

Influência da porosidade no módulo de elasticidade de um material compósito com foco na indústria de materiais de fricção

Porosity influence on the modulus of elasticity in a composite material focused on friction industry

Isis Michelena¹

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
isismichelena@terra.com.br

Carlos Pérez Bergmann¹

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
bergmann@ufrgs.br

Hazim Al-Qureshi²

Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil
alhazim@emc.ufsc.br

Resumo. Este trabalho tem como finalidade investigar a correlação entre porosidade e módulo de elasticidade em materiais de fricção, focando na influência do teor e no tipo de fibra utilizado, visando à proposição de um modelo matemático que correlacione essas duas propriedades. A modelagem proposta foi desenvolvida tendo como base a Lei das Misturas Modificada (Al-Qureshi, 1988) e os equacionamentos propostos por Spriggs (1961) e Kingery *et al.* (1976). Para simplificação do modelo, foi analisado um compósito contendo um aglomerante e um elemento de reforço. Com o objetivo de utilizar materiais empregados na indústria de fricção, fez-se uso de matriz fenólica e as fibras de vidro e aramida como elemento de reforço. Os compósitos analisados foram separados em 2 grupos, de acordo com a fibra utilizada, e, dentro destes grupos, foi variado o percentual de fibra. Com base nos resultados obtidos experimentalmente foi verificado o uso do modelo proposto, que apresentou resultados satisfatórios.

Palavras-chave: porosidade, módulo de elasticidade, materiais de fricção.

Abstract. The propose of this work is to investigate the correlation between porosity and modulus of elasticity in friction materials, focusing on the influence of the amount and type of fiber used, in order to propose a mathematical model that correlates these two properties. The proposed model was developed based on the modified Law of Mixtures (Al-Qureshi, 1988) and includes the equations proposed by Spriggs (1961) and Kingery *et al.* (1976). A composite with a binder and a reinforcement element was analyzed to simplify the model. In order to use common materials in the friction industry the experiments have been carried out with phenolic resin as a matrix and two types of fiber as a reinforcement element: fiberglass and aramid fiber. The composites analyzed were separated in 2 groups according to the fiber used and the percentage of fiber was varied within these groups. Based on the experimental results, the use of the proposed model was verified, which demonstrated satisfactory results.

Key words: porosity, modulus of elasticity, friction materials.

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500, Setor 4, Prédio 74, Sala 21, Campus do Vale, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil.

² Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica. LABMAT/UFSC. Campus Universitário Trindade, Caixa postal: 476, 88040-900, Florianópolis, SC, Brasil.

Introdução

Com a evolução contínua, os veículos passaram a ser cada vez mais exigidos em termos de velocidade, carga, estabilidade de frenagem, ruído e vibração. Dessa forma, os materiais de fricção necessitaram se adequar para que essas demandas pudessem ser atendidas (Casaril, 2009). O cumprimento dessas novas demandas implica o conhecimento das características das matérias-primas que causarão um maior impacto no desempenho do produto final a ser projetado.

Em materiais de fricção, a matéria-prima mais comumente utilizada como matriz é a resina fenólica, devido à combinação de propriedades mecânicas e térmicas, indispensáveis para essa aplicação. Como elemento de reforço estrutural, a fibra de vidro e a fibra aramida são as matérias-primas mais empregadas, pois apresentam resistência mecânica satisfatória e boa processabilidade, além do custo competitivo (Nicholson, 1995).

Levando em consideração os fatos abordados acima, surge a necessidade de entender a influência do teor de fibras em um material compósito de matriz fenólica. Essa influência está focada principalmente na avaliação dos módulos de elasticidade e porosidades, fatores que, notadamente, possuem correlação entre si.

Assim, utilizou-se matriz fenólica, e foram variados os teores de fibra em dois grupos de compósitos: um dos grupos utilizou fibra de vidro como elemento estrutural e o outro utilizou fibra aramida. Essa variação buscou avaliar as diferenças apresentadas pelos dois grupos de compósitos. Com os dados provenientes do experimento, foi proposta uma correlação matemática do módulo de elasticidade e porosidade.

Para a correlação, partiu-se da Lei das Misturas, que está baseada no princípio da aditividade, estabelecendo que as propriedades do compósito serão intermediárias entre as propriedades dos componentes que o constituem, segundo a Equação 1.

$$P_c = P_f V_f + P_m V_m \quad \text{Equação 1}$$

Para a Equação 1, P indica a propriedade a que esta relação é válida, por exemplo: para cálculo da resistência à ruptura, módulo de elasticidade e deformação. Os índices c , f e m indicam compósito, fibra e matriz, respectivamente, e V refere-se à fração volumétrica apresentada no compósito.

Essa relação é válida para compósitos com fibras longas, porém, o compósito em questão utiliza fibras curtas. Neste último o carregamento deve ser feito na matriz, que transfere carga para as fibras. Dessa forma, a resistência ao cisalhamento interfacial e a efetividade do recobrimento dos componentes são aspectos críticos para o modelamento mecânico do compósito, segundo Al Qureshi (1997). Portanto, cabe introduzir, nos termos independentes da Equação 1, fatores de correção de modo a ajustar a eficiência da contribuição de cada um para a resistência mecânica do compósito. Assim, a Equação 1 pode ser reescrita na forma da Equação 2.

$$P_c = \beta P_f V_f + \lambda P_m V_m \quad \text{Equação 2}$$

Essa modificação leva em consideração a geometria, o alinhamento das fibras e a sua adesão na matriz. Na Equação 2, β é o fator de eficiência do alinhamento das fibras, variando de 0 a 1, de acordo com a Tabela 1.

No presente trabalho, utilizou-se β de 0,375, levando em consideração o processo de fabricação do material. Neste, o comprimento da fibra é de 3,2 mm assim como a espessura do corpo-de-prova. Como o comprimento da fibra é maior ou igual à espessura do corpo-de-prova, o material possui propriedades ortotrópicas.

A outra variável presente na Equação 2, λ , é o fator de adesão entre as fibras e a matriz, variando de 0 a 1, podendo ser obtido experimentalmente. Para o caso de fibras curtas dispostas aleatoriamente, a determinação do módulo de elasticidade é complexa. Por essa razão, utiliza-se a Equação 3, baseada em dados experimentais (Al-Qureshi, 1988).

$$E_{aleat.} = \frac{3}{8} E_1 + \frac{5}{8} E_2 \quad \text{Equação 3}$$

onde $E_{aleat.}$ indica o módulo de elasticidade aleatório, e E_1 e E_2 , as direções do esforço.

Visando à aplicação em materiais de fricção, há a necessidade de considerar a porosidade, pois, além de influenciar a resistência mecânica, pode também influenciar outros fatores como ruído e vibração.

Para a proposta de modelo, a equação de Al-Qureshi serviu como base e inclui a abordagem de porosidade segundo os modelos de Spriggs e Kingery.

Kingery *et al.* (1976) propuseram que a fração volumétrica de matriz fosse calculada de

Tabela 1. Eficiência do reforço das fibras no compósito para alguns ângulos de orientação de fibra em relação à aplicação da tensão (Al-Qureshi, 1988).**Table 1.** Composite fiber reinforcement efficiency for the angles of fiber orientation according to the stress application (Al-Qureshi, 1988).

Orientação da fibra	Direção da aplicação da carga	Eficiência de Reforço (β)
Todas as fibras paralelas	Paralela às fibras	1
	Perpendicular às fibras	0
Bidirecionais (tecidos)	Metade das fibras paralelas e metade perpendiculares	0,5
Fibras distribuídas uniformemente e randomicamente num plano específico	Qualquer direção no plano das fibras	0,375
Fibras distribuídas uniformemente e randomicamente num espaço tridimensional	Qualquer direção	0,2

acordo com o percentual volumétrico de fibra, segundo a Equação 4.

$$V_m = 1 - V_f \quad \text{Equação 4}$$

A contribuição de Spriggs está na expressão baseada no princípio de carga residual suportada pela secção transversal da matriz e na mínima distância entre os poros e que é dada pela Equação 5.

$$E(P) = E_m \cdot e^{(-bp)} \quad \text{Equação 5}$$

Onde $E(P)$ e E_m indicam, respectivamente, os módulos de elasticidade do material final, poroso, e do material denso. P é o percentual de porosidade e b uma constante. O valor de b é inerente às diferenças na natureza da porosidade. Dessa forma, é afetado pela geometria, pelo tamanho e pela interconectividade dos poros. O processo e o método de medição de resistência mecânica também possuem forte influência nessa constante.

Juntando-se a Equação 4 e Equação 5 na Equação 2, é possível ter um modelo para o cálculo do módulo de elasticidade que inclua o fator porosidade em materiais compósitos, Equação 6.

$$E_c = E_m (1 - V_f)e^{(-bp)} + \beta E_f V_f \quad \text{Equação 6}$$

Materiais e métodos

O trabalho experimental foi desenvolvido no Centro de Pesquisa da Empresa FRAS-LE S/A. As especificações das matérias-primas utilizadas estão listadas na Tabela 2. A Figura 1 apresenta uma fotografia com amostras dessas matérias-primas.

Para a verificação da influência do teor de fibra, foram realizados experimentos variando o percentual volumétrico de fibra e resina fenólica. A Tabela 3 informa a nomenclatura e as proporções correspondentes, bem como a massa específica teórica dos compósitos formulados.

Para a confecção das amostras, adotou-se um procedimento muito próximo ao procedimento de confecção de materiais compósitos. Dessa forma, foram seguidos os seguintes passos:

- Pesagem da formulação;
- Homogeneização: Utilizando um misturador do tipo Eirich;
- Conformação: em prensa à temperatura de 160°C, com pressão de 5MP e tempo de ciclo de 12min subdivididos em 7 minutos para degasagem na forma de 14 ciclos (20s sob pressão e 10s de degasagem) e mais 5 minutos sob pressão;

Tabela 2. Matérias-primas utilizadas e suas especificações (dados fornecidos pelos fabricantes).
Table 2. Raw materials used and their specifications (manufacturer data).

	Módulo de elasticidade	Fabricante	Especificações
Resina Fenólica	5,3 GPa	Reichhold do Brasil	Densidade:1,2 g/cm ³ Tempo de cura: 34s Teor de hexa: 8,5% Fluidez: 37mm Classe: Novolaca
Fibra de vidro	72,5 GPa	Jushi Group	Densidade:2,6 g/cm ³ Diâmetro do filamento: 17µm Comprimento: 3,2mm Nº filamentos/feixe: 200
Fibra Aramida	70 GPa	Dupont	Densidade:1,65 g/cm ³ Diâmetro do filamento: 12,6 µm Material em forma de polpa Nº filamentos: 1000.



Figura 1. Amostras: resina fenólica (acima), fibra aramida (esquerda) e fibra de vidro (direita).

Figure 1. Sample: phenolic resin (above), aramid fiber (left) and glassfiber (right).

- Tratamento térmico: de 4 horas e 30min, sendo que, nas primeiras 3 horas, a estufa segue um aumento gradual de temperatura partindo da temperatura ambiente até 160°C e, atingido esse patamar, permanece por mais 1 hora.

Para a determinação da resistência mecânica, foram realizados ensaios de flexão a 3-pontos nos corpos-de-prova. O ensaio seguiu a norma ASTM D790-07, método de teste I, segundo procedimento A. Os corpos-de-prova mantiveram superfície original da etapa de conformação, sem sofrer polimento ou lixamento. Foram

confeccionados 30 corpos-de-prova de cada um dos materiais de fricção investigados.

Para a determinação da porosidade, foi utilizada uma norma de referência da Volkswagen com código PV 3005 (1997). Essa norma analisa a porosidade através da densidade do material e da densidade do material prensado, verificando o preenchimento dos espaços vazios.

Resultados e discussões

Os resultados obtidos através das medidas de porosidade assim como a densidade experimental e o percentual de fibra e matriz estão explícitos na Tabela 4.

A Figura 2 apresenta os resultados da Tabela 4, onde o eixo das abcissas indica o percentual de fibra utilizado, e o eixo das ordenadas, o percentual de porosidade encontrado.

De acordo com esses dados, para o composto com fibra de vidro, o percentual de porosidade diminuiu com o aumento de fibra. Esse fato pode estar relacionado a dois fatores: à quantidade de resina fenólica, visto que esta é que fará a liberação de água durante a formação das ligações cruzadas segundo Artmann (2008).

Outro fator a ser considerado é o formato da fibra. Como mostrado na Figura 1, o vidro utilizado encontra-se sob a forma de pequenos filamentos, o que facilita a penetração da resina. No entanto, para a aramida, que está na forma de polpa, a resina apresenta maior dificuldade de penetração. Dessa forma, após

Tabela 3. Formulações dos corpos-de-prova: proporção de resina e fibra de vidro e resina e fibra aramida em fração volumétrica.

Table 3. Analyzed composite formulations: resin, fiberglass and aramid fiber in volume fraction.

Denominação*	Resina (%)	Fibra de vidro (%)	Fibra aramida (%)	ME (teórica)
5% FV	95	5	-	1,27
10% FV	90	10	-	1,34
15% FV	85	15	-	1,41
20% FV	80	20	-	1,48
25% FV	75	25	-	1,55
30% FV	70	30	-	1,62
5% FA	95	-	5	1,22
10% FA	90	-	10	1,25
15% FA	85	-	15	1,27
20% FA	80	-	20	1,29
25% FA	75	-	25	1,31
30% FA	70	-	30	1,34

Nota: (*) FV indica uso de fibra de vidro e FA indica uso de fibra aramida.

Tabela 4. Percentual de fibra e de porosidade nos materiais de fricção investigados neste trabalho.

Table 4. Porosity and fiber fraction on friction materials investigated in this study.

Fibra (%)	ρ_F (g/cm ³)	Matriz (%)	Porosidade (%)
5% FV	1,29	88,9	6,1
10% FV	1,36	85,5	4,5
15% FV	1,45	82,9	2,1
20% FV	1,5	78,6	1,4
25% FV	1,58	74,1	0,9
30% FV	1,63	69,7	0,3
5% FA	1,25	90,3	4,7
10% FA	1,27	86,5	3,5
15% FA	1,27	82,0	3,0
20% FA	1,29	76,9	3,1
25% FA	1,32	72,0	3,0
30% FA	1,3	66,9	3,1

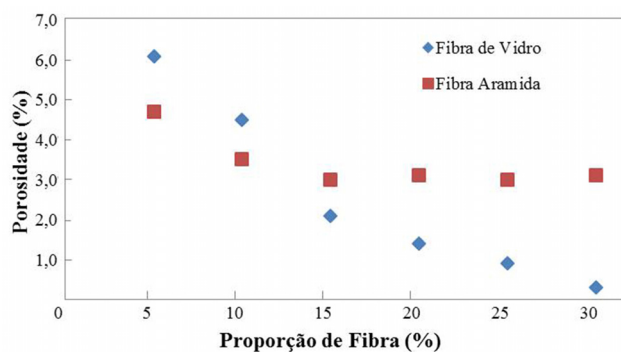


Figura 2. Percentual de porosidade apresentado nos materiais de fricção investigados.

Figure 2. Porosity fraction presented in the composite materials investigated.

15% de aramida, o material apresentou estabilidade quanto ao grau de porosidade.

A determinação do módulo de elasticidade (E) baseou-se nos dados de tensão de ruptura (σ) e deformação (ϵ), obtidos nos ensaios de flexão a 3-pontos, segundo a norma ASTM D790-07. A Tabela 5 apresenta a média gerada pela análise de 30 corpos-de-prova ensaiados.

Como o foco do trabalho é módulo de elasticidade, a Figura 3 evidencia as variações sofridas por essa propriedade mecânica de acordo com o percentual de fibra utilizado. Os resultados indicam que quanto maior o teor de fibras, tanto de

vidro quanto aramida, maior o módulo de elasticidade do compósito. Para efeito de comparação, foram acrescentadas, na Figura 3, as curvas com os valores do módulo de elasticidade do compósito segundo a Lei das Misturas (Equação 1).

É possível averiguar que os materiais de fricção investigados não seguem totalmente a Lei das Misturas. Como principais contribuintes para esse fato, pode-se citar o uso de fibras curtas e a porosidade presente no material.

Na busca por uma relação porosidade e módulo de elasticidade, primeiramente, foi verificado se essas propriedades podem ser

Tabela 5. Média dos resultados de tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação apresentados no ensaio de flexão 3-pontos, segundo a norma ASTM D790-07.

Table 5. Stress average results, strain and modulus of elasticity obtained from the three-point bending test according to ASTM D790-07.

Material	σ (MPa)	E (GPa)	ϵ
5%FV	66,92	6,915	0,00963
10%FV	85,28	8,501	0,01003
15%FV	121,18	10,638	0,01113
20%FV	110,50	10,408	0,01061
25%FV	124,35	12,041	0,01031
30%FV	120,05	13,338	0,00896
5%FA	83,81	6,026	0,01304
10%FA	100,34	6,112	0,01411
15%FA	98,06	6,932	0,01417
20%FA	100,45	7,171	0,01447
25%FA	108,10	7,436	0,01450
30%FA	115,67	7,960	0,01470

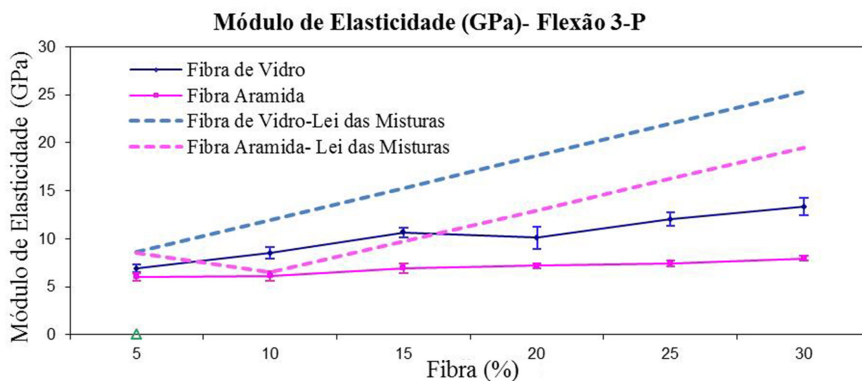


Figura 3. Média e desvio padrão do módulo de elasticidade dos materiais de fricção investigados.
Figure 3. Modulus of elasticity mean and standard deviation in the composites investigated.

correlacionadas linearmente para os compósitos investigados. Para detalhar os valores de módulo de elasticidade e porosidade, foi montada a Tabela 6.

A Figura 4 apresenta a relação entre porosidade e módulo de elasticidade e os fatores de correlação apresentados pelos compósitos com resina fenólica e fibra de vidro e resina fenólica e fibra aramida. O eixo das abcissas indica o percentual de porosidade, e o eixo das ordenadas, o módulo de elasticidade dos materiais de fricção investigados.

A relação entre porosidade e módulo de elasticidade para a fibra de vidro apresenta fator de correlação linear razoável de $R^2=0,93$.

Já para a aramida, o fator de correlação é de $R^2=0,54$, ou seja, a relação linear entre o percentual de fibra de aramida e módulo de elasticidade é muito fraca. Esse fato pode estar correlacionado ao formato da fibra (polpa), que dificultou a penetração da resina. Para valores maiores que 15% de fibra não foi percebida a diminuição da porosidade conforme apresentado na Tabela 6. Dessa forma, o material deverá ser correlacionado por outra equação.

Visto que os materiais de fricção investigados não podem ser modelados através da Lei das Misturas simples e não apresentam uma relação linear com a porosidade, analisaram-

Tabela 6. Módulo de elasticidade e porosidade dos materiais de fricção investigados.
Table 6. Modulus of elasticity and porosity of the friction material analyzed.

Material	Módulo de elasticidade (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Porosidade (%)
5% FV	6,915	0,411	6,1
10% FV	8,501	0,585	4,5
15% FV	10,638	0,538	2,1
20% FV	10,408	0,693	1,4
25% FV	12,041	0,702	0,9
30% FV	13,338	0,935	0,3
5% FA	6,027	0,399	4,7
10% FA	6,112	0,513	3,5
15% FA	6,933	0,542	3,0
20% FA	7,171	0,262	3,1
25% FA	7,436	0,288	3,0
30% FA	7,960	0,286	3,1

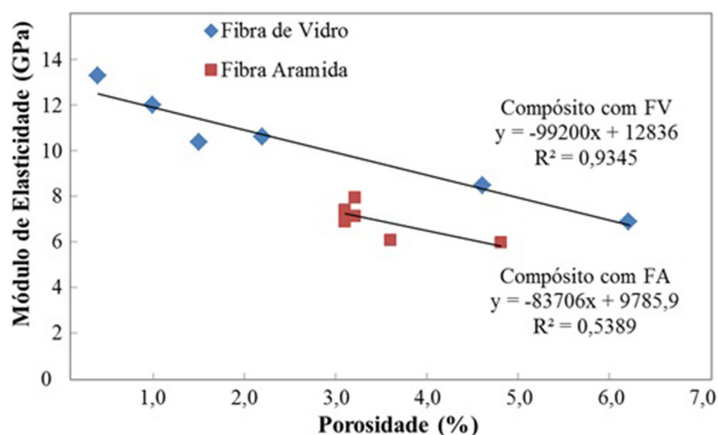


Figura 4. Relação entre porosidade e módulo de elasticidade dos materiais de fricção investigados e os fatores de correlação da regressão linear proposta.

Figure 4. Relation between porosity and modulus of elasticity in the friction material and the correlation factors of the proposed linear regression.

se os dados obtidos através do modelo proposto na Equação 6.

Para o cálculo do modelo, é necessário definir a constante b que mais se adapta ao material utilizado, baseado nos experimentos de Spriggs (1961) e Knudsen (1962). Foram sugeridos valores de 0 a 7, e o valor que encontrou maior proximidade com os resultados de módulo experimental foi de 1,8. Dessa forma, a partir da Equação 6, chega-se à Equação 7.

$$E_c = E_m(1 - V_f) e^{(-1,8P)} + 0,375E_fV_f \quad \text{Equação 7}$$

A Tabela 7 apresenta os valores obtidos com a aplicação da Equação 7, com a comparação com os resultados encontrados experimentalmente para o material de fricção com fibra de vidro e resina fenólica.

A variação média entre o módulo de elasticidade obtido experimentalmente e o calculado segundo o modelo proposto é de 13%. Se esse valor fosse proveniente de um material cerâmico, polimérico ou metálico seria considerado elevado, porém, por se tratar de um material composto onde dispomos da variação proveniente de dois módulos elásticos, esse valor é considerado aceitável. Correlacionando o módulo de elasticidade teórico com o módulo de elasticidade experimental, conforme a Figura 5, verifica-se uma significativa correlação, $R^2 = 0,94$, indicando que a Equação 7 é aplicável para esse composto.

Para o material de fricção com fibra aramida foi repetido o mesmo procedimento feito com o material com fibra de vidro. A Tabela

Tabela 7. Resultados teóricos e experimentais dos módulos de elasticidade testados para o material de fricção com fibra de vidro.

Table 7. Theoretical and experimental results of the modulus of elasticity for the composite with fiberglass.

Material	E Teórico (GPa)	E Experimental	
		E (GPa)	Desvio Padrão (GPa)
5% FV	5,86	6,91	0,41
10% FV	7,10	8,50	0,59
15% FV	8,39	10,64	0,54
20% FV	9,53	10,10	1,13
25% FV	10,66	12,04	0,70
30% FV	11,79	13,34	0,93

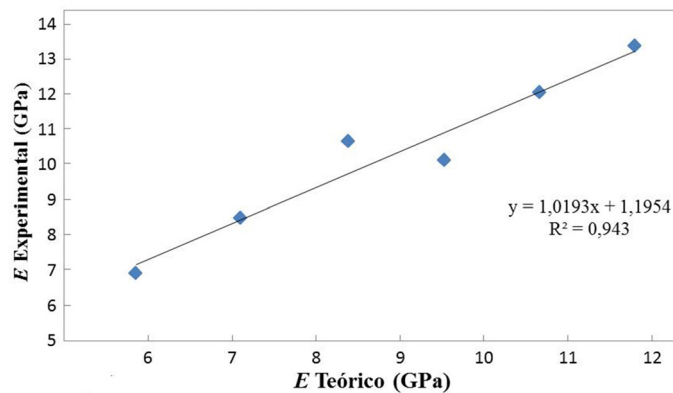
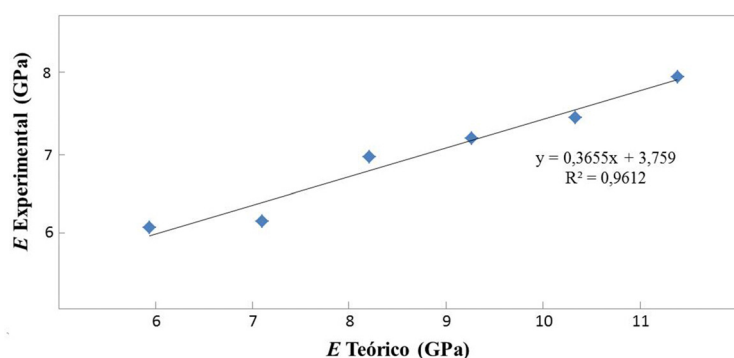


Figura 5. Correlação entre os resultados de módulo de elasticidade teórico e experimental para o composto com fibra de vidro.

Figure 5. Correlation between the results of experimental and theoretical modulus of elasticity for fiberglass composite.

Tabela 8. Resultados teóricos e experimentais dos módulos de elasticidade testados para o compósito com fibra aramida.**Table 8.** Theoretical and experimental results of the modulus of elasticity for the composite with aramid fiber.

Material	E Teórico (GPa)	E Experimental	
		E (GPa)	Desvio Padrão (GPa)
5% FA	5,94	6,03	0,40
10% FA	7,10	6,11	0,51
15% FA	8,21	6,93	0,52
20% FA	9,26	7,17	0,26
25% FA	10,33	7,44	0,29
30% FA	11,38	7,96	0,29

**Figura 6.** Correlação entre os resultados de módulo de elasticidade teórico experimental para o compósito com fibra aramida.**Figure 6.** Correlation between the results of experimental and theoretical modulus of elasticity for aramid fiber composite.

8 apresenta os resultados obtidos. Como comentado anteriormente, o formato da fibra tem forte influência na penetração da resina e, conseqüentemente, na porosidade apresentada pelo material, de tal modo que a variação entre módulo de elasticidade teórico e experimental apresentada pelo material de fricção com fibra aramida também se mostrou superior à variação apresentada pelo material de fricção com fibra de vidro (variação média de 24%). Porém, esse fato não foi relevante para o fator de correlação, que se mostrou plausível $R^2=0,96$. Dessa forma, é possível aplicar a Equação 7 na ampla gama de compósitos investigados.

Conclusões

A modelagem matemática simplificada apresentada para descrever a influência da po-

rosidade no módulo de elasticidade dos materiais compósitos investigados, desenvolvida a partir dos equacionamentos propostos por Al-Qureshi, Spriggs e Kingery e agregando mais uma variável, corrobora com os resultados experimentais, dando suporte para a afirmação de que as modificações propostas ao modelo base foram feitas de forma correta. Para a aplicação do modelo, houve a necessidade de uso de uma constante relacionada à porosidade, b , assumindo-se um valor de 1,8 na Equação 6 proposta.

Para que o trabalho feito possa ser aplicado em materiais de fricção, sugere-se ampliar o número de matérias-primas, já que um compósito para fricção pode conter mais de 10 diferentes matérias-primas. Espera-se que a utilização do modelo proposto reduza expressivamente tempo e esforços de desen-

volvimento de produtos, colaborando para a redução dos custos de projeto e o aumento da competitividade desses produtos.

Agradecimentos

Os autores agradecem enormemente à empresa Fras-le S/A pelo completo suporte ao projeto que engloba este trabalho e à Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela parceria e pelo suporte tecnológico.

Referências

- AL-QURESHI, H.A. 1988. *Composite Materials: Fabrication and Analysis*. 3ª ed., São José dos Campos, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 650 p.
- AL-QURESHI, H.A.; STAEL, G.C. 1997. Modified Rule of Mixtures for Natural Fiber Composites, In: CANADIAN CONGRESS OF APPLIED MECHANICS, 16, Quebec, 1997. *Anais...* Quebec, CANCAM-97, 1:49-50.
- ARTMANN, A. 2008. *Estudo para a otimização do processamento de formulações de resina fenólica aplicada a material de fricção*. Caxias do Sul, RS. Dissertação de Mestrado. Universidade de Caxias do Sul, 74 p.
- ASTM STANDARDS D790-07. 2007. *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials: Manual Book of ASTM Standard*. New York, D20.10, 11 p.
- CASARIL, A. 2009. *Modelagem Matemática e Avaliação Experimental do Módulo de Elasticidade de Materiais Compósitos Particulados de Matriz Fenólica para uso como Material de Fricção*. Porto Alegre, RS. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 56 p.
- KINGERY, W.D.; BOWEN, H.K.; UHLMANN, D.R. 1976. *Introduction to Ceramics*. 2ª ed., New York, John Wiley & Sons, 1032 p.
- KNUDSEN, F.P. 1962. *Journal of American Society*. 45ª ed., New York, p. 94-95.
- NICHOLSON G. 1995. *Facts about friction*. 1ª ed., Croydon, Ed. P&W Prince Enterprises Inc., 210 p.
- SPRIGGS, R.M. 1961. Expression for effect of porosity on elastic modulus of polycrystalline refractory materials, particularly aluminum oxide. *Journal of American Ceramic Society*, 44(12):628-629. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.1961.tb11671.x>
- VOLKSWAGEN PV3005. 1997. *Determinação da Porosidade, Guarnição para Freios a Tambor e a Disco - Ensaio de Material*. São Paulo, Norma Volkswagen, 105 p.

Submetido: 14/08/2013

Aceito: 16/09/2013