvas médias de tensão vs deformação em tração obtidas a partir dos dados experimentais para os cordoneis de poliéster, poliamida, poliaramida e híbrido (poliaramida+poliamida), e as curvas de ajuste do modelo hiperelástico de Marlow. Foi observada uma excelente correlação entre os dados experimentais e o modelo hiperelástico de Marlow em toda a faixa de deformação avaliada.

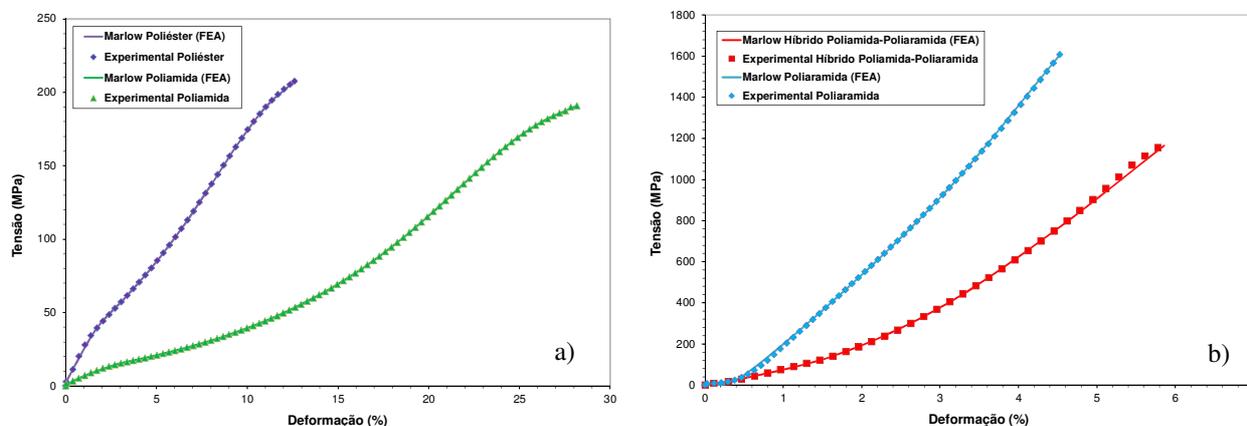


Fig. 2: Tensão vs deformação dos cordoneis (dados experimentais = símbolos) e ajuste pelo modelo de Marlow (linhas). (a) Poliéster e poliamida e (b) poliaramida e híbrido.

O cordoneis de poliéster apresentou uma carga e deformação de ruptura de 207 MPa e 12,6%, respectivamente. Enquanto, para o cordoneis de poliamida, esses valores foram 193 MPa e 29,1%. O cordoneis de poliaramida foi o que apresentou o maior módulo entre todos e carga e deformação de ruptura igual a 1607 MPa e 4,5%, respectivamente. Verifica-se que a resistência do cordoneis híbrido poliaramida-poliaramida é da ordem de 1164 Mpa, bastante superior a do cordoneis de poliéster (207 MPa), atualmente utilizado como reforço em borrachas. O cordoneis híbrido apresenta no máximo 5,8% de deformação na ruptura, bem inferior a observada para o cordoneis de poliéster (12,6%), no entanto, a sua maior resistência confere a este uma grande vantagem em termos de desempenho.

Avaliação da pressão de ruptura dos modelos por elementos finitos

Para análise dos resultados do FEA, buscou-se identificar em qual pressão os cordoneis atingiriam sua carga de ruptura, em que região a falha ocorreria e o nível de alongamento axial provocado no tubo. Para isso, avaliou-se a variável

Stress Mises (S), em MPa, e a variável *Spatial Displacement* (U), em mm. Por exemplo, a Fig. 3(a-b) mostra a imagem 3D do modelo do tubo reforçado com cordoneis de poliaramida com ângulo de 55° para uma pressão hidrostática de 171 bar, na qual os cordoneis estão próximos da ruptura (1607 N, vide Fig. 2(b)). O rompimento dos cordoneis previsto pelo modelo ocorre a uma pressão levemente inferior e igual a 170 bar. Nessa pressão o tubo se deslocou axialmente cerca de 26 mm, resultando em um deformação de 5,3%.

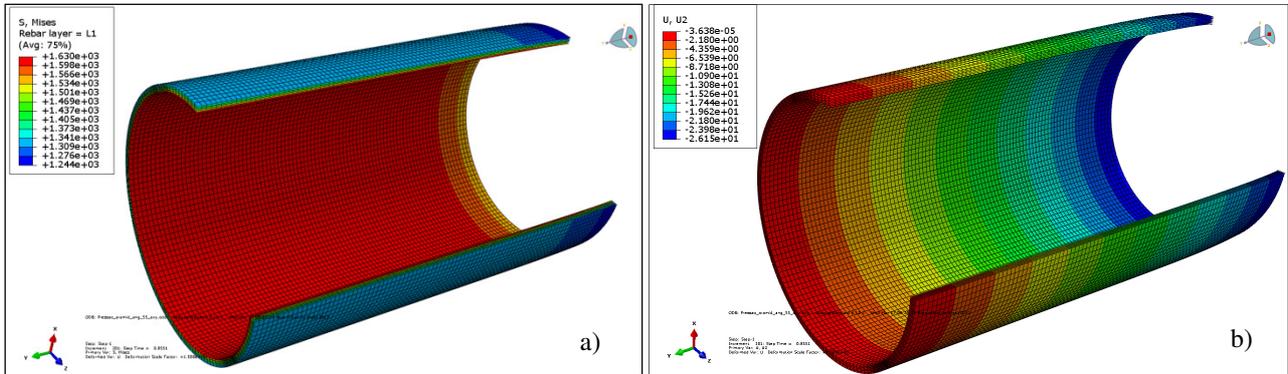


Fig. 3: Imagem 3D e resultados do modelo submetido a $P_{interna} = 171$ bar. (a) Tensão de Mises (MPa) e (b) deslocamento axial (mm).

As Fig. 4(a-b) e 5(a-b) mostram as 16 curvas de pressão vs deformação geradas pelas simulações envolvendo a mudança de material e ângulo dos cordoneis. De uma forma geral, observa-se que o ângulo de 49° apresentou, para todos os materiais, a menor pressão de ruptura e a menor deformação axial, e conseqüentemente a maior rigidez axial. Por outro lado, com ângulo de 55°, a energia necessária para a ruptura do tubo foi a maior dentre todas as curvas, o que pode garantir uma boa performance desse ângulo. Para os ângulos de 51° e 53°, os resultados foram intermediários aos anteriormente testados.

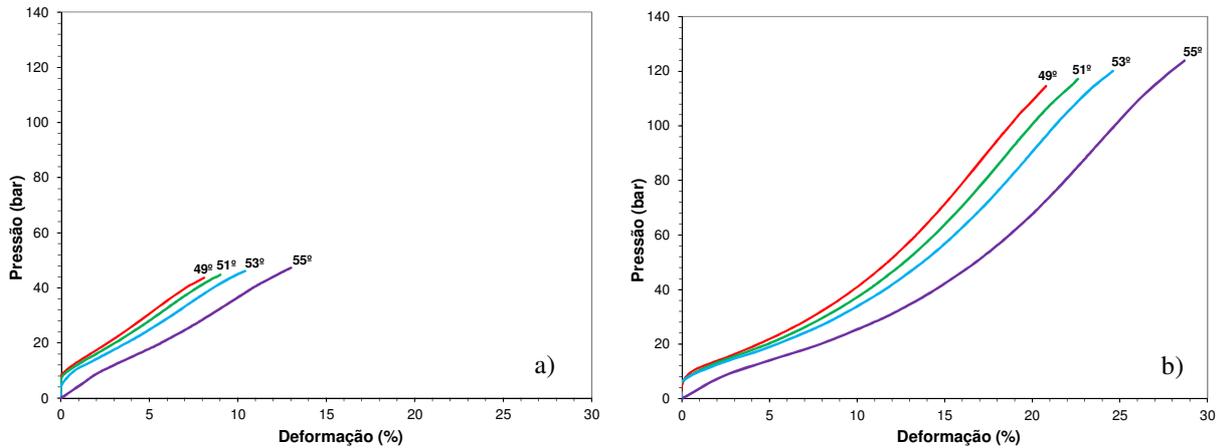


Fig. 4: Pressão vs deformação em função do ângulo de distribuição dos cordoneis. (a) Poliéster e (b) Poliamida

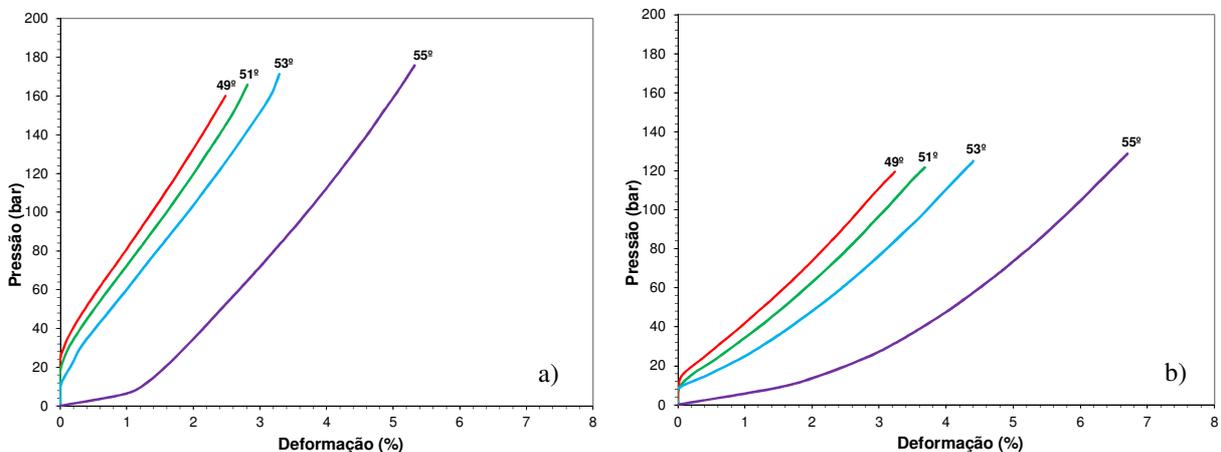


Fig. 5: Pressão vs deformação em função do ângulo de distribuição dos cordoneis: (a) Poliaramida (b) Híbrido.

Conclusão

O cordonel de poliamida apresentou módulo superior aos demais, o que é uma desvantagem em aplicações que exijam elevada deformação na ruptura. Em contra-partida, o cordonel de poliéster apresentou baixa carga de ruptura e conseqüentemente uma menor pressão de ruptura do tubo elastomérico. Apesar dos cordonéis de poliamida apresentarem uma carga na ruptura levemente inferior ao poliéster, a elevada deformação na ruptura desse material favorecem o seu uso em aplicações que requerem essa propriedade. A combinação entre a carga de ruptura do cordonel de poliamida e a deformação na ruptura da poliamida forneceram ao cordonel híbrido um melhor balanço dessas características.

A análise por FEA provou que 55° é o ângulo de distribuição ideal dos cordonéis, pois este permitiu uma maior pressão e deformação de ruptura do tubo. Esse bom desempenho ocorreu devido a esse ângulo ocasionar o equilíbrio entre as forças radial e axial provocada pela pressão no interior do tubo. Para os demais ângulos há uma perda de eficiência, pois à medida que a pressão interna foi aplicada, os mesmos sofreram rotação de seu ponto inicial até o ponto de equilíbrio. A rotação para um ângulo maior fez com que o tubo sofresse um “encolhimento”, diminuindo a deformação na ruptura.

Agradecimentos

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

Referências

1. KORDSA. **Product catalogue Twixtra**. 2012. ed. Turkey: Kordsa, 2012.
2. AYTEC, A.; YILMAZ, B.; DENIZ, V. Effect of Twist Level on Tyre Cord Performance. **Fibers and Polymer**, Turkey, v. 10, n. 2009, p. 221-225, Janeiro 2009.
3. OCIMF. **Guide to manufacturing and purchasing hoses for offshore moorings**. 2009. ed. London: Oil Companies International Marine Forum, 2009.
4. ABAQUS INC. **Analysis User's Manual: Volume V: Prescribed Conditions, Constraints & Interactions**. 2008. ed. USA: Abaqus, 2008.
5. GOPEZ, F. Aramid yarn as a textile member in products. **Rubber & Plastics News**, USA, p. 14-16, Fevereiro 2008.
6. ZANDIYEH, A. R. K. **Mangueira resistente ao esmagamento**. PI 0512531-6A, 25 mar. 2008.
7. A M Y EL-LAWINDY, S. B. E.-G. Strain energy density of carbon-black-loaded rubber vulcanizates. **J. Phys. D: Appl. Phys.**, UK, n. 33, p. 1894-1901, Março 2000.
8. K. HABEEB RAHIMAN, G. U. A. S. C. K. R. Cure characteristics and mechanical properties of styrene-butadiene rubber/acrylonitrile butadiene rubber. **Materials Letters**, Kerala, India, v. 59, p. 633-639, Outubro 2004.