

DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES DE RIGIDEZ DE COMPÓSITOS DE MATRIZ DE EPÓXIDO REFORÇADOS COM FIBRA ENTRELAÇADA

J. A. Simões¹ e A. T. Marques²

¹ Secção Autónoma de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Portugal

² DEMEGI – FEUP, Porto, Portugal



RESUMO

Neste artigo descreve-se o procedimento experimental efectuado para a determinação da rigidez material de compósito, com reforço por entrelaçamento, passíveis de aplicação no desenvolvimento de componentes na área da medicina ortopédica. Os compósitos estudados foram fabricados em resina de epóxido reforçada com entrelaçados de fibra de vidro e de carbono-vidro sobre a forma de provetes tubulares cilíndricos. Os provetes foram obtidos por moldação por compressão a frio auxiliada com pressão. Realizaram-se ensaios de pressão interna para a caracterização da rigidez do material.

1. INTRODUÇÃO

É inquestionável a importância que os materiais compósitos vão assumindo cada vez mais nas diferentes áreas de projecto de engenharia. Sobre estes materiais tem recaído o interesse de muitos investigadores, constituindo uma fonte inesgotável de investigação, inovação e desenvolvimento das mais variadas aplicações estruturais. A prótese de anca é uma dos componentes, da área da medicina ortopédica, que tem estimulado a investigação de novos materiais (Simões, 1999). Os materiais passíveis de serem aplicados no fabrico de implantes ortopédicos devem possuir propriedades físicas, térmicas, químicas e mecânicas compatíveis com o meio onde vão ser inseridos, tendo que satisfazer requisitos normalizados de ensaios de biocompatibilidade. Actualmente, existe um enorme interesse no desenvolvimento de

materiais compósitos de matriz polimérica. A resina termoendurecível mais utilizada na indústria ortopédica dos implantes tem sido a de epóxido. Existe alguma controvérsia sobre as propriedades de biocompatibilidade desta resina e da sua aplicabilidade no fabrico de implantes. Alguns investigadores consideram este material incompatível; outros consideram que determinados sistemas de resinas de epóxido são compatíveis, tendo inclusivamente sido utilizados no fabrico de componentes para pacemakers, em cimentos de fixação de implantes e em placas para a união de fracturas (Scheer, 1981).

A polisulfona é um polímero de excelente biocompatibilidade (Spector et al., 1983; Design Engineering Data, 1979) e foi um dos primeiros materiais testados e utilizados como matriz em aplicações ortopédicas, nomeadamente, no

desenvolvimento de próteses de anca compósitas. A elevada estabilidade química e térmica da polisulfona resulta da sua estrutura química, mas não pode ser utilizada com o PMMA (polimetacrilato de metilo) porque é absorvido por solventes orgânicos polares, tais como a acetona, hidrocarbonatos clorinados, ou por solventes como o benzeno. A polietersulfona é outro polímero muito semelhante à polisulfona, mas cuja temperatura de transição vítrea é superior à da polisulfona em cerca de 50°C. O PEEK é um termoplástico que tem sido estudado para o desenvolvimento de implantes ortopédicos, todavia a sua biocompatibilidade não é tão conhecida como a da polisulfona (Williams et al., 1987).

O polietileno é neste momento o termoplástico mais utilizado no fabrico de componentes acetabulares. Actualmente existem estudos com poliuretano para o mesmo fim (Unsworth et al., 1981 e 1987). Um compósito obtido por injeção de polietileno reforçado com fibra de carbono foi utilizado no fabrico de componentes acetabulares. Este compósito era composto por cerca de 10% a 15% de fibra com comprimento médio de 3 mm (Katz, 1984). Contudo, este material não foi massivamente aplicado por não se ter verificado melhorias significativas das propriedades mecânicas desejadas pelos fabricantes.

As fibras de carbono e de poliamida aromática têm sido as mais utilizadas em aplicações. As fibras de carbono apresentam alguma fragilidade, pois não exibem qualquer ductilidade, e o alongamento após rotura é inferior a 1%. A vantagem das fibras de poliamida relativamente às fibras de carbono está na sua fractura dúctil, todavia, apresentam uma resistência em compressão em cerca de 20% da sua resistência em tracção. As fibras de carbono têm uma resistência em compressão praticamente idêntica à sua resistência em tracção.

Os maiores problemas, no que diz respeito à rotura dos materiais compósitos, residem na interface fibra-matriz. Se a

transferência de tensões da fibra para a matriz não se processar convenientemente, resultará disso uma perda de capacidade do compósito para suportar maiores esforços. A interface do material compósito é o factor chave no desempenho do mesmo, sendo necessário uma forte ligação entre a matriz e a fibra para se obter boas propriedades. A ligação química é uma das formas possíveis de ligação entre a fibra e a matriz, mas é necessária elevada estabilidade química da fibra e da resina. O carbono, devido à sua aptidão para absorver gás, pode formar fortes ligações químicas com grupos insaturados de resinas termoplásticas. Este facto, aliado à sua boa biocompatibilidade, faz com que seja normalmente escolhido para o estudo e fabrico de próteses de anca. Existem alguns problemas de ligação entre as fibras de poliamida e as resinas termoplásticas e termoendurecíveis.

2. O PROCESSO DE ENTRELAÇAMENTO DE FIBRA

Dos mais variados processos de fabrico de transformação de materiais compósitos, o processo de entrelaçamento de fibra (*braiding*) adequa-se ao fabrico de componentes como a prótese de anca. O processo de entrelaçamento é um processo de fabrico têxtil de longa data que tem sido aplicado na produção dos mais diversos produtos domésticos e industriais (Skelton, 1989). Tradicionalmente, os produtos mais adequados ao processo de entrelaçamento eram as cordas, reforço e protecção de tubos, cabos e outros produtos similares. Para este tipo de aplicações, a simplicidade relativa e a elevada produtividade do entrelaçamento faz com que seja um processo de fabrico de baixo custo. Mais recentemente, as vantagens inerentes do processo fizeram com que o mesmo fosse expandido ao fabrico de outras aplicações industriais. Actualmente existe um interesse crescente no fabrico de pré-formas por entrelaçamento.

Muitos fabricantes têm incorporado este tipo de estruturas como reforço em aplicações compósitas de elevada

exigência mecânica. Inicialmente, quando a preocupação era demonstrar o potencial dos materiais compósitos no projecto de engenharia, havia unicamente a preocupação do fabrico de produtos de elevada qualidade, sem a preocupação com os custos inerentes ao fabrico destes. À medida que os materiais compósitos foram conquistando o mercado concorrencial dos metais tradicionais, não foi possível continuar a fabricar estruturas de elevada qualidade com elevado custo, o que provocou a investigação de processos alternativos de fabrico, mais vantajosos e mais viáveis economicamente.

O processo de entrelaçamento, é na sua essência, um processo bastante simples. Na sua forma básica, dois conjuntos de fibra são postos em movimento circular de forma que as fibras se intersectem. O detalhe da estrutura pode ser modificado manipulando a sequência da intersecção das fibras. A elevada deformabilidade radial de uma estrutura tubular entrelaçada permite o fabrico de pré-estruturas conformes e de geometria complexa. A configuração final da pré-forma é a do mandril, e a orientação da fibra é obtida pelo quociente entre a velocidade de rotação da fibra e a velocidade de translação do carro que a contém. O mandril poderá ser de geometria variável, e caso não tenha reentrâncias demasiado profundas, é possível efectuar a pré-forma com a geometria do mandril. Há contudo algumas restrições neste processo, nomeadamente, no diâmetro máximo e mínimo com que é possível fabricar as pré-formas, e estes dependem do tipo de máquina de entrelaçamento. No fabrico do tecido de fibra entrelaçada é possível adicionar fibras na direcção axial para aumentar a resistência do tecido nesta direcção.

Existem, potencialmente, de estruturas entrelaçadas (Skelton, 1989). O primeiro, consiste na impregnação de pré-formas por moldação por transferência de resina (RTM), talvez o processo mais versátil de impregnação. Neste caso, após fabricar a pré-estrutura, esta é colocada dentro de um molde, injectando-se resina,

normalmente a baixa pressão, para impregnar a pré-forma. Um segundo método consiste em fabricar e impregnar a pré-forma em simultâneo. Este método produz uma estrutura impregnada sobre um mandril, princípio muito similar ao processo de enrolamento filamental húmido. A terceira possibilidade, consiste na utilização de pré-impregnados parcial ou totalmente curados. Existem contudo algumas limitações com a utilização de pré-impregnados (Skelton, 1979).

3. FABRICO DE PROVETES

Os provetes foram fabricados usando pré-formas tubulares de fibra de vidro e híbridas de carbono-vidro, cujas características são:

FIBRA DE VIDRO

- designação comercial - Silasox™;
- diâmetro = 31,8 mm;
- ângulo do entrelaçado = 45 °;
- peso = 376 g / m²;
- espessura = 0,3 mm (50% vf);
- cedência = 27 m/kg.

FIBRA DE CARBONO/VIDRO

- designação comercial - Cobrasox™;
- diâmetro = 38,1 mm;
- ângulo do entrelaçado = 45 °;
- peso = 336 g / m²;
- espessura = 0,3 mm (50% vf);
- cedência = 25 m/kg.

Para o fabrico dos provetes, projectou-se e fabricou-se um molde. O molde foi maquinado em duralumínio, cujo guiamento e simetria da cavidade cilíndrica era obtida através de dois pinos. Os dois meios moldes eram fechados através de oito parafusos, e nas duas tampas laterais, utilizaram-se quatro parafusos para fechar lateralmente o molde. Em cada tampa foi maquinada uma superfície cónica que permitia o ajustamento de cada metade do molde, permitindo prender uma manga de polietileno que encerrava o ar sob pressão. A estanquicidade do molde era conseguida através da utilização de um elastómero (*mastik*) nas superfícies cónicas das duas

tampas. Nas extremidades do molde colocou-se uma válvula de admissão de ar e um filtro para o escape do mesmo (figura 1). A pressão interior da manga garantia uma espessura relativamente constante aos provetes.

O método de fabrico dos provetes foi como a seguir se descreve. Após a colocação de fita desmoldante no molde, colocavam-se três tecidos de fibra entrelaçada em torno de duas mangas de polietileno (*Walsroder Perfekt*) de diâmetro 40 mm, impregnando as respectivas estruturas com resina de epóxico (*Beresin L 84A* com 20% de catalisador *Beresin L 84B*). Concluída esta operação, colocava-se o impregnado dentro da cavidade do molde, fechando-o e introduzindo ar sob pressão (4 a 5 bar) dentro da manga, suficiente para encostar o impregnado às superfícies do molde. Seguiu-se um processo de cura à temperatura ambiente durante 24 horas. A figura 1 ilustra esquematicamente o processo utilizado no fabrico dos provetes. Todos os provetes foram posteriormente sujeitos a uma pós-cura a 80°C durante 12 horas. Na figura 2 ilustra-se um exemplar de cada tipo de provete fabricado. Na tabela 1 apresentam-se os resultados do diâmetro e espessura médias dos provetes, bem como o volume de fibra determinado de acordo com a Norma NP 2216/1988 (determinação da perda de massa por calcinação para materiais plásticos reforçados com fibra de vidro).

Os resultados da tabela 1 mostram que o fabrico dos provetes com reforço em vidro foi mais uniforme, obtendo-se volumes de fibra muito semelhantes. O mesmo não aconteceu relativamente ao fabrico dos provetes com reforço híbrido, pois o provete H1 apresentou um percentagem de cerca de 25% de volume de fibra superior aos outros dois (H2 e H3). Comparando o volume de fibra entre as duas estruturas de reforço, verifica-se que a estrutura híbrida apresenta uma menor percentagem de fibra e, conseqüentemente, uma maior percentagem de resina. O facto de as pré-formas híbridas serem de maior diâmetro que as

de vidro, fez com que a fibra ficasse colocada com menor ângulo de entrelaçamento, alterando a forma de impregnação do reforço.

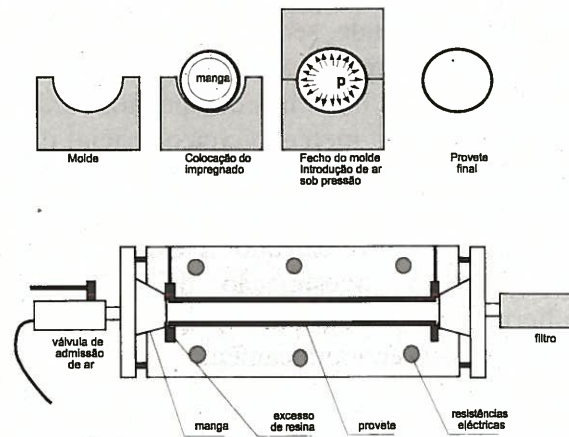


Fig 1 - Desenho esquemático do processo de fabrico dos provetes.

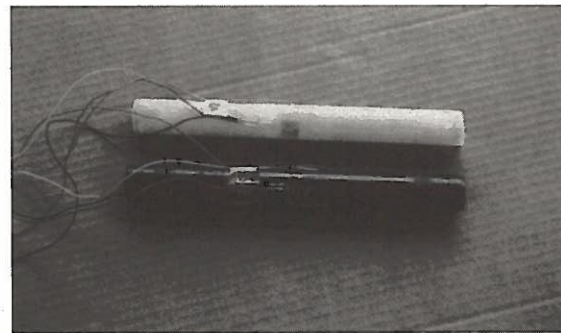


Fig 2 - Provetes tubulares usados na determinação das propriedades de rigidez dos compósitos.

4. DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES ELÁSTICAS

A determinação das constantes elásticas de provetes de secção tubular pode ser efectuada por meio de ensaios de tracção, compressão, torção, pressão interna e pressão externa. Os ensaios de tracção e compressão permitem determinar a resistência e o módulo de elasticidade respectivamente, em tracção e compressão e o respectivo coeficiente de Poisson. A caracterização das propriedades de resistência e de rigidez de um material é feita normalmente com provetes planos de largura considerada infinita, extrapolando os resultados para provetes tubulares, desprezando o efeito de bordo. Esta é uma simplificação que pode em determinadas

Tabela 1 - Diâmetro e espessura média dos provetes e respectivo volume de fibra.

Provete	diam. (mm)	esp. (mm)	Vol. fibra %
V_1	30,300	1,158	65,8
V_2	30,260	1,162	62,9
V_3	30,314	1,208	65,6
Média	30,291	1,176	64,8
H_1	30,398	1,190	53,5
H_2	30,348	1,186	39,0
H_3	30,365	1,186	39,5
Média	30,370	1,187	44,0

circunstâncias ser razoável, não permitindo contudo eliminar as diferenças inerentes no fabrico de provetes tubulares e planos. No entanto, é mais difícil obter provetes tubulares com espessura constante e reforço uniforme, o que afecta de forma significativa os resultados do ensaio. Por exemplo, no trabalho de Hoggatt (1989), verifica-se que a comparação de resistência e da rigidez de provetes planos e tubulares com 7 camadas obtidas num ensaio de tracção, deu origem a um erro de 72% para o módulo de elasticidade e de 57% para a resistência à rotura. Quando o número de camadas dos provetes aumentou para 13 camadas, o erro para o módulo de elasticidade baixou para 2% e 4% para a resistência à rotura. Os resultados parecem ser afectados, não só pelo método de fabrico, mas também pela espessura e sequência de empilhamento das camadas.

4.1 O ensaio com Pressão Interna

Um provete tubular pode ser considerado de parede fina ou parede espessa, não sendo muito clara a transição de um tipo para o outro. Para caracterizar correctamente as propriedades elásticas é necessário controlar a estabilidade das tensões σ_r (direcção radial) e σ_θ (direcção circunferencial) e a variação da espessura

relativa c (ou R/h) sendo:

$$c = \frac{2R - h}{h + 2R} \quad (1)$$

em que R é o raio médio e h a espessura do provete. Aumentando o valor de c , isto é, transitando de um provete de parede espessa para fina, o efeito das tensões σ_r e σ_θ decresce, mantendo-se a tensão σ_z (direcção axial) torna-se praticamente uniforme em toda a espessura do provete.

Bulmanis (1988) determinou a influência da espessura de provetes tubulares sobre as tensões instaladas, concluindo que a tensão σ_r pode ser desprezada quando $c > 0,7$ ou $R/h > 4,5$, devendo o efeito da tensão σ_z ser analisado para cada caso concreto.

Estudos realizados por Pagano e Whitney (1980) sobre o estado de tensão em cilindros fabricados por enrolamento filamental helicoidal mostraram que o conceito de parede fina depende da anisotropia do material. Provetes obtidos por enrolamento filamental helicoidal com fibra de vidro podem ser considerados de parede fina para $R/h=10$, e $R/h=40$ para enrolamento com fibra de carbono.

O ensaio de pressão interna permite determinar os módulos de elasticidade na direcção longitudinal e circunferencial e a resistência à rotura da estrutura compósita. Neste tipo de ensaio, se o provete é de parede fina, a tensão radial pode ser desprezada. Tal como nos ensaios de tracção, a uniformidade do estado de tensão depende da anisotropia do material E_z/E_θ e do quociente R/h . As tensões circunferenciais e axiais num provete tubular de parede fina (figura 3) podem ser obtidas respectivamente pelas expressões:

$$\sigma_\theta = \frac{pR}{h} \quad (2)$$

e

$$\sigma_z = \frac{pR}{2h} \quad (3)$$

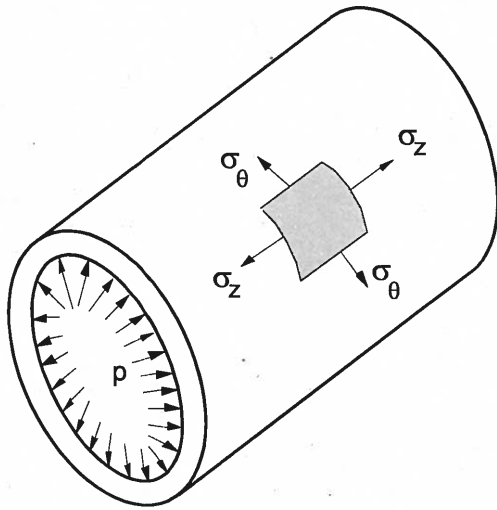


Fig 3 - Tensões desenvolvidas num provete tubular cilíndrico sujeito a pressão interna.

sendo p a pressão interna, R o raio médio da secção do provete e h a sua espessura. O conhecimento das extensões circunferenciais e axiais provocadas pela pressão interior permitem a determinação das constantes elásticas que caracterizam a rigidez material da estrutura ensaiada.

4.2 PROPRIEDADES DE RIGIDEZ DE UM MATERIAL ORTOTRÓPICO

A caracterização da rigidez material dos provetes pressupõe, aparentemente, a determinação de cinco constantes elásticas, por se tratar de um material ortotrópico. Assim, as constantes que caracterizam a estrutura compósita são os módulos de elasticidade E_z e E_θ , coeficientes de Poisson $\nu_{\theta z}$ e $\nu_{z\theta}$ e o módulo de corte $G_{z\theta}$ (figura 4). Dada a relação entre os módulos de elasticidade e os coeficientes de Poisson, o cálculo pode ser efectuado apenas com base em quatro variáveis (Gay, 1991). Tendo em consideração a figura 4, as constantes de elasticidade podem ser determinadas pelas expressões:

$$\epsilon_z = \frac{\sigma_z}{E_z} - \nu_{\theta z} \frac{\sigma_\theta}{E_\theta} \quad (4)$$

$$\epsilon_\theta = \frac{\sigma_\theta}{E_\theta} - \nu_{z\theta} \frac{\sigma_z}{E_z} \quad (5)$$

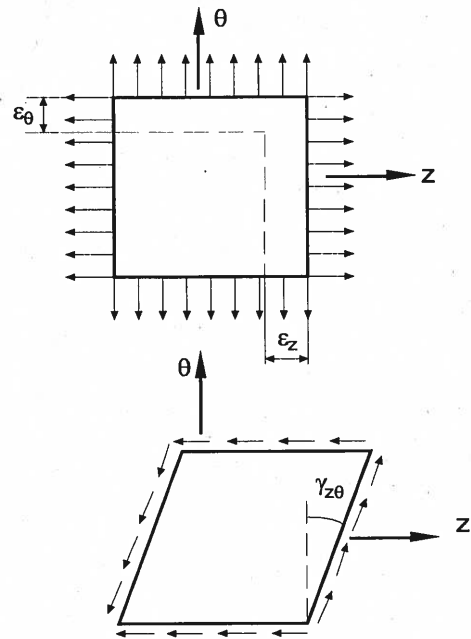


Fig 4 - Estado plano de tensão num material ortotrópico.

$$\gamma_{z\theta} = \frac{\tau_{z\theta}}{G_{z\theta}} \quad (6)$$

$$\nu_{z\theta} = \nu_{\theta z} \frac{E_z}{E_\theta} \quad (7)$$

As constantes elásticas determinadas para a caracterização das propriedades de rigidez do compósito fabricado foram os módulos de elasticidade e os coeficientes de Poisson

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O simples ensaio de pressão interna não permite a determinação das quatro constantes elásticas do material. Assim, para contornar este obstáculo, realizaram-se dois ensaios de pressão interna distintos. No primeiro, o provete encontrava-se livre de movimento axial (figura 5a), no segundo, restringiu-se o seu movimento axial (figura 5b). A realização destes dois ensaios permitiu-nos determinar quatro constantes elásticas.

Para os provetes ensaiados, e de acordo com a representação esquemática da figura 5a, foram colocadas duas peças nas extremidades do provete, evitando a saída da água sob pressão e permitindo o

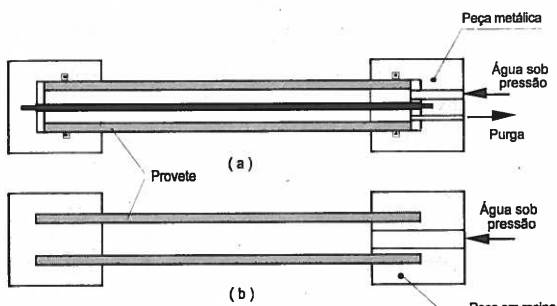


Fig 5 - Tubo sujeito a pressão interna com a) - provete livre de movimento axial e b) - provete restringido de movimento axial.

movimento axial do provete. No ensaio ilustrado na figura 5b, as pontas dos provetes foram bloqueadas com cilindros de resina de epóxico, conseguindo-se assim a restrição do seu movimento axial. A figura 6 ilustra as condições impostas aos diferentes ensaios e a forma como se permitiu, ou não, o movimento axial do provete.

Instrumentaram-se três provetes de cada material com rosetas de dois extensómetros a 90°, GFCA-3-350-50 com *gauge factor* de 2,14, da Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. Os extensómetros foram ligados a um sistema de leitura da Measurements Group, Raleigh, North Carolina (P-3500). Os ensaios de pressão interna foram realizados fazendo uso de equipamento específico. A medição da pressão foi efectuada com uma precisão igual ou superior a 1% em relação ao valor máximo da gama do transdutor de pressão utilizado. O transdutor foi seleccionado para um valor máximo de pressão a medir igual ou inferior a 10 MPa. A figura 7 ilustra o aparato experimental utilizado na realização dos ensaios.

Os provetes foram ensaiados determinando-se a variação das extensões circunferenciais ϵ_θ e axiais ϵ_z com a pressão p . Considerando as expressões (2) a (7), e a variação das extensões com a pressão, os módulos de elasticidade circunferencial e axial e os respectivos coeficientes de Poisson foram determinados através das expressões:

$$E_z = \frac{p R}{\epsilon_\theta h} \quad (8)$$

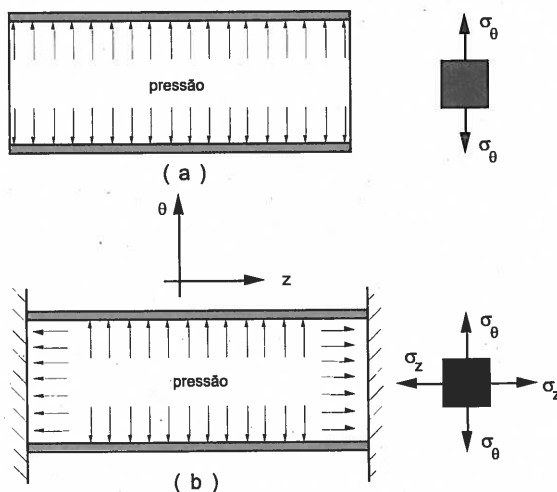


Fig 6 - Condições fronteira impostas aos provetes ensaiados sob pressão interna.

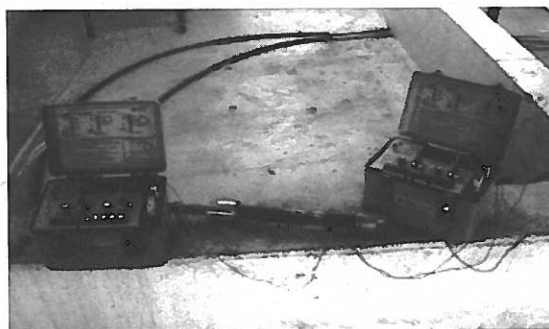


Fig 7 - Aparato experimental utilizado na realização dos ensaios de pressão interna.

$$v_{\theta z} = -\frac{\epsilon_z}{\epsilon_\theta} \quad (9)$$

$$\frac{2h}{R} \left(\frac{\epsilon_z}{p} - v_{\theta z} \frac{\epsilon_\theta}{p} \right) E_z^2 - E_z + v_{\theta z}^2 E_\theta = 0 \quad (10)$$

$$v_{z\theta} = v_{\theta z} \frac{E_z}{E_\theta} \quad (11)$$

Duas das constantes elásticas (E_θ e $v_{\theta z}$) foram determinadas a partir do ensaio (a) utilizando as expressões (8) e (9) respectivamente. As outras duas (E_z e $v_{z\theta}$) foram determinadas a partir do ensaio (b), com base na expressões (5.10) e (5.11). O módulo E_z foi obtido através das soluções possíveis da expressão (5.10). A figura 8 ilustra a variação típica das extensões axial e circunferencial para o ensaio do provete com reforço de vidro (V1).

Utilizando as expressões (8) a (10) obteve-se as constantes elásticas para cada provete, que são apresentadas na tabela 2.

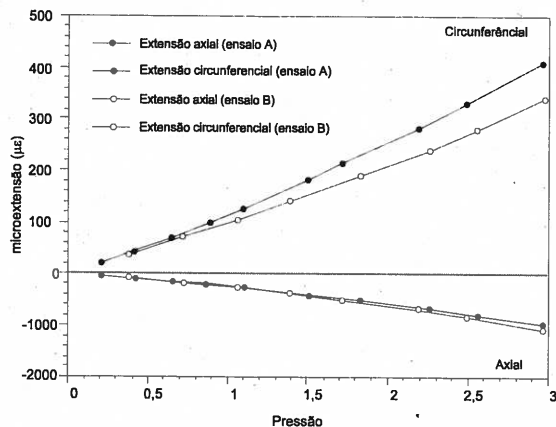


Fig 8 - Extensão circunferencial e axial em função da pressão interior.

Tabela 2 - Constantes elásticas para cada provete e respectiva média.

Provete	E_z	E_θ	$\nu_{\theta z}$	$\nu_{z\theta}$
	(MPa)			
V_1	7,1	10,4	0,51	0,34
V_2	6,9	11,9	0,58	0,34
V_3	6,9	11,1	0,55	0,34
Média	7,0	11,1	0,55	0,34
H_1	8,8	11,8	0,45	0,33
H_2	9,0	13,6	0,46	0,30
H_3	8,9	12,8	0,46	0,32
Média	8,9	12,7	0,46	0,32

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostram-nos que a diferença entre os módulos de elasticidade das duas estruturas é pouco significativa, cerca de 2 GPa. Esta pequena diferença deveu-se ao facto dos provetes com reforço de carbono-vidro conterem um menor volume de fibra, cerca de 5%, relativamente aos provetes de vidro. As pré-formas de reforço híbrido eram de maior diâmetro, fazendo com que a fibra ficasse alojada segundo um ângulo menor relativamente ao eixo do provete, e como consequência, os provetes fabricados com estas pré-formas continham um menor volume de fibra.

7. REFERÊNCIAS

- Bulmanis, V. N., "Compression tests on composite tubes", *Polymer Mechanics*, 10, (5), pp. 802, 1988.
- Design Engineering Data, UDEL Polysulfone, Union Carbide Engineering Polymers Technical Monograph, 4th revision, 1979.
- Gay, D., *Marériaux composites*, 3ª Edição, Hermes, 1991.
- Hoggatt, J. T., "Test methods for high-modulus carbon yarn and composites", *Composite Materials: Testing and Design*, ASTM STP No 480, Philadelphia, Pa., pp. 48, 1989.
- Katz, D. M., "Holographic interferometry in the biomechanical analysis of loading patterns in the human femur", PhD. Thesis, University of London, 1992.
- Pagano, N. J., Whitney, J. M., "Geometric design of composite cylindrical characterization specimens", *J. Composite Materials*, July, pp. 380, 1980.
- Scheer, W., "Carbon fibre reinforced epoxy resin, a material for human implants", *Processing and uses of Carbon fibre reinforced plastics*, Tradução por M. S. Welling, VDI-Verlag GmbH, 1981.
- Simões, J. A. O., "Estudo da componente femoral de uma prótese de anca de rigidez controlada", Tese de doutoramento, FEUP, Porto, 1999.
- Skelton, J., "Triaxially braided materials for composites", in *Textile Structural Composite*, Tsu-Wei Chou e Frank K. Ko, Elsevier Science Publishers B. V., pp. 118, 1989.
- Spector, M., Davis, R. J., Lunceford, E. M., Harmon, S. L., "Porous polysulfone coatings for fixation of femoral stems by bone ingrowth", *Clin. Orthop. Rel. Res.*, 176, pp. 34, 1983.
- Unsworth, A., Roberts, B., Thompson, J. C., "The application of soft layer lubrication to hip prosthesis", *J. Bone Joint Surg.*, 63B, pp. 297, 1981.
- Unsworth, A., Percy, M. J., White, E. F. T., White, G., "Soft layer lubrication of artificial joints", *Synthetic Lubrication*, 5, pp. 54, 1987.
- Williams, D. F., McNamara, A., Turner, R. M., "Potential of polyetheretherketone (PEEK) and carbon-fibre-reinforced PEEK in medical applications", *J. Mater. Sci. Letters*, 6, pp. 188, 1987.