

ESTUDO DO COMPORTAMENTO AO IMPACTO DE TUBAGEM PRODUZIDA POR ENROLAMENTO FILAMENTAR

Silva*, J. F. M. G.; Marques**, A. T.

*Equiparado a Professor Adjunto, ISEP, Porto - Portugal.

**Professor Associado. INEGI - FEUP, Porto - Portugal.

RESUMO

O dano provocado pelo impacto a baixa velocidade de um objecto (por ex. um utensílio de trabalho) pode ter consequência muito gravosas no caso das estruturas compósitas, retirando um valor significativo à sua resistência mecânica. Em certas indústrias (como a petrolífera e a nuclear) onde as tubagens em material compósito encontram ampla aceitação e os custos de manutenção são elevados, o conhecimento da resistência à pressão interior após impacto é de primordial importância. Neste artigo começa-se por abordar o fenómeno de impacto. Refere-se o fabrico de tubos por enrolamento filamentar com diferentes parâmetros de fabrico. Descrevem-se de seguida os ensaios de impacto por queda de peso e pressão interior após impacto das tubagens produzidas. Finalmente mostram-se as diferenças de comportamento ao impacto encontradas e discute-se a aplicabilidade de modelos para o cálculo da força de impacto, área delaminada e energia absorvida.

1. INTRODUÇÃO

Os compósitos são materiais bastante diferentes dos materiais homogêneos tradicionais. Dado o interesse destes materiais em aplicações estruturais, o termo restringe-se aos materiais que contenham um reforço (sob a forma de fibras) suportado por um 'aglomerante' polimérico.

Os tubos em material compósito são na sua maior parte produzidos em plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV). São normalmente fabricados por moldação manual, moldação por centrifugação ou enrolamento filamentar.

Com um campo de aplicações cada vez maior, especialmente na condução de fluidos pressurizados, os tubos em material compósito são largamente estudados para satisfazerem os requisitos de resistência à pressão interior quer a curto quer a longo prazo.

No entanto, em certas indústrias, como a nuclear e a petroquímica, existe a necessidade de conhecer o comportamento dos sistemas de tubagens quando sujeitos a solicitações dinâmicas, nomeadamente de impacto. Nos materiais compósitos, a simples queda de um objecto pode facilmente provocar delaminações (dano de impacto mais comum), que podendo ser

invisíveis à vista desarmada, provocam um abaixamento substancial das propriedades mecânicas.

Em aplicações de tubagens nestas indústrias o conhecimento da sua resistência ao impacto é crucial.

Neste artigo referem-se os resultados obtidos no estudo da resistência à pressão interior após impacto de tubos em material compósito produzidos por enrolamento filamentar com diferentes parâmetros de fabrico.

2. IMPACTO EM COMPÓSITOS

Os testes de impacto tais como o Izod ou Charpy são usados para dar uma indicação da resistência ao impacto dos materiais isotrópicos tradicionais. Devido à complexidade do mecanismo do dano em estruturas compósitas, os referidos testes têm uma aplicação limitada. Os ensaios de impacto por queda de peso, no caso do impacto de baixa velocidade são mais úteis.

A resposta ao impacto de uma estrutura pode ser decomposta numa componente local e numa componente global. A componente local de deformação deve-se a um fenómeno de contacto localizado, governado pelo raio de curvatura do impactor, módulos do impactor e provete e energia de impacto (contacto do tipo hertziano). A componente global deve-se à deformação de toda a estrutura. Se o laminado tiver espessura elevada, baixa resistência ao corte interlaminar e uma pequena distância entre apoios aparecerá preferencialmente dano por delaminação. Estruturas finas e com grandes distâncias entre apoios, tenderão a apresentar um tipo de dano por flexão. A penetração ocorre no caso de impactos do tipo balístico.

Nos ensaios de queda de peso é monitorizada a força de contacto ao longo do tempo. A área desta curva representa o impulso transmitido pelo impactor ao provete e é igual à variação da quantidade de movimento do mesmo impactor. Estudos recentes (Sjoebloom, 1988, Lagace, 1993 e Doucet, 1993) permitem retirar as conclusões seguintes:

- a força máxima de impacto é a chave para a caracterização da resistência ao dano nos materiais compósitos;

- a energia total absorvida no impacto está ligada à extensão do dano causado;

- a área de dano visível pode ser utilizada para comparar ou prever o dano em estruturas a partir da sua observação em provetes teste;

- não existe um único teste capaz de ser utilizado para prever o comportamento ao dano de impacto.

A resistência à pressão interior após impacto de tubagem produzida por enrolamento filamentar é um aspecto importante e só recentemente tratado (Frost et al, 1994 e Pays, 1994). A pressurização após impacto de tubagem revelou que a ocorrência de exsudação ou fugas na zona de impacto se devia à coalescência de microfissuras da matriz.

A força máxima de impacto pode ser calculada de uma maneira aproximada pela expressão seguinte (Robinson and Davies):

$$F = \sqrt{G_{IIc} \frac{8\pi^2 E_m e^3}{9(3+\nu_m)(1-\nu_m)}} \quad (1)$$

em que $E_m = (E_a E_{cr}^3)^{1/4}$, $\nu_m = \frac{\nu_a + \nu_{cr}}{2}$, E_a é o módulo axial, E_{cr} é o módulo circunferencial, ν_a é o coeficiente de Poisson axial, ν_{cr} é o coeficiente de Poisson circunferencial, G_{IIc} a taxa crítica de libertação de energia do material em modo II, sendo e a espessura da tubagem.

Um modelo simples para quantificar o dano de tubos sujeitos a impactos severos é aquele que considera que cada camada delamina como resultado de tensões de corte elevadas, tendo a área delaminada o valor da área do impactor. Se se considerar que a área delaminada observada do exterior se prolonga através de cada camada ao longo da espessura, teremos a expressão seguinte para a energia de impacto (Reid and Ashton, 1992):

$$E = G_{IIc} (n_de_camadas - 1) A_d \quad (2)$$

em que A_d é a área delaminada visível.

3. PRODUÇÃO DE TUBOS POR ENROLAMENTO FILAMENTAR

A tecnologia de enrolamento filamentar permite a rápida deposição de filamentos contínuos em padrões de enrolamento desejados. É um processo no qual o reforço impregnado é continuamente enrolado num mandril em rotação (Peters et al, 1991).

São inúmeros os parâmetros específicos deste processo de fabrico, sendo de salientar os seguintes:

- i) ângulo de enrolamento;
- ii) tensão nas fibras do reforço;
- iii) sequência de empilhamento;
- iv) gradiente de tensão nas fibras do reforço;
- v) tempo de enrolamento entre camadas de reforço;
- vi) grau de sobreposição das fibras do reforço;
- vii) grau de entrecruzamento das fibras do reforço;
- viii) velocidade de produção;
- ix) viscosidade da resina.

Uma escolha incorrecta dos referidos parâmetros levará à criação de estruturas com conteúdo excessivo de vazios e/ou pouco compactas (Choen et al, 1995).

Para o fabrico dos tubos para ensaio foi utilizado um equipamento de enrolamento filamentar helicoidal de comando numérico e controlo da tensão nas fibras do reforço. A resina utilizada foi um poliéster isoftálico (Crystic 272[®]) sendo o reforço constituído por filamentos de 'roving' de fibra de vidro E com 2400 de Tex e manta de superfície de 30 g/m² de gramagem.

O faseamento no fabrico de cada tubo foi o seguinte:

- i) preparação do mandril com agente desmoldante;
- ii) uma camada de tecido de superfície;
- iii) enrolamento das camadas estruturais na sequência 90°/± 55°/90°;
- iv) reforço dos topos com enrolamento circunferencial;
- v) cura à temperatura ambiente;
- vi) pós-cura a 80 °C em estufa durante 3 horas.

Para facilitar a operação de desmoldar, o mandril foi revestido com PTFE e possuía uma conicidade de 1/1000. Foram ainda utilizadas formas para permitir que as tubagens pudessem ser ensaiadas à pressão interior sem serem necessárias quaisquer operações posteriores.

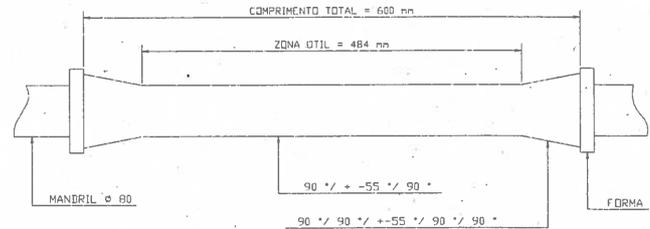


fig. 1 - Geometria das tubagens.

Foram produzidos tubos de referência (Tref), com diâmetro interior de 80 mm, comprimento útil de 500 mm e espessura nominal de 3 mm. Os parâmetros de fabrico de referência foram os seguintes:

- uma bobina de 'roving' com largura de banda de aprox. 4 mm;
- tensão nas fibras do reforço = 0.27 g/Tex/roving;
- velocidade de fabrico por camada = 5 min;
- grau de entrecruzamento normal.

Para além da série de tubos de referência foram produzidas outras séries, geometricamente idênticas à anterior mas com parâmetros de enrolamento diferentes:

- tensão nas fibras de reforço = 0.60 g/Tex/roving, (Ttm);
- tensão nas fibras de reforço = 1.00 g/Tex/roving, (Tte);
- Grau de entrecruzamento do reforço elevado (Tee).

4. ENSAIOS DE IMPACTO POR QUEDA DE PESO

Os ensaios de impacto foram realizados numa máquina de impacto por queda de peso instrumentada. Os tubos foram ensaiados ao impacto estando simplesmente apoiados num suporte em V segundo a norma ASTM D2444. O impactor utilizado tinha uma geometria esférica com diâmetro

de 25 mm e uma massa de 4.748 kg. Todos os tubos foram ensaiados sensivelmente a meio do seu comprimento, dando-se o impacto transversalmente ao seu eixo longitudinal.

O aumento de rigidez na zona dos topos das tubagens permitiu evitar o fenómeno de ovalização.

O equipamento utilizado dispunha de um sensor piezoelectrico capaz de monitorizar a evolucao da força ao longo do tempo. A partir dos valores da força de contacto de impacto foi possível, por integração, obter valores para a aceleração, velocidade, deflexão e energia de impacto.

Foram ensaiadas duas séries dos tubos de referência, sendo uma ensaiada a 2.5 J (Tref_2.5) e outra a 1.5 J (Tref_1.5). Todas as outras séries foram ensaiadas a 1.5 J.

O ensaio de diferentes séries de tubos (com três tubos por série) apresentou os resultados seguintes (médias e desvios padrão):

Tab. 1 - Resultados dos ensaios de impacto.

Ref.	Força max. (N)		deflexão máx. (mm)		Energia máx. (J)	
	média	d. p.	média	d. p.	média	d. p.
Tref_2.5	875	105	3.81	0.42	2.45	0.015
Tref_1.5	876	51	2.20	0.10	1.24	0.017
Tte	844	92	2.58	0.20	1.43	0.046
Ttm	831	81	2.63	0.16	1.40	0.046
Tee	954	32	2.36	0.052	1.42	0.035

O gráfico força/tempo da série Tref_1.5, média dos três ensaios da série apresenta uma forma característica, semelhante à encontrada no ensaio das outras séries.

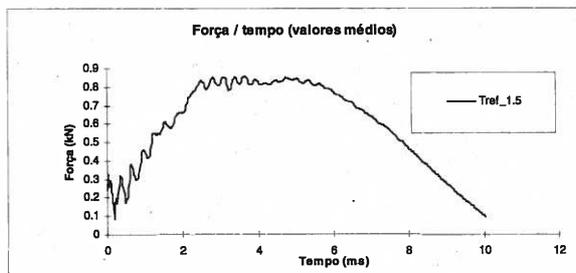


fig. 2 - Gráfico força/tempo para a série Tref_1.5.

As medições da área delaminada visível conduziram aos seguintes valores:

Tab. 2 - Área delaminada visível.

Referência	Área delam. (cm ²)	Desv. pad. (cm ²)
Tref_2.5	5.1	1.1
Tref_1.5	2.3	0.16
Tte	3.3	0.46
Ttm	3.0	0.51
Tee	2.9	0.48

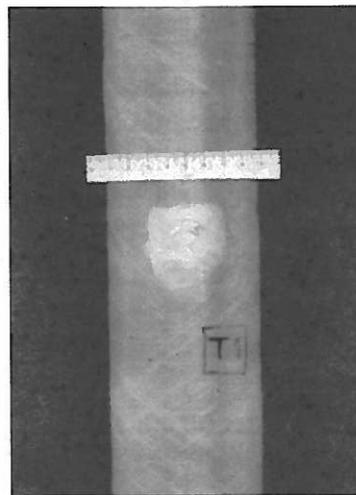


fig. 3 - Dano de impacto num dos tubos.

5. ENSAIOS DE PRESSÃO INTERIOR

Os ensaios de pressão interior dos tubos foram realizados utilizando-se um equipamento capaz de pressurizar água até 30 MPa, uma prensa com tirantes roscados e vedantes do tipo hidráulico (O-rings).

Foram realizados testes de rebentamento sem componente axial de sollicitação, com um incremento de 5 MPa/min. A detecção de fugas de fluido hidráulico, muito importante no ensaio dos tubos com dano de impacto, fez-se recorrendo a pó de giz.

Uma série de ensaios em tubos de referência sem impacto conduziu ao valor de 24.9 ± 0.48 MPa para a pressão de rebentamento.

Nos tubos com dano de impacto a resistência à pressão interior é comandada pelo aparecimento de fugas próximas da zona de impacto, por coalescência de fissuras na matriz. De acordo com a normalização existente, o aparecimento de

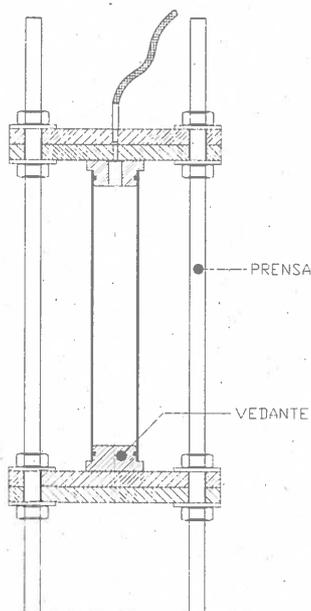


fig. 4 - Sistema de pressão interior.

fugas determina o fim do ensaio. Os resultados obtidos no ensaio dos tubos com dano de impacto (três tubos por cada série) sumaria-se de seguida.

Tab. 3 - Pressão interior em tubos com dano.

Ref.	Pressão de rebent. (MPa)			Exist. de fugas (S/N)		
	1	2	3	1	2	3
Tref_2.5	0.2	0.2	0.2	S	S	S
Tref_1.5	25	24.3	0.2	N	N	S
Tte	0.2	4.7	4.0	S	S	S
Ttm	0.2	4.9	0.2	S	S	S
Tee	0.2	4.0	2.5	S	S	S

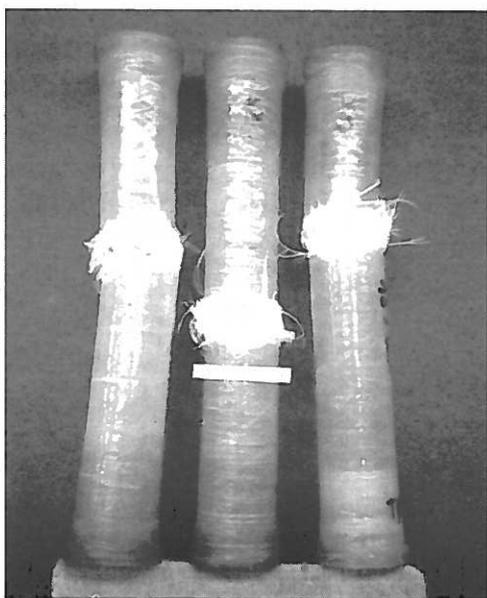


fig. 5 - Tubos ensaiados à pressão interior.

6. ENSAIOS DE FRACTURA INTER-LAMINAR EM MODO II (ENF)

O cálculo da força de impacto utilizando a expressão 2 passa pela estimativa da rigidez média, do coeficiente de Poisson médio bem como do valor do parâmetro G_{IIC} .

Não se encontraram na literatura valores para o G_{IIC} no caso dos compósitos de vidro/poliéster. Para a sua determinação produziram-se placas planas, por enrolamento filamentar, segundo a norma ISO DIS 9291, no mesmo material dos tubos, retirando-se provetes de $20 \times 150 \times 3.5 \text{ mm}^3$. A fenda inicial foi simulada com filme de PTFE de $20 \text{ }\mu\text{m}$ de espessura colocada a meio da espessura do provete.

Foi utilizada a geometria de carregamento ENF (End Notched Flexure), tendo sido ensaiados 5 provetes. Utilizou-se uma distância entre amarras de 100 mm , comprimento de fenda/distância entre amarras de 0.25 e velocidade de ensaio de 2 mm/min . Utilizando-se o critério visual e a teoria das vigas corrigida obteve-se para G_{IIC} do material o valor de $2.568 \pm 0.075 \text{ kJ/m}^2$.

Ensaio de fractura interlaminar a partir de fissuras geradas por propagação do defeito inicial não apresentaram bons resultados. Verificou-se uma indefinição na direcção de propagação da fenda.

7. CONCLUSÕES

A força de impacto é sem dúvida uma característica importante do ensaio de impacto, sendo o seu valor relativamente independente das energias de impacto. Da análise dos resultados verifica-se que a série de tubos Tee, apresenta um valor de força máxima cerca de 10% mais elevado relativamente à série de referência, não havendo variação significativa nas outras séries.

O cálculo da força de impacto pela expressão 2 resulta praticamente no dobro

do valor obtido no ensaio. Esta diferença de resultado pode ser explicada pelo facto da expressão 2 negligenciar a curvatura da tubagem, assumir que a área delaminada é circular e expressar propriedades mecânicas em termos de propriedades equivalentes.

O aumento da tensão nas fibras do reforço acarreta uma diminuição significativa da rigidez das tubagens assim produzidas quando estas são comparadas com a tubagem de referência. (note-se que no entanto o módulo destas tubagens aumenta, havendo no entanto uma diminuição da espessura responsável pela perda de rigidez).

É natural que as tubagens produzidas com uma tensão elevada, sendo menos rígidas, tenham uma maior capacidade de absorção de energia (cerca de 13 % em relação a tubagens de referência).

Todas as tubagens ensaiadas à pressão interior com dano de impacto de 2.5 J apresentaram fugas. No entanto, as fissuras provocadas pelo dano de impacto não progrediram com o aumento da pressão, sendo possível determinar a pressão de rotura da tubagem. Essa rotura ocorreu para valores idênticos aos obtidos no ensaio de pressão interior de tubagens não danificadas. No impacto houve apenas delaminações da matriz. Existem indicações de que o caudal de fugas se reduz ao longo do tempo (*Pays et al, 1995*).

As tubagens de referência são as que apresentam maior valor de pressão de rebentamento, mas em todas as séries se verificou a existência de fugas.

Em síntese:

- parâmetros distintos do processo de fabrico de enrolamento filamentar dão origem a comportamentos distintos dos componentes fabricados;
- o comportamento à pressão interior após impacto das tubagens de vidro poliéster é governado pela matriz, isto é o impacto fatura a matriz, não sendo o reforço afectado significativamente;
- o cálculo analítico da força de impacto passa pelo refinamento das expressões existentes para provetes planos.

REFERÊNCIAS

- Peters, S. T., Humphrey W. D. and Foral R. F., 1991. Filament Winding Composite Structure Fabrication. SAMPE.
- Choen, D., Toombs Y., Johnson A. and Hansen M., 1995. Experimental Investigation into the Influence of Filament Winding Parameters on Composite Vessel Quality and Strength. Proceedings of ICCM-10, Canada.
- Sjoebloom P. O. et al., 1988. On Low-Velocity Impact Testing on Composite Materials. Journal of Composite Materials, Vol. 22.
- Lagace P. A. et al., 1993. A Preliminary Proposition for a Test Method to Measure Impact Damage Resistance. Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 12.
- Doucet A. B., Rao M. D., 1993, The use of Absorbed Impact Energy as a Damage Metric. Advanced Composite Letters.
- Frost S. R. e Cervenka A., 1994, Glass Fibre-Reinforced Epoxy Matrix Filament Wound Pipes for use in the Oil Industry. Composites Manufacturing, Vol. 5.
- Robinson P. and Davies G. A. O., Predicting Failure by Debonding and Delamination. AGARD 74th Structures and Materials Meeting.
- Reid S. R. and Ashton J. N., 1992, Damage Tolerance of Composite Pipes to local loading. Project CP299, UMIST.
- Pays M. F., 1994, Étude de la Résistance au Choc de Tuyauteries en Matériaux Composites. Department etude des Matériaux, EDF.
- Pays M., Garcin Ph., 1995, Résistance au Choc des Tuyauteries en Matériaux Composites. Department etude des Matériaux, EDF.