

ESTUDO DO DANO EM TUBOS DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA REFORÇADA COM FIBRAS CONTÍNUAS

S. M. Correia¹, J. F. Silva², J. Monteiro³, J. P. Nunes⁴, A. T. Marques⁵

¹Técnica Superior, Departamento de Engenharia Mecânica, ISEP

²Prof. Adjunto, Departamento de Engenharia Mecânica, ISEP

³Investigador, LOME, INEGI

⁴Prof. Auxiliar, Departamento de Engenharia de Polímeros, Universidade do Minho

⁵Prof. Catedrático, Departamento de Engenharia Mecânica, FEUP



RESUMO

Estudou-se o dano causado por impacto de baixa velocidade em tubagens produzidas por enrolamento filamentar de matriz termoplástica e de matriz termoendurecível, reforçadas com fibras de vidro. Determinou-se também, experimentalmente, o valor da taxa crítica de libertação de energia em modo II (G_{IIc}), através de ensaios de End-Notched Flexure (ENF), a partir de provetes obtidos de placas fabricadas por compressão a quente. Relacionou-se o valor de G_{IIc} obtido em provetes planos com o dano de impacto nas tubagens.

1 - INTRODUÇÃO

As tubagens estruturais em material termoplástico reforçado com fibras têm vindo a ser utilizadas com sucesso em algumas aplicações industriais, nomeadamente na indústria química, no transporte de água (condutas adutoras) e em estações de tratamento de águas residuais. Este tipo de tubagens apresenta, relativamente às mais tradicionalmente empregues, de matriz termoendurecível reforçada com fibras, uma maior resistência química e maior tenacidade, com a vantagem de a matriz poder ser reciclada e/ou reutilizada.

Estes tubos, podem ser sujeitos a diferentes tipos de carregamentos, tais como, pressão interior, compressão diametral, flexão etc., bem como sofrer danos devido a condições de

funcionamento inesperadas (impactos de baixa velocidade, tal como queda de pedras, ferramentas, etc.).

Neste trabalho descreve-se uma metodologia baseada em conceitos da mecânica da fractura para avaliar possíveis danos em tubagens.

Para a caracterização mecânica dos materiais e das amostras de tubos produzidas por enrolamento filamentar e, para a determinação de propriedades úteis no estudo do dano em materiais compósitos laminados foram realizados ensaios de ENF (End-Notched-Flexure) e ensaios mecânicos.

Foram ainda realizados testes de impacto a baixa velocidade por queda de peso, sendo a caracterização da área delaminada gerada obtida a partir da técnica de ESPI – Electronic Speckle Pattern Interferometry.

2 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 - Matérias-primas

As matérias-primas utilizadas na produção de provetes para os ensaios descritos neste trabalho foram:

- Fibra de vidro tipo E impregnada de resina de poliéster;
- Pré-impregnado de fibra de vidro e de polipropileno, adiante designado por Twintex[®] (figura 1).

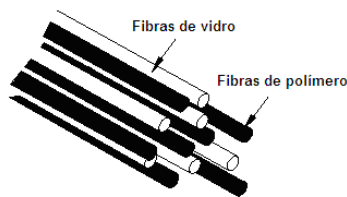


Fig. 1 – Representação esquemática do Twintex[®].

2.2 - Fabrico de provetes para testes

Para o fabrico dos provetes utilizados nos ensaios descritos neste trabalho adoptou-se a tecnologia do enrolamento filantar. O equipamento utilizado foi uma máquina de enrolamento filantar helicoidal de comando numérico de marca Pultrex, modelo Modwind 1S 6NC [1].

Para além do fabrico de tubos por enrolamento filantar produziram-se também placas com pré-fendas pelo mesmo processo de transformação, submetidas posteriormente a ensaios ENF para o cálculo da taxa de libertação de energia em modo II do material (G_{IIc}), a fim de relacionar esta propriedade com o comportamento ao impacto da tubagem fabricada.

Para este estudo, foram produzidos por enrolamento filantar vários tubos com 3mm de espessura, 80mm de diâmetro interior e 400mm de comprimento, a partir de um mandril tubular em aço, com uma ligeira conicidade (1/1000), revestido com uma camada desmoldante de politetrafluoretileno (PTFE) e de uma película de Melinex de 25 μ m de espessura.

Os tubos produzidos foram posteriormente identificados e submetidos a ensaios de impacto de baixa velocidade por queda de peso.

Para o fabrico das placas acima referidas, utilizou-se um mandril plano constituído por duas faces de vidro de 5mm. Para gerar a pré-fenda recorreu-se a uma película de Melinex com 25 μ m, introduzida a meio da espessura da placa. Para finalizar a consolidação submeteu-se as placas a compressão a quente. O equipamento utilizado foi uma prensa hidráulica SATIM 400 kN com aquecimento e arrefecimento controlado [2].

As placas consolidadas foram posteriormente submetidas a ensaios ENF.

Para cada uma das estruturas acima mencionadas foram usadas dois tipos de matérias-primas: fibra de vidro com poliéster, e Twintex[®].

2.3 - Ensaios ENF (End-Notched Flexure)

Os materiais compósitos de matriz polimérica são cada vez mais utilizados em aplicações estruturais. Todavia, estes materiais são susceptíveis de sofrer delaminação, isto é, descoesões localizadas entre as camadas que os constituem. A delaminação é particularmente perigosa pois, podendo ser invisível a 'olho nu', pode debilitar consideravelmente as estruturas.

Para realizar os testes ENF de acordo com o Protocolo ESIS para o teste de fractura interlaminar No.2 em modo II de Novembro de 1988 [3], cortaram-se quatro provetes com uma forma rectangular segundo a direcção das fibras de reforço das placas com pré-fenda produzidas por compressão a quente, tendo sido possível a determinação da já referida taxa crítica de libertação de energia, G_{IIc} , isto é, a energia necessária para o início da propagação de uma pré-fenda já existente do provete.

Para realizar estes ensaios utilizou-se um dispositivo idêntico ao utilizado para a realização de ensaios de flexão em três pontos, constituído por dois apoios

cilíndricos, enquanto a carga foi aplicada a meio do comprimento do provete, gerando uma distribuição de tensões que promoveu a propagação da pré-fenda, neste caso, em modo II. A máquina de ensaios utilizada foi uma Instron 4208.

A geometria dos provetes para teste é representada esquematicamente na figura 2.

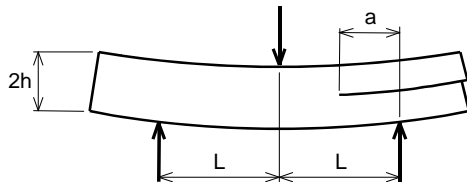


Fig. 2 - Geometria dos provetes para os ensaios ENF.

A espessura $2h$ foi aproximadamente 3mm, a distância entre amarras $2L$ e a largura eram 100mm e 20mm respectivamente. A relação a/L foi mantida sempre constante e igual a 0,5.

O critério adoptado para a determinação do ponto inicial de propagação da fenda foi o “5% offset value”. Segundo este critério, a intersecção da curva experimental força-deslocamento com uma linha recta correspondente a um aumento de 5% da ‘compliance’ define o ponto carga-deslocamento da curva experimental correspondente ao início da propagação da fenda (ver figura 3).

Neste estudo calculou-se o valor de G_{IIc} utilizando-se as equações obtidas a partir da teoria das vigas “Direct Beam Theory” e também aquelas que resultam da utilização da teoria das vigas corrigidas “Corrected Beam Theory”.

Por este processo, foi possível obter bons resultados para ambos os materiais ensaiados.

2.4 - Teste de impacto

Os tubos produzidos por enrolamento filamentar com diferentes materiais foram submetidos a testes de impacto de baixa velocidade por queda de peso para determi-

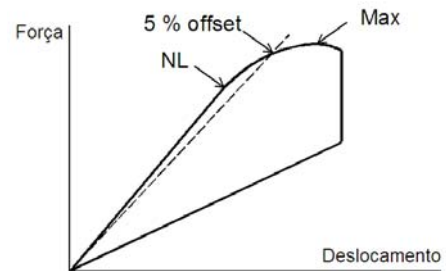


Fig. 3 - Critério utilizado para a determinação do início da propagação da fenda.

nação da evolução da força, da velocidade de impacto e da energia absorvida. Estes valores foram obtidos através de cálculos feitos com base nos valores de força medidos pelo sensor de força com o qual a máquina de impacto está instrumentada.

Neste ensaio utilizou-se uma máquina de impacto por queda de peso Rosand IFW5HV com impactor de geometria hemisférica e massa 2,853 kg. Todos os ensaios foram realizados a uma energia de 10 J [4].

As tubagens foram simplesmente apoiadas num suporte em ‘V’ conforme se mostra na figura 4. Este suporte em ‘V’, com um ângulo de abertura de 90° e comprimento suficiente para apoiar todo o comprimento útil da tubagem, segue a norma para impacto de tubagens ASTM D 2444.

O ponto de impacto esteve sempre sensivelmente a meio do comprimento da tubagem e transversalmente ao seu eixo longitudinal.

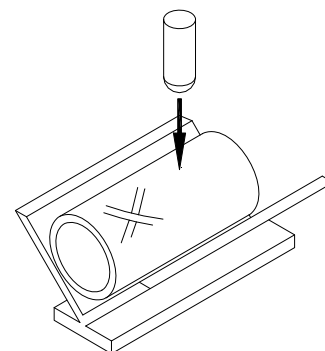


Fig. 4 - Suporte das tubagens para os ensaios de impacto.

A figura 5 apresenta um gráfico força/tempo obtido num ensaio de impacto de um tubo de Twintex[®]. A verificação da existência de dano no interior da tubagem fez-se por simples inspecção visual.

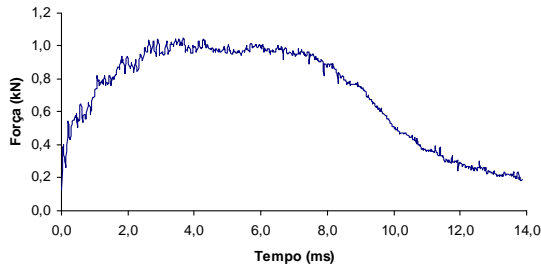


Fig. 5 - Gráfico força/tempo obtido num ensaio de impacto num tubo de Twintex[®].

2.5 - Testes ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry)

A técnica de ESPI foi utilizada na determinação da área delaminada na zona do impacto nos tubos produzidos a partir de Twintex[®]. Nestes tubos, a matriz não é translúcida e portanto não é possível determinar, por simples inspecção visual, a área delaminada, sendo necessário recorrer a outras técnicas.

Nesta técnica (figura 6), guarda-se informação sob a forma de um holograma, sobre a fase da luz reflectida por um objecto antes de ser solicitado, resultante da interferência entre duas ondas.

Quando o objecto a estudar (amostra de tubo) é solicitado (neste trabalho a solicitação consistiu no aquecimento da zona a estudar com um secador de ar quente), produz-se e guarda-se informação de um novo holograma, sendo possível obter a muito pequena deformação do tubo na zona delaminada por correlação dos dois hologramas referidos.

A correlação resulta num ‘interferograma’ constituído por um conjunto de franjas de interferometria. Estas franjas representam pontos com o mesmo deslocamento, sendo a distância entre duas franjas adjacentes igual a metade do comprimento de onda da luz do LASER utilizado (neste trabalho o LASER utilizado

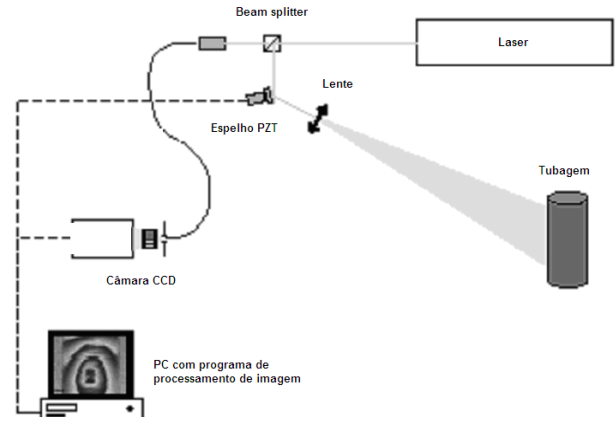


Fig. 6 - Representação esquemática do sistema de ESPI utilizado.

gerou uma luz com um comprimento de onda de aproximadamente 532nm). As imagens obtidas com esta técnica foram posteriormente processadas digitalmente.

Neste trabalho, para a obtenção do mapa de fase de cada franja de interferometria foram utilizadas técnicas de diferença de fase temporal. O espelho foi montado num transdutor piezoeléctrico (PZT) e utilizado para modular a fase dos padrões de franjas que, em combinação com técnicas de processamento de imagem, permitiram o cálculo da distribuição da fase nas três dimensões espaciais.

Neste trabalho, para o cálculo da fase de cada pixel, foi utilizado um algoritmo especial que utiliza quatro imagens com informação da fase, permitindo a obtenção do mapa de fase. Na figura 7a pode ver-se a zona a inspecionar que foi objecto de estudo, correspondente à parte da tubagem onde se deu o impacto.

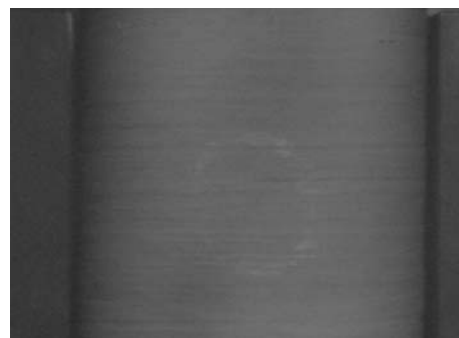


Fig. 7a - Área a inspecionar.

Na figura 7b mostra-se o mapa de fase ESPI, revelando a zona com defeito (área delaminada).

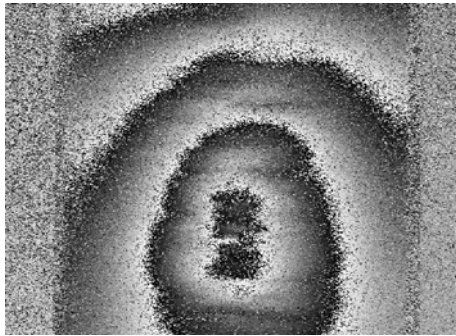


Fig. 7b - Zona evidenciando a área delaminada.

Os resultados obtidos foram posteriormente processados usando algoritmos dedicados. Na figura 7c mostra-se a zona com defeito após filtragem e remoção de todos os movimentos de corpo rígido.

Pode ver-se ainda que na zona do impacto os deslocamentos são elevados (cor vermelha). A cor azul representa as zonas da tubagem com menores valores de deslocamento.

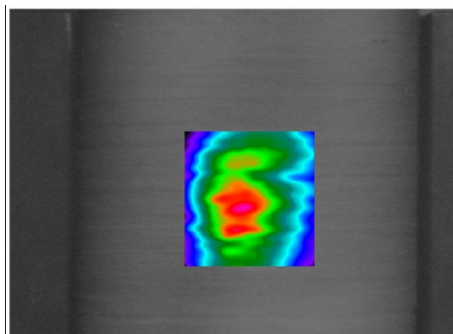


Fig. 7c - Área delaminada.

Para uma melhor visualização mostra-se na figura 7d uma representação tridimensional do campo de deslocamentos da zona da tubagem com o defeito de delaminação.

Como se pode observar nota-se claramente uma zona aproximadamente elíptica que delimita a área de dano.

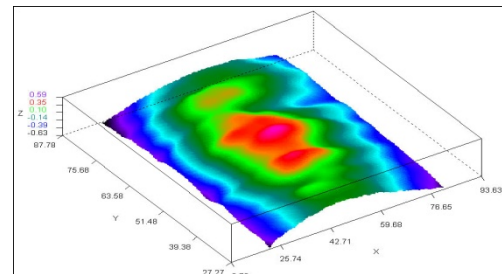


Fig. 7d - Representação 3D da área delaminada.

Com a técnica descrita foi possível determinar um valor correspondente à área afectada pelo dano de impacto.

3 - RESULTADOS

A tabela 1 sumaria os resultados obtidos nos testes de ENF realizados aos provetes planos. Como se pode constatar, a fibra de vidro com poliéster exibe valores mais elevados de G_{IIc} do que o pré-impregnado Twintex®.

Tabela 1 – Resultados obtidos dos testes ENF.

Material	G_{IIc} (kJ/m ²)
Twintex®	1,00±0,06
Fibra de vidro e poliéster	2,50±0,1

Note-se que, apesar dos tubos produzidos a partir do Twintex® apresentarem um valor de G_{IIc} bastante inferior ao dos tubos produzidos com uma matriz termoendurecível, a área delaminada nestes últimos é muito elevada (ver tabela 3). Assim, os tubos produzidos a partir do Twintex® apresentam uma tolerância ao dano superior a tubos produzidos com uma matriz de poliéster. Este aspecto, poderá estar relacionado com uma consolidação incompleta do polipropileno, havendo, por isso, uma fraca adesão do polímero com as fibras, o que poderá permitir uma maior dissipação da energia de impacto, sem que ocorra delaminação.

Relativamente aos testes de impacto das tubagens (tabela 2), o Twintex® apresenta

os melhores resultados do que a fibra de vidro com poliéster relativamente à capacidade de absorção de energia.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios de impacto por queda de peso.

Compósito	Força máxima (kN)	Energia à força máxima (J)	Velocidade de impacto (m/s)
Twintex®	1,05±0,05	8,40±0,8	2,57±0,006
Fibra de vidro e poliéster	0,75±0,1	5,0±0,6	

Por último, os resultados obtidos com a técnica de ESPI permitiram a determinação das áreas danificadas nos tubos de Twintex®. Para os tubos de fibra de vidro com poliéster, a extensão dos danos foi avaliada por simples inspeção visual uma vez que o material é translúcido (ver tabela 3).

Tabela 3 - Áreas delaminadas.

Área delaminada	Unidades	Twintex®	Fibra de vidro e poliéster
Experimental	mm ²	452	1850
Calculada		530	667

Os valores calculados assumem uma relação linear para a energia absorvida entre o parâmetro de G_{IIc} e as áreas danificadas [5].

4 – CONCLUSÕES

Neste trabalho comparou-se os resultados obtidos com tubagens de termoplástico reforçado com fibras contínuas (Twintex®) com as de um sistema tradicionalmente utilizado na indústria (fibra de vidro com poliéster).

Como principais conclusões obtidas através da realização deste trabalho enunciamos:

- As taxas de libertação crítica de energia em modo II (G_{IIc}) podem ser determinadas para os diferentes materiais;

- Os tubos produzidos com matriz termoplástica (Twintex®) apresentam os melhores resultados nos testes de impacto relativamente às tubagens de poliéster com fibra de vidro representativas da maioria das aplicações comerciais;
- A técnica de ESPI pode ser usada para a determinação das áreas delaminadas;
- No caso dos materiais translúcidos é possível estimar a área delaminada por simples inspeção visual;
- Os compósitos fabricados a partir de Twintex® apresentam uma melhor tolerância ao dano do que os compósitos de fibra de vidro com poliéster.

5 – REFERÊNCIAS

- [1] Pultrex Filament Winding Machine Specifications. PULTREX Lda. Clacton-On-Sea, Essex, England (1992).
- [2] J. F. Silva. Pré-Impregnados de Matriz Termoplástica: Fabrico e Transformação por Compressão a Quente e Enrolamento Filamentar. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Tese de Doutoramento (2005).
- [3] Protocols for interlaminar fracture testing of composites.ESIS-Polymers & Composites Task group. Edited by P. Davies (1993).
- [4] Rosand Precision Impact Tester. Software Manual, version 1.3. Rosand Precision Lda, West Midlands, England.
- [5] S. R. Frost, A. Cervenka. Glass Fibre-Reinforced Epoxy Matrix Filament-Wound Pipes for use in the oil industry. Composite Manufacturing, 5, pp. 73-81 (1994).