

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM

MODELAGEM MATEMÁTICA E AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO MÓDULO DE
ELASTICIDADE DE MATERIAIS COMPÓSITOS PARTICULADOS DE MATRIZ
FENÓLICA PARA USO COMO MATERIAL DE FRICÇÃO

por

Alexandre Casaril

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre
2009

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM

MODELAGEM MATEMÁTICA E AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO MÓDULO DE
ELASTICIDADE DE MATERIAIS COMPÓSITOS PARTICULADOS DE MATRIZ
FENÓLICA PARA USO COMO MATERIAL DE FRICÇÃO

Alexandre Casaril
Engenheiro de Materiais

Trabalho realizado no Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre

2009

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Ciência e Tecnologia dos Materiais e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Co-Orientador: Professor Hazim Ali Al-Qureshi, PhD.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Guilherme Barra

Prof. Dr. Marcos Roberto Farias Soares

Profa. Dra. Juliane Vicenzi

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGEM

DEDICATÓRIA

Aos meus irmãos Leonardo e Guilherme, e à pequena Débora, nossa amada irmã.

Se eu puder, de alguma forma através dos meus esforços, inspirá-los a sempre seguir em frente com honestidade, bondade e justiça, terei alcançado um de meus grandes objetivos de vida.

Não se preocupe em ser um gênio e não se preocupe se não for inteligente. Confie mais no trabalho duro, na perseverança e na determinação. O melhor lema para uma longa marcha é “Não resmungue. Agüente”.

Você tem o futuro nas mãos. Nunca duvide disso. Não se gabe. O menino que se gaba, assim como o homem que se gaba, pouco mais pode fazer. É um zé-ninguém que anuncia sua própria mercadoria barata. A lata vazia é a que faz mais barulho. Seja honesto. Seja leal. Seja bondoso. Lembre-se que a coisa mais difícil de conseguir é a faculdade de ser altruísta. Como qualidade, é um dos mais belos atributos da masculinidade.

Ame o mar, a sonoridade da praia, os prados amplos. Mantenha-se limpo de corpo e mente.

*Sir Frederick Treves Bart, Cavaleiro Comandante da Real Ordem da Vitória, Companheiro da Ordem do Banho, Sargento Honorário a Serviço de Sua Majestade o Rei, Médico Honorário a Serviço de Sua Alteza Real o Príncipe de Gales, escrito na Rua Wimpole, 6, Praça Cavendish, Londres, em 2 de setembro de 1903, por ocasião do vigésimo quinto aniversário do jornal para crianças *The Boy's Own Paper*.*

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas participaram e contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho. E a todas deixo meus sinceros agradecimentos. Ao meu orientador, Professor Carlos P. Bergmann, por ter me recebido no seu grupo de pesquisa, por ter tornado possível a minha jornada na Pós-Graduação em Engenharia de Materiais na Escola de Engenharia da UFRGS e por sua valorosa contribuição para esta dissertação. Ao meu co-orientador, mas acima de tudo meu amigo, Professor Hazim Ali Al-Qureshi, a quem eu devo grande parte da minha formação, não apenas profissional, mas também muitos ensinamentos que me orientam para a vida.

Da mesma forma, agradeço a Fras-le S.A., que ofereceu todo suporte e apoio para realização deste trabalho como parte do seu programa de pesquisa e desenvolvimento de produtos. Ao Doutor Marcos R. F. Soares, líder do programa de pesquisa da Fras-le S.A. e coordenador do Laboratório Químico, onde muitas das análises foram desenvolvidas, com a contribuição do senhor Norton H. Wille e senhorita Albertina Artmann. Ao senhor Leonel W. dos Reis, líder do Laboratório Piloto e sua equipe, onde foram fabricadas as amostras para realização dos experimentos. Ao senhor Marcelo Maruju, à época da realização dos experimentos, coordenador do Laboratório Físico, e sua equipe, pelo grande auxílio na preparação dos corpos-de-prova e realização dos ensaios mecânicos.

Por fim, agradeço imensamente aos meus pais, Neudi e Judith, que sempre me incentivaram e orientaram – e ainda o farão por muito tempo – nas diversas situações que vivi, me apoiando nas batalhas do meu dia-a-dia e me ensinando os valores essenciais para que eu me torne, a cada dia, uma pessoa melhor.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABELAS	VIII
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
RESUMO	X
ABSTRACT	XI
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	5
2.1. Objetivos Específicos	5
3. Revisão Bibliográfica	6
3.1. Materiais Compósitos	6
3.1.1. Materiais Compósitos Reforçados com Fibras	7
3.1.2. Materiais Compósitos Particulados	10
3.2. Lei da Mistura	10
3.3. Sistemas de Freio	11
3.4. Materiais de Fricção	14
3.4.1. Matérias-Primas e Funcionalidades	16
3.5. Influência da Rigidez no Desempenho de Materiais de Fricção	18
4. MODELO	20
4.1. Revisão do Modelo de Al-Qureshi	20
4.2. Modificações Propostas ao Modelo	24
4.2.1. Quanto ao Número de Fases Dispersas	24
4.2.2. Quanto à Forma das Partículas Dispersas	25
4.2.3. Quanto à Presença de Fases Dispersas Viscoelásticas	27
5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	29
5.1. Matérias-Primas e Composições	29
5.2. Fabricação dos Materiais Compósitos	32
5.2.1. Homogeneização	32
5.2.2. Compactação a Quente	33
5.2.3. Tratamento Térmico	33
5.3. Determinação Experimental do Módulo de Elasticidade	33
5.4. Fator de Forma	35
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
6.1. Fator de Forma	36
6.2. Propriedades Mecânicas da Resina Fenólica	38
6.3. Módulo de Elasticidade dos Materiais Compósitos	40
7. CONCLUSÕES	48
8. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
ANEXO I	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 – Sistemas de freio disco/pastilha para veículo de passageiros [fonte: farm4.static.flickr.com].....	12
Figura 3.2 – Sistemas de freio disco/pastilha para veículo pesado [Cortesia Fras-le S.A.].....	12
Figura 3.3 – Sistema de freio ECO DRUM BPW. [www.bpw.com].....	13
Figura 3.4 – Sistema de freio ECO DRUM BPW. [www.bpw.com].....	13
Figura 4.1 – Reforço particulado num sólido [Al-Qureshi,1988].....	20
Figura 4.2 – representação cúbica da inclusão contida no material compósito [Al-Qureshi, 1988].....	22
Figura 4.3 – Partícula de formato irregular aleatório.....	25
Figura 4.4 – Círculo de área equivalente à da partícula em consideração.....	26
Figura 5.1 – Seqüência do procedimento experimental adotado no trabalho.....	29
Figura 5.2 – Aspecto visual da fibra de vidro (à esq.), da resina fenólica (à dir.) e do silicato de zircônio (acima) utilizados na produção dos compósitos.....	30
Figura 5.3 – Moinho utilizado na etapa de homogeneização.....	32
Figura 6.1 – Partículas de sulfato de bário analisadas para estimativa do fator de forma.....	36
Figura 6.2 – Partículas de grafite analisadas para estimativa do fator de forma.....	36
Figura 6.3 – Partículas de silicato de zircônio analisadas para estimativa do fator de forma.....	37
Figura 6.4 – Curva tensão-deformação do corpo-de-prova nº1 de resina fenólica, resultante do ensaio de flexão a 3-pontos.....	39
Figura 6.5 – Resultados teóricos e experimentais de módulo de elasticidade dos compósitos testados.....	41
Figura 6.6 – Correlação entre módulo de elasticidade teórico e módulo de elasticidade experimental, e diferenças entre ambos.....	42
Figura 6.7 – Faixa de variação dos resultados teóricos de módulo de elasticidade dos materiais M1 a M8 devido ao desvio padrão experimental do módulo de elasticidade da resina fenólica.....	44
Figura 6.8 – Faixa de variação dos resultados teóricos de módulo de elasticidade dos materiais M1 a M8 devido ao desvio padrão experimental do fator de forma das matérias-primas utilizadas na fabricação dos mesmos.....	46

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Propriedades elásticas das principais fibras utilizadas para fabricação de materiais compósitos. [Al-Qureshi, 1988].....	8
Tabela 5.1 – Composições dos materiais compósitos produzidos e avaliados para teste do modelo teórico.....	30
Tabela 5.2 – Informações de interesse sobre as matérias-primas utilizadas nas composições testadas.	31
Tabela 5.3 – Dimensões dos corpos de prova e parâmetros do ensaio de flexão a 3-pontos utilizados no trabalho.....	34
Tabela 6.1 – Resultados das medições do fator de forma para as matérias-primas de interesse.....	37
Tabela 6.2 – Resultados da caracterização da resina fenólica no ensaio de flexão a 3- pontos.	38
Tabela 6.3 – Resultados teóricos e experimentais do módulo de elasticidade dos materiais compósitos testados.....	40
Tabela 6.4 – Faixa de variação dos resultados teóricos de módulo de elasticidade dos materiais M1 a M8 devido ao desvio padrão experimental do módulo de elasticidade da resina fenólica.....	43
Tabela 6.5 – Faixa de variação dos resultados teóricos de módulo de elasticidade dos materiais M1 a M8 devido ao desvio padrão experimental do fator de forma das matérias-primas utilizadas na fabricação dos mesmos.....	45

LISTA DE SÍMBOLOS

m – metro
mm – milímetro
n – coeficiente da curva força-deslocamento na porção linear no teste de flexão 3-pontos
μm – micrômetro
F – força
A – área
R – raio
V – volume
W – massa
ρ - densidade
K - carga
s – segundo
min - minuto
P – propriedade
E – módulo de elasticidade
G – módulo de cisalhamento
σ – tensão
ε – deformação
δ - alongamento
w – fração mássica
v – fração volumétrica
α – fator de forma
β – fator de alinhamento de fibras
MPa – mega Pascal
GPa – giga Pascal
°C – grau Celsius
rpm – rotações por minuto
F_{máx} – ferret máximo
F_{mín} – ferret mínimo
Vidro-E – fibra de vidro tipo E
Vidro-S – fibra de vidro tipo S
NAO – *non-asbestos organic*
SBR – poli(estireno-co-butadieno)
NBR – poli(acrilonitrila-co-butadieno)

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma modelagem matemática simplificada para projeção do módulo de elasticidade de materiais de fricção. A modelagem foi desenvolvida a partir de equações apresentadas por outros autores. Estas equações foram complementadas para que fossem adequadas aos materiais de fricção. A partir da equação base, foi inserida a Lei da Mistura simples na equação a fim de possibilitar a consideração de todas as fases presentes no material de fricção e sua contribuição para a rigidez do mesmo. Foi proposto um fator de forma α para as matérias-primas particuladas empregadas na fabricação dos materiais de fricção. Este fator visou corrigir a eficiência da contribuição das fases particuladas para a rigidez do material de fricção em virtude da sua irregularidade geométrica. Da mesma forma, foi incluído, ainda, no modelo matemático, um fator exponencial que quantifica a contribuição de fases viscoelásticas de baixo módulo de elasticidade. Conforme observado, a introdução deste fator exponencial é imprescindível devido à magnitude peculiar da influência das fases de baixo módulo de elasticidade sobre a rigidez do material de fricção. Para correta alimentação do modelo matemático proposto, foi realizada a caracterização do fator de forma das fases particuladas utilizadas na confecção dos materiais de fricção que foram utilizados para teste do modelo. Da mesma forma, foi feita a caracterização do módulo de elasticidade da resina fenólica, fabricada sob os mesmos parâmetros de processo dos materiais de fricção. Foram produzidas oito composições representativas de materiais de fricção semelhantes aos utilizados para fabricação de lonas de freio, aplicadas em veículos pesados com sistema de freio a tambor. As mesmas foram testadas em flexão a 3 pontos, de acordo com a norma ASTM D790-92, 1992, método de teste I, segundo procedimento A. Os resultados experimentais obtidos para o módulo de elasticidade dos materiais de fricção mostraram bom grau de confiabilidade, evidenciada pelo desvio padrão obtido nos resultados. A comparação entre os resultados teóricos, calculados através do modelo proposto e a partir das propriedades das matérias-primas, e os resultados experimentais mostrou boa correlação, encorajando a utilização do modelo desenvolvido neste trabalho para o projeto de materiais de fricção.

ABSTRACT

This work shows a simplified mathematical modeling for friction materials elasticity modulus design. The modeling was developed from other authors equations. These equations were modified to be adequate to friction materials. In the base equation, was introduced a simple Rule-of-Mixtures in order to consider all components in the friction material composition, and their contribution to the rigidity of it. A shape factor (α) was proposed to be applied to the particulate raw materials used in the fabrication of friction material. The shape factor function is to correct the particulate phases contribution efficiency to the rigidity of the friction material, due to its geometrical irregularities. Also, was introduced in the mathematical modeling an exponential factor to quantify the contribution of viscoelastic phases that show low modulus of elasticity. It was observed that the introduction of the exponential factor is very important due to the peculiar magnitude of the influence of these phases with low modulus of elasticity on the friction material rigidity. To obtain the necessary support to the mathematical modeling, the shape factor characterization was proceeded for the particulate phases used in the manufacture of the friction materials tested to check modeling validation. Also, the modulus of elasticity characterization of the phenolic resin was made with pure phenolic resin pieces manufactured with the same process parameters used for the friction materials manufacture. Eight compositions, representative of friction materials used for heavy vehicles drum brake linings, were produced. They were tested under 3-points bending test procedure, according to ASTM D790-92, 1992 standard, using test method I, procedure A. Experimental results obtained for the modulus of elasticity of the friction materials show reliable confidence, evidenced by the standard deviation of the results. Comparison between theoretical results, calculated with the proposed mathematical modeling and the raw materials properties, and the experimental results show good correlation, encouraging the use of the proposed modeling for friction materials design.

1. INTRODUÇÃO

O cenário de pesquisa e desenvolvimento de produtos no segmento de materiais de fricção é bastante peculiar. As grandes empresas do setor, que dominam o mercado mundial, possuem amplos centros de excelência em pesquisa, básica e aplicada, e desenvolvimento de produtos. Foi assim desde o surgimento deste setor da indústria de autopeças, e desta forma se manteve durante sua consolidação e expansão, ao longo do último século, puxadas pela demanda da indústria automotiva [Nicholson, 1995].

De fato, é rara a existência de centros de excelência em pesquisa e desenvolvimento de materiais de fricção fora das companhias manufatureiras. Essa característica do setor pode ser explicada, em parte, pela complexidade do conhecimento agregado ao desenvolvimento de materiais de fricção. Devido aos requisitos técnicos e econômicos associados ao uso, os materiais de fricção, em sua grande maioria, são desenvolvidos sob a lógica de materiais compósitos particulados, contendo normalmente mais de quinze matérias-primas funcionais em sua composição, onde se destacam as resinas termofixas – fenólica, epóxi e de caju são as principais – grafites, coques, minerais, elastômeros, metais, sulfetos e outras matérias-primas, empregados normalmente na forma de pós, grânulos e fibras. Esta variedade composicional tem se mostrado ao longo da história da indústria de materiais de fricção como a alternativa mais viável, técnica e economicamente, para atender as necessidades, em serviço, de veículos e máquinas industriais no que compete ao controle de movimento [Nicholson, 1995].

Os requisitos associados aos materiais de fricção em serviço dizem respeito à eficiência de frenagem, vibrações, ruído, resistência mecânica e resistência térmica. Além disso, todos estes aspectos trabalham dinamicamente em largas faixas de temperatura que vão desde a temperatura ambiente e podem superar 1000°C em alguns casos, com variação de carga aplicada e de velocidades de deslizamento. Associam-se a isto a complexidade dos fenômenos tribológicos presentes em serviço e a sensibilidade ao envelhecimento térmico de várias das matérias-primas empregadas nas composições de materiais de fricção. Levando em conta o fator “custo”, que é imprescindível para a competitividade e sobrevivência no mercado, pode-se vislumbrar as dificuldades que envolvem o desenvolvimento de produtos para o mercado de materiais de fricção.

De forma geral, para desenvolver materiais de fricção, atualmente, são necessários conhecimentos sobre o comportamento mecânico de materiais compósitos particulados/fibrosos; comportamento térmico dos materiais compósitos e das matérias-primas utilizadas na sua fabricação; comportamento tribológico dos materiais compósitos e

das propriedades das matérias-primas que influenciam nos fenômenos dessa natureza; comportamento de ruído e vibração dos sistemas de freio.

As propriedades mecânicas dos materiais de fricção, destacando a resistência mecânica e o módulo de elasticidade, têm extrema importância, pois influenciam praticamente todos os requisitos técnicos desses materiais. A rigidez do material de fricção tem tamanha importância para aplicação do mesmo, a ponto de ter sido criado um ensaio específico para medida desta propriedade do material em carregamento dinâmico, o qual é característica crítica de projeto. Este ensaio, empregado praticamente apenas para materiais de fricção é denominado Compressibilidade, e seu resultado é dado, basicamente, pela deflexão do material de fricção (em muitos casos uma peça inteira como uma pastilha, por exemplo), quando submetido à solitação de compressão livre em carregamento dinâmico cíclico, com alta taxa de carregamento.

A Compressibilidade do material de fricção influencia diretamente na ocorrência de ruído em serviço do material. Muitos autores [Matozo, 2008; Canali, 2002] já observaram que materiais que apresentam valores altos de compressibilidade, indicando menor rigidez dos mesmos comparativamente, apresentam menor propensão à ocorrência de ruído em serviço. Da mesma forma, tem influência enorme no comportamento de vibração do sistema de freio, que é extremamente crítico para projetos, atualmente.

A rigidez do material de fricção influencia também diretamente a eficiência de frenagem e a resistência ao desgaste do mesmo. Materiais de fricção para freios a tambor, por exemplo, precisam ser flexíveis, dentre outras características, para terem a habilidade de se moldarem ao tambor de freio, conforme as condições de serviço variem [Nicholson, 1995].

Por outro lado, existe enorme dificuldade em prever as propriedades mecânicas de materiais compósitos de fricção, por várias razões. Estudos visando modelagem e equacionamento em materiais compósitos normalmente abordam materiais compósitos de fibras contínuas e matriz polimérica (termoplásticos e termorrígidos), os quais são utilizados em segmentos de tecnologia de ponta, como a indústria automobilística, náutica, aeronáutica e aeroespacial. Da mesma forma, a classe de materiais compósitos particulados de matriz termofixa reforçados com fibras picadas tem aplicação praticamente restrita ao segmento de materiais de fricção, não tendo outros setores significativos da indústria empregando esta classe de material. Adicionalmente, existem grandes dificuldades do ponto de vista científico na elaboração de modelos que estimem de forma satisfatória o comportamento das propriedades mecânicas desta classe de materiais, pela variedade das características das

matérias-primas utilizadas na fabricação dos mesmos, bem como pela interação mecânica entre elas. Como já citado, são empregadas matérias-primas metálicas, poliméricas, cerâmicas, na forma de pós, grânulos, fibras, com geometrias variadas, distribuição de tamanhos variada e propriedades mecânicas distintas. O emprego, por exemplo, de elastômeros com características viscoelásticas, em contrapartida aos cerâmicos frágeis, também empregados em materiais de fricção, modificam sensivelmente o comportamento mecânico do material compósito obtido.

Por estas razões, a literatura científica disponível a respeito de modelagem das propriedades mecânicas de materiais compósitos que seja adequada a materiais de fricção é extremamente reduzida, sendo que se observa em projetos de materiais de fricção uma busca pelas propriedades mecânicas ideais do material baseada na lógica da tentativa e erro, onde a base mais significativa para desenvolvimento é a própria experiência do engenheiro da área.

A proposta deste trabalho parte exatamente da dificuldade, acima colocada, de se obter no desenvolvimento de materiais de fricção o valor desejado para as propriedades mecânicas do mesmo. Portanto, este trabalho se engaja no contexto de pesquisa e desenvolvimento de materiais de fricção. Estes são materiais compósitos de alta complexidade, com um grande número de fases presentes em sua composição, as quais são empregadas na forma de pós, grânulos e fibras.

A propriedade de interesse que é abordada neste trabalho é o módulo de elasticidade. Esta propriedade, conforme colocado anteriormente, tem extrema importância para o desempenho do material de fricção em serviço e é avaliada através de características críticas de projeto, como a Compressibilidade, por exemplo.

A partir das informações existentes na literatura a respeito de materiais compósitos particulados e materiais compósitos reforçados com fibras curtas, será proposto um modelo matemático, a partir do aperfeiçoamento de modelos já desenvolvidos por outros autores, que preveja o módulo de elasticidade de materiais compósitos de fricção, particulados de matriz termofixa e reforçados com fibras picadas.

Para verificação da validade do modelo proposto, serão avaliados materiais compósitos contendo matérias-primas comumente utilizadas em materiais de fricção, de forma a simular a complexidade da composição de materiais de fricção comercialmente produzidos. Estes materiais serão fabricados seguindo processo semelhante ao de materiais de fricção comerciais, e será submetido ao ensaio mecânico de flexão, que é mais apropriado

para materiais que apresentam grande fragilidade e pequena deformação até a ruptura, como é o caso dos materiais de fricção.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é contribuir para a construção do conhecimento na Ciência dos Materiais, mais especificamente na área de materiais compósitos de fricção, através da proposição e validação de um modelo teórico que permita estimar o módulo de elasticidade de um material compósito de fricção, contendo fases dispersas particuladas e fibrosas, e matriz termofixa, a partir de informações como a composição do compósito, o módulo de elasticidade das fases presentes e suas características geométricas.

2.1. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Equacionar o módulo de elasticidade de materiais compósitos de fricção, que contêm fibras curtas e partículas;
- Determinar e medir as características geométricas das matérias-primas que sejam importantes, com base no equacionamento;
- Fabricar uma série de composições de materiais compósitos de fricção, e realizar o teste de flexão dos mesmos a fim de validar o equacionamento;

Além disso, este trabalho visa atender as expectativas da indústria de materiais de fricção, mais especificamente a Fras-le S.A., que deu completo suporte a este projeto, do ponto de vista da geração de conhecimento e tecnologia que possa ser efetivamente utilizado no desenvolvimento de produtos, tornando-os mais competitivos no mercado mundial, trazendo retorno econômico para a empresa e para a nação.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Materiais Compósitos

A necessidade de otimização de custo, desempenho e processo de fabricação de componentes vêm dando suporte para o desenvolvimento dos materiais compósitos. Um material compósito é obtido pela mistura física de, pelo menos, dois constituintes de classes diferentes, a fim de formar um terceiro material – este denominado compósito – o qual apresenta propriedades e características de interesse mais adequadas para aplicação do que seus constituintes originais. A categorização de critérios que dão respaldo para que um material seja efetivamente considerado compósito ainda é discutida no meio científico. Porém, alguns critérios já são considerados essenciais para que uma mistura multifásica seja reconhecida como material compósito. É necessário que os componentes sejam insolúveis entre si. O conjunto de propriedades de desempenho deve ser superior ao dos componentes independentes. É necessário que os componentes estejam presentes em quantidade significativa, maior do que 5% em volume. Deve haver uma interação tridimensional, a qual deve atender uma escala microcópica, a fim de garantir a interação dos componentes, bem como a homogeneidade microestrutural e de propriedades [Calister, 2000].

Do ponto de vista da utilidade dos materiais compósitos, o que se busca no desenvolvimento dos mesmos é combinar características desejáveis de dois ou mais materiais diferentes gerando um novo material com características de interesse otimizadas e singulares.

O processo de combinar dois materiais para formar um terceiro pode ocorrer de várias formas. Este conceito, na verdade, está longe de ser novo. Os materiais compósitos têm estado presentes no cotidiano da humanidade desde os tempos antigos. Os israelitas utilizavam tijolos reforçados com fibras vegetais já em 800 a.C. Os mongóis utilizavam arcos confeccionados com tendões de animais e seda artificial, unidos por meio de adesivos. Mesmo na natureza, a existência de estruturas como filamentos fibrosos embebidos em uma matriz é comumente observada, como o bambu, por exemplo [Al-Qureshi, 1988].

O concreto armado é um dos materiais compósitos, desenvolvidos pelo homem, mais populares e largamente empregados em estruturas. Neste material, as barras de aço são adicionadas ao concreto para incrementar sua resistência à tração, enquanto o próprio concreto fornece boa resistência à compressão [Al-Qureshi, 1988; Calister, 2000].

O desenvolvimento acelerado dos materiais compósitos tem assegurado seu emprego cada vez mais crescente em diversos segmentos industriais, por vários motivos. Um deles é o desenvolvimento dos processos de produção de insumos, como materiais fibrosos e particulados principalmente, que têm possibilitado as mais diversas geometrias (valorizando a geometria, qualidade superficial e outros parâmetros importantes). O desenvolvimento dos processos de produção de insumos tem permitido, também, o barateamento dos mesmos, o que é de grande importância para viabilidade do emprego de materiais compósitos na indústria. As principais vantagens, quanto à aplicação, segundo Silvestre Filho, 2001, podem ser assim resumidas: pelo seu aspecto multifuncional, os materiais compósitos são capazes de satisfazer diversas exigências de projeto; em estruturas, a economia de peso é significativa, frequentemente varia de 25 a 50% em relação aos materiais metálicos convencionais; a alta rigidez à torção, exigida em vários veículos, e principalmente aviões, pode ser satisfeita; excelente resistência à corrosão pode ser obtida; possuem qualidades de fadiga e fratura; as características de tolerância ao impacto são excelentes; a flexibilidade de seleção e mudança no estilo e considerações estéticas do produto é uma característica importante, e elas podem ser feitas com baixos investimentos; uma baixa expansão térmica pode ser conseguida, mas varia significativamente com a escolha do material da matriz, com o tipo de fibra empregada e com sua orientação; a manufatura e montagem são simplificadas por causa da interação dos componentes, reduzindo as uniões e os dispositivos de união.

Estas vantagens são complementadas pelas combinações de propriedades que os materiais compósitos permitem, pela possibilidade de variação da composição e das matérias-primas que podem ser empregadas na fabricação dos mesmos. O custo mais elevado do emprego destes materiais é compensado pelas já citadas vantagens que eles proporcionam, principalmente em produtos de alta tecnologia onde o custo da matéria-prima e do processo de fabricação não são os principais agregadores de valor – aeroespacial e aeronáutico, por exemplo [Casaril, 2004].

3.1.1. Materiais Compósitos Reforçados com Fibras

A principal função das fibras nos materiais compósitos é carregar carga ao longo da direção de reforço, a direção de alinhamento, sendo que o reforço das fibras incrementa, basicamente, a resistência e a rigidez do material compósito. De fato, o termo “fibra” foi sugerido pela ASTM (Sociedade Americana de Testes e Materiais), e o mesmo designa material de qualquer natureza que possui razão de aspecto, ou seja, razão entre comprimento e

largura, maior do que 10:1, uma seção cruzada com área inferior a $5,1 \times 10^{-8} \text{ m}^2$, e uma largura menor do que $2,54 \times 10^{-4} \text{ m}$ [Al-Qureshi, 1988].

A razão da utilização de materiais com características de fibras para construção de materiais compósitos é que esta geometria garante uma resistência e uma rigidez inerente muito maior do que o material em seu formato não fibroso (propriedade de volume macro).

As principais variedades de fibras comercialmente utilizadas são fibras de vidro, fibras de aramida (Kevlar, Twaron) e fibras de carbono. A fibra de vidro do tipo “E” é uma das mais utilizadas comercialmente para propósitos de reforço. A fibra de vidro do tipo “S” – de alta resistência, tem aplicações mais restritas à indústria aeroespacial, devido ao custo associado. A fibra de aramida foi desenvolvida pela Du Pont, é uma fibra polimérica sintética que oferece altos valores de propriedades de resistência a tração e rigidez, apresentando também alta resistência ao impacto. Seu desenvolvimento contemplava, principalmente, aplicações balísticas particularmente para coletes a prova de bala. A fibra de carbono tem característica extremamente refinada, oferecendo alta resistência e alta rigidez, em comparação com outras fibras e também materiais metálicos, proporcionando materiais compósitos com resistência e rigidez específicas bastante úteis para componentes de Engenharia.

A Tabela 3.1 apresenta propriedades mecânicas de algumas fibras de Engenharia importantes.

Tabela 3.1 – Propriedades elásticas das principais fibras utilizadas para fabricação de materiais compósitos. [Al-Qureshi, 1988]

Tipo de Fibra	Módulo de elasticidade (GPa)		Resistência (MPa)	
	Tração	Compressão	Tração	Compressão
Vidro – E	53,8	51,7	1310	965
Vidro – S	72,4	85,5	1620	1138
Aramida (Kevlar 29)	50,0	46,5	1351	238
Carbono (alto módulo)	200,0	196,5	758	793
Carbono (alta resistência)	144,8	141,3	1379	1586

De forma geral, fibras não são utilizadas diretamente em estruturas de Engenharia por causa da sua diminuta seção cruzada. Porém, quando uma quantidade de fibras é embebida em uma matriz formando um componente macro, como um laminado, o mesmo proporciona propriedades de resistência e rigidez muito interessantes.

A forma mais eficiente de maximizar as propriedades mecânicas do material compósito é através do emprego de fibras contínuas, formando laminados. Esta estrutura de componente permite extrair das fibras o máximo da sua rigidez e resistência. Além disso, propicia obtenção de anisotropia de propriedades do componente, otimizando o mesmo de acordo com as especificações de projeto. Esta concepção é bastante empregada nas indústrias automobilística, náutica, aeronáutica e aeroespacial, que são setores de tecnologia de ponta, onde a otimização do peso das estruturas é importante do ponto de vista de projeto.

Do ponto de vista do foco deste trabalho, materiais de fricção, o maior interesse está nos materiais compósitos reforçados com fibras descontínuas, comumente chamadas de “fibras picadas”. Em relação aos conceitos da Micromecânica dos materiais compósitos, as fibras picadas oferecem potencial de incremento das propriedades mecânicas inferior, em comparação às fibras contínuas. No caso dos materiais compósitos reforçados com fibras picadas, a carga é aplicada diretamente sobre a matriz do material compósito, e transferida por deformação através da adesão interfacial para as fibras. Nesse caso, a resistência do material compósito é função direta do comprimento das fibras [Al-Qureshi, 1988; Casaril, 2004; Calister, 2000].

A utilização de fibras picadas na confecção de materiais de fricção remonta praticamente ao período em que surgiu esta classe de materiais como demanda da indústria automotiva. O emprego de fibras de asbestos como uma das matérias-primas principais da composição dos materiais de fricção sedimentou a utilização de materiais fibrosos no design de materiais de fricção [Nicholson, 1995]. Posteriormente, passaram a ser utilizadas fibras de aramida, de acrílico, fibras de vidro picadas, etc. O emprego de uma grande variedade de matérias-primas na forma de pós é bastante importante, do ponto de vista de fabricação, para determinação do processo de homogeneização da composição do material de fricção, geralmente feita em moinhos, e para a etapa de prensagem do mesmo, geralmente em cavidades aquecidas. Dessa forma, a condição do processamento acaba restringindo a utilização de fibras à variedade de fibras picadas disponíveis no mercado, as quais proporcionam menor potencial de reforço, mas ainda assim oferecem a melhor relação custo-benefício. Há de se levar em consideração que existe um grande número de outras

propriedades críticas de projeto para materiais de fricção, além das propriedades mecânicas, algumas delas com maior importância, inclusive.

3.1.2. Materiais Compósitos Particulados

Partícula, por definição, possui pequenas dimensões e não obedece a razão de aspecto mínima para ser tomada como fibra. Como já mencionado, a característica de reforço do compósito é fortemente dependente da característica geométrica dos seus componentes, com exceção da matriz. A resistência do material compósito é mais eficientemente incrementada utilizando materiais de reforço na forma de fibras ao invés de partículas. De modo geral, as partículas no material compósito aumentam a rigidez do mesmo, porém, não contribuem consideravelmente para o aumento da sua resistência.

No entanto, quando outras propriedades de aplicação do componente de Engenharia, além da resistência mecânica e da rigidez, são importantes, os componentes particulados podem ser utilizados de forma eficiente na otimização das mesmas. Materiais particulados são utilizados para modificar propriedades térmicas, elétricas, características de usinagem, dureza superficial, propriedades de atrito e desgaste, sendo as duas últimas de primeira importância de acordo com o foco deste trabalho, que são os materiais de fricção, como já observado.

3.2. Lei da Mistura

No projeto de materiais compósitos, combinam-se vários materiais com o objetivo de produzir uma nova geração de materiais com características especiais. O desempenho dos compósitos é fortemente influenciado pelas propriedades dos seus materiais constituintes, sua distribuição, fração volumétrica e interação entre eles.

As propriedades mecânicas dos materiais compósitos seguem o Princípio da Aditividade, o qual estabelece que, ao se adicionar à matriz uma ou mais fases dispersas a fim de formar um material compósito, as propriedades do novo material formado serão intermediárias entre as propriedades dos componentes constituintes.

A partir desse princípio, e com enfoque nos materiais compósitos com matriz polimérica reforçada com fibras contínuas, foi desenvolvida, para prever as propriedades mecânicas dos materiais compósitos, a Lei das Misturas, de acordo com a Equação 3.1.

$$P_c = P_f v_f + P_m v_m \quad \text{Equação 3.1}$$

Demonstrada no Anexo 1, onde P_c representa a propriedade mecânica em questão do compósito, na direção longitudinal, da mesma forma que P_f representa a propriedade mecânica em questão da fibra e P_m é a propriedade mecânica em questão da matriz, v_f e v_m são as frações volumétricas, da fibra e da matriz, respectivamente. A Equação 3.1 representa a Lei das Misturas genérica, que governa as propriedades elásticas de um material compósito.

3.3. Sistemas de Freio

O sistema de freio é um dos sistemas mais importantes do veículo, no que diz respeito à segurança. A função básica do mesmo é permitir ao condutor o controle de movimento do veículo, fazendo com que o mesmo possa trafegar de forma segura, sem oferecer risco aos demais que se encontram no mesmo ambiente.

O fenômeno de frenagem do veículo se dá através do contato entre material de fricção, fixo à estrutura do carro, e o rotor, que gira com a roda do veículo. Quando o pedal freio é acionado, gerando pressão no sistema hidráulico ou pneumático do veículo, o material de fricção é pressionado contra o rotor. Esta interface tem um coeficiente de atrito alto, gerando um torque de frenagem contrário ao movimento do veículo, fazendo com que o mesmo diminua sua velocidade ou aceleração.

É importante observar que o veículo está conectado ao piso onde o mesmo trafega, através dos pneus, e é extremamente dependente da qualidade de interação da interface piso/pneu. Qualquer força de frenagem, aceleração ou mesmo para o direcionamento do veículo deve ser gerada na área de contato dos pneus com o terreno. Para manutenção da segurança, somente podem ser aplicadas forças de frenagem menores ou iguais ao produto da força normal pelo coeficiente de atrito da interface piso/pneu. Caso este limite seja ultrapassado, ocorrerá o arraste dos pneus, uma situação que é comprovadamente reconhecida como perigosa, por causar a perda de dirigibilidade do veículo, além de resultar em distâncias de frenagem muito maiores [Limpert, 1999].

Basicamente, existem dois tipos de sistemas de freio: disco/pastilha e tambor/lona. As Figuras 3.1 e 3.2 mostram dois sistemas de freio disco/pastilha típicos. A Figura 3.1 corresponde a um sistema de freio disco/pastilha de um veículo esportivo de passageiros. A Figura 3.2 apresenta um sistema de freio disco/pastilha durante teste de alta criticidade em

dinamômetro. Esta classe de freio disco/pastilha é destinada a veículos pesados. As duas pastilhas de freio são alocadas no interior do caliper (em vermelho na Figura 3.1, e em cinza escuro na Figura 3.2 envolvendo o disco ao rubro).



Figura 3.1 – Sistemas de freio disco/pastilha para veículo de passageiros [fonte: farm4.static.flickr.com].

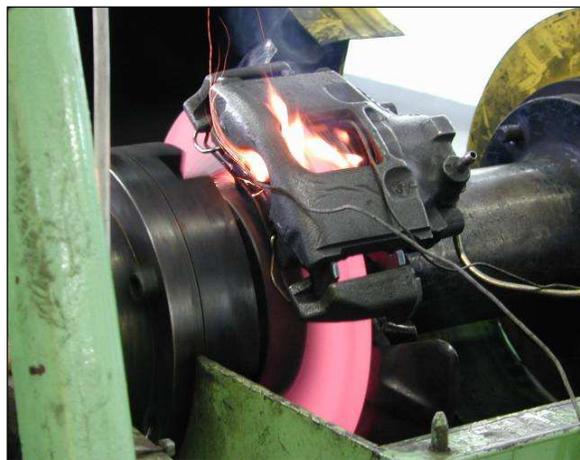


Figura 3.2 – Sistemas de freio disco/pastilha para veículo pesado [Cortesia Fras-le S.A.].

As Figuras 3.3 e 3.4 mostram a configuração de um sistema de freio tambor/lona do fabricante BPW, classe ECO DRUM, acoplado a um eixo destinado a veículos pesados. A Figura 3.3 mostra o detalhe da lona posicionada sobre os patins na parte interna do tambor, enquanto a Figura 3.4 apresenta o eixo completo com dois sistemas de freio, um em cada extremidade.



Figura 3.3 – Sistema de freio ECO DRUM BPW. [www.bpw.com]



Figura 3.4 – Sistema de freio ECO DRUM BPW. [www.bpw.com]

O sistema de freio disco/pastilha tem a característica de maior estabilidade em relação ao sistema de freio tambor/lona. Isso se deve, principalmente, ao desenho do sistema e confere ao mesmo a vantagem de oferecer uma relação linear entre o coeficiente de atrito e o torque de frenagem resultante. Para o sistema tambor/lona, essa correlação não é linear, depende da configuração do sistema, podendo originar, dependendo da situação, perturbações consideráveis no torque de frenagem, mesmo com pequenas variações no coeficiente de atrito na interface tambor/lona.

Outro fator que influencia fortemente o desempenho do sistema tambor/lona. Incrementos críticos de temperatura podem levar a patamares de dilatação do tambor de freio que podem ocasionar perda crítica da capacidade de frenagem. Esta característica também está associada, principalmente, ao desenho de atuação radial do sistema de freio. O sistema de freio a disco, devido ao seu conceito, tem uma liberdade maior de trabalho em relação à temperatura [Limpert, 1999].

O balanço de desempenho e custo, associado às características específicas dos mercados, determinaram as aplicações dos sistemas de freio a disco/pastilha e tambor/lona.

No mercado brasileiro, os veículos de passageiros utilizam sistemas de freio disco/pastilha nas rodas dianteiras, que tem maior participação no balanço de frenagem. Já nas rodas traseiras, os dois sistemas são empregados, sendo que veículos ditos “populares” comumente utilizam sistema de freio tambor/lona, enquanto que em veículos das categorias “médios” e “grandes” há uma tendência gradual de aplicação do sistema de freio disco/pastilha. Para veículos pesados, de cargas e de passageiros, é comum a aplicação do sistema de freio lona/tambor, em todos os eixos do veículo, sendo que a aplicação do sistema disco/pastilha é muito reduzida. Essa mesma tendência é observada em toda América Latina. Este cenário também reflete basicamente o mercado dos Estados Unidos.

Já no mercado europeu, onde os requisitos legislativos de segurança são bastante rígidos, percebe-se uma ampla aplicação do sistema de freio disco/pastilha em todas as linhas e categorias de veículos. O sistema tambor/lona encontra aplicação em segmentos restritos, como trailers e veículos agrícolas.

3.4. Materiais de Fricção

A função dos materiais de fricção é possibilitar o controle de movimento do veículo pela desaceleração do mesmo, através da transformação da energia cinética em calor, via fricção, e dissipar o calor gerado para o meio. Tomado como um componente do veículo, o material de fricção apresenta outras funções secundárias que complementam o propósito acima colocado. Alguns requisitos adicionais são a resistência à corrosão, estabilidade de atrito, alta durabilidade, baixa propensão à geração de ruído e vibrações, além da necessidade de custo aceitável versus *performance* [Nicholson, 1995; Limpert, 1999; Matozo, 2006; Casaril, 2004].

De acordo com Nicholson, 1995, Robert Froad é tido como inventor do primeiro material de fricção, em 1897. Froad inventou um material à base de algodão impregnado com betume, que foi largamente utilizado em sistemas de freio de carroças e nos primeiros automóveis.

No começo da década de 1920, foram desenvolvidos os materiais de fricção moldados, à base de asbestos. As fibras de asbesto foram utilizadas largamente até a década de 1990 para produção de materiais de fricção, especialmente para lonas de freio para sistemas lona/tambor destinados a veículos pesados, pois proporcionam propriedades mecânicas, térmicas e tribológicas muito interessantes a um custo bastante viável. Porém, a descoberta de malefícios

causados por este material – a asbestose – acarretou em um movimento de proibição da utilização desta matéria-prima, que se iniciou na Europa na década de 1980 e ainda está se consolidando atualmente em países como o Brasil e Índia.

Na década de 1950, foram desenvolvidos os primeiros materiais de fricção ditos “metálicos”, que continham matérias-primas metálicas (além de outras cerâmicas e poliméricas), como a fibra de aço, dispersas numa matriz de resina.

Atualmente, os desenvolvimentos de novos materiais de fricção têm consolidado a tecnologia de materiais “asbestos-free”, pelas razões já colocadas acima. Tratando-se de materiais de fricção para freios a disco, os mesmos são classificados, basicamente, em quatro grupos, de acordo com o conceito de matérias-primas utilizadas no seu desenvolvimento: *Semi-metallic*, *Low Steel*, NAO e *Ceramic* [Nicholson, 1995; Matozo, 2006].

Os materiais denominados *Semi-metallic* são materiais que contêm alta quantidade de metais ferrosos em sua composição, geralmente aço, em torno de 50% em massa. Materiais *Low Steel* também contêm matérias-primas ferrosas, porém em quantidade menor do que 15% em massa. O termo NAO é um termo geral para materiais de fricção não-asbestos que contêm matérias-primas metálicas não ferrosas em sua composição, como cobre e latão. Materiais denominados *Ceramic* são materiais de fricção que não levam em sua composição matérias-primas metálicas. Em seu lugar são utilizadas matérias-primas de outras classes, como fibras cerâmicas, por exemplo.

Esta classificação é um tanto subjetiva e passível de questionamento, visto que todas as classes acima colocadas tem muito mais pontos em comum do que pontos de divergência. Ambas utilizam componentes de atrito e lubrificação, ligantes e cargas semelhantes. As denominações surgiram a partir do mercado, como alternativa para diferenciação de concepção de materiais de fricção e, de certa forma, como recurso de *marketing*, frente a vários cenários de vantagens e desvantagens apresentadas pelas diferentes classes de materiais de fricção.

Para materiais de fricção destinados aos sistemas de freio lona-tambor, a diferenciação utilizada apenas separa os materiais ainda fabricados com fibras de asbestos dos materiais asbestos-free.

3.4.1. Matérias-Primas e Funcionalidades

Atualmente, os materiais de fricção destinados a aplicações no mercado automotivo são desenvolvidos sob a concepção de materiais compósitos, contendo, normalmente, mais de 15 matérias-primas diferentes em sua composição. São utilizadas matérias-primas de todas as classes da Ciência dos Materiais: cerâmicas, metálicas e poliméricas. As diferentes matérias-primas utilizadas possuem variadas funcionalidades no *design* do material compósito. Em termos de funcionalidade, as mesmas são agrupadas, tradicionalmente, em cinco grupos distintos: ligantes, atritantes, lubrificantes, cargas e fibras. É comum o caso de uma matéria-prima assumir características condizentes com mais do que um grupo acima especificado, gerando certa ambigüidade na definição do papel da matéria-prima na composição do material de atrito [Nicholson, 1995; Casaril, 2004; Menetrier, 2006].

3.4.1.1. Ligantes

São resinas poliméricas, normalmente termofixos, que têm a função de matriz no material de fricção, ou seja, de manter agregados todos os outros componentes do material. As resinas fenólicas são largamente empregadas no desenvolvimento de materiais de fricção, por apresentarem a melhor combinação de propriedades mecânicas e térmicas, indispensáveis para esta aplicação.

O incremento dos requisitos para os materiais de fricção tem sido consideravelmente incrementados a partir da década de 1980, o que levou à similares demandas no que compete aos ligantes utilizados em sua estrutura. Em serviço, a energia cinética do veículo convertida em calor durante a frenagem podem conduzir à picos de temperatura extremamente altos, da ordem de 800°C na superfície do material de fricção. Nesse contexto, a principal função do ligante é manter a consistência estrutural do material de fricção. A resina fenólica pode prover ao material a resistência mecânica necessária à manutenção da consistência estrutural, bem como oferecer a mais alta resistência ao desgaste quando o material de fricção é submetido à situações de abrasão, combinadas com longos intervalos de tempo em alta temperatura [Gardziella, 2000].

3.4.1.2. Atritantes

São geralmente materiais cerâmicos, de alta dureza e fragilidade, empregados na forma de pó, com a função principal de elevar o coeficiente de atrito do material. Óxido de

alumínio, silicato de zircônia e óxido de cromo são materiais comumente empregados para esta função.

3.4.1.3. Lubrificantes

São comumente empregados materiais de dureza extremamente baixa e estrutura lamelar, visto que a razão do emprego dos mesmos é regular e estabilizar o coeficiente de atrito obtido com atritantes, além de favorecer mecanismos tribológicos que diminuem o desgaste do material. São comumente utilizados grafites, coques, talcos e sulfetos metálicos.

Um sistema de lubrificantes e atritantes bem elaborado é imprescindível para o bom desempenho do material de fricção, tanto em relação à eficiência de frenagem quanto no que diz respeito à sua durabilidade.

3.4.1.4. Cargas

São materiais empregados em grande quantidade na composição de materiais de atrito, visto que têm a função principal de preenchimento. São requisitos importantes para estes materiais a estabilidade térmica e mecânica, e dureza intermediária, a fim de não influenciar significativamente no sistema de atritantes/lubrificantes. São exemplos de materiais comumente empregados como cargas o sulfato de bário, o carbonato de cálcio e o caulim.

Os elastômeros são empregados em materiais de fricção com objetivo primário de diminuição da rigidez dos mesmos. Além disso, comumente são elaborados compostos intermediários, a base de borracha e outras matérias-primas, pré-homogeneizadas e adicionadas posteriormente à composição final. Elastômeros normalmente utilizados em materiais de fricção são SBR, NBR, borracha natural e, comumente é empregado, também, o resíduo reciclado moído de pneumáticos, adicionado na forma de grânulos.

3.4.1.5. Fibras

Para incremento da resistência mecânica do material de atrito são empregadas fibras, normalmente picadas, de pequeno comprimento. Fibra de vidro, fibra de aramida e fibras metálicas são matérias-primas largamente empregadas em composições de materiais de fricção, todas com comprimento da ordem de milímetro. Em termos de rigidez, estas fibras influenciam o módulo de elasticidade do composto de fricção da mesma forma que os materiais particulados, e assim podem ser tratados de forma a simplificar o projeto. Isto pode

ser devido a alguns aspectos geométricos das mesmas, como o fato de as fibras de vidro serem empregadas na forma de feixes com pequena razão de aspecto e altamente desalinhas no compósito.

Para materiais destinados a sistemas de freio pastilhas-disco, são utilizadas comumente fibras de aramida e fibras metálicas (aço, latão, cobre, etc). Materiais destinados a sistemas de freio lona-tambor empregam, além destas fibras, a fibra de vidro, em larga escala, principalmente para a aplicação em veículos pesados.

3.5. Influência da Rigidez no Desempenho de Materiais de Fricção

A rigidez do material de fricção é propriedade crítica para sua aplicação. Conforme coloca Yuhas *et al.*, 2006, o comportamento de ruído e vibração de sistemas de freio é um problema complexo envolvendo simultaneamente a interação de diversos materiais e numerosas variáveis de *design* do sistema de freio. Muitos pesquisadores de sistemas de freio têm se valido de modelagem e simulações para entender os vários fatores que determinam a *performance* na aplicação. Como *inputs* para modelos de ruído e vibrações, são essenciais dados de módulo de elasticidade, módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson do material de fricção.

Outra característica amplamente utilizada pela indústria automotiva como indicativo da rigidez do material de fricção é o teste conhecido como “Compressibilidade”. O mesmo foi desenvolvido por sistemistas de freio, a fim de caracterizar a rigidez do material de fricção em condições dinâmicas de aplicação, a partir da identificação da influência desta característica do material na ocorrência de ruído e vibrações originadas durante a frenagem. O resultado obtido no teste de “Compressibilidade” é a deflexão do material pela aplicação de carga sobre o mesmo em condições específicas de temperatura e velocidade de carregamento, que simulam condições de aplicação no campo. De acordo com Matozo *et al.*, 2006, o teste de “Compressibilidade” se tornou mundialmente reconhecido como procedimento de caracterização para pastilhas de freio. Seu trabalho demonstra, de acordo com seus resultados, relação entre a “Compressibilidade” e a propensão do material à ocorrência de ruído, como o do tipo Squeal, concordando com outros autores.

Segundo observado por Friedrich, 1986, materiais compósitos de matriz polimérica que apresentam módulo de elasticidade relativamente maior sempre apresentam uma melhor resistência ao desgaste, relativamente, sendo que esta propriedade é uma das mais relevantes do ponto de vista da influência que exerce sobre a resistência ao desgaste do material.

A linha mestre deste trabalho, relativa ao desenvolvimento da modelagem para o módulo de elasticidade para materiais compósitos, com foco em materiais de fricção visa permitir o *design* do módulo de elasticidade do material e, indiretamente, de características críticas de projeto, como as colocadas acima.

4. MODELO

Várias modelagens para a projeção do módulo de elasticidade de materiais compósitos contendo fases dispersas podem ser verificadas na literatura. A utilização de técnicas de simulação numérica [Pal, 2005] e de análise por elementos finitos [Guiot et al, 2006; Marur, 2004] são bastante empregadas na investigação de materiais compósitos.

Neste trabalho, buscou-se o desenvolvimento de um equacionamento matemático simples, com base nas características geométricas e no módulo de elasticidade das diversas matérias-primas empregadas no projeto e fabricação de materiais de fricção. Dessa forma, permite-se uma compreensão e entendimento, por parte do engenheiro que utiliza esta ferramenta, do comportamento mecânico de cada uma das matérias-primas e a sua influência no material compósito resultante.

Foi selecionado, dentre os desenvolvimentos matemáticos existentes para projeção do módulo de elasticidade de materiais compósitos particulados, o demonstrado por Al-Qureshi, 1988. A partir do mesmo, foram propostas três modificações para que a modelagem matemática fosse adequada aos materiais compósitos de fricção.

4.1. Revisão do Modelo de Al-Qureshi

O desenvolvimento matemático base apresentado por Al-Qureshi, 1988 utiliza os conceitos da Micromecânica dos materiais compósitos para determinar o módulo de elasticidade de um material contendo uma inclusão, representada genericamente pela Figura 4.1.

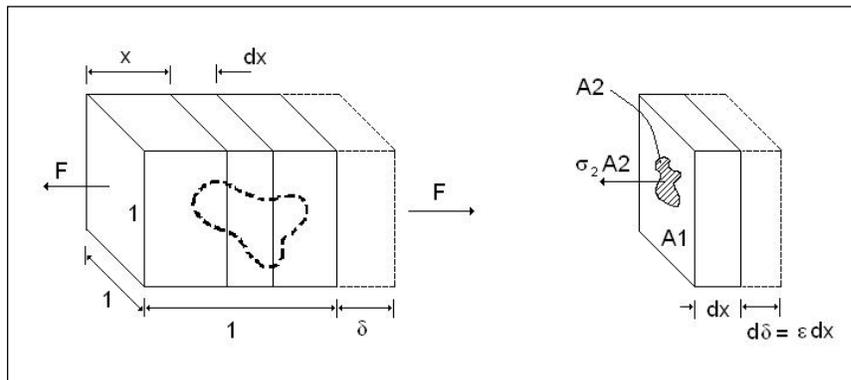


Figura 4.1 – Reforço particulado num sólido [Al-Qureshi, 1988].

A Figura 4.1 apresenta um material compósito contendo uma inclusão e submetido a um carregamento de tração uniaxial. Toma-se inicialmente a relação mostrada na Equação 4.1, embasada na Lei de Hooke para comportamento linear dos materiais sob deformação elástica, como verdadeira:

$$E = \frac{F}{\delta} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{E} = \frac{\delta}{F} \quad \text{Equação 4.1}$$

Diferenciando a Equação 4.1, e considerando “ F ” uma força constante aplicada à face do sólido, conforme Figura 4.1, tem-se que:

$$d\left(\frac{\delta}{F}\right) = \frac{d\left(\frac{1}{E}\right)}{dx} dx = \frac{1}{E} \quad \text{Equação 4.2}$$

Integrando a relação apresentada na Equação 4.2, chega-se a:

$$\int_0^1 \frac{d\delta}{F} = \int_0^1 \frac{d\left(\frac{1}{E}\right)}{dx} dx = \frac{1}{E} \quad \text{Equação 4.3}$$

Considerando que o material sofre pequenas deformações, então:

$$d\delta = \varepsilon dx \quad \text{Equação 4.4}$$

Substituindo a Equação 4.4 na Equação 4.3, resulta:

$$\int_0^1 \frac{\varepsilon dx}{F} = \frac{1}{E} \quad \text{Equação 4.5}$$

A carga total aplicada sobre o material compósito é igual a soma das cargas suportadas pelos seus constituintes, de forma que:

$$F = \sigma_1 A_1 + \sigma_2 A_2 \quad \text{Equação 4.6}$$

Onde $A_2 = A_2(x)$ e $A_1 = (1 - A_2(x))$. Assim, assumindo que os constituintes apresentam a mesma deformação, e partindo do comportamento elástico dos compósitos, tem-se que:

$$\sigma_1 = E_1 \varepsilon \quad \text{e} \quad \sigma_2 = E_2 \varepsilon \quad \text{Equação 4.7}$$

Substituindo a Equação 4.7 na Equação 4.6, tem-se:

$$F = E_2 \varepsilon A_2(x) + E_1 \varepsilon (1 - A_2(x)) \quad \text{Equação 4.8}$$

Substituindo a Equação 4.8 na Equação 4.5, e integrando para obter o módulo aparente, chega-se à seguinte relação:

$$\frac{1}{E} = \int_0^1 \frac{\varepsilon dx}{\varepsilon [E_2 A_2(x) + E_1 (1 - A_2(x))]} \quad \text{Equação 4.9}$$

Considerando a relação $A = A_1 + A_2(x) = 1$:

$$\frac{1}{E} = \int_0^1 \frac{dx}{E_1 + (E_2 - E_1) A_2(x)} \quad \text{Equação 4.10}$$

Agora, colocando os subscritos adequados para matriz e fase dispersa, tem-se que:

$$\frac{1}{E} = \int_0^1 \frac{dx}{E_m + (E_d - E_m) A_d(x)} \quad \text{Equação 4.11}$$

A Figura 4.2 representa um material compósito contendo uma inclusão, da mesma forma que a Figura 4.1. Porém, a inclusão, no caso da Figura 4.2 é considerada cúbica, a fim de tornar mais adequada as considerações para derivações e integrações que o desenvolvimento matemático prevê.

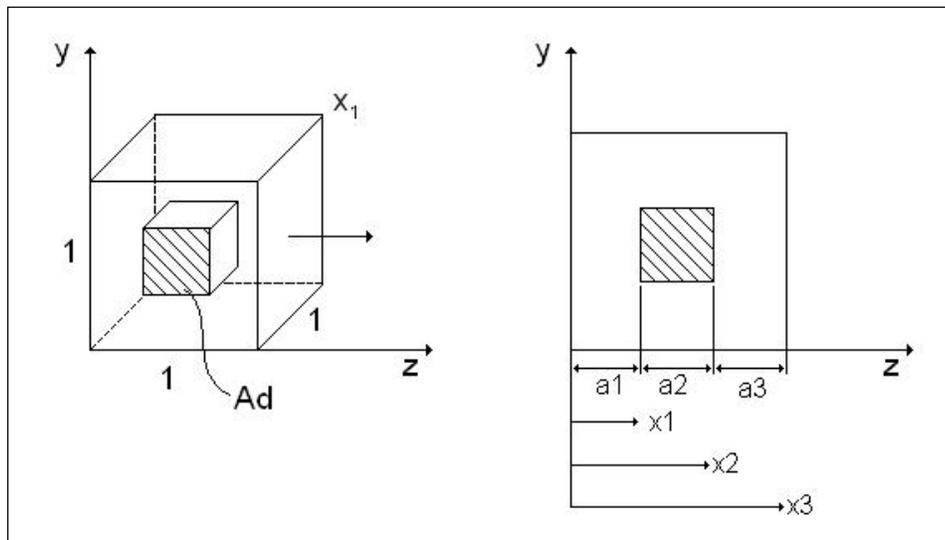


Figura 4.2 – representação cúbica da inclusão contida no material compósito [Al-Qureshi, 1988].

A Equação 4.1 pode ser reescrita considerando os limites de integração de acordo com a Figura 4.2:

$$\frac{1}{E} = \int_0^{x_1} \frac{dx}{E_m} + \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{E_m + (E_d - E_m)A_2(x)} + \int_{x_2}^{x_3} \frac{dx}{E_m} \quad \text{Equação 4.12}$$

A primeira e a terceira parte do cubo da Figura 4.2 contêm resina, enquanto a parte intermediária contém a partícula cúbica. Note que na região compreendida entre x_1 e x_2 , $A_d = a_2^2$ e nas regiões compreendidas entre 0 e x_1 , e x_2 e x_3 , $A_d = 0$.

Pela integração da Equação 4.12, tem-se:

$$\frac{1}{E} = \frac{a_1}{E_m} + \frac{a_2}{E_m + (E_d - E_m)a_2^2} + \frac{a_3}{E_m} \quad \text{Equação 4.13}$$

Rearranjando e simplificando a Equação 4.13, tem-se que:

$$\frac{E_m}{E} = \frac{(a_1 + a_2 + a_3)E_m + (a_1 + a_3)(E_d - E_m)a_2^2}{E_m + (E_d - E_m)a_2^2} \quad \text{Equação 4.14}$$

De acordo com a Figura 4.2:

$$a_1 + a_2 + a_3 = 1 \quad \text{ou} \quad a_1 + a_3 = 1 - a_2 \quad \text{Equação 4.15}$$

Substituindo a Equação 4.15 na Equação 4.14, tem-se que:

$$\frac{E_m}{E} = \frac{E_m + (E_d - E_m)(1 - a_2)a_2^2}{E_m + (E_d - E_m)a_2^2} \quad \text{Equação 4.16}$$

Fazendo as seguintes considerações geométricas em relação à fração volumétrica da fase dispersa:

$$v_d = a_2^3 \quad \text{ou} \quad a_2^2 = v_d^{2/3} \quad \text{Equação 4.17}$$

Finalmente, pela substituição de a_2 como função de v_d , a Equação 4.16 pode ser expressa como:

$$\frac{E}{E_m} = \frac{E_m + (E_d - E_m)v_d^{2/3}}{E_m + (E_d - E_m)v_d^{2/3}\left(1 - v_d^{1/3}\right)} \quad \text{Equação 4.18}$$

A Equação 4.18 é o resultado do desenvolvimento matemático demonstrado por Al-Qureshi, 1988, para projeção do módulo de elasticidade de um material compósito contendo uma fase dispersa particulada. Não há dúvida em relação à importância do mesmo para a área de materiais compósitos. No entanto, é interessante ressaltar os aspectos particulares das considerações feitas para se chegar a este modelo, e que podem, de certa forma representar limitações durante a utilização do mesmo. O modelo prevê a adição de apenas uma fase dispersa no material compósito. Além disso, considera, para os efeitos de cálculo, que as partículas dispersas na matriz possuem geometria cúbica.

Tratando-se de materiais compósitos particulados, em muitos casos, especialmente no campo de materiais de fricção, estas considerações divergem da realidade, pois, como já observado, os materiais de fricção apresentam composições que normalmente englobam mais de quinze fases dispersas na matriz termofixa. Além disso, as matérias-primas empregadas apresentam geometrias variadas, normalmente irregulares.

Para adequar o modelo à utilização em projeto de materiais compósitos particulados, com foco em materiais de fricção, são propostas alterações, as quais estão descritas a seguir.

4.2. Modificações Propostas ao Modelo

4.2.1. Quanto ao Número de Fases Dispersas

Foi necessário modificar o modelo demonstrado por Al-Qureshi, 1988 (Equação 4.18), para estimar adequadamente o módulo de elasticidade de materiais compósitos com várias fases dispersas. Para tal, foi necessário introduzir no termo referente ao módulo de elasticidade da fase dispersa uma Lei da Mistura simples a fim de considerar os valores desta propriedade para todas as fases dispersas, que contribuem para o módulo de elasticidade do material compósito final. Dessa forma chega-se à seguinte relação (Equação 4.19).

$$\frac{E}{E_m} = \frac{E_m + \left(\left(\sum_{i=1}^n \frac{v_i E_i}{v_d} \right) - E_m \right) v_d^{2/3}}{E_m + \left(\left(\sum_{i=1}^n \frac{v_i E_i}{v_d} \right) - E_m \right) v_d^{2/3} \left(1 - v_d^{1/3} \right)}$$

Equação 4.19

4.2.2. Quanto à Forma das Partículas Dispersas

As matérias-primas empregadas como fases dispersas no material compósito geralmente apresentam geometria irregular, por serem originárias diretamente do processo de mineração e moagem. Devido à irregularidade geométrica, a distorção que elas acarretam no perfil de tensões que cargas externas provocam ao serem aplicadas ao componente de material compósito difere do perfil de tensões ocasionado por fases de geometria esférica. Conseqüentemente, as propriedades mecânicas, entre elas o módulo de elasticidade, são modificadas. Para efeito de equacionamento, neste caso, do módulo de elasticidade do material compósito, deve ser considerado um fator de correção de geometria a ser incluído no modelamento.

O fator de forma (α) é um auxiliar muito utilizado na Mecânica das partículas na área da Metalurgia do Pó [Casaril *et al.*, 2007]. O mesmo relaciona a forma das partículas dispersas a formas regulares (cubos, esferas, etc.) e é empregado de forma a corrigir as perdas não previstas no desenvolvimento matemático do modelo, devido à geometria não cúbica das partículas.

Considerando agora a Figura 4.3, a qual apresenta uma partícula de formato irregular aleatório.

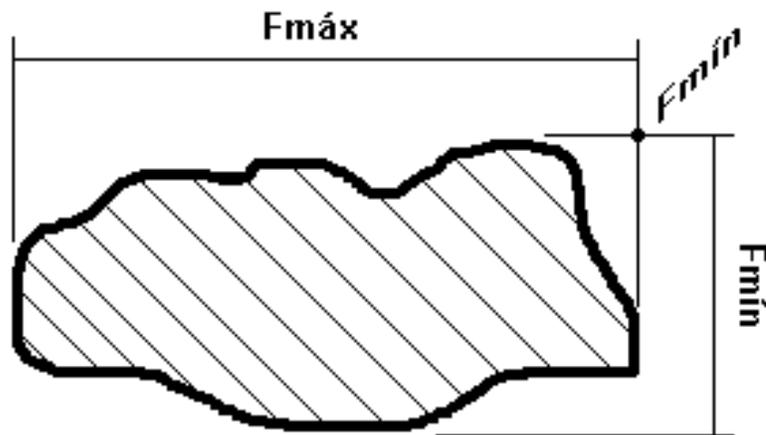


Figura 4.3 – Partícula de formato irregular aleatório.

Para dedução do fator de forma tridimensional aplicado a esta partícula, inicialmente faz-se uma regressão geométrica para um formato simples: cúbico ou esférico. Adotando o formato esférico, que já foi utilizado com sucesso por outros autores [Ahmed *et al.*, 1990; Mital *et al.*, 1996], inicialmente estima-se um círculo de área equivalente à da partícula considerada. A Figura 4.4 apresenta o círculo equivalente.

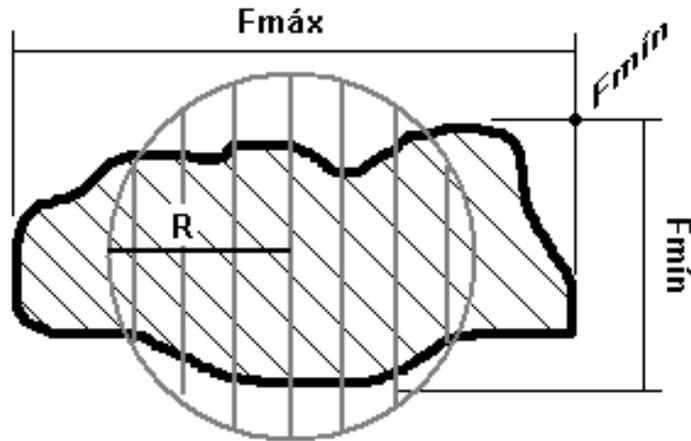


Figura 4.4 – Círculo de área equivalente à da partícula em consideração.

Através da área do círculo equivalente, pode-se estimar o raio do mesmo através da relação apresentada na Equação 4.20.

$$A_{total} = \pi R^2 \therefore R = \sqrt{\frac{A_{total}}{\pi}} \quad \text{Equação 4.20}$$

A determinação do fator de forma se dá através da relação entre o volume da esfera equivalente e o volume do paralelepípedo que contém a partícula. O volume da esfera equivalente é obtido através do seu raio, conforme Equação 4.21.

$$V_{esfera} = \frac{4\pi R^3}{3} = \frac{4A_{total}^{3/2}}{3\pi^{1/2}} \quad \text{Equação 4.21}$$

O volume do paralelepípedo que contém a partícula é calculado através dos valores de $Fmáx$ e $Fmín$, conforme ilustrado na Figura 4.3. Como a medida é realizada em duas

dimensões, a terceira dimensão, de profundidade, foi admitida como sendo, também, igual ao $F_{mín}$ mensurado.

$$V_{paralelepipedo} = F_{máx} \cdot F_{mín}^2 \quad \text{Equação 4.22}$$

A Equação 4.23 apresenta o fator de forma proposto.

$$\alpha = \frac{V_{esfera}}{V_{paralelepipedo}} = \frac{4A_{total}^{3/2}}{3\pi^{1/2}F_{máx}F_{mín}^2} \quad \text{Equação 4.23}$$

Incluindo este importante fator nos termos que englobam os módulos de elasticidade das fases dispersas, tem-se a relação que segue:

$$\frac{E}{E_m} = \frac{E_m + \left(\left(\sum_{i=1}^n \frac{v_i E_i \alpha_i}{v_d} \right) - E_m \right) v_d^{2/3}}{E_m + \left(\left(\sum_{i=1}^n \frac{v_i E_i \alpha_i}{v_d} \right) - E_m \right) v_d^{2/3} \left(1 - v_d^{1/3} \right)} \quad \text{Equação 4.24}$$

4.2.3. Quanto à Presença de Fases Dispersas Viscoelásticas

O emprego de matérias-primas com comportamento mecânico viscoelástico ocasiona variações na rigidez do material, e por consequência no valor do módulo de elasticidade do mesmo, que diferem do comportamento elástico de metais ou cerâmicos, por exemplo.

Conforme apresentado por Ahmed *et al.*, 1990, a Equação de Einstein para estimar a viscosidade para suspensões de inclusões esféricas rígidas há muito é aplicada com sucesso para descrever o módulo de elasticidade e módulo de cisalhamento para inclusões rígidas contidas em matrizes não rígidas.

$$G_c = G_m(1 + 2,5v_p) \quad \text{Equação 4.25}$$

Onde G é o módulo de cisalhamento, c e m se referem ao composto e à matriz, respectivamente. A fração volumétrica da fase particulada é representada por v_p . Essa correlação se mostrou eficiente para baixas concentrações de cargas particuladas. Isto porque ao incrementar a fração volumétrica de cargas particuladas os perfis de deformação ao que cercam as partículas começam a interagir devido à proximidade.

Ainda de acordo com a revisão apresentada por Ahmed, foi proposto por Mooney que o comportamento de incremento da rigidez de uma matriz não rígida, ocasionado por particulados rígidos, obedece um comportamento não linear, e sim exponencial.

$$G_c = G_m e^{2,5v_p} \quad \text{Equação 4.26}$$

A Equação 4.26, proposta por Mooney, concorda com a Equação 4.25, proposta por Einstein, para frações volumétricas pequenas. Além disso, mostrou-se mais eficiente para grandes frações volumétricas de partículas. Mooney ainda complementou esta correlação considerando fator S (crowding factor).

Para o caso inverso, ou seja, materiais com matriz rígida contendo fases dispersas viscoelásticas, como os materiais de fricção, é válido admitir que a modificação do módulo de elasticidade também obedeça um comportamento exponencial, porém apresentando um decaimento do mesmo ao invés de um incremento.

Propõe-se, neste trabalho, que a correlação exponencial proposta por Mooney para descrever o incremento da rigidez de um compósito de matriz viscoelástica, causado por particulados rígidos, pode ser aplicado de forma inversa (exponencial negativa) para descrever o decaimento do módulo de elasticidade de um compósito de matriz rígida, contendo uma fração volumétrica de fase dispersa viscoelástica (v_{ve}).

Aplicando uma correlação inversa a de Mooney à Equação 4.24, obtemos a Equação 4.27.

$$E = E_m \left(\frac{E_m + \left(\left(\sum_{i=1}^n \frac{v_i E_i \alpha_i}{v_d} \right) - E_m \right) v_d^{2/3}}{E_m + \left(\left(\sum_{i=1}^n \frac{v_i E_i \alpha_i}{v_d} \right) - E_m \right) v_d^{2/3} \left(1 - v_d^{1/3} \right)} \right) e^{-2,5v_{ve}} \quad \text{Equação 4.27}$$

5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A Figura 5.1 apresenta o procedimento experimental adotado neste trabalho.

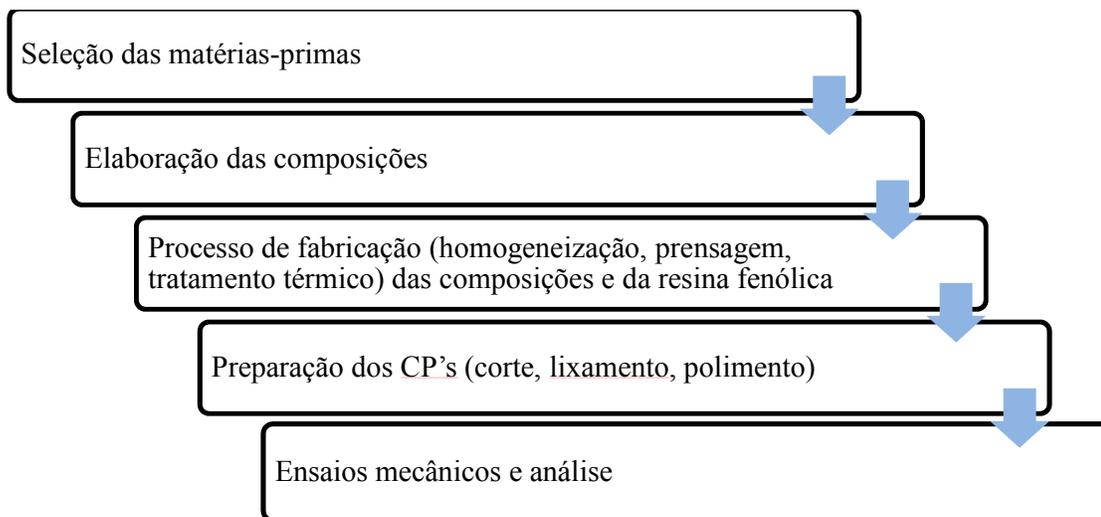


Figura 5.1 – Sequência do procedimento experimental adotado no trabalho.

5.1. Matérias-Primas e Composições

Para realização dos testes mecânicos de validação do modelo teórico proposto, foram fabricados oito materiais de composição variada. As matérias-primas utilizadas foram resina fenólica em pó, silicato de zircônio, grafite natural, pó de borracha reciclada, fibra de vidro picada e sulfato de bário. A Figura 5.2 mostra o aspecto de três matérias-primas utilizadas na confecção dos compósitos.



Figura 5.2 – Aspecto visual da fibra de vidro (à esq.), da resina fenólica (à dir.) e do silicato de zircônio (acima) utilizados na produção dos compósitos.

As composições dos materiais compósitos testados estão explicitadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Composições dos materiais compósitos produzidos e avaliados para teste do modelo teórico.

Fração volumétrica dos componentes						
Material	Resina	Silicato de Zircônio	Grafite	Pó de Borracha	Fibra de Vidro	Sulfato de Bário
M1	0,40	0,15	0,15	0	0,15	0,15
M2	0,32	0,17	0,17	0	0,17	0,17
M3	0,40	0,20	0,20	0	0	0,20
M4	0,32	0,24	0,24	0	0	0,20
M5	0,40	0,15	0	0,15	0,15	0,15
M6	0,40	0,20	0	0,25	0	0,15
M7	0,40	0,20	0	0,35	0	0,05
M8	0,40	0,10	0	0,45	0	0,05

O módulo de elasticidade e outras informações de interesse das matérias-primas são apresentados na Tabela 5.2. Pela sua influência na estimativa teórica do modelo (Equação 4.27), o módulo de elasticidade da resina fenólica foi determinado experimentalmente já que

os valores encontrados na literatura [Callister, 2000] variam significativamente. Isto porque as propriedades mecânicas da resina fenólica dependem não apenas da sua classe, aditivos, agentes de cura e aceleração, mas também dos parâmetros de fabricação, tais como tempo e temperatura de prensa, e processo de tratamento térmico de pós-cura.

Para caracterização das propriedades mecânicas da resina fenólica, principalmente o módulo de elasticidade, corpos-de-prova de resina pura foram produzidos através do mesmo processo de fabricação pelo qual foram produzidos os corpos-de-prova dos compósitos avaliados, conforme descrito na seção 5.2. A metodologia utilizada para a determinação do módulo de elasticidade da resina fenólica é a mesma empregada na determinação do módulo de elasticidade dos materiais compósitos, e é descrita na seção 5.3.

Tabela 5.2 – Informações de interesse sobre as matérias-primas utilizadas nas composições testadas.

	Módulo de Elasticidade	Fabricante	Observações
Resina Fenólica	5,3 GPa*	Reichhold	Tempo cura: 34 s Teor de Hexa: 8,5% Fluidez: 37 mm Classe: Novolaka
Silicato de Zircônia	304 GPa**	Minasolo	Tamanho de partícula: <45 µm
Grafite	7 GPa**	Extrativa	Teor de cinzas: <10% Tamanho de partícula: <100 µm
Pó de Borracha	0,008 GPa**	Engisul	Tamanho de partícula: <400 µm
Fibra de Vidro	72,5 GPa**	Owens Corning do Brasil	Diâmetro filamento: 17 µm Comprimento: 3,2 mm Nº filamentos/feixe: 200 Fator de alinhamento β : ~0,30***
Sulfato de Bário	50 GPa**	Química Geral do Nordeste	Tamanho de partícula: <45 µm

* Valor experimental obtido pela metodologia descrita na seção 5.1

** Valores obtidos na literatura

*** Foi demonstrado em trabalhos anteriores [6, 10, 30] que para materiais compósitos de fricção, o valor comum de β é cerca de 0,30.

5.2. Fabricação dos Materiais Compósitos

Para validação do equacionamento proposto na modelagem do módulo de elasticidade, foram fabricados diferentes materiais compósitos, seguindo a concepção de materiais de fricção destinados à fabricação de lonas de freio para sistemas tambor/lona, aplicadas a veículos pesados.

Também foi necessário realizar a caracterização do módulo de elasticidade da resina fenólica, visto que esta é uma propriedade de entrada do modelo. Esta necessidade surgiu pelo fato de as propriedades mecânicas da resina fenólica serem função da sua composição fenol/formaldeído e também dos parâmetros do processo de moldagem a quente ao qual a resina foi submetido. Desta forma, a fim de obter o valor correto do módulo de elasticidade da resina fenólica, peças de resina fenólica pura também foram fabricadas conforme o processo de fabricação definido para os materiais compósitos.

O processo de fabricação utilizado para produção dos materiais compósitos e da resina fenólica é semelhante ao processo empregado na produção de lonas de freio para veículos pesados. Consiste de três etapas básicas: homogeneização, compactação a quente e tratamento térmico de pós-cura.

5.2.1. Homogeneização

A homogeneização dos materiais compósitos foi feita em moinho de pás, mostrado na Figura 5.3. O moinho possui uma pá de homogeneização e um rotor “intensificador”.



Figura 5.3 – Moinho utilizado na etapa de homogeneização.

A pá de homogeneização é fixa. O contêiner gira com frequência de 72 rpm, e o intensificador com frequência de 1375 rpm. O processo de homogeneização é feito na seguinte sequência:

- i) Todas as matérias-primas são colocadas na cuba;
- ii) 5 minutos com a cuba em movimento (72 rpm) e intensificador desligado;
- iii) 20 segundos com a cuba e o intensificador ligados.

O intensificador é muito importante para a homogeneização do material. Porém, o mesmo provoca a abertura dos feixes de fibra de vidro, se elas forem expostas durante muito tempo.

5.2.2. Compactação a Quente

A etapa de compactação a quente foi realizada a 160°C, com pressão de 5 MPa, num tempo total de prensa de 12 minutos subdivididos da seguinte forma: 14 ciclos (20 segundos sob pressão/10 segundos de degasagem), totalizando 7 minutos, mais 5 minutos sob pressão.

5.2.3. Tratamento Térmico

Após a etapa de compactação a quente, as placas dos materiais compósitos e de resina fenólica pura foram submetidas ao processo de tratamento térmico, para consolidação da cura da resina e estabilização do material. O processo de tratamento térmico foi realizado em estufa, com tempo total de 4 horas e 30 minutos. A sequência do processo começa pelo aquecimento da estufa da temperatura ambiente até 160°C com taxa de aquecimento constante. Esta primeira etapa tem duração de 3 horas e 30 minutos. Em seguida, o material é mantido em isoterma de 160°C por 1 hora em estufa elétrica.

5.3. Determinação Experimental do Módulo de Elasticidade

O método de avaliação do módulo de elasticidade para caracterização da resina fenólica e dos materiais compósitos produzidos foi o ensaio de flexão a 3-pontos. O ensaio de flexão é consagrado para avaliação das propriedades mecânicas de materiais com característica frágil [Richerson, 1992]. Os materiais compósitos de fricção podem ser

classificados genericamente como frágeis, por apresentarem pequena deformação até a ruptura. Esta característica é conferida, principalmente, pela matriz de resina fenólica, por ela em si, apresentar uma extrema fragilidade, como é característica dos termofixos. Materiais frágeis têm sua resistência mecânica condicionada à presença de defeitos como trincas, que atuam como concentradores de tensão. Por este motivo, o teste de tração simples é menos recomendado do que o teste de resistência à flexão.

Os ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM D790-92, 1992, Método de teste I, segundo procedimento A. As dimensões do corpo-de-prova estão explicitadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Dimensões dos corpos de prova e parâmetros do ensaio de flexão a 3-pontos utilizados no trabalho.

Comprimento (mm)	96
Espessura (mm)	4,8
Largura (mm)	13
Distância entre apoios (mm)	80
Velocidade de deflexão (mm/min)	2
Número de amostras ensaiadas de cada material	10
Número de amostras ensaiadas de resina fenólica	5

As dimensões dos corpos-de-prova foram definidas de acordo com recomendações da norma ASTM D790-92, a fim de garantir uma razão entre a distância entre apoios (*span*) e espessura maior do que 16, para minimizar a indução de tensões de cisalhamento interno no corpo-de-prova.

O módulo de elasticidade resultante no teste de resistência mecânica à flexão a 3-pontos foi calculado pela Equação 5.1.

$$E = \frac{L^3 n}{4bd^4} \quad \text{Equação 5.1}$$

Onde E é o módulo de elasticidade (GPa), L é a distância entre apoios (mm), n é o coeficiente da curva força-deslocamento na porção linear da mesma (N/mm), b é a largura do corpo-de-prova (mm) e d é a espessura do mesmo (mm).

A Equação 5.2 foi utilizada para o cálculo da resistência mecânica à flexão 3-pontos.

$$\sigma = \frac{1,5LP}{bd^2} \quad \text{Equação 5.2}$$

onde P é a carga à qual o corpo-de-prova é submetido. A deformação ε é fornecida pela máquina de ensaios.

5.4. Fator de Forma

O equacionamento do módulo de elasticidade apresentado no modelo teórico proposto neste trabalho engloba um aspecto geométrico, relacionado ao formato de partícula das matérias-primas empregadas na composição do material compósito. As condições admitidas no desdobramento teórico inicialmente consideraram partículas com formatos simples (cubos), a fim de permitir o desdobramento matemático do modelo. Para correção destas considerações, foi empregado, conforme demonstrado no modelo, um artifício geométrico, pela introdução de um fator de forma (α) na equação proposta pelo modelo.

O fator de forma é uma característica particular de cada uma das matérias-primas empregadas na fabricação dos materiais compósitos apresentados na seção 5.3. Análise de imagem foi a ferramenta utilizada para mensurar as características necessárias para estimativa do fator de forma.

O equipamento utilizado para coleta das imagens consiste de uma mesa de disposição, onde a amostra a ser analisada é alocada, uma haste para suporte do coletor de imagens e uma câmera fotográfica de alta resolução, que faz a coleta das imagens propriamente dita.

A preparação das amostras das matérias-primas para coleta de imagens é feita com o auxílio de uma Placa de Petry. Uma quantidade da ordem de miligramas de material é dispersa num fluido transparente, numa concentração pequena o suficiente para que não haja interferência entre partículas na análise de imagem. As imagens são coletadas para posterior análise.

A análise das imagens é feita através do *software* RS Image versão 1.9.1 (Roper Scientific Inc.) que possibilitou determinar os dados de interesse: Ferret Máximo, Ferret Mínimo e área de partícula.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Fator de Forma

As Figuras 6.1, 6.2 e 6.3 apresentam imagens coletadas para análise e estimativa do fator de forma das três matérias-primas. Foi utilizado aumento de 300 vezes. Os resultados obtidos, por análise de imagens, do fator de forma de partícula das matérias-primas utilizadas neste trabalho são apresentados na Tabela 6.1.

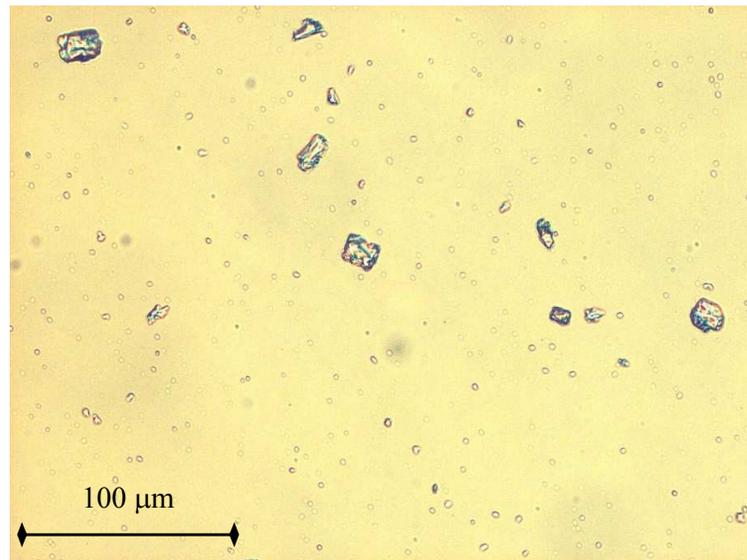


Figura 6.1 – Partículas de sulfato de bário analisadas para estimativa do fator de forma.

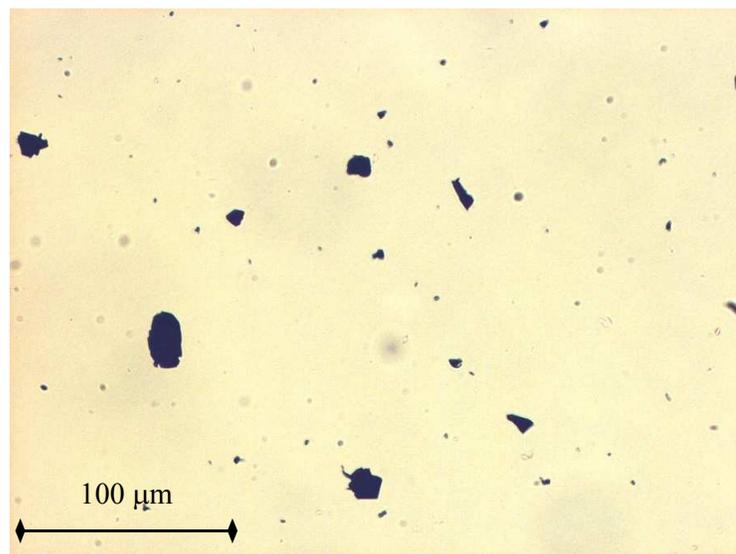


Figura 6.2 – Partículas de grafite analisadas para estimativa do fator de forma.

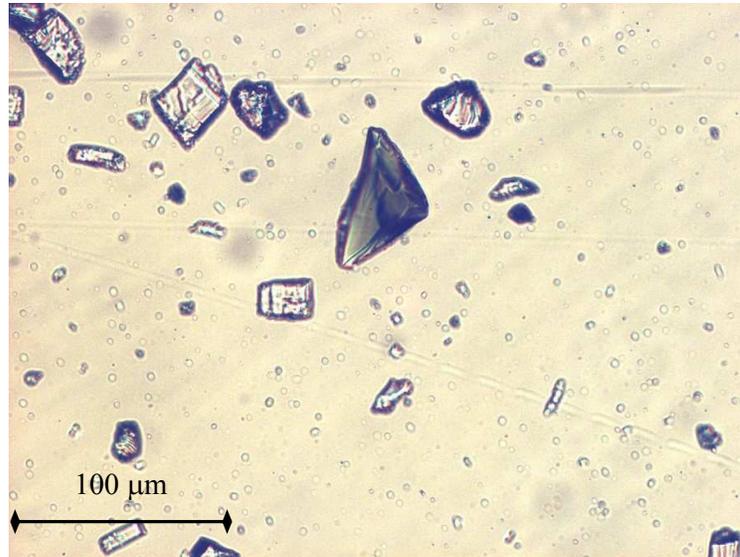


Figura 6.3 – Partículas de silicato de zircônio analisadas para estimativa do fator de forma.

Tabela 6.1 – Resultados das medições do fator de forma para as matérias-primas de interesse.

		Sulfato de Bário	Silicato de Zircônio	Grafite
Fator de	Média	0,48	0,53	0,70
Forma (α)	Desvio Padrão	0,20	0,21	0,18
Nº de partículas analisadas		283	574	207

Os resultados obtidos para o fator de forma se encontram no range da expectativa inicial para este trabalho. Pelo fato de os grades de matérias-primas selecionados para este trabalho serem essencialmente de baixo custo, esperava-se grande desvio-padrão nos valores do fator de forma.

O grande número de partículas avaliadas para cada uma das matérias-primas reforça a confiabilidade dos resultados. O valor do desvio padrão das medidas é consideravelmente alto, o que demonstra a irregularidade geométrica das matérias-primas analisadas.

Pode-se confirmar pelas Figuras 6.1, 6.2 e 6.3, a variação geométrica das matérias-primas empregadas, tanto na distribuição do tamanho de grão quanto no formato das partículas. Muitas das matérias-primas empregadas na fabricação de materiais de fricção, como caulim, carbonato de cálcio e grafite são extraídas diretamente de lavras de mineração, e apenas submetidas ao processo de moagem e secagem. Algumas delas, inclusive, são produtos secundários, resíduos de outros produtos, como o sulfato de bário, que resulta da

flotação do fosfato de cálcio. Este aspecto, por um lado, garante custos competitivos às mesmas, porém, em detrimento da sua qualidade, representada pela variabilidade de suas características.

6.2. Propriedades Mecânicas da Resina Fenólica

Os resultados da determinação do módulo de elasticidade da resina fenólica são apresentados na Tabela 6.2, em conjunto com os resultados de resistência mecânica à flexão e deformação na ruptura.

Tabela 6.2 – Resultados da caracterização da resina fenólica no ensaio de flexão a 3- pontos.

Corpo-de-Prova	σ (MPa)	E (GPa)	ϵ
1	47,95	5,120	0,00937
2	62,42	5,388	0,01159
3	35,67	5,244	0,00680
4	64,73	5,322	0,01216
5	62,74	5,379	0,01166
Média	54,70	5,291	0,01032
Desvio Padrão	12,58	0,111	0,00224

A resina fenólica é um polímero termofixo de alta fragilidade, como observado na literatura [Callister, 2000]. Os resultados da caracterização por flexão a 3-pontos, mostrados na Tabela 6.2 corroboram esta afirmação.

O desvio padrão observado tanto para resistência à ruptura por flexão a 3-pontos quanto para deformação de ruptura são elevados, cerca de 22 a 23%. Isto é ocasionado pelo fato de o material apresentar comportamento frágil e totalmente elástico, concordando com a Lei de Hooke em todo seu perfil de deformação até a ruptura. Conforme pode ser observado na Figura 6.4, ambos os resultados são interdependentes e, de certa forma, são coerentes com resultados observados em outros materiais de comportamento frágil [Richerson, 1992].

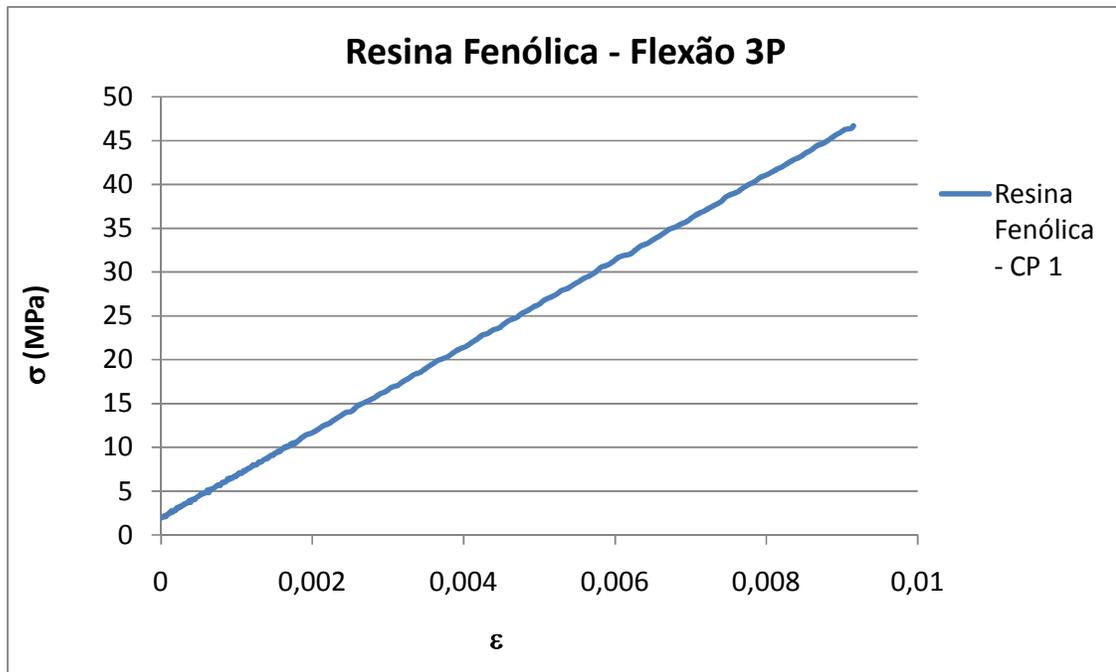


Figura 6.4 – Curva tensão-deformação do corpo-de-prova n^o1 de resina fenólica, resultante do ensaio de flexão a 3-pontos.

Este comportamento frágil suporta fortemente o argumento de que a resistência mecânica da resina fenólica deve ser tratada através dos fundamentos de Mecânica da Fratura para materiais frágeis [Callister, 2000; Richerson, 1992], de forma estatística, como análise de Weibull, por exemplo.

Por outro lado, os resultados obtidos na caracterização da resina fenólica para o módulo de elasticidade são bastante satisfatórios, sendo que o desvio padrão observado é da ordem de 2%. O contraste de variabilidade observado em relação à resistência se deve ao fato de o módulo de elasticidade ser uma propriedade intrinsecamente resultante das interações atômicas e, no caso dos polímeros, moleculares dos materiais [Callister, 2000], não sendo significativamente afetado pela sua fragilidade e defeitos de escala microscópica como trincas e poros resultantes do processo de fabricação.

Além disso, o baixo valor observado para o desvio padrão dos resultados de módulo de elasticidade da resina fenólica evidencia a boa qualidade da preparação dos corpos-de-prova, bem como da correta realização dos ensaios, no que diz respeito ao equipamento, dispositivos e alinhamento de corpo-de-prova e punção durante a aplicação da carga.

6.3. Módulo de Elasticidade dos Materiais Compósitos

A Tabela 6.3 mostra os resultados do módulo de elasticidade dos materiais compósitos testados para validação do equacionamento proposto no modelo. Estão apresentados os valores experimentais, obtidos dos ensaios de flexão a 3-pontos e os valores teóricos, obtidos através da Equação 4.27 e dos valores das características geométricas e propriedades das matérias-primas empregadas na fabricação dos materiais compósitos testados.

Tabela 6.3 – Resultados teóricos e experimentais do módulo de elasticidade dos materiais compósitos testados.

Material	E teórico (GPa)	E experimental		Teórico/experimental Δ (%)
		E (GPa)	Desvio padrão (GPa)	
M1	19,62	17,5	0,43 (2,5%)	+12,4%
M2	21,75	19,6	0,25 (1,3%)	+10,85%
M3	20,97	17,8	0,18 (1,0%)	+17,65%
M4	25,18	21,7	0,86 (4,0%)	+16,02%
M5	10,72	10,33	0,13 (1,25%)	+3,88%
M6	7,76	7,7	0,11 (1,42%)	+0,25%
M7	5,14	4,9	0,22 (4,5%)	+5,50%
M8	3,15	2,8	0,65 (23%)	+12,37%

O desvio padrão encontrado nos resultados experimentais é menor do que 5%, o que permite qualificar os ensaios como de boa reprodutibilidade, em função da preparação dos corpos-de-prova, e observância dos procedimentos previstos na norma técnica adotada. A única exceção é o desvio padrão do material M8, que representa cerca de 23% do valor absoluto.

Pode-se verificar pela Tabela 6.3 que existe uma boa correlação entre os resultados teóricos e experimentais, sendo que a diferença encontrada entre ambos varia de material para material. A maior diferença encontrada entre os valores teórico e experimental diz respeito ao material M3, e é de cerca de 17%. A Figura 6.5 apresenta graficamente o comparativo entre os resultados teóricos do módulo de elasticidade e os resultados experimentais, incluindo o desvio padrão encontrado nos testes.

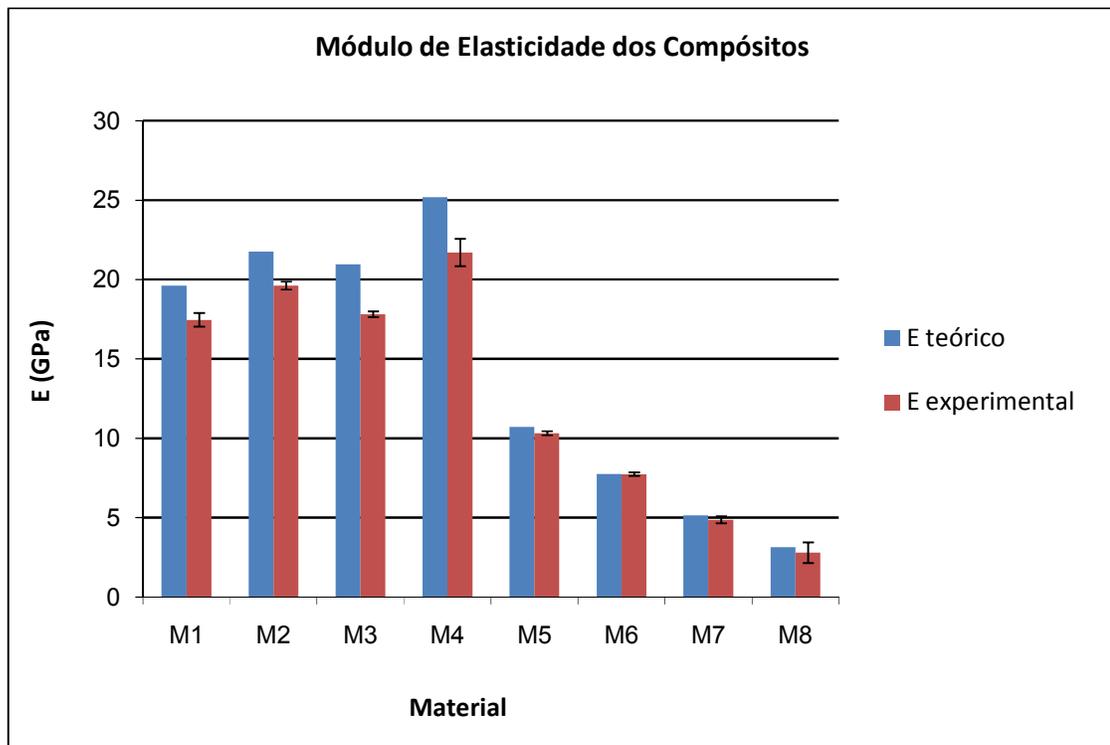


Figura 6.5 – Resultados teóricos e experimentais de módulo de elasticidade dos compósitos testados.

Na Figura 6.6 estão apresentadas, a correlação entre módulo de elasticidade teórico e experimental, e a correlação entre o valor teórico absoluto do módulo de elasticidade e a diferença entre os resultados teóricos e experimentais.

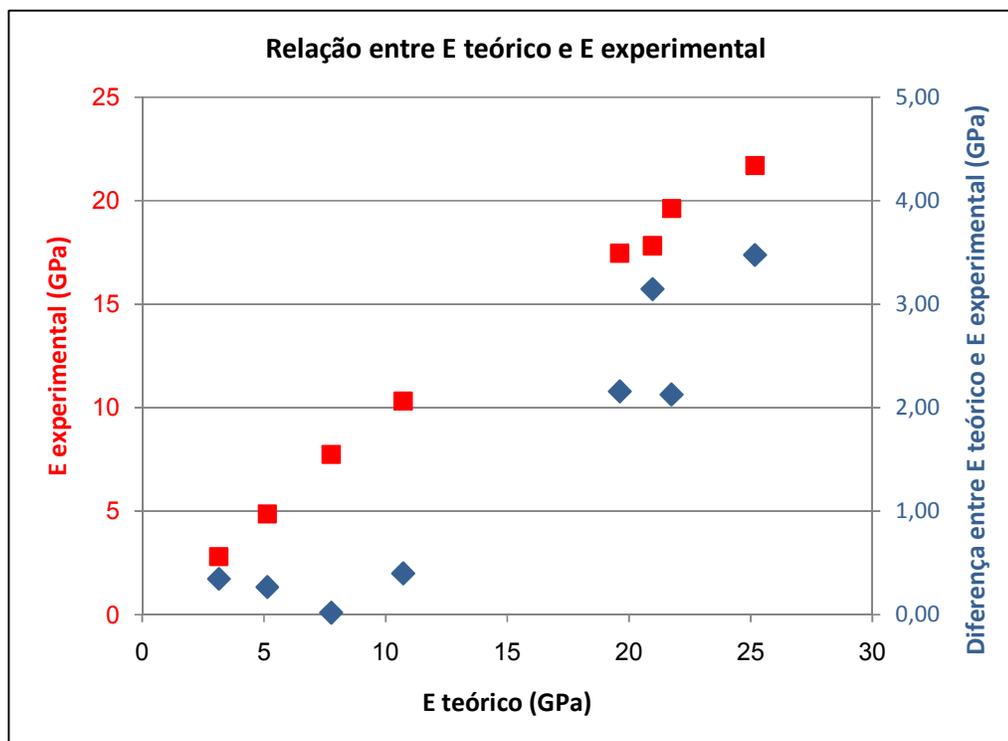


Figura 6.6 – Correlação entre módulo de elasticidade teórico e módulo de elasticidade experimental, e diferenças entre ambos.

Pelos dados mostrados na Tabela 6.3 e nas Figuras 6.5 e 6.6, verifica-se uma melhor correlação entre os valores teórico e experimental para os materiais que apresentam menor módulo de elasticidade. Coincidentemente são os que possuem em sua composição pó de borracha reciclado e não possuem grafite (materiais M5, M6, M7 e M8). Nestes casos, a diferença entre o valor teórico e experimental do módulo de elasticidade está abaixo de 6% em três casos e em 12% no outro caso (material M8), se mostrando altamente satisfatório.

Para os materiais que não contêm pó de borracha reciclado em sua composição, a diferença observada entre os valores teóricos do módulo de elasticidade e os valores experimentais encontrados está entre 12 e 16%, mostrando uma concordância também satisfatória, apesar da diferença maior.

Observa-se que para todas as oito composições avaliadas, os resultados do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente são menores do que os resultados teóricos calculados através do modelo proposto (equação 4.27).

O fato de as composições avaliadas apresentarem uma larga faixa de valores de módulo de elasticidade experimentalmente obtidos, que vai de 2,8 GPa a 21,7 GPa, e mesmo

assim concordarem de forma satisfatória com os resultados teóricos calculados, dá suporte para a afirmação de que as modificações propostas ao modelo base, e que deram origem à Equação 4.27, foram feitas de forma correta.

Apesar da boa concordância verificada entre resultados teóricos e experimentais, é possível incrementar ainda mais a qualidade dos resultados experimentais e, além disso, investigar aspectos que não foram englobados neste trabalho, e que devem ser analisados a fim de refinar o modelo e os resultados experimentais obtidos. As diferenças observadas podem estar associadas à variabilidade das características geométricas das matérias-primas e suas propriedades.

Considerando o desvio padrão da medida de módulo de elasticidade da resina fenólica e sua influência no módulo de elasticidade dos materiais compósitos de fricção avaliados (M1 a M8), obtém-se uma faixa de variação do módulo de elasticidade teórico, apresentada na Tabela 6.4, onde estão apresentados os valores teóricos médios, máximos e mínimos de módulo de elasticidade dos materiais M1 a M8.

Tabela 6.4 – Faixa de variação dos resultados teóricos de módulo de elasticidade dos materiais M1 a M8 devido ao desvio padrão experimental do módulo de elasticidade da resina fenólica.

Material	<i>E</i> teórico (GPa)	E teórico mínimo (GPa)	E teórico máximo (GPa)	Significância da faixa de variação
M1	19,62	19,37	19,86	2,5%
M2	21,75	21,51	21,98	2,2%
M3	20,97	20,68	21,24	2,6%
M4	25,18	24,86	25,48	2,4%
M5	10,72	10,56	10,88	3,0%
M6	7,76	7,63	7,89	3,4%
M7	5,14	5,04	5,23	3,6%
M8	3,15	3,09	3,20	3,7%

Na Figura 6.7 pode-se verificar graficamente a faixa de variação mostrada na Tabela 6.4.

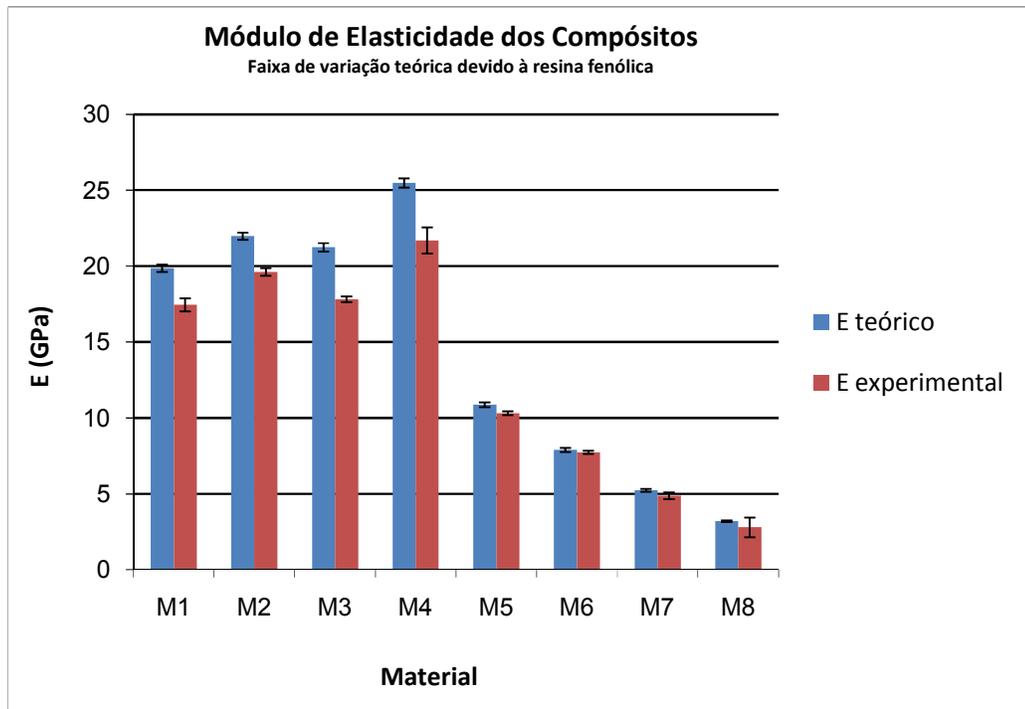


Figura 6.7 – Faixa de variação dos resultados teóricos de módulo de elasticidade dos materiais M1 a M8 devido ao desvio padrão experimental do módulo de elasticidade da resina fenólica.

Os resultados apresentados na Tabela 6.4 e Figura 6.7 mostram que a faixa de variação dos resultados teóricos de módulo de elasticidade dos materiais M1 a M8 são afetados de forma menor pela variação dos resultados experimentais do módulo de elasticidade da resina fenólica, sendo que a maior variação teórica ocasionada foi de 3,66%, para o material M8. Isto permite reiterar novamente o procedimento adequado da caracterização realizada das propriedades mecânicas da resina fenólica. Além disso, evidencia que este parâmetro, que é bastante importante do ponto de vista do modelo (Equação 4.27) foi investigado de forma adequada e que esforços para o melhoramento da caracterização da resina fenólica, visando diminuir a faixa de variação dos resultados proporcionariam resultados pouco eficientes do ponto de vista do refinamento do modelo e busca de uma melhor concordância dos resultados teóricos de módulo de elasticidade dos materiais compósitos M1 a M8 em relação aos experimentais obtidos para os mesmos.

A Tabela 6.5 apresenta uma análise similar da faixa de variação dos resultados teóricos, obtidos para o módulo de elasticidade dos materiais M1 a M8, ocasionada pela

dispersão dos resultados de fator de forma, que constam na Tabela 6.1, medidos para as matérias-primas utilizadas na fabricação dos materiais de fricção.

Tabela 6.5 – Faixa de variação dos resultados teóricos de módulo de elasticidade dos materiais M1 a M8 devido ao desvio padrão experimental do fator de forma das matérias-primas utilizadas na fabricação dos mesmos.

Material	<i>E</i> teórico (GPa)	E teórico mínimo (GPa)	E teórico máximo (GPa)	Significância da faixa de variação
M1	19,62	16,15	21,94	29,5%
M2	21,75	16,57	25,28	40,0%
M3	20,97	16,98	23,42	30,8%
M4	25,18	19,86	28,56	34,6%
M5	10,72	9,02	11,72	25,1%
M6	7,76	6,95	8,19	16,0%
M7	5,14	4,74	5,34	11,5%
M8	3,15	2,92	3,27	11,1%

A Figura 6.8 apresenta graficamente os resultados explicitados na Tabela 6.5.

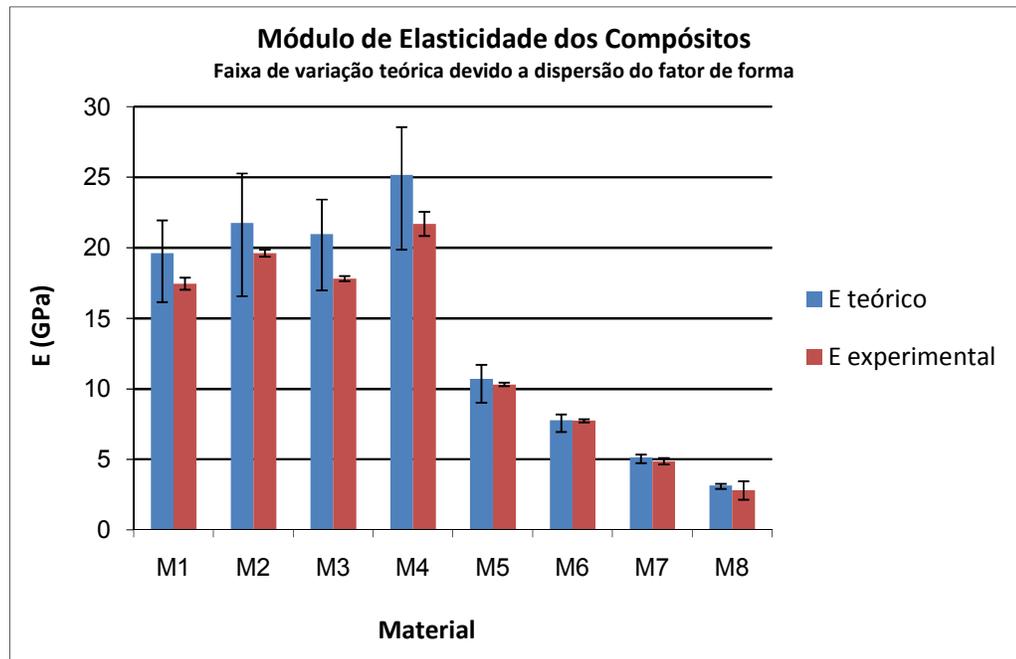


Figura 6.8 – Faixa de variação dos resultados teóricos de módulo de elasticidade dos materiais M1 a M8 devido ao desvio padrão experimental do fator de forma das matérias-primas utilizadas na fabricação dos mesmos.

Os resultados apresentados na Tabela 6.5 e na Figura 6.8 evidenciam a representatividade da variação dos resultados do fator de forma medido das matérias-primas empregadas na fabricação dos materiais compósitos de fricção. O desvio padrão dos resultados de fator de forma, conforme Tabela 6.1, variam do mínimo de 26% para o grafite até 42% para o sulfato de bário, sendo de 40% para o silicato de zircônio. A variação no resultado teórico calculado através da Equação 4.27, devido ao desvio padrão dos resultados de fator de forma, é superior a 10% em todos os materiais, e chega ao valor máximo de 40% para o material M2. Importante ressaltar que são verificadas menores faixas de variação dos valores teóricos para os materiais que contêm fase viscoelástica (M5 a M8). Isto pode ser compreendido levando-se em conta que o fator exponencial que considera a influência da fase viscoelástica sobre o módulo de elasticidade diminui a representatividade da variação do fator de forma das matérias-primas. No entanto, para os materiais M1 a M4, que não possuem frações de material viscoelástico em suas composições, a faixa de variação dos resultados teóricos de módulo de elasticidade devido à variação do fator de forma fica entre 29,5% (desvio padrão de 14,75%) e 40,0% (desvio padrão de 20,0%), evidenciando que esta é fortemente influenciada pela variação dos valores de fator de forma.

No caso dos resultados do fator de forma, ao contrário do que foi observado para a resina fenólica, a melhoria na medida deste parâmetro de entrada do modelo com foco na diminuição da variação dos resultados é importante na busca de melhor concordância entre resultados teóricos e experimentais, e para o refinamento do modelo apresentado. A medição adequada dos valores de Ferret apresentados na seção 4.2.2 é importante no sentido de diminuir a imprecisão dos valores de fator de forma. A utilização de matérias-primas com formato mais homogêneo é outra alternativa para diminuir a variação dos valores de fator de forma.

Além das possibilidades de melhoria já citadas, é importante ressaltar que aspectos inerentes ao processo de fabricação não foram levados em consideração no modelo, como a presença de vazios nos materiais compósitos, bem com a integridade na adesão interfacial, entre a resina fenólica e as fases presentes no compósito.

Embora sejam encontrados trabalhos demonstrando que a distribuição de tamanho de partícula não tem influência significativa na rigidez de polímeros termoplásticos [Kiss *et al.*, 2007], é de interesse para o aperfeiçoamento do trabalho que este aspecto seja investigado para materiais de fricção. A característica peculiar que esta classe de materiais possui de empregar baixas frações de matriz fenólica combinada com a distribuição de tamanho de grão das fases dispersas suscita a necessidade de investigação, englobando aspectos como empacotamento e continuidade efetiva da matriz.

7. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho permitem inferir as seguintes conclusões:

➤ Foi desenvolvida uma Modelagem matemática simplificada para projeção do módulo de elasticidade de materiais de fricção. A modelagem foi desenvolvida a partir de um equacionamento apresentado por outro autor, complementada para se adequar aos materiais de fricção. A inserção, na equação base, da Lei da Mistura simples possibilitou a consideração de todas as fases presentes no material de fricção e sua contribuição para a rigidez do mesmo;

➤ Foi conferido um fator de forma α para as matérias-primas particuladas empregadas na fabricação dos materiais de fricção, com a função de corrigir a eficiência da contribuição das fases particuladas para a rigidez do material de fricção em virtude da sua irregularidade geométrica;

➤ Foi incluído no modelo matemático, um fator exponencial que quantificasse a contribuição de fases viscoelásticas de baixo módulo de elasticidade, imprescindível, devido à magnitude peculiar da influência das fases de baixo módulo de elasticidade sobre a rigidez do material de fricção;

➤ Os resultados experimentais obtidos para o módulo de elasticidade dos materiais compósitos de fricção mostraram bom grau de reprodutibilidade, evidenciada pelo desvio padrão menor do que 5% observado nos resultados;

➤ Os resultados da caracterização do módulo de elasticidade da resina fenólica apresentaram desvio padrão de cerca de 2% e ocasionam uma faixa de variação de até 3,7% nos resultados teóricos do módulo de elasticidade dos materiais M1 a M8, quando realizada a extrapolação;

➤ Os resultados da caracterização do fator de forma das matérias-primas utilizadas na fabricação dos materiais M1 a M8 mostraram desvio padrão entre 25% e 42%, e ocasionam uma faixa de variação entre 11,1% e 34,6% nos resultados teóricos do módulo de elasticidade dos mesmos, quando realizada a extrapolação. A influência da variação dos resultados de fator de forma sobre os resultados teóricos de módulo de elasticidade é menor para os materiais que contêm fase viscoelástica em suas composições devido ao fator exponencial do modelo que quantifica o decaimento do módulo de elasticidade ocasionado pela fase viscoelástica;

➤ Apesar da imprecisão nos resultados teóricos, gerada pela variação dos resultados de fator de forma, a comparação entre os resultados teóricos médios, calculados através do

modelo proposto e das propriedades das matérias-primas, e os resultados experimentais mostram grau de correlação que possibilita a utilização do modelo desenvolvido neste trabalho para o projeto de materiais de fricção;

➤ Para a indústria de materiais de fricção, a utilização da modelagem proposta no projeto de materiais de fricção pode trazer benefícios em termos de redução do tempo de desenvolvimento de produto e, conseqüentemente, na redução do custo do desenvolvimento, além de aumentar a probabilidade de sucesso do projeto.

8. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Os resultados obtidos neste trabalho permitem sugerir os seguintes temas para trabalhos futuros:

- Investigar o refinamento do modelo e origem da discrepância entre resultados teóricos e experimentais;
- Incrementar o método de medida do fator de forma, a fim de se obter menor dispersão dos resultados experimentais;
- Investigar aspectos inerentes ao processo de fabricação, como a presença de vazios nos materiais compósitos, bem com a integridade na adesão interfacial, entre a resina fenólica e as fases presentes no compósito;
- Investigar a influência da distribuição de tamanho de partícula na rigidez dos materiais compósitos de fricção, englobando aspectos como empacotamento e continuidade efetiva da matriz.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al-Qureshi, H. A.; **Composite Materials: Fabrication and Analysis**; Third Edition; Instituto Tecnológico de Aeronáutica – Brasil; 1988.

Nicholson, G.; **Facts About Friction – 100 Years of Brake Linings & Clutch Facings**; P&W Price Enterprises, Inc., 1995.

Matozo, L. T.; Menetrier, A.; Tamagña, A.; **Analysis of High Dumping Underlayer Materials for Brake Pads and its Effects on NVH Performance**; in Proceedings of 24th Annual Brake Colloquium & Engineering Exhibition; SAE International; November, 2006; United States.

Limpert, R.; **Brake Design and Safety**; Second Edition; by Society of Automotive Engineers; EUA; 1999.

Canali, R. J.; Tamagña, A.; **Evaluation of Properties of Disc and Pad Materials and Their Relation with Disc Brake Noise – An Experimental Investigation**; in Proceedings of 20th Annual Brake Colloquium & Engineering Exhibition; SAE International; October 6-9, 2002, Phoenix, Arizona, USA.

Casari, A., Gomes, E. R., Soares, M. R. F., Al-Qureshi, H. A.; **Micromechanical analysis of composites with short fibers and particles**. Key Engineering Materials, v. 348-9, 2007.

Menetrier, A.; **Estudos de controle de composição e processo para controle da compressibilidade**; Dissertação de Mestrado, Universidade de Caxias do Sul; 106 pgs; 2006.

Ahmed, S.; Jones, F.R.; **A Review of Particulate Reinforcement Theories for Polymer Composites**; Journal of Materials Science, Vol 25, pgs. 4933-4942; 1990.

Guiot, B.; Nadot-Martin, C; Dragon, A.; **A multiscale (visco)-hyperelastic modeling for particulate composites**; Mechanics Research Communications; Vol 33, pgs. 441-449; 2006.

Pal, R.; **Modeling viscoelastic behavior of particulate composites with high volume fraction of filler**; Materials Science and Engineering; Vol 412, pgs. 71-77; 2005.

Marur, P. R.; **An engineering approach for evaluating effective elastic moduli of particulate composites**; Materials Letters, Vol 58, pgs. 3971-3975; 2004.

Richerson, D. W.; **Modern Ceramic Engineering**; 2nd Edition; New York, Marcel Dekker, Inc.; 1992.

Silvestre Filho, G. D.; **Comportamento mecânico do poliuretano derivado do óleo de mamona reforçado por fibras de carbono: contribuição para o projeto de hastes de quadril**; Dissertação, USP-São Carlos; 2001.

Casari, A.; **Análise Micromecânica dos Compósitos com Fibras Curtas e Partículas**. Florianópolis; UFSC; Curso de Graduação em Engenharia de Materiais; 2004; 54 pg.

Callister Jr., W. D.; **Materials science and engineering: an introduction**; 5th. ed. New York: J. Wiley, 1999, c2000.

Yuhas, D. E.; Ding, J.; Venkatesan, S.; **Non-Linear Aspects of Friction Material Elastic Constants**; in Proceedings of 24th Annual Brake Colloquium & Engineering Exhibition; SAE International; November, 2006; United States.

Friedrich, K.; **Friction and Wear of Polymer Composites**; Elsevier Science Publishing Company Inc.; New York; Vol. 1; 1986.

ASTM Standard D 790-92; **Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**; Manual Book of ASTM Standard; 1992.

Mital, S. K., Murthy, P. L. N., Goldberg, R. K.; **Micromechanics for particulate reinforced composites**; NASA Technical Memorandum 107276; 1996.

Kiss, A., Fekete, E., Pukánszky, B.; **Aggregation of CaCO₃ particles in PP composites: Effect of surface coating**; Composite Science and Technology; vol. 76; pgs 1574-1583; 2007.

Gardziella, A. Pilato, L. A.; Knop, A.; **Phenolic Resins**; 2° Edition, Springer-Verlag; Germany; 2000.

ANEXO I

Sendo o material compósito formado pela matriz e pelas fibras, pode-se estabelecer que a massa do compósito (W_c) é igual à soma da massa das fibras (W_f) e da matriz (W_m). O volume do compósito (V_c) é igual à soma do volume das fibras (V_f), da matriz (V_m) e dos vazios internos (V_v).

Assim, tem-se que:

$$W_c = W_m + W_f \quad (\text{A1-1})$$

$$V_c = V_m + V_f + V_v \quad (\text{A1-2})$$

A fração mássica de fibras (w_f) pode ser definida como sendo a razão entre a massa das fibras e a massa do compósito, da mesma forma que a fração mássica da matriz (w_m) é a razão entre a massa da matriz e a massa do compósito. Como resultado, tem-se:

$$w_f = \frac{W_f}{W_c} \quad (\text{A1-3})$$

$$w_m = \frac{W_m}{W_c} \quad (\text{A1-4})$$

De forma que a soma das frações mássicas de fibras e da matriz é igual a um.

$$w_f + w_m = 1 \quad (\text{A1-5})$$

A fração volumétrica de fibras (v_f) é a razão entre o volume de fibras e o volume do compósito. A fração volumétrica da matriz (v_m) é a razão entre o volume da matriz e o volume total do compósito. Similarmente, a fração volumétrica de vazios (v_v) é a razão entre o volume total dos vazios e o volume do compósito. Assim, tem-se:

$$v_f = \frac{V_f}{V_c} \quad (\text{A1-6})$$

$$v_m = \frac{V_m}{V_c} \quad (\text{A1-7})$$

$$v_v = \frac{V_v}{V_c} \quad (\text{A1-8})$$

Sendo que a soma das frações volumétricas de fibras, da matriz e de vazios também é igual a um.

$$v_f + v_m + v_v = 1 \quad (\text{A1-9})$$

Por definição, a densidade do compósito é a razão entre a massa do compósito e o volume do mesmo.

$$\rho_c = \frac{W_c}{V_c} \quad (\text{A1-10})$$

Sendo que a equação A1-10 pode ser descrita, também, considerando as densidades da fibra (ρ_f) e da matriz (ρ_m) da seguinte forma:

$$\rho_c = \frac{\rho_f V_f + \rho_m V_m}{V_c} = \rho_f v_f + \rho_m v_m \quad (\text{A1-11})$$

Considerando que as fibras são contínuas ao longo do componente material, são dispostas paralelamente entre si, possuem seção transversal constante, e que existe boa adesão na interface matriz/fibra, pode-se assumir que as deformações, na direção longitudinal, do compósito (ε_c), das fibras (ε_f) e da matriz (ε_m) são iguais. Assim:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m = \varepsilon_f \quad (\text{A1-12})$$

Desde que os materiais constituintes e o compósito apresentem comportamento elástico que obedece a Lei de Hooke:

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f \quad (\text{A1-13})$$

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_m \quad (\text{A1-14})$$

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c \quad (\text{A1-15})$$

Onde σ_f , σ_m e σ_c são, respectivamente, as tensões nas fibras, na matriz e no compósito, e E_f , E_m e E_c são, os módulos de elasticidade das fibras, da matriz e do compósito, respectivamente.

Assumindo que a carga suportada pelo compósito (K_c), quando solicitado, é dividida entre as fibras (K_f) e a matriz (K_m), como segue:

$$K_c = K_f + K_m \quad (\text{A1-16})$$

e que

$$K_f = \sigma_f A_f = (E_f \varepsilon_f) A_f \quad (\text{A1-17})$$

$$K_m = \sigma_m A_m = (E_m \varepsilon_m) A_m \quad (\text{A1-18})$$

Onde A_f e A_m são as seções transversais das fibras e da matriz, respectivamente. Substituindo as Equações A1-17 e A1-18 na Equação A1-16, resulta que:

$$K_c = \sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (\text{A1-19})$$

Onde A_c é a seção transversal do compósito. Considerando o que segue:

$$\frac{A_f}{A_c} = \frac{V_f}{V_c} = v_f \quad (\text{A1-20})$$

$$\frac{A_m}{A_c} = \frac{V_m}{V_c} = v_m \quad (\text{A1-21})$$

Tem-se que, para as propriedades mecânicas elásticas do material:

$$P_c = P_f v_f + P_m v_m \quad (\text{A1-22})$$

Onde P_c representa a propriedade mecânica em questão do compósito, na direção longitudinal, da mesma forma que P_f representa a propriedade mecânica em questão da fibra e

P_m é a propriedade mecânica em questão da matriz. A Equação A1-22 representa a *Lei das Misturas* que governa as propriedades elásticas do material compósito na direção longitudinal.