

O COMPORTAMENTO MECÂNICO DE ANÉIS COMPÓSITOS ÍNTEGROS E COM DEFEITOS SUBMETIDOS A ENSAIO DE TRAÇÃO¹

Irwin Guedes Alves²
José Roberto Moraes d'Almeida³
Lavinia Maria Sanabio Alves Borges⁴

Resumo

Este trabalho tem como objetivo determinar a influência de defeitos na resistência mecânica de anéis compósitos, através da determinação, experimental e computacionalmente, das tensões de colapso dos anéis. Os anéis são obtidos a partir de tubos compósitos reforçados com fibra de vidro, fabricados pelo método de *filament winding*. Adota-se uma metodologia baseada em ensaios laboratoriais de anéis íntegros e com defeitos simulados por furos de dimensões variadas. Os experimentos consistem em ensaios de tração em anéis conforme o especificado pela norma ASTM D2290-00. Os dados obtidos são tratados estatisticamente, para avaliar a influência dos parâmetros geométricos dos defeitos na resistência dos anéis e comparados com os resultados da simulação computacional utilizando o Método dos Elementos Finitos e software específico. Resultados satisfatórios obtidos nos ensaios mecânicos, assim como nos modelos analíticos propostos, corroboraram com a hipótese da viabilidade da aplicação de tais ensaios de tração em anéis como meio de simplificação de testes hidrostáticos em tubos.

Palavras-chave: Material compósito; Ensaio de tração em anéis; Elementos finitos

MECHANICAL BEHAVIOR OF COMPOSITE RINGS WITH OR WITHOUT DEFECTS SUBMITTED TO SPLIT DISK TESTING

Abstract

This work aims to evaluate the influence of defects on the strength of machined composite rings, through the determination of their collapse stresses both experimental and computationally. The rings were machined from glass-fiber reinforced pipes, manufactured by filament winding. The methodology used is based on laboratorial tests of rings presenting no defects or with cylindrical defects, which are intended to simulate damages of various dimensions. The rings tensile tests were performed following ASTM D2290-00 standard. The experimental data was statistically treated to evaluate the influence of the defect geometric parameters and the results were compared with solutions from computational simulations using finite elements and a specific software. Satisfactory results obtained from the mechanical experiments and the analytical model are strong evidences to the proposed thesis that the split disk method is a way of simplification of burst tests in pipes.

Key words: Composite materials; Split disk test; Finite elements

¹ *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

² *Engenheiro Mecânico, MSc., Gerência de Modificações de Projeto, Eletronuclear – Eletrobras Termonuclear S.A., Rodovia Rio-Santos km 522 – Itaorna – 23900-000, Angra dos Reis, RJ, Brasil.*

³ *Engenheiro Metalúrgico, MSc, DSc, Professor, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rua Marquês de São Vicente, 225 – Gávea – 22453-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

⁴ *Engenheira Mecânica, MSc, DSc, Professora, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia, bloco G, Cidade Universitária - Ilha do Fundão – 21945-970, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

INTRODUÇÃO

O emprego de novos materiais assumiu maior destaque na última década. Observa-se, com incidência crescente, a aplicação em dutos de compósitos, para escoamento de água, petróleo, gás natural, vapor e outros fluidos sob pressão, por exemplo, na substituição de materiais convencionais, principalmente os metálicos.^[1]

Existem dutos de várias modalidades e fabricados com diferentes materiais, cada qual com características únicas e utilizados com diversas finalidades. Dentre esses estão os tubos compósitos que se beneficiam de sua alta resistência à corrosão e abrasão, rapidez de montagem, menor custo de fabricação, além do baixo peso.

A vantagem mais significativa dos materiais compósitos sobre os metálicos se refere, entretanto, ao custo final de seu emprego. Esta advém de seu peso significativamente menor e também de um custo menor de instalação. Custos de manutenção mais baixos também são um incentivo importante ao emprego de compósitos. Normalmente, os componentes fabricados em compósito podem ser muito competitivos em termos de custo em relação aos componentes fabricados em aço, se o custo total do componente instalado for levado em consideração. Através de uma comparação simplificada de custos entre um duto de aço carbono e um duto de compósito termoplástico nota-se que, ao longo de 20 anos, o duto de compósito possui um custo, aproximadamente, quatro vezes menor do que o duto de aço.^[2]

Um exemplo de aplicação onde os compósitos têm vantagens são vasos de pressão. Destaca-se que, antes dos vasos de pressão serem aprovados para uso comercial, são requeridas considerações de segurança, como testes sob condições severas. Um teste essencial é o de pressão de colapso, que deve ser muito mais elevada do que a pressão de operação.^[3] Alguns fatores causam restrições para a aceitação de plásticos reforçados por fibras (FRP – *Fiber-reinforced Plastics*) pela indústria naval e petroquímica; dentre eles, restrições relacionadas às influências dos defeitos. Portanto, justifica-se a utilização do ensaio de tração em anéis, como uma alternativa de simplificação ao complexo teste hidrostático em tubos e determinação precisa das propriedades em amostras tubulares.^[4]

Este trabalho tem por objetivo principal estudar o comportamento de anéis compósitos íntegros ou com defeitos quando submetidos à tração. Os objetivos foram delineados considerando-se a maior facilidade do ensaio de tração em anéis, para obtenção das propriedades mecânicas, em relação a outros ensaios mecânicos como, por exemplo, o teste hidrostático. Para consecução desse objetivo foi necessário: investigar as tensões de colapso dos anéis, experimental e computacionalmente, além de analisar o comportamento do limite de resistência dos corpos-de-prova, quando submetidos a diferentes tipos de defeitos. Os valores da tensão circunferencial e do módulo de elasticidade circunferencial do material compósito em estudo também foram determinados.

MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

As análises realizadas foram: o ensaio de tração em anéis, a simulação computacional e o tratamento estatístico.

O ensaio de tração em anéis objetiva a caracterização mecânica de materiais compósitos. Esta é possível com a determinação da tensão circunferencial aparente de ruptura, com aplicação de uma força, dimensões do corpo-de-prova e do módulo de elasticidade, que é determinado por meio das tensões e deformações circunferenciais.

O material compósito, objeto de ensaio, foi fabricado e fornecido por uma empresa nacional. Todos os estudos e pesquisas prévios, relacionados à caracterização do material, foram feitos em trabalhos anteriores [5]. Este material é constituído por matriz de resina vinil-éster e fibras de vidro contínuas orientadas na direção circunferencial e picotadas ao longo do tubo e foi fabricado por enrolamento simultâneo de fibras contínuas e picadas pelo processo “*hoop-chop*”. A partir dos tubos foram fabricados anéis com dimensões requeridas pela norma ASTM D2290-00, optando-se por 25mm de largura e reduções de seção de 4mm de raio, mostrado na Figura 1.



Figura 1 - Vistas do anel obtido a partir do corte dos tubos.

Em seguida, foram inseridos defeitos de formato cilíndrico nos anéis, variando-se o raio e a profundidade, obtendo-se seis grupos distintos de anéis. A quantidade de anéis ensaiados e suas nomenclaturas, assim como as condições de ensaio são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Quantidade de anéis ensaiados para cada configuração analisada.

Tipos de Anéis			Com lubrificante	Sem lubrificante
Sem Defeito	Íntegros	Posição I (I#)	6	6
		Alinhado (IAlinhado)	-	1
	Sem Redução de Seção (SRS#)		3	1
Com Defeito	CDV4D#	Posição I	4	-
		Posição II	-	1
	CDV8D#	Posição I	3	-
		Posição II	-	2
	CD5P12D#	Posição I	3	-
		Posição II	-	2
	CDV12D#	Posição I	3	-
		Posição II	-	2

As configurações, quanto aos posicionamentos utilizados nos ensaios experimentais, são esboçadas na Figura 2.

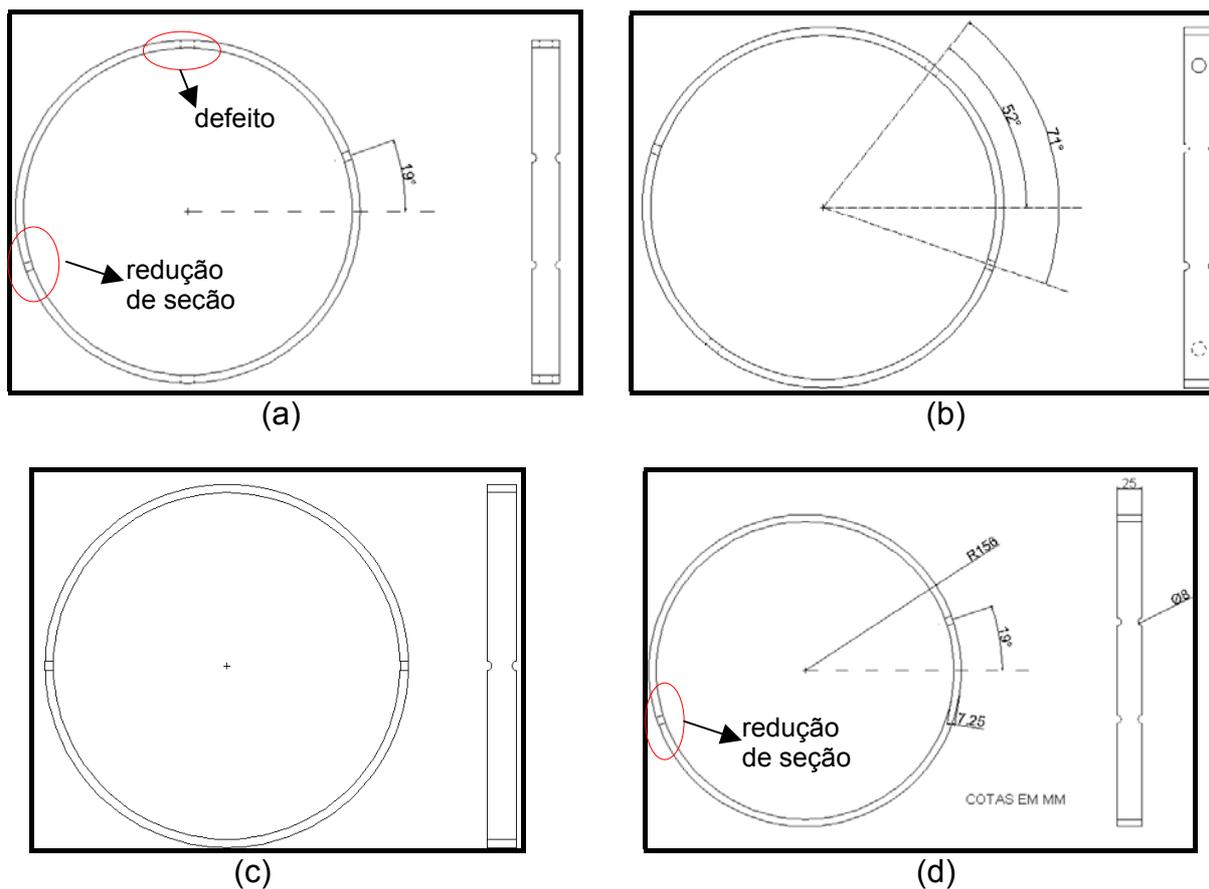


Figura 2 - Posições do defeito e da redução de seção para: (a) anel com defeito na posição I (não-girado), (b) anel com defeito na posição II (girado), (c) anel íntegro alinhado (Alinhado), (d) anel íntegro na posição I.

Tendo como referência a norma ASTM D2290-00, procedimento **A**, foram realizados ensaios de tração em anéis, Figura 3, numa prensa universal, com uma taxa de carregamento de 5 mm/min.

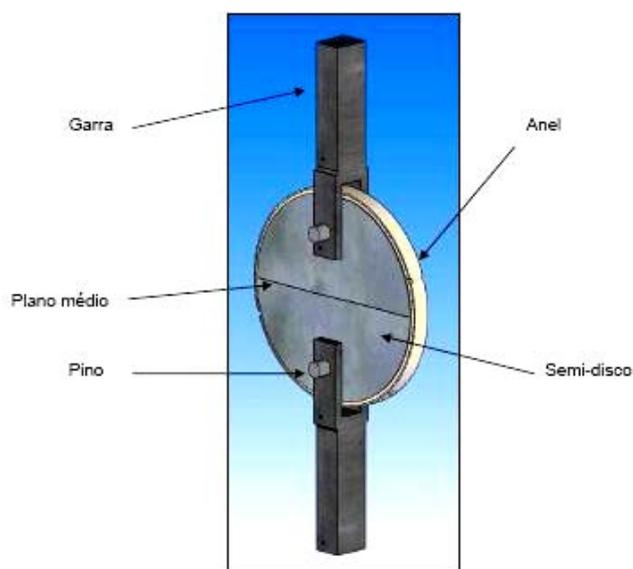


Figura 3 - Esquema ilustrativo do ensaio de tração em anéis.

A partir da força de ruptura (F_r) e da área média (A_m) determinou-se a tensão de ruptura circunferencial aparente ($\sigma_{\theta Ap}$), através da seguinte expressão:

$$\sigma_{\theta Ap} = \frac{F_r}{2 \cdot A_m} \quad (1)$$

O modelo numérico possui as dimensões dos anéis fabricados. Para cada grupo de anel e condição de ensaio foi elaborado um modelo. As partes anel e semi-discos foram criadas separadamente, considerando os semi-discos como corpos rígidos e o anel como corpo deformável. O anel compósito para fins de análise numérica é considerado isotrópico.

Quanto às condições de contorno, ilustradas na Figura 4, fixou-se o semi-disco inferior e para o semi-disco superior se estabeleceu $u_x = u_z = 0$. Na seção do plano médio, a condição de contorno para o anel foi $u_z = 0$.

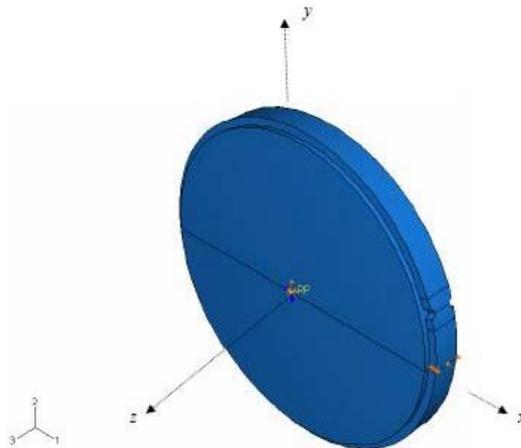


Figura 4 - Condições de contorno

O carregamento considerado foi o deslocamento máximo médio (d_m máx) obtido experimentalmente para cada grupo de corpo-de-prova, Tabela 2.

Tabela 2: Deslocamento máximo médio para cada grupo de corpo-de-prova.

Corpo-de-prova	d_m máx. (mm)
I#	6,37
SRS#	9,13
CDV4D#	6,65
CDV8D#	7,03
CDV12D#	6,03
CD5P12D#	6,52

Os tipos de elementos, quantidades de elementos e nós para cada modelo, considerando as diferentes configurações dos anéis, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Tipo de elemento, número de elementos e nós para os modelos numéricos.

Modelos	Tipo de elemento	Número de Elementos	Número de nós
Anel I*	C3D20R	9468	49170
Semi-discos	R3D4	464	590
Anel IAlinhado*	C3D8R	17536	22824
Semi-discos	R3D4	464	590
Anel SRS*	C3D20R	8640	43946
Semi-discos	R3D4	464	590
Anel CDV4D*	C3D8R	6200	9384
Semi-discos	R3D4	464	590
Anel CDV8D*	C3D8R	5960	9192
Semi-discos	R3D4	780	948
Anel CD5P12D*	C3D8R	11400	15763
Semi-discos	R3D4	780	948
Anel CDV12D*	C3D8R	6520	10152
Semi-discos	R3D4	464	590
Anel CDV4Dgirado*	C3D8R	5472	8605
Semi-discos	R3D4	464	590
Anel CDV8Dgirado*	C3D8R	8950	21414
Semi-discos	R3D4	464	590
Anel CD5P12Dgirado*	C3D8R	5544	8530
Semi-discos	R3D4	536	680
Anel CDV12Dgirado*	C3D8R	10630	15372
Semi-discos	R3D4	464	590

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analicamente, foi determinada uma tensão circunferencial teórica para um tubo com a finalidade de tornar os parâmetros adimensionais. Esta tensão teórica adotada foi denominada tensão circunferencial de referência ($\sigma_{\theta R}$), obtida através de (2):

$$\sigma_{\theta R} = \frac{F}{2 \cdot t \cdot \Delta z} \Rightarrow \sigma_{\theta R} = 244,05 \text{MPa}, \quad (2)$$

onde F é a força de tração média a que os anéis foram submetidos durante os ensaios, e t e Δz a espessura e a largura do corpo-de-prova, respectivamente.

E a pressão interna a que pode ser submetido o tubo com estas dimensões é obtida por (3):

$$p = \sigma_{\theta R} \cdot \frac{t}{R_i} \Rightarrow p = 11,89 \text{MPa}, \quad (3)$$

onde R_i é o raio interno do anel.

Através dos ensaios, foi possível observar que em todos os grupos de anéis os corpos-de-prova apresentaram comportamentos lineares semelhantes. Na Figura 5, são apresentadas as curvas características para o comportamento dos corpos-de-prova ensaiados experimentalmente, além da curva de comportamento do tubo e

dos anéis modelados numericamente. Para os modelos numéricos, as nomenclaturas dos anéis são representadas com um asterístico (*).

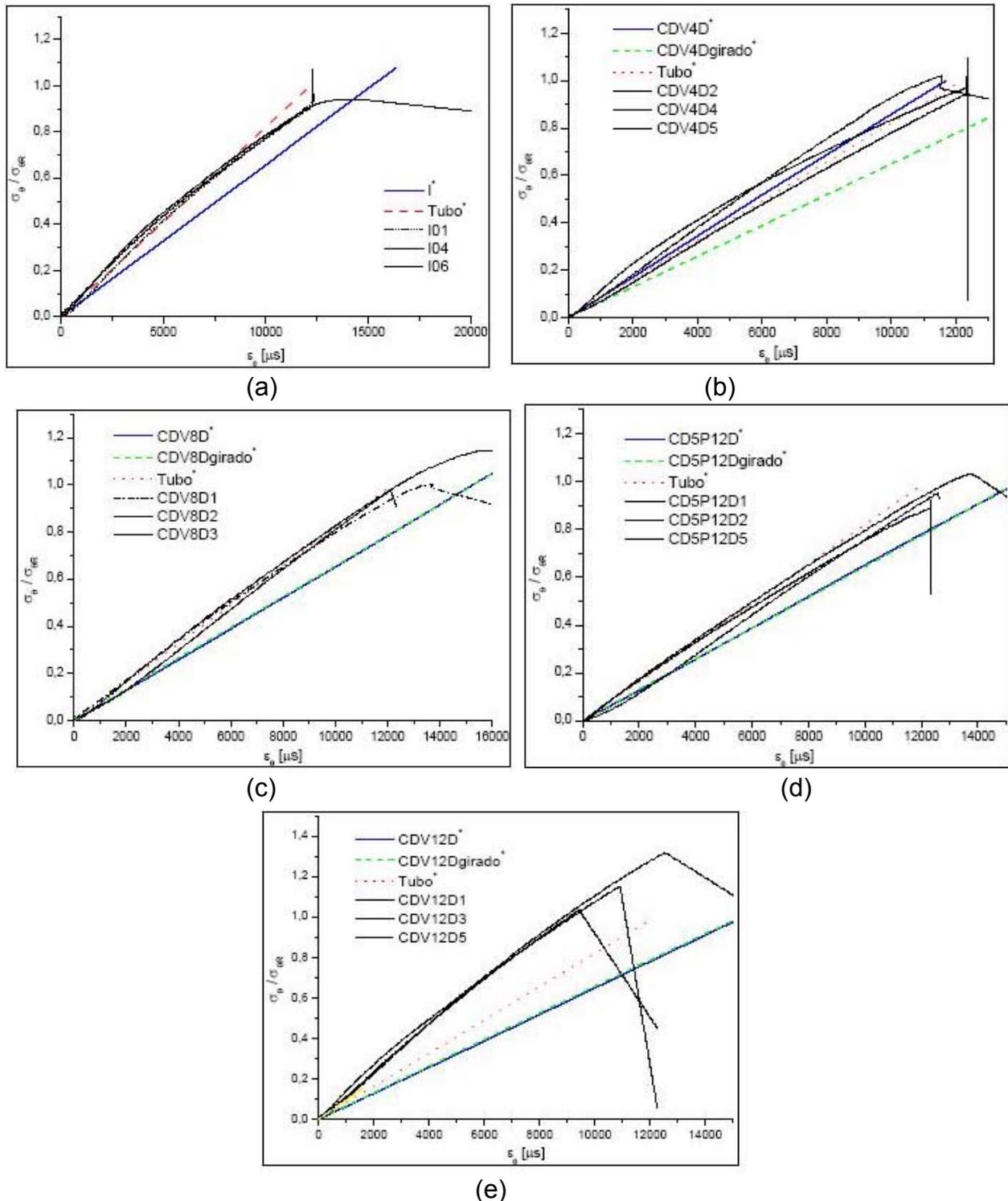


Figura 5 - Tensão circunferencial *versus* deformação circunferencial: (a) I#, Tubo e I*, (b) CDV4D#, Tubo e CDV4D*, (c) CDV8D#, Tubo e CDV8D*, (d) CD5P12D#, Tubo e CD5P12D*, (e) CDV12D#, Tubo e CDV12D*.

A Figura 5 permitiu observar em relação aos anéis numéricos, na configuração posição I (não-girado) e posição II (girado), um comportamento semelhante ou até

igual em alguns casos, para a seção analisada. Com exceção do anel CDV4D, que apresentou uma discrepância no comportamento entre as configurações girado e não-girado. Fato explicado por não se ter conseguido alcançar uma distribuição uniforme dos elementos no modelo CDV4D*.

Analisando os anéis I e IAlinhado*, foi observado que ambos possuem o mesmo comportamento, no que se refere à tensão circunferencial *versus* deformação circunferencial. Entretanto, na modelagem numérica, quando a região da redução de seção é analisada percebe-se a proximidade do valor da tensão circunferencial, em relação ao valor da tensão de referência ao longo da largura do anel – Figura 6. Nas extremidades, também é observado o efeito de borda.

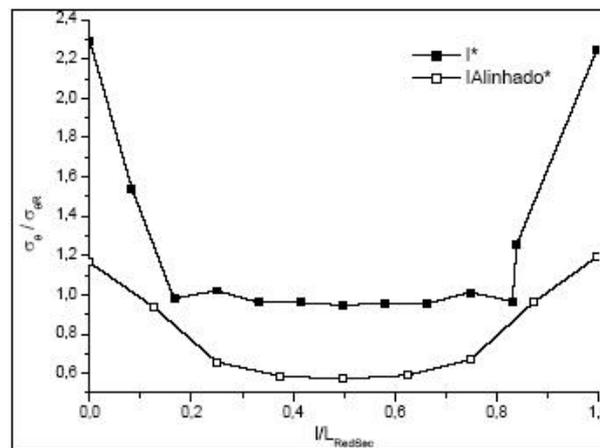


Figura 6 - Tensão circunferencial na largura da redução de seção (L_{RedSec}).

O uso do posicionamento do anel inteiro - posição I é validado, visto que há um comportamento da tensão na redução de seção muito próxima da tensão de ruptura do tubo caracterizada pela tensão de referência ($\sigma_{\theta R}$), e mais confiável numa localização afastada do plano médio.

A análise de tensões ao longo do anel foi de fundamental importância. Através desta, foi possível avaliar a região do plano médio e sua influência ao longo do anel. Foi observado - Figura 7 - que a partir de $\alpha=7^{\circ}$, aproximadamente, onde α é o ângulo considerado a partir do plano médio, as tensões são estabilizadas. Quando $\alpha < 7^{\circ}$ ocorre uma queda drástica na tensão na região da redução de seção, situada no plano médio. O mesmo efeito da flexão no plano médio foi observado em outros trabalhos.^[6,7]

Outro ponto importante a ser discutido é o efeito da flexão na redução de seção. A Figura 7 mostra uma queda brusca na tensão circunferencial na redução de seção localizada no plano médio para o IAlinhado*, diferentemente do anel I* - redução de seção. A utilização da redução de seção no plano médio poderia trazer resultados não confiáveis.

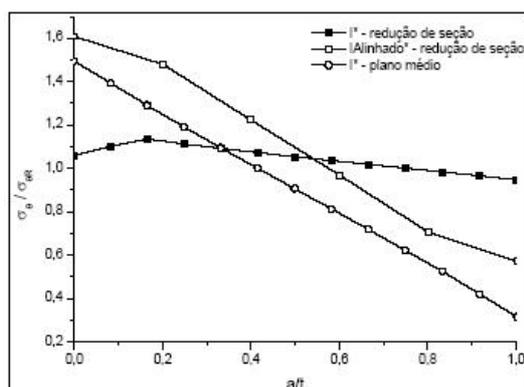


Figura 7 - Tensão circunferencial *versus* espessura.

Por ser a redução de seção a principal região a ser analisada, as Figuras 6 e 7 justificam a opção adotada e vem comprovar o que a norma indica, a respeito do deslocamento da redução de seção em relação ao plano médio no teste experimental.

Através da análise numérica comprovou-se que o anel SRS* atingiu valores de tensões muito superiores às do Tubo*. Por outro lado, o anel íntegro (I*) atingiu valores de tensões bem próximos às do Tubo*.

Analisando o posicionamento da redução de seção, o anel íntegro se mostrou apropriado quando comparado ao ensaio do tubo hidrostático. Quanto ao comportamento do posicionamento girado (posição II), este não influenciou no resultado, apresentando comportamento semelhante aos girados ou não-girados (posição I).

Por outro lado, os anéis com defeito não-girado (posição I) e anéis com defeito girado (posição II) apresentaram comportamentos semelhantes quando comparados dentro de cada grupo. No anel CDV4Dgirado*, por exemplo, a redução de seção está localizada em $\alpha=160^\circ$ (aproximadamente) e o defeito em $\alpha=50^\circ$, conforme mostrado na Figura 8. Da mesma forma, as observações feitas anteriormente são válidas para os anéis CDV8D*, CD5P12D* e CDV12D*.

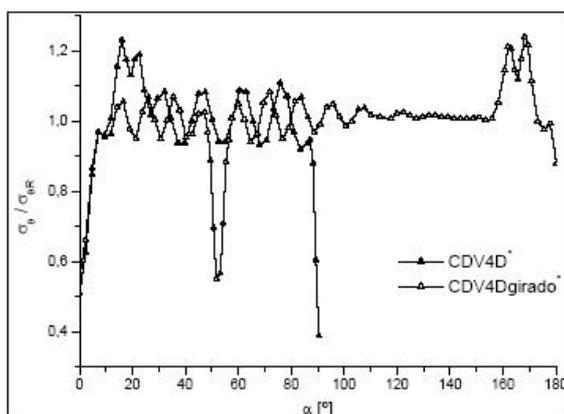


Figura 8 - Tensão circunferencial *versus* ângulo a partir do plano médio.

Vale salientar que o comportamento da tensão na redução de seção para ambos os casos, anel girado e não-girado, foi semelhante. Porém, quando a redução de seção foi localizada onde há o efeito da flexão, no plano médio, isto não foi observado.

Nos anéis compósitos testados foi possível identificar o processo de fratura dominante para cada anel. Os tipos de falhas identificados, mostrados na Figura 9, foram:

- A – trincas perpendiculares à direção das fibras e ausência de trincas na direção circunferencial;
- B – trincas circunferenciais pequenas e superfície de fratura irregular e localizada;
- C – trincas individuais paralelas às fibras, responsáveis pela delaminação próximo à região de fratura.

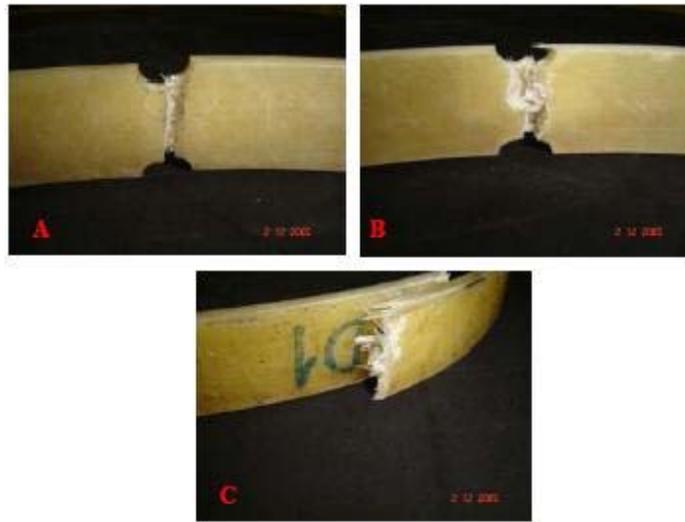


Figura 9 - Tipos de falhas.

A fratura do material apresentou três características predominantes, ilustradas na Figura 10.

- *clusters* de fibras sacadas, próximos da superfície externa do anel;
- delaminação nas camadas ricas em fibras picadas; e
- mecanismo de dano por *whitening*, circundando a região de fratura.

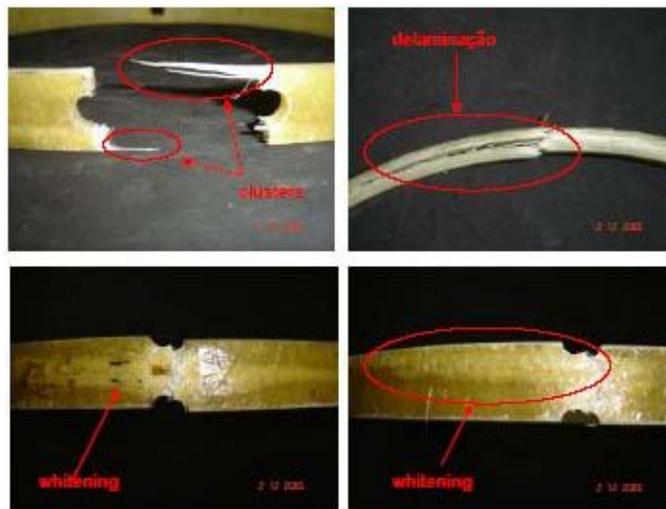


Figura 10 - Características apresentadas nas proximidades da região de fratura.

O processo de *whitening*, observado pelo aspecto esbranquiçado na superfície externa e localizado ao redor da região de fratura, foi atribuído principalmente pelo descolamento local nas interfaces e trincamento da matriz. Este mecanismo de dano, provavelmente, pode nos indicar que o material está entrando num processo de falha.

Comparando-se os tipos de fratura e considerando apenas os anéis ensaiados com lubrificação; há tendência a alterações no tipo de fratura na seqüência A, B e C com o aumento da tensão máxima de ruptura circunferencial aparente. Aparentemente, quando existe delaminação há uma tendência ao aumento da resistência, conforme mostra a Figura 11

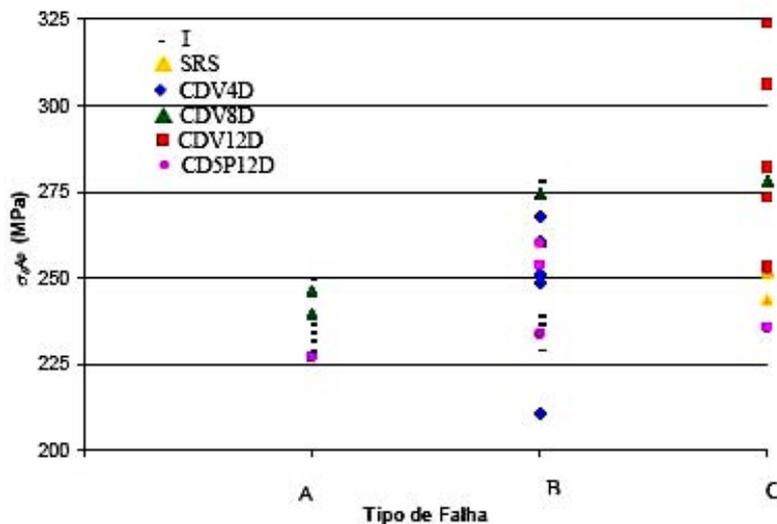


Figura 11 - Tensão máxima de ruptura circunferencial aparente versus tipo de fratura.

Pela Figura 11, nota-se para os anéis íntegros (I#) a provável influência do uso do lubrificante no tipo de falha, uma vez que todos os outros fatores são constantes. Isto é, o lubrificante reduz significativamente as forças de atrito na interface anel/semi-disco.^[8]

CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, nos ensaios experimentais, nas simulações numéricas e nas análises estatísticas, as seguintes conclusões são formuladas:

1. Para o anel íntegro a tensão circunferencial aparente de ruptura foi 231,77 MPa.
2. A posição da redução de seção fora do alcance da região do plano médio é de fundamental importância no ensaio de tração em anéis, devido à flexão apresentada nesse local.
3. O comportamento dos anéis ensaiados mecanicamente e os resultados das simulações a partir dos modelos computacionais foram muito próximos, apresentando diferenças não superiores a 10%, o que faz validar os modelos utilizados.
4. O módulo de elasticidade circunferencial obtido experimentalmente foi de 18,78GPa para o anel íntegro. Esse valor se mostrou correto, diante da compatibilidade com os modelos analíticos.
5. O mecanismo de falha do material é uma combinação de delaminação com fratura de fibras.
6. O efeito da utilização ou não do lubrificante na interface disco-anel não foi notado quando analisadas as tensões, porém o lubrificante influenciou o modo de fratura porque seu uso permite que o anel não atrite fortemente com o disco.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 JEYAPALAN J. K. (1990) Advances in pipeline materials. **Civil Engineering**, v. 7, P. 60-62.
- 2 MARTIN Dr. S.; AVERY A. (2003) Reinforced Thermoplastic Pipe – Innovative Technology for Onshore Field Developments. In: **Twentieth-second International Conference on Offshore**, Cancun, June 8–13, 2003.
- 3 LIFSHITZ J. M.; DAYAN H. (1995) Filament-wound pressure vessel with thick metal liner. **Composite Structures**, v. 32, P. 313-323.
- 4 PARNAS L.; KAYNAK C.; ERDILLER E. S.; SENELC F. (2005) Use of split-disk tests for the process parameter of filament wound epoxy composite tubes. **Polymer Testing**, v.24, P.648-655.
- 5 EGBERT N. B. (2004) **Influência de defeitos cilíndricos sobre o limite de resistência de anéis de resina éster vinílica reforçada com fibras de vidro**. Dissertação (Mestrado) Programa de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. P.80.
- 6 YWN-DE X.; CHIN-KUNG C. (1987) How to predict the burst pressure of a FRP pipe, Composite Structures 4 – Analysis and Design Studies. In: **4th International Conference on Composite Structures**, v.1, Scotland.
- 7 JONES I. A.; MIDDLETON V.; OWEN M. J. (1996) Roller-assisted variant of the split disc test for filament-wound composites, **Composites: Part A**, v.27A, P.287-294.
- 8 ZINOV'EV P. A.; TSVETKOV S. V.; KULISH G. G.; VAN DEN BERG R. W.; VAN SCHEPDAEL L. J. M. M. (2001) Strength of unidirectional composites under high hydrostatic pressures. **Mechanics of Composite Materials**, v.37, n.4, P.281-288.