

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE GUARNIÇÕES DE FREIO AUTOMOBILÍSTICO USANDO FIBRAS PANOX E POLPA DE ARAMIDA EM SUBSTITUIÇÃO AO AMIANTO

Fausto Rodrigues Filho¹

Zaida Jova Aguila²

Edson Bittencourt²

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Projeto Mecânico¹ e Faculdade de Engenharia Química, Departamento de Tecnologia de Polímeros² 13.083-970 – Campinas, SP, Brasil. E-mail: fausto@fem.unicamp.br¹

Resumo

A proibição do uso de amianto na fabricação de guarnições de freios trouxe a necessidade de se buscar um substituto técnica e economicamente viável. Muitas tentativas têm sido realizadas, e as guarnições de freio tanto para uso rodoviário como ferroviário estão sendo atualmente produzidas sem esta fibra. Entretanto não se conseguiu ainda encontrar um substituto adequado. Nos freios aeronáuticos e carros de corrida já se utilizam até mesmo os discos de fibra de carbono, cujo custo entretanto é muito alto para veículos automotivos e ferroviários. Neste trabalho procura-se analisar as propriedades físicas, químicas e mecânicas das fibras PANOX e ARAMIDA, cujo custo é significativamente mais baixo que a fibra de carbono, e o seu uso como reforço em guarnições de freio rodoviário. Adotou-se como modelo para os ensaios a guarnição utilizada nos veículos Volkswagen GOL 1995 em diante, aplicável também a outros modelos de veículos, por ser a guarnição de maior consumo no país. Essas guarnições foram produzidas segundo os mesmos processos industriais correntes utilizados na produção das guarnições em uso no mercado. Foram produzidas amostras com porcentagens diferentes dessas fibras e utilizados aditivos e cargas minerais usuais também em diferentes proporções. Foram finalmente determinados os valores de alguns parâmetros característicos como resistência ao cisalhamento, dureza e densidade relativa e as características de desempenho em ensaios tipo KRAUSS, conforme norma NBR-6143. Comparam-se então o desempenho e características dessas guarnições entre si e com o desempenho e características de guarnições comerciais de boa procedência, classificadas como “original” pelo fabricante e adquiridas em concessionária autorizada, adotada como referência.

Palavras chaves: freios, material de atrito, amianto, aramida, PANOX.

1. INTRODUÇÃO

Durante muito tempo o amianto foi amplamente utilizado como fibra de reforço em formulações de compósitos para a fabricação de materiais de atrito para freios de máquinas e autoveículos.

Desconsiderando-se os primeiros sistemas de freios mais rudimentares que utilizavam blocos de madeira, metais e outros materiais naturais como sapatas de freios, os primeiros materiais sintéticos utilizados em sistemas industrializados eram constituídos de resina fenólica, que apresentava grandes vantagens sobre aqueles. Logo a resina sintética passou a ser utilizada conjuntamente com tecido de algodão, o que lhe conferiu maior capacidade de carga e melhor desempenho, valendo-lhe ainda o nome de 'lona de freio'. Cintas metálicas foram também utilizadas, sendo que o produto que melhor se adaptou ao mercado foi a malha de amianto com resina sintética. O amianto era utilizado principalmente como elemento estrutural e apresentava bom desempenho por suas propriedades mecânicas e térmicas. Finalmente chegou-se à composição de resina fenólica com fibra de amianto prensada, que perdurou até poucos anos atrás em função de seu excelente desempenho, melhorado e controlado com a adição de cargas diversas. A formulação permite variações diversas, consistindo segredo industrial a composição final e valores dos parâmetros para o processo industrial que garantem o desempenho desejado em cada caso.

Foi também essa composição que antecedeu e viabilizou a implantação do freio a disco em veículos, que já nasceu com esse material de atrito. Esta composição passou então a ser o material predominante tanto em freios veiculares como em máquinas estacionárias, sendo que nos veículos ferroviários veio a substituir as pesadas sapatas metálicas de ferro fundido. Hoje no Brasil apenas em alguns casos excepcionais ainda se utilizam sapatas de ferro fundido em locomotivas mais antigas, que não foram adaptadas à sapata fenólica. Na Inglaterra a sapata de ferro fundido é ainda utilizada em maior escala (cerca de 40 a 50%) e outros países também ainda mantêm o uso em escala mais reduzida.

O baixo custo e alta escala de produção do amianto garantiriam sua permanência no material de atrito indefinidamente, em vista de suas propriedades, não fora a percepção de seus efeitos nocivos à saúde, conforme Seiler (1988), o que levou à necessidade de sua eliminação do processo. Buscando-se um substituto para a fibra de amianto, muitas fibras naturais foram tentadas, tanto vegetais como minerais, algumas delas com relativo sucesso. Igualmente alguns outros produtos foram e continuam sendo utilizados e introduzidos na formulação do material de atrito, como palha de aço, ferro e outros metais, além uma mistura de vários deles. Entretanto, ainda não se conseguiu até o momento uma alternativa que substitua adequadamente o amianto.

Sistemas especiais de freios, como os utilizados em veículos de corrida (Fórmula 1) e freios aeronáuticos vêm sendo produzidos com fibra de carbono, que se constitui em processo com custos bastante elevados, que embora se justifiquem e seja absorvidos nestas aplicações, são insuportáveis para veículos regulares rodoviários e ferroviários.

A PANOX, obtida a partir da copolimerização da acrilonitrila, é um dos materiais intermediários obtidos durante o processo de produção da fibra de carbono. Suas características e estabilidade térmica nessa fase do processo sugerem a possibilidade de desempenho adequado no composto para a produção do material de atrito para freios, sem a necessidade da etapa de carbonização, que se sucede no processo de obtenção da fibra de carbono e eleva substancialmente o custo final. Dessa forma, seu uso nesta etapa seria economicamente viável, segundo Del Arco (1998), em comparação aos demais materiais.

A polpa de aramida é outro material cujas características sugerem sua utilização com os mesmos objetivos de substituir o amianto. Obtida a partir da fibra de aramida, cuja designação química é poliparafenilene tereftalamida, é proveniente de parafenilene diamida e cloreto de tereftalol, os quais são polemizados em solventes orgânicos, produzindo um polímero solúvel somente em solventes altamente agressivos. Apresenta excelentes propriedades para ser utilizada como fibra de reforço, como maior volume e aglutinação, baixa densidade, alta cristalinidade e orientação, conforme Stron (1989).

As resinas fenólicas têm grande disponibilidade no mercado em uma grande variedade de formas, apresentam baixo custo, alta resistência a produtos químicos, à deformação e a altas temperaturas, bom acabamento, além de constituir um excelente ligante na fabricação de compósitos, protegendo a superfície das fibras individuais e evitando a deterioração das propriedades no contato fibra – fibra, como relatam Pilato e Knop (1985).

Estas considerações motivaram a realização deste trabalho, buscando estudar a possibilidade de utilização das fibras de PANOX e aramida como alternativa para a substituição do amianto na composição do material de atrito.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizadas diversas formulações tendo como base uma resina fenólica com a adição de diferentes concentrações de PANOX e aramida, além das cargas minerais e aditivos tradicionais. Com esses compósitos foram fabricadas guarnições de freio segundo o modelo geométrico utilizado em veículos marca Volkswagen, modelo Gol 1.6. Este modelo de guarnição foi escolhido por ser utilizado também em outros veículos da mesma fábrica, resultando no modelo mais produzido industrialmente, o que facilitou a colaboração de uma das fábricas desse material e a realização dos ensaios de desempenho. Tais corpos de prova foram ensaiados de modo a se determinar seus coeficientes de atrito pelo método de ensaio Krauss.

2.1 Materiais Utilizados

A poliacrilonitrila (PAN) é um polímero sintético, quimicamente homogêneo, com cadeias contínuas de carbono e cadeias laterais de nitrila dispostas a ciclização. O processo de obtenção de fibras de carbono se inicia com a estabilização oxidativa da PAN a temperatura entre 200 e 300 °C, quando ocorrem transformações estruturais de modo que a estrutura linear das cadeias da PAN se transforma em moléculas tipo escada pelas reações de ponte intramolecular. Nesta etapa a fibra é conhecida como PANOX e apresenta excelentes propriedades térmicas que a tornam adequadas para ser usada como reforço em compósitos para a fabricação de materiais de atrito. A PANOX utilizada neste trabalho foi fornecida pelo Centro Técnico Aeroespacial em cabos de 320.000 filamentos e módulo de elasticidade 7,5 GPa. A temperatura de transição vítrea (T_g) permanece entre 112 e 115 °C.

A aramida pode ser vista como um nylon com anéis benzênicos na cadeia polimérica que aumentam sua resistência. As fibras de aramida, conforme Prestow (1986), apresentam-se em cabos de 134 a 10.000 filamentos. Apresentam boas qualidades a altas temperaturas e sua T_g se situa em torno de 250 °C. Quebra em fratura única formando pequenas fibrilas dentro da própria fibra, o que lhe confere alta flexibilidade com relação às fibras convencionais, segundo Matthews e Rawlings, (1996).

Utilizou-se ainda resina fenólica tipo Novolac, fornecida pela Schenectady do Brasil Ltda, recomendada como aglutinante em materiais de atrito, além de Alumina, Grafite e Barita fornecidas pela Cia Brasileira de Equipamentos (COBREQ).

2.2 Métodos Empregados

Procedeu-se inicialmente a um estudo morfológico das fibras utilizadas pelo método da Microscopia Eletrônica Exploratória. Este método permite também observar a orientação e as estruturas longitudinal e transversal das fibras. Utilizou-se um microscópio eletrônico modelo JXA-840 pertencente ao Departamento de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da

Unicamp. As fibras foram submetidas a um processo de metalização com ouro, usando-se a técnica de *sputtering* em um equipamento marca Balzer, modelo SCD-050, atingindo-se uma camada de 250 Å.

Uma vez caracterizadas as fibras foram preparadas diversas formulações com a resina fenólica, PANOX, aramida e diferentes concentrações de aditivos, com as quais foram confeccionados os corpos de prova na forma de guarnições de freio comerciais comuns. Na definição dessas formulações consideraram-se as referências e a experiência prática dos próprios fabricantes, buscando-se obter as possíveis combinações julgadas adequadas. Foram mantidas constante as concentrações das fibras e variadas as quantidades de carga mineral e aditivos.

O processo se constitui das seguintes etapas:

- Mistura e dispersão dos diferentes constituintes;
- Confeção dos pré-impregnados;
- Prensagem a quente do material à temperatura de 128 °C e pressão 145 kgf/cm²;
- Pós-cura dos compósitos a 240 °C durante 3 horas.

Os corpos de prova, na forma de guarnições de freio comerciais comuns, foram executados segundo o modelo geométrico utilizado para os veículos marca Volkswagen modelo Gol 1.6. Este modelo de guarnição é utilizado também em outros tipos de veículos da mesma marca, de modo que vem a ser o modelo de maior produção. A confecção das guarnições foi efetuada pela COBREQ, introduzindo-se na linha de produção uma bandeja com os corpos de prova durante a fabricação normal de suas guarnições desse tipo. Foram utilizadas, assim, exatamente as mesmas condições de fabricação das guarnições comerciais.

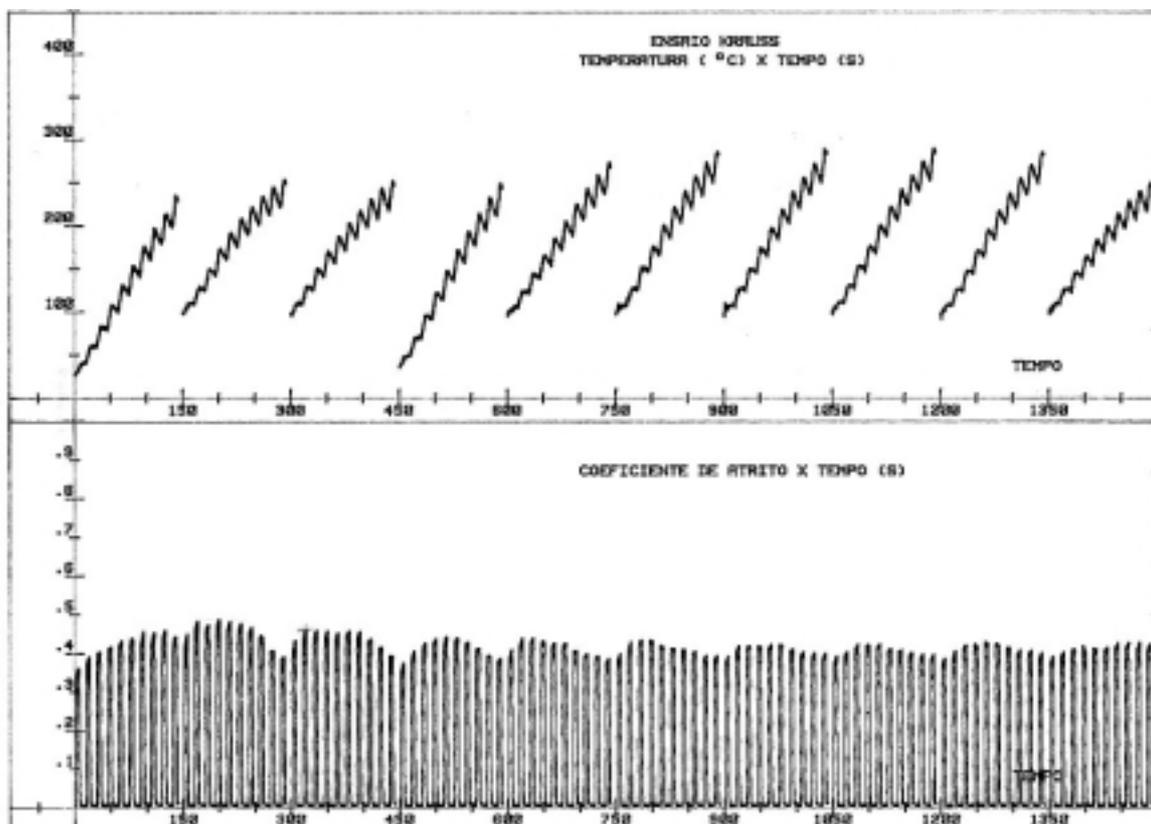


Figura 1 – Gráfico típico obtido em um ensaio tipo Krauss

A avaliação do desempenho foi feita por meio de ensaios tipo Krauss, realizados conforme a norma ABNT 6143: Guarnições de Freio a Disco - Determinação do Atrito e Desgaste Através da Bancada de Ensaios Krauss. O ensaio consiste na realização de 10 ciclos de aplicação e alívio do freio com intensidade de aplicação e rotação constantes e definidas na norma. As aplicações têm a duração de 5 segundos, seguidas de 10 segundos de alívio entre uma aplicação e outra. Cada ciclo é composto de 10 aplicações sucessivas. A figura 1 mostra o gráfico característico de um ensaio tipo Krauss como obtido no plotter, onde a parte superior mostra a temperatura em função do tempo e a parte inferior mostra a variação do coeficiente de atrito também em função do tempo.

Este ensaio é usualmente utilizado na indústria durante a fase de desenvolvimento do produto cada vez que a 'montadora' lança no mercado um modelo novo, para caracterizar o desempenho de cada formulação experimentada. O sistema de freios é desenvolvido simultaneamente com o material de atrito, acompanhados por testes dinamométricos e testes de protótipos em pista real. Ao final, escolhidos o sistema e o material de atrito, dentre as diversas experiências realizadas, o resultado do teste Krauss correspondente é definido como o padrão de qualidade a ser observado para a fabricação do material de atrito. Dessa forma, é corrente na indústria o conceito que o ensaio não seja utilizado como critério de definição da qualidade do material de atrito mas tão somente como controle de qualidade da produção.

Ainda conforme estabelece a norma utilizada, os ensaios se realizam utilizando-se as guarnições originais na sua forma real, suportadas pelo próprio calíper utilizado no veículo e aplicadas contra um disco de freio também original do veículo. São medidos e apresentados na forma de gráficos a temperatura na superfície do disco e o valor do coeficiente de atrito em função do tempo em cada ciclo. Determinam-se em cada ensaio os valores do coeficiente de atrito a frio, mínimo, máximo e médio.

A norma não estabelece qualquer valor de referência para aprovação ou rejeição, apenas o método de ensaio. Dessa forma, e como se trata de um trabalho de investigação para estudar alternativas, os resultados obtidos com o material em estudo foram comparados com os resultados obtidos nos ensaios de um material comercial original de fábrica, fornecido pelo fabricante do veículo e adquirido em agência autorizada. Todos os ensaios foram realizados no equipamento de ensaios de freios do Laboratório Ferroviário da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp.

3. ENSAIOS E RESULTADOS

A figura 2 mostra a micrografia longitudinal das fibras utilizadas. Verifica-se que a fibra Panox (fig.2.a) apresentou boa orientação, grande empacotamento paralelo ao eixo das fibras,

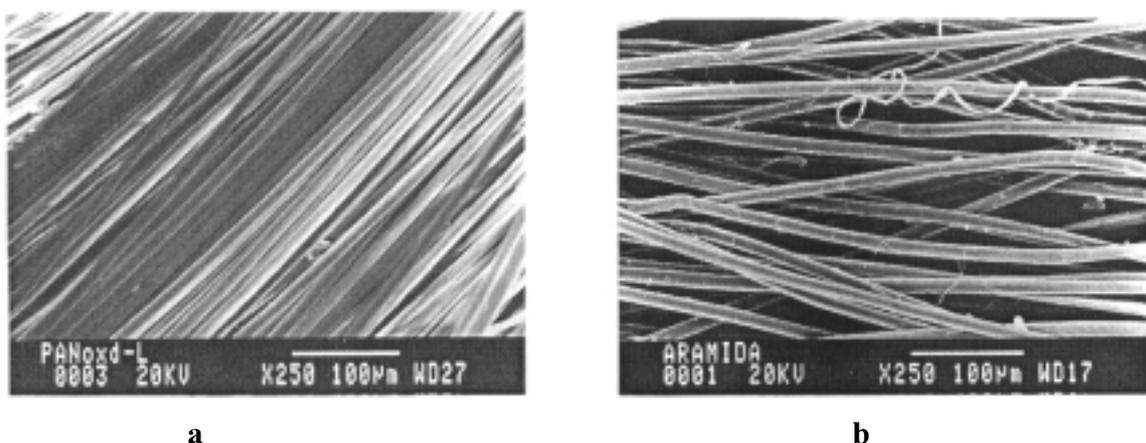


Figura 2 - Micrografia longitudinal das fibras utilizadas: a) Panox; b) Aramida

que se apresentam separados por sulcos e baixa proporção de espaços vazios. Observam-se algumas inclusões entre as fibras que se podem atribuir a defeitos ou impurezas.

Nas fibras de Aramida (fig.2.b), os feixes se apresentam de forma cruzada, com maior volume livre entre as fibras e a presença de uma estrutura fibrilar na superfície, caracterizada por pequenas fibras às vezes enroscadas nas fibras maiores ou em forma de lâminas. As camadas mais externas dos feixes de fibras vão se separando devido à repulsão eletrostática.

Sendo a cadeia polimérica da aramida altamente conjugada, favorece a existência de uma alta densidade eletrônica ocasionada pelos elétrons dos orbitais *p*, o que provoca a grande repulsão eletrostática observada entre as cadeias do polímero e a existência de um maior volume livre.

Devido às propriedades morfológicas apresentadas pela fibra Panox, não foi possível obter corpos de prova utilizando apenas essa fibra como elemento de reforço pela falta de aglutinação e compactação dos diferentes constituintes. Foi necessária a introdução de alguma quantidade de aramida nas formulações para se poder obter melhor aglutinação, o que ocorre devido à grande área ($6 \text{ m}^2/\text{g}$) de superfície apresentada por esta fibra.

A figura 3 mostra uma comparação dos valores do coeficiente de atrito médio obtidos nos ensaios de desempenho, segundo o método Krauss, com os corpos de prova utilizados. A comparação pode ser feita diretamente entre os diversos compósitos preparados ou entre estes e as guarnições comerciais utilizadas como referência. Estas apresentaram valores do coeficiente de atrito entre 0,28 e 0,42 em 3 ensaios realizados com 3 guarnições diferentes.

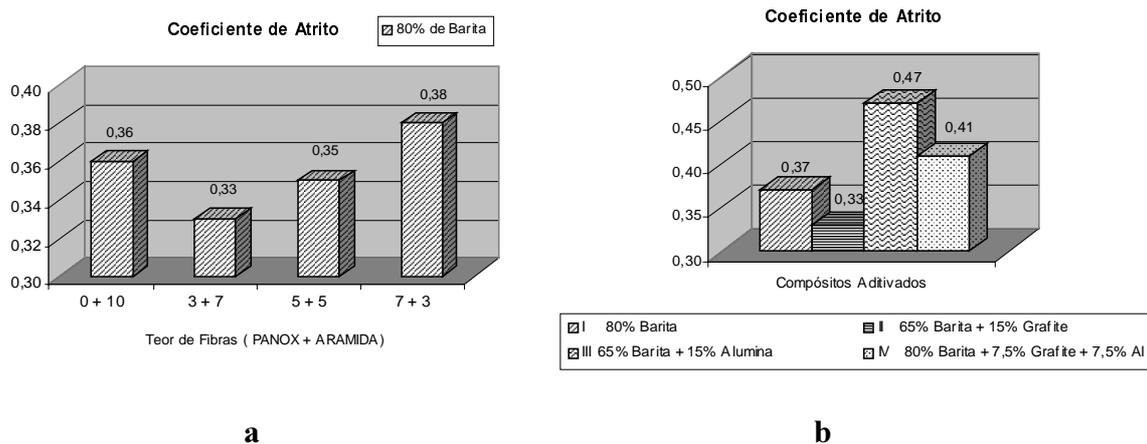


Figura 3 - Influência da concentração de fibras e aditivos sobre o coeficiente de atrito: a) variação da concentração de Panox e Aramida, mantidos constantes os demais componentes; b) variação da concentração dos aditivos, mantidas constantes as fibras.

A figura 3.a mostra a influência da proporção de fibras PANOX e aramida sobre o coeficiente de atrito. A soma das concentrações das duas fibras se mantém constante em 10%, variando a proporção de cada uma delas, de forma a manter também constante a concentração dos demais componentes.

Observa-se uma curiosidade: a formulação apenas com fibras de aramida apresentou um valor do coeficiente de atrito mais alto, que se reduziu com a introdução de pequenas concentrações de PANOX. Com 3% de PANOX ocorreu um valor mínimo do coeficiente de atrito, que passou a aumentar novamente com maiores concentrações de aramida. Compósitos reforçados totalmente com fibras de aramida apresentaram melhor comportamento do coeficiente de atrito devido à sua estrutura fibrilar, assim como à irregularidade na sua distribuição e volume livre entre elas, o que lhes permite uma melhor interação com a matriz e os aditivos.

Concentrações de 3% de fibras de PANOX reduzem o valor do atrito devido à substituição de parte da aramida na formulação, o que diminui os efeitos referidos anteriormente. Com o aumento da concentração de PANOX o coeficiente de atrito vai aumentando, como mostra a figura 3.a . Isto ocorre devido ao aumento da densidade nas formulações, embora quando se utiliza somente fibras de PANOX como reforço, não seja possível obter corpos de prova por falta de aglutinação dos constituintes, o que pode ser atribuído ao grande empacotamento e baixa proporção de volume livre desta fibra.

Verifica-se também que todas as formulações apresentaram valores do coeficiente de atrito no mesmo intervalo da variação obtida com o material de referência.

A figura 3.b mostra a influência da variação da proporção de alguns dos demais componentes, mantidas fixas as concentrações das fibras.

Verifica-se inicialmente que o coeficiente de atrito ficou sempre acima do mínimo em relação ao material de referência, porém subiu bastante acima do máximo com a introdução de proporção maior de Alumina. De modo geral, a introdução de Alumina aumenta o coeficiente de atrito em proporção crescente com sua concentração, embora seja um forte abrasivo. Seus orbitais vazios se combinam com os orbitais p da aramida e com os grupos N nas fibras de PANOX, os quais na presença da matriz fenólica oferecem maior rigidez e resistência ao compósito por efeito da reticulação, o que o torna um excelente elemento estrutural.

A introdução de grafite apresenta efeito exatamente contrário. O grafite permanece nos espaços livres entre as fibras, devido à sua estrutura planar, o que lhe permite o movimento de uma camada sobre outra. Dessa forma, qualquer esforço transmitido pelas fibras provoca um deslocamento entre as camadas de grafite vizinhas, propriedade esta conhecida como efeito lubrificante.

4. CONCLUSÕES.

O ensaio tipo Krauss mostrou-se adequado para a avaliação de materiais de atrito por comparação com o material original. Estudos posteriores poderão ser desenvolvidos para avaliar melhor as condições de realização deste tipo de ensaio, estabelecendo-se valores dos parâmetros envolvidos, tais como coeficiente de atrito, desgaste e temperatura como limites que possibilitem a aceitação ou rejeição de materiais de atrito.

Ficou comprovado que as fibras de PANOX e aramida possuem propriedades que as tornam adequadas para o uso como reforço em materiais de atrito.

A fibra de aramida apresentou bom desempenho quando utilizada na proporção de 10% do peso do compósito. Seu uso combinado com a PANOX, numa proporção total de 10% na soma das duas fibras, permite um controle do valor do coeficiente de atrito dentro da faixa de variação do material de referência e um desempenho estável. Em concentrações iguais das duas fibras se obtém praticamente o mesmo desempenho que com o uso apenas da aramida, o que não é interessante devido ao custo muito maior desta fibra. A redução da PANOX até 30% dessa combinação reduz o coeficiente de atrito com aumento do custo e o seu aumento até 70% aumenta o coeficiente de atrito com redução do custo. O uso apenas de PANOX não é possível porque não se consegue aglutinar o compósito. Deve-se prosseguir as investigações para se verificar o desempenho das combinações entre 70 e 100% de PANOX e 70 e 100% de aramida.

O uso de pequenas concentrações de aramida é necessário para garantir a aglutinação e estabilidade do compósito.

A fibra de PANOX demonstrou possuir características adequadas para seu uso como material de reforço em compósitos para a fabricação de material de atrito para freios de veículos,

o que a transforma em um produto com grande interesse tecnológico e industrial devido à facilidade de obtenção e baixo custo de produção.

Também os elementos utilizados como carga, tais como alumina e grafite, afetam significativamente o comportamento do material de atrito. A variação das proporções destes componentes, combinada com proporções adequadas das fibras, pode ser utilizada para manter sob controle o coeficiente de atrito desejado em cada caso.

A maioria das formulações utilizadas apresentou boa estabilidade do valor do coeficiente de atrito medido ao longo de todo o ensaio, superior mesmo ao resultado obtido nos ensaios com o material de referência.

AGRADECIMENTOS .

Ao CNPq pelo apoio financeiro; ao Centro Técnico Aeroespacial, pelo fornecimento da matéria prima e a Companhia Brasileira de Equipamento (COBREQ), pela manufatura dos corpos de prova.

REFERÊNCIAS.

- Del Arco, A.P., 1997, “Análise e Desenvolvimento do Processo de Obtenção de Fibras de Carbono a Partir de Estabilização Oxidativa das Fibras de Poliacrilonitrila”, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas.
- Matthews, F.L., Rawlings, R.D., 1996, “Composite Materials: Engineering and Science”.
- Pilato L.A., Knop, A., 1985, “Phenolic Resins. Chemistry, Applications and Performances”.
- Preston, J., 1986, “Aramid Fibers”. In: Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, 2^a ed., v.2, p. 97.
- Seiler, H.G, et al., 1988, “Handbook on the Toxicity of Inorganic Compounds”.
- Strong, A.B., 1989, “Fundamental of Composites Manufacturing: Materials, Methods, and Applications”.