

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 – PPGE3M

INFLUÊNCIA DA POROSIDADE NO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE  
UM MATERIAL COMPÓSITO COM FOCO NA INDÚSTRIA DE  
MATERIAIS DE FRICÇÃO

por

ISIS MICHELENA

Dissertação para obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2013

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 – PPGE3M

INFLUÊNCIA DA POROSIDADE NO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE  
UM MATERIAL COMPOSITO COM FOCO NA INDÚSTRIA DE  
MATERIAIS DE FRICÇÃO

ISIS MICHELENA

Engenheira 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 – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre

2013

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

Coorientador: Professor Hazim Ali Al-Qureshi, PhD.

Banca Examinadora:

Dr. Alexandre Casaril

Dr. Luciano Tedesco Matozo

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker  
Coordenador do PPGE3M

## DEDICATÓRIA

À minha família e ao meu companheiro Marcos Rossi.

Em especial ao meu pai, Carlos Fernando Michelena, que sempre foi um grande incentivador.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente ao meu orientador, Dr. Carlos Pérez Bergmann, por ter me recebido no seu centro de pesquisa e ter tornado possível minha jornada no programa de pós-graduação, além do incentivo e auxílio sempre que preciso.

Ao coorientador Dr. Hazim Ali Al-Qureshi, por estar sempre presente e ter sido mais que um coorientador.

A todos os professores do curso de Mestrado em Materiais pelos conhecimentos adquiridos.

Ao centro de pesquisa e desenvolvimento da empresa Fras-le S/A onde foram realizados os experimentos.

Aos meus colegas da Fras-le que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização e elaboração deste trabalho, em especial ao laboratório piloto, que tornou possível a confecção das amostras e ao laboratório físico onde foram executados os ensaios.

Enfim, os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que, de alguma forma, acreditaram e incentivaram a condução deste trabalho, o qual possibilitou uma grande realização pessoal e profissional.

Muito Obrigada!

## SUMÁRIO

RESUMO.....	VII
ABSTRACT .....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	IX
ÍNDICE DE TABELAS .....	XI
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	XII
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS .....	3
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 MATERIAIS COMPÓSITOS.....	4
3.1.1 Matrizes.....	5
3.1.1.1 Resina Fenólica .....	5
3.1.2 Fibras.....	9
3.1.2.1 Fibra de Vidro .....	10
3.1.2.2 Fibra Aramida .....	11
3.2 MATERIAIS DE FRICÇÃO .....	15
3.2.1 Propriedades dos Materiais de Fricção .....	16
3.2.2 Matérias-Primas .....	17
3.2.2.1 Aglomerantes .....	18
3.2.2.2 Materiais estruturais .....	19
3.2.2.3 Lubrificantes .....	19
3.2.2.4 Abrasivos.....	19
3.2.2.5 Modificadores de Atrito .....	20
3.3 INTERFACE MATRIZ-ELEMENTO DE REFORÇO.....	20
3.4 MORFOLOGIA DE POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS CURTAS.....	22
3.4.1 Teor de Fibras .....	22
3.4.1.1 Volume Crítico de Fibras .....	23
3.4.1.2 Volume Máximo de Fibras.....	25
3.5 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS .....	26
3.6 POROSIDADE .....	27
3.6.1 Modelos para Relacionar Porosidade e Módulo de Elasticidade .....	29
3.7 MODELO MATEMÁTICO.....	35
3.7.1 Revisão do Modelo Al-Qureshi .....	36

3.7.2 Modelo Proposto .....	38
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	40
4.1 MATERIAIS .....	40
4.2 MÉTODOS .....	41
4.2.1 Preparação dos Corpos de Prova .....	42
4.2.1.2 Conformação .....	43
4.2.1.3 Tratamento Térmico .....	43
4.2.3 Determinação da Massa e Densidade Específica .....	44
4.2.3.1 Massa Específica das Matérias-Primas .....	44
4.2.3.2 Densidade Específica dos Corpos de Prova .....	44
4.2.4 Determinação da Resistência Mecânica .....	45
4.2.5 Determinação do Módulo de Elasticidade .....	46
4.2.6 Determinação da Porosidade .....	46
4.2.7 Análise Visual da Porosidade .....	47
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	48
5.1 DENSIDADE DO COMPÓSITO .....	48
5.2 POROSIDADE .....	48
5.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	51
5.3 RELAÇÃO ENTRE POROSIDADE E MÓDULO DE ELASTICIDADE .....	55
5.4 APLICAÇÃO DO MODELO .....	56
6. CONCLUSÕES .....	60
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	63

## RESUMO

O presente trabalho propõe uma modelagem matemática simplificada que tem como foco o cálculo do módulo de elasticidade em matérias de fricção levando em consideração a porosidade. A modelagem proposta foi desenvolvida tendo como base a Lei das Misturas Modificada e os equacionamentos propostos por Spriggs e Kingery. Para simplificação do modelo, foi analisado um compósito com um aglomerante e um elemento de reforço. A escolha das matérias-primas levou em consideração os elementos mais utilizados em um material de fricção, desta forma o aglomerante utilizado foi uma resina fenólica e os agentes de reforço foram fibras de vidro e aramida. O equacionamento foi verificado utilizando dados empíricos. Para tanto, foram utilizados dois grupos de compósitos, um com resina fenólica e fibra de vidro e o outro com resina fenólica e fibra aramida. A verificação da influência das fibras no compósito foi feita variando o percentual de fibra, de 5% a 30% em peso, com um aumento de 5% entre as amostras. Os materiais foram confeccionados segundo o método de cura a quente sob pressão, seguido de tratamento térmico. Para a verificação das propriedades mecânicas foi realizado o teste de flexão a 3-pontos, segundo a norma ASTM D790,07. Em uma primeira análise, foi verificado o teor mínimo para que a fibra comece a atuar como reforço estrutural, e este para os dois grupos investigados foi de aproximadamente 2%, ou seja em todas as amostras as fibras estão atuando como elemento de reforço. O ensaio de porosidade seguiu a norma Volkswagen PV 3005. Por esse, foi possível verificar que para o compósito com fibra de vidro, quanto maior o teor de fibra, menor a porosidade apresentada pelo compósito. Para o compósito com aramida, a porosidade só diminui até 15%, após mantém-se constante. Este resultado pôde ser explicado pelo fato da aramida se apresentar na forma de polpa, dificultando a molhabilidade da resina. Como não há correlação linear entre porosidade e módulo de elasticidade para o compósito com fibra aramida, é proposto um modelo que seja apto à avaliação dos dois compósitos em questão. A utilização deste modelo visou a redução expressiva no tempo despendido e esforços de desenvolvimento de produtos, colaborando para a redução dos custos de projeto e aumento da competitividade destes produtos. A modelagem matemática simplificada proposta permitiu obter uma correlação entre o módulo de elasticidade e a porosidade. Os dados calculados através do modelo proposto concordam de forma satisfatória com os resultados experimentais.

Palavras-Chave: Porosidade, Módulo de elasticidade, Materiais de Fricção, Modelamento matemático.

## ABSTRACT

The present work shows a simplified mathematical modeling focused on the modulus of elasticity in a friction material considering the inherent porosity of this material. The suggested model was developed based on the modified Law of Mixtures and equations proposed by Spriggs and Kingery. To obtain a simplified model a composite constituted of a binder and a reinforcement element was analyzed. Raw materials used in these tests were chosen based on raw materials most used in a friction industry, the binder used is a phenolic resin and reinforcing components are glass fiber and aramid fiber. The proposed model was verified based on the empirical data, analyzing two groups of composite material, one with a phenolic resin and fiber glass and another one with phenolic resin and aramid fiber. To understand the influence of the reinforcing components in the composite, the percentage of fibers was varied from 5% to 30%, the difference between samples is 5%. The materials were manufactured using the process typically used for friction materials, heat curing under pressure followed by heat treatment. The samples were tested under 3-points bending test procedure, according to ASTM D790-07 standard. In a preliminary analysis the minimum fraction of fiber that works as a reinforcing component is 2%, according to critical volume equation. Then in all the samples analyzed the fibers are acting as reinforcement elements. The porosity test was made according to VW PV 3005 standard. Using this method, it was possible to verify that increasing the percentage of glass fiber the percentage of porosity decrease. For the aramid composite the percentage of porosity decreases up to 15% of fiber, from this point the value is kept constant. This result can be explained if we consider the fact that the aramid fiber is used in the pulp form, hindering the wettability of the resin. Since there is no linear correlation between porosity and elastic modulus for the composite with aramid fiber, it is proposed a model that is able to appraisal the two composites in question. The use of this model aims a significant reduction in time spent and resources on development, helping to reduce the project cost and increasing the product competitiveness. The simplified mathematical model proposed supported a correlation between modulus of elasticity and porosity. Data calculated by the proposed model agrees satisfactorily with the experimental results.

Key-words: Porosity, Modulus of elasticity, Friction materials, Mathematical modeling.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1: Exemplos de materiais multi-fase: (a) resina polimérica reforçada com fibra de vidro; (b) Aço: ferrita e cementita; (c) Palha e argila (STAR, 2000).	4
Figura 3.2: Estrutura química das resinas fenólicas do tipo resol e novolaca. (SANTOS <i>et al.</i> , 1981).	6
Figura 3.3: Variação da resistência à tração, compressão e flexão de resinas fenólicas em função da temperatura (PILATO, 1994).	8
Figura 3.4: Variação do módulo de elasticidade em tração, compressão e flexão de resinas fenólicas em função da temperatura (PILATO, 1994).	8
Figura 3.5: a) Diversidade de produtos de fibra de vidro ( <i>roving</i> ), fibras entrelaçadas e fibras picadas; b) Fibra picada (Owens Corning, 2012).	11
Figura 3.6: Plano de ligação de pontes de hidrogênio na estrutura do Kevlar (adaptado de <a href="http://www.alunosonline.com.br/quimica/polimero-prova-bala-kevlar.html">http://www.alunosonline.com.br/quimica/polimero-prova-bala-kevlar.html</a> , consultado em julho de 2013).	12
Figura 3.7: Apresentação da fibra aramida na forma de: a) polpa; b) segmentos; c) flocos; d e e) tecidos (Du Pont, 199-).	13
Figura 3.8: Imagem por MEV da superfície de fratura de um compósito de polipropileno com 25% em volume de fibra de vidro (FU <i>et al.</i> , 2000).	21
Figura 3.9: Variação de tensão em um compósito unidirecional que possui fibra resistente e matriz dúctil (SHAH <i>et al.</i> , 2012).	24
Figura 3.10: Cálculo da área transversal definida pelas fibras em uma célula unitária hexagonal (CALLISTER, 2002).	26
Figura 3.11: Efeito da quantidade e do tamanho das partículas na eficiência de empacotamento: a) sistema monodisperso; b) máxima densidade de empacotamento teórica; c) deficiência de partículas dispersas; d) deficiência de partículas grandes; e) distribuição inadequada de tamanhos de partículas (OLIVEIRA, 2000).	28
Figura 3.12: Comparação gráfica do $E_p/E_0$ em função da porosidade de acordo com equações proposta por diferentes pesquisadores (CHOREN <i>et al.</i> , 2013).	32
Figura 4.1: Fluxograma da metodologia experimental utilizada neste trabalho.	40
Figura 4.2: Amostras: resina fenólica (acima), fibra aramida (esquerda) e fibra de vidro (direita).	41
Figura 4.3: Misturador do tipo moinhos de pás, empregado na homogeneização do material.	43
Figura 5.1: Percentual de porosidade apresentado nos materiais de fricção investigados.	49
Figura 5.2: Imagens por microscopia ótica dos materiais de fricção investigados.	51
Figura 5.3 Média e desvio padrão da tensão de ruptura dos materiais de fricção investigados.	53
Figura 5.4 Média e desvio padrão da deformação dos materiais de fricção investigados.	53
Figura 5.5 Média e desvio padrão do módulo de elasticidade dos materiais de fricção investigados.	54
Figura 5.6 Relação entre porosidade e módulo de elasticidade dos materiais de fricção investigados e os fatores de correlação da regressão linear proposta.	56
Figura 5.7: Correlação entre os resultados de módulo de elasticidade teórico e experimentais para o compósito com fibra de vidro.	58

Figura 5.8: Correlação entre os resultados de módulo de elasticidade teórico e experimentais para o compósito com fibra aramida. ....	59
---	----

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Comparação de algumas propriedades térmicas, físicas e químicas de resinas fenólicas e poliéster (SEYMOUR, 1987).....	7
Tabela 2: Propriedades das fibras de vidro (KIM, 1998).....	10
Tabela 3: Denominação dos tipos de Kevlar e suas características (YANG, 1993).....	13
Tabela 4: Comparação de fibras de alto desempenho (DU PONT, 199-). .....	15
Tabela 5: Proporção máxima de fibra empregada de acordo com o formato da fibra (SHAH <i>et al.</i> ,2012) .....	26
Tabela 6: Equações que correlacionam módulo de elasticidade e porosidade (CHOREN <i>et al.</i> , 2013).....	30
Tabela 7: Alguns valores de $k$ para diferentes valores de $\mu_0$ .....	33
Tabela 8: Eficiência do reforço das fibras no compósito para alguns ângulos de orientação de fibra em relação à aplicação da tensão (AL-QURESHI, 1988).....	37
Tabela 9: Especificações das matérias-primas utilizadas e suas especificações (dados fornecidos pelos fabricantes).....	41
Tabela 10: Formulações dos corpos de prova: proporção de resina e fibra de vidro e resina e fibra aramida em fração volumétrica.....	42
Tabela 11: Parâmetros utilizados na conformação dos corpos de prova por conformação a quente.....	43
Tabela 12: Dimensões dos corpos de prova e parâmetros do ensaio utilizado no ensaio de flexão a 3-pontos segundo a norma ASTM D790-07.....	45
Tabela 13: Resultados teóricos e experimentais da densidade específica dos materiais.....	48
Tabela 14 Percentual de fibra e de porosidade nos materiais de fricção investigados neste trabalho.....	49
Tabela 15 Média (de 30 corpos de prova) dos resultados de tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação apresentados no ensaio de flexão 3-pontos, segundo a norma ASTM D790-07.....	52
Tabela 16 Módulo de elasticidade e porosidade dos materiais de fricção investigados.....	55
Tabela 17 Resultados teóricos e experimentais dos módulos de elasticidade testados para o material de fricção com fibra de vidro.....	57
Tabela 18: Resultados teóricos e experimentais dos módulos de elasticidade testados para o compósito com fibra aramida.....	58

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

PMC= polymer matrix composite ou compósitos de matriz polimérica

MMC= metallic matrix composite ou compósito com matriz metálica

CMC= ceramic matrix composite ou compósito de matriz cerâmica

CCC= carbon-carbon composites ou compósitos de matriz carbono-carbono

ASTM= American Society for Testing and Materials ou Sociedade Americana de Testes e Materiais

$v_f$ = fração volumétrica de fibras

$v_{f,crit}$ = volume mínimo de fibras ou volume crítico de fibras

$\sigma_c$ = tensão suportada pelo compósito

$\sigma_m$ = tensão suportada pela matriz

$\varepsilon_{mu}$ = deformação final sofrida pela matriz

$E_c$ = módulo de elasticidade do compósito

$\sigma_{fu}$ = tensão máxima suportada pelas fibras

$\eta_l$ = fator de eficiência

$V_f^{max}$ = fração volumétrica máxima de fibras

$\pi$ = número PI (3,1415)

$R$ = espaçamento entre as fibras

$E_p$ = módulo de elasticidade do compósito incluindo a porosidade

$E_0$ = módulo de elasticidade do compósito completamente denso

$\mu_0$ = coeficiente de Poisson do material denso

$\rho$ = densidade do compósito

$\rho_0$ = densidade relativa, incluindo a porosidade

$P$ = porosidade

$P_c$  = propriedades do compósito

$P_f$  = propriedades da fibra

$P_m$  = propriedades da matriz

$V_m$  = fração volumétrica de matriz

$\beta$  = fator de eficiência do alinhamento das fibras

$\lambda$  = fator de adesão entre a fibra e a matriz

$m_e$  = massa específica

$m$  = massa de amostra

$V_F$  = volume final

$V_I$  = volume inicial

$m_a$  = massa imersa em água

$\sigma$  = tensão

$L$  = distância entre apoios

$C$  = carga

$l$  = largura

$d$  = espessura

$\varepsilon$  = deformação do compósito

$D$  = deslocamento

$\varphi$  = diâmetro

$h$  = altura

$FV$  = fibra de vidro

$FA$  = fibra aramida

## 1. INTRODUÇÃO

Materiais de fricção utilizados em sistemas de frenagem de veículos a motor pertencem à classe dos compósitos de matriz polimérica (PMC), em que a fase contínua é um polímero termorrígido, reforçado por uma ou mais fases descontínuas, compostas por fibras e/ou partículas. Durante a manufatura desses materiais, com o auxílio de temperatura e pressão, a matriz polimérica reage quimicamente (reação de cura), transformando-se num compósito termorrígido com propriedades específicas.

As propriedades dos materiais de fricção para esse tipo de aplicação estão diretamente relacionadas às características de seus componentes e ao processo de manufatura. Desta maneira, é de fundamental importância o conhecimento de todas as características das matérias-primas que causarão um maior impacto no desempenho do produto final a ser projetado.

As diferentes matérias-primas utilizadas têm variadas funcionalidades no desempenho do material de fricção. Em termos de funcionalidades, as mesmas são agrupadas em: fase dispersa, composta por materiais estruturais e modificadores do atrito, como lubrificantes, abrasivos e cargas, e a matriz, composta de resina e elastômeros [NICHOLSON, 1995].

Em materiais de fricção, a matéria prima mais comumente utilizada como matriz é a resina fenólica, devido à combinação de propriedades mecânicas e térmicas, indispensáveis para esta aplicação.

A fibra de vidro é a matéria-prima mais utilizada como elemento de reforço estrutural em materiais que não apresentam metal em sua estrutura. Esta utilização se dá principalmente devido a resistência mecânica satisfatória e boa processabilidade, além do custo competitivo.

Com a evolução contínua, os veículos passaram a ser utilizados em condições cada vez mais severas em função de variáveis de aplicação como: velocidade, carga, temperatura e as mais diversas condições ambientais. Desta forma em veículos motorizados houve a necessidade de desenvolvimento de materiais de fricção com maior poder de frenagem e que apresentassem estabilidade durante a aplicação, resistência à temperatura, baixo desgaste e baixa agressão ao tambor ou ao disco.

Neste novo cenário, a fibra aramida vem ganhando espaço. Esta fibra polimérica possui resistência à temperatura em torno de 550°C, o que gera um aumento na resistência à temperatura do compósito, apresenta características mecânicas interessantes e possui um custo competitivo, se comparado com fibras com desempenho semelhante como a fibra de carbono.

As propriedades mecânicas dos materiais de fricção, destacando a resistência à ruptura e o módulo de elasticidade, têm extrema importância, pois influenciam em praticamente todos os requisitos técnicos desses materiais. Tendo a fibra como principal elemento de reforço, buscou-se avaliar o comportamento apresentado por esta em um material de fricção industrializado. Assim, utilizou-se matriz fenólica e foram variados os teores de fibra em dois grupos de compósitos, um dos grupos utilizou fibra de vidro como elemento estrutural e o outro utilizou fibra aramida. Esta variação buscou avaliar as diferenças apresentadas pelos dois grupos de compósitos, tendo em mente que quanto maior o teor de fibras utilizado em um compósito, maior será sua resistência mecânica, até que seja atingido um volume máximo de fibras no compósito. Após este valor, haverá a tendência de estabilizar ou até reduzir sua resistência mecânica.

A necessidade de entender a influência do teor de fibras em um material compósito de matriz fenólica para a aplicação em materiais de fricção foi a principal motivação deste trabalho. Esta influência está focada principalmente na avaliação do módulo de elasticidade e porosidade, fatores que, notadamente, possuem correlação entre si. A partir de dados experimentais gerados foi proposto, então, um modelo matemático para correlacionar estas duas propriedades.

## **2. OBJETIVOS**

O objetivo geral deste trabalho é a investigação da correlação entre porosidade e módulo de elasticidade em materiais de fricção, com foco na influência do teor e no tipo de fibra utilizada, visando a proposição de um modelo matemático que correlacione essas duas propriedades.

### **2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- i) Verificar as diferenças em termos de resistência mecânica de um compósito com fibra de vidro e um com fibra aramida, em diferentes percentuais;
- ii) Analisar o volume crítico e máximo de fibra em cada um dos compósitos;
- iii) Verificar a densidade específica experimental e comparar com a teórica;
- iv) Quantificar a porosidade;
- v) Propor um modelo matemático que correlacione porosidade e módulo de elasticidade.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Muitas tecnologias modernas exigem materiais com combinações incomuns de propriedades que não podem ser atendidas pelas ligas metálicas, cerâmicas e materiais poliméricos (ELZEI, 2000). O objetivo principal de se desenvolver materiais compósitos é obter uma combinação de características desejáveis de dois ou mais materiais em um simples material multi-fase.

A Engenharia e o *Design* têm se defrontado com demandas por equipamentos de alto desempenho, os quais devem atender especificações cada vez mais severas, o que por sua vez cria um formidável desafio para os engenheiros de materiais: desenvolver materiais que possam fazer frente a solicitações de serviço cada vez maiores. No projeto de materiais compósitos, pode-se combinar de maneira engenhosa metais, cerâmicos, polímeros para produzir materiais com características especiais em termos de propriedades mecânicas, tais como rigidez, tenacidade e resistência nas condições ambientes e em altas temperaturas. A Figura 3.1 apresenta ilustrativamente alguns materiais multi-fase que podem ser considerados materiais compósitos.

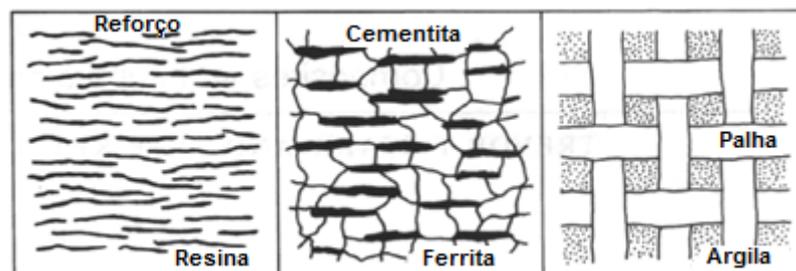


Figura 3.1: Exemplos de materiais multi-fase: (a) resina polimérica reforçada com fibra de vidro; (b) Aço: ferrita e cementita; (c) Palha e argila (STAR, 2000).

A categorização de critérios que dão respaldo para que um material seja efetivamente considerado compósito ainda é discutida no meio científico, porém como uma definição simples, pode-se dizer que o material compósito é qualquer material multifásico que exiba uma porção significativa das propriedades das fases que o constituem, de modo que seja obtido um melhor conjunto propriedades para uma determinada aplicação. Desta forma,

alguns critérios necessitam ser atendidos: consistir-se de dois ou mais materiais, intrinsecamente insolúveis; apresentar propriedade final distinta daquelas dos constituintes, os constituintes devem estar presente em proporções razoáveis (por exemplo: 5%), entre outros (ELZEI, 2000).

### 3.1.1 Matrizes

Fibras são materiais de uso em Engenharia quando combinadas com uma matriz. O propósito do uso da matriz é manter a integridade estrutural do material sob carga térmica ou mecânica (AL-QURESHI, 1988). Em essência, o componente matricial se constitui no meio de transferência e homogeneização dos esforços suportados pelos componentes de reforço. Este componente pode ser formado a partir de diferentes tipos de materiais de Engenharia, desde que estes sejam capazes de cumprir as seguintes funções, segundo MANO (2000):

- i) Manter a orientação das fibras e seu espaçamento;
- ii) Transmitir as forças de cisalhamento entre as camadas de fibras;
- iii) Fornecer proteção ao elemento de reforço contra danos superficiais.

Os compósitos classificam-se de acordo com sua matriz, podendo ser de matriz polimérica (PMC), de matriz metálica (MMC), de matriz cerâmica (CMC) e os de matriz carbono-carbono (CCC) (CALLISTER, 2002). Um grande esforço tem sido empreendido na investigação para o uso de outros materiais como matriz, porém o maior uso ainda é de matrizes poliméricas.

#### 3.1.1.1 Resina Fenólica

O estudo e desenvolvimento de resinas fenólicas teve seu início no ano de 1872 por intermédio de A. von Bayer, enquanto pesquisava os diferentes pigmentos originados da reação entre o fenol e o formaldeído. Mais tarde, Ter Meerr (1879), A. Claus e E. Trainer (1879) descobriram um material resinoso e solúvel, cujo ponto de fusão era de 100°C. Até esse momento, ainda não existia uma aplicação para este tipo de material e os estudos sobre resinas fenólicas continuaram até 1889 quando Claisen (1879) e Kleeberg (1879) obtiveram uma resina reticulada e insolúvel a partir da reação contendo excesso de formaldeído e ácido clorídrico (KNOP e SCHEIB, 1979). Algum tempo depois, devido aos estudos realizados por Manasse (1879) e Lederer (1879), a empresa BAYER (FARBENFABR, 1879) patenteou o

processo de obtenção do orto- e para-hidróxibenziálcool sem mencionar a formação da resina fenólica.

A primeira ideia de uma possível aplicação para este tipo de resina surgiu a partir dos trabalhos realizados por Speier, Smith e Luft, que por volta de 1900 propuseram a utilização deste material como isolante térmico e como um possível substituto da ebonita e da madeira. Mais tarde, descobriu-se que era possível empregar estas resinas (com ou sem carga) como revestimento a prova de água, na confecção de fibras, na fabricação de bolas de bilhar, botões, entre outras aplicações. Neste mesmo período, a empresa LOUIS BLUMER patenteou a produção de resinas fenólicas sólidas e solúveis utilizando ácidos orgânicos como catalisador.

Dependendo do tipo de catálise e da relação molar aldeído/fenol utilizada, pode-se obter dois tipos de resinas fenólicas: uma, formada em ambiente básico com excesso de aldeído, denominada resol, reativa ao calor; e outra, que se forma em ambiente ácido com excesso de fenol, chamada novolaca, termicamente estável, a Figura 3.2 ilustra a estrutura química destas resinas.

As propriedades mecânicas, físicas e químicas das resinas fenólicas do tipo resol e novolaca, quando curadas, são praticamente as mesmas. A principal diferença está na estrutura molecular. Resinas do tipo resol apresentam massa molar mais baixa que as novolacas e curam sob alta temperatura com ou sem ajuda de um ácido forte como agente de cura. O teor de sólidos é menor do que 75% devido à presença do grupo metilol ligado ao anel aromático. Para as resinas do tipo novolaca, a massa molar é mais elevada do que nas resóis, pois não apresentam nenhum grupo metilol ligado ao anel aromático e são curadas mediante a adição de um agente de cura alcalino, geralmente hexametiltetramino, também conhecido como hexamina (HTMA).

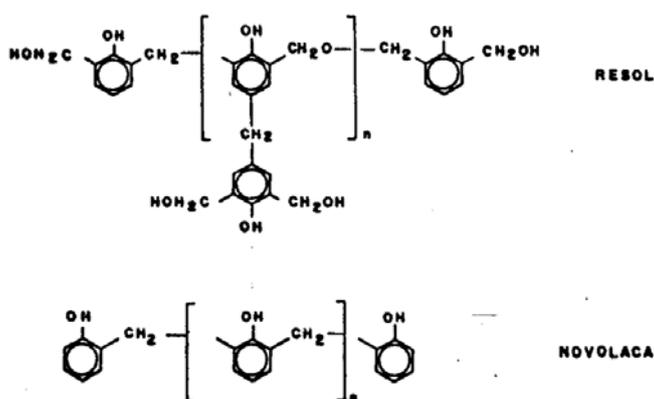


Figura 3.2: Estrutura química das resinas fenólicas do tipo resol e novolaca. (SANTOS *et al.*, 1981).

As resinas fenólicas são as preferidas em uma grande gama de aplicações, desde *commodities* e materiais de construção até o uso na indústria aeroespacial de alta tecnologia. O reconhecimento surge do fato que estas resinas possuem várias características desejáveis, como boa resistência mecânica, boa resistência térmica e estabilidade dimensional, bem como alta resistência contra vários solventes, ácidos e água. Ela é inerentemente resistente à chama e desprende pouca fumaça quando incinerada (NAIR, 2004). Nenhum outro material conhecido, até então, apresenta o mesmo desempenho que as resinas fenólicas neste aspecto. Por estas razões, este tipo de material é capaz de atender a grande maioria das normas internacionais onde a segurança contra o fogo é prioridade imediata.

A utilização de reforços especiais de fibra de vidro, por exemplo, confere às resinas fenólicas um desempenho mecânico comparável aos compósitos à base de resina poliéster sem carga. O mesmo acontece quando se trata da resistência ao impacto, à corrosão e à absorção de água. Em termos de resistência mecânica, os compósitos à base de resinas fenólicas se comportam semelhante ao alumínio e ao aço. Entretanto, os metais apresentam valores de módulo de elasticidade, resistência à deformação e ao alongamento superiores. Algumas propriedades importantes podem ser vistas na Tabela 1, onde o desempenho de uma resina fenólica frente a uma resina poliéster é analisado.

Tabela 1: Comparação de algumas propriedades térmicas, físicas e químicas de resinas fenólicas e poliéster (SEYMOUR, 1987).

Propriedade	Fenólica com carga mineral	Fenólica com fibra de vidro	Poliéster com fibra de vidro
Temperatura de Deflexão a 1820 kPa (°C)	200	250	200
Resistência Máxima ao Calor Contínuo (°C)	175	175	160
Coefficiente de Expansão Linear (cm/°Cx10 <sup>-5</sup> )	2,0	1,5	2,5
Resistência à Flexão (kPa)	-	-	83.000
Resistência à Compressão (kPa)	172.400	120.000	172.000
Resistência ao Impacto (Izod, cm.N)	21,5	75	160
Resistência à Tração (kPa)	41.400	60.000	69.000
Elongamento (%)	0,5	0,2	1,5
Dureza (Rockwell)	M110	E70	M50
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,5	1,85	2,0
Absorção de Água (%)	0,03	0,5	-
Constante Dielétrica	8	5	5

Para melhorar as propriedades de um material compósito contendo resinas fenólicas é necessário combinar corretamente o tipo de resina fenólica a ser utilizada (resol, novolaca ou

modificada), o tipo e o teor de reforço (fibra de vidro, fibra aramida, fibra de carbono), os aditivos (desmoldantes, agentes de cura, redutores de viscosidade, entre outros) e as demais cargas necessárias. Cada componente empregado na fabricação de um compósito desempenha uma função específica no produto final e o conhecimento adequado destas funções possibilita fabricar materiais que terão as propriedades selecionadas (LI, 2010).

Um aspecto a ser considerado na resina fenólica é a perda de resistência mecânica quando submetido ao aumento de temperatura. As Figura 3.3 e 3.4 mostram as mudanças sofridas pela resina fenólica para as propriedades como módulo de elasticidade e resistência à tração, compressão e flexão para temperaturas de 0 a 500°C. De acordo com os gráficos apresentados, observa-se que para temperaturas acima de 250°C estas propriedades diminuem drasticamente.

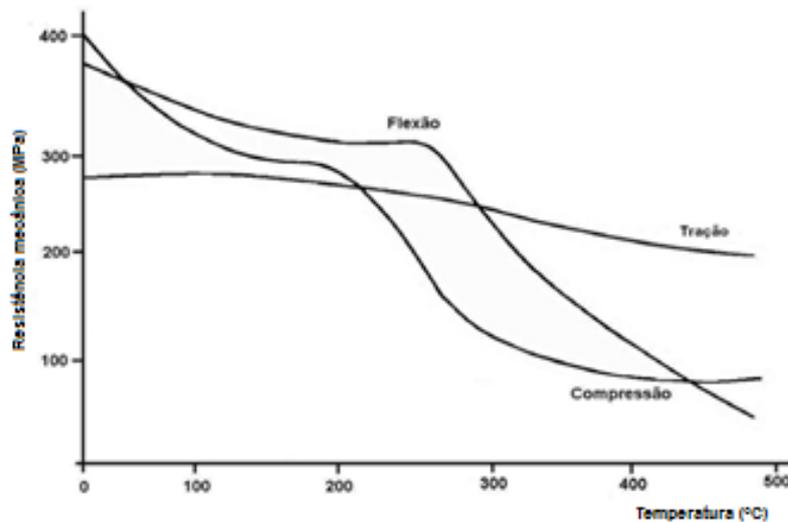


Figura 3.3: Variação da resistência à tração, compressão e flexão de resinas fenólicas em função da temperatura (PILATO, 1994).

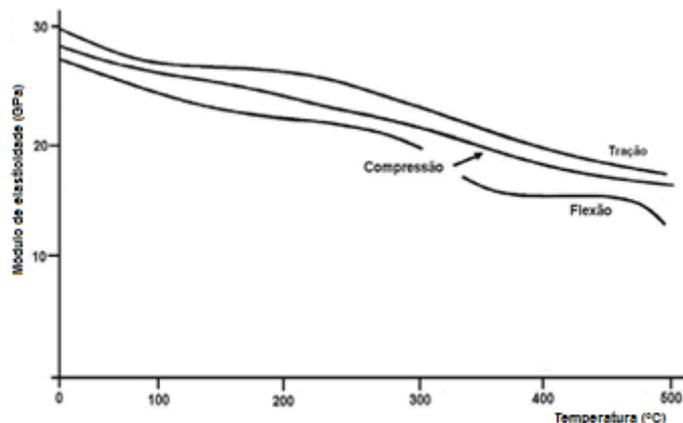


Figura 3.4: Variação do módulo de elasticidade em tração, compressão e flexão de resinas fenólicas em função da temperatura (PILATO, 1994).

Além das vantagens já mencionadas, as resinas fenólicas apresentam boa estabilidade dimensional, dureza de superfície, alta durabilidade, além de baixo custo de produção. As desvantagens relacionadas à aplicação deste tipo de resina na fabricação de compósitos estão diretamente relacionadas à sua dificuldade de processamento (liberação de água durante a reação de cura e a dificuldade em controlar a viscosidade da resina) e de reciclagem do material (reaproveitamento do material como carga), a fim de se atingir um desenvolvimento sustentável em relação ao meio ambiente.

### 3.1.2 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 (CASARIL, 2009).

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 transversal com área inferior a  $5,1 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ , e uma largura menor do que  $2,54 \times 10^{-4} \text{ m}$ . A geometria da fibra possui grande influência no controle da carga a ser suportada pelo material. Devido à geometria utilizada pela fibra, a possibilidade de ocorrência de defeitos é infinitamente menor que em materiais de formato regular (AL-QURESHI, 1988).

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.

Como o maior interesse deste trabalho está nos materiais de fricção será dada ênfase nos materiais compósitos reforçados com fibras descontínuas, comumente chamadas de “fibras picadas”. Estas 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).

### 3.1.2.1 Fibra de Vidro

A partir de 1940, e principalmente em função de necessidades advindas da 2ª Guerra Mundial, iniciou-se a utilização da fibra de vidro como elemento de reforço de peças moldadas em resinas poliéster. Neste primeiro momento foram produzidas carcaças de proteção para as antenas de radar em veículos militares (caças e bombardeiros). Esses elementos de proteção deviam ser suficientemente fortes para resistir às cargas aerodinâmicas, dimensionalmente estáveis sob temperaturas externas, resistentes ao tempo e transparentes às frequências ultraelevadas dos pulsos de radar, condição esta que excluía qualquer solução metálica (AL-QURESHI, 1988).

As fibras de vidro podem ser divididas em 3 categorias principais: E-Glass (*electrical*), C-Glass (*Chemical/ Corrosion*) e S-Glass (*Structural*). As fibras do tipo E são bons isolantes elétricos, possuem uma boa processabilidade e módulo de elasticidade moderado. Estes são o tipo de fibra de vidro mais amplamente utilizados. As fibras do tipo C possuem uma melhor resistência química à corrosão que o tipo E e são indicadas para aplicações em meios corrosivos. Fibras de vidro do tipo S possuem alta resistência e alto módulo de elasticidade, foram desenvolvidas para aplicações militares. O módulo das fibras do tipo S é aproximadamente 20% superior que as fibras do tipo E (KIM 1998), conforme demonstra Tabela 2.

Tabela 2: Propriedades das fibras de vidro (KIM, 1998).

Propriedade	Fibra tipo E	Fibra tipo S
Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	5 a 25	5 a 15
Densidade ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,54	2,49
Resistência à tração (MPa)	2,4	4,5
Elongação na ruptura (%)	3 a 4	5,4
Módulo de elasticidade (GPa)	72,4	85
Coefficiente de expansão térmica ( $10^{-6}/\text{K}$ )	5,0	5,6

As fibras de vidro do tipo E (as fibras utilizadas neste trabalho) possuem sua composição química baseada em alumínio-boro-silicatos. A produção de fibra de vidro é feita a partir de vidro fundido em um forno a temperatura por volta de 1600°C. O vidro fundido passa por orifícios em um prato de platina aquecido. Estes filamentos são unidos na forma de

mechas que são submetidos a um tratamento químico para otimizar a adesão do vidro na matriz polimérica. As mechas podem ser bobinadas (*roving*), entrelaçadas (*yarn*) ou cortadas (*chopped*), ilustrações destes formatos estão apresentadas na Figura 3.5. Para as fibras cortadas, as mechas de fibra são então picadas em comprimentos específicos, secas, peneiradas, e acondicionadas em sistemas de embalagem para atender às requisições de uso.

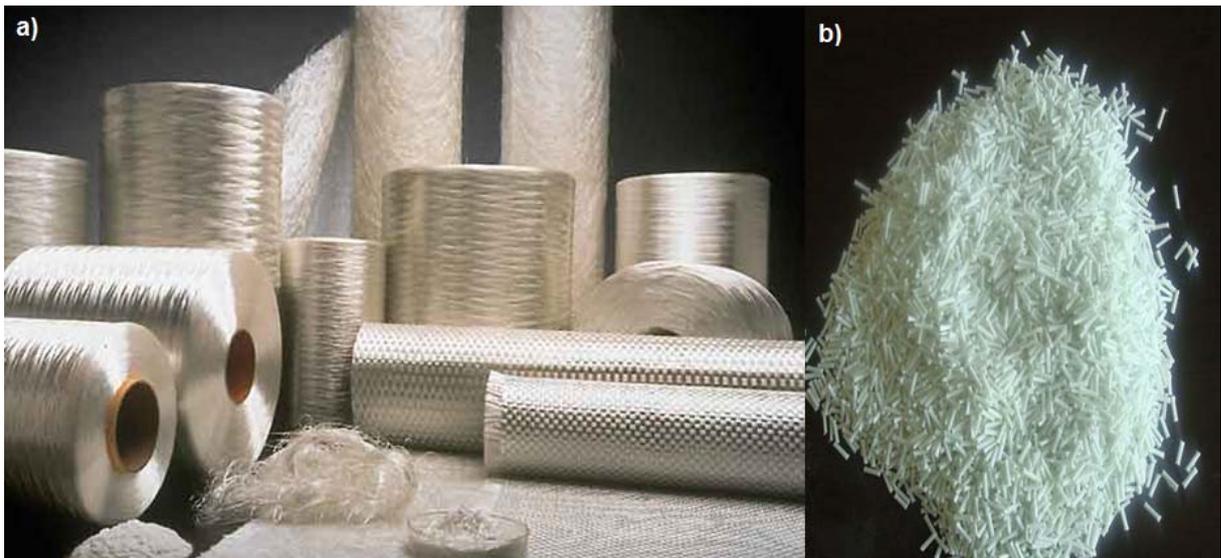


Figura 3.5: a) Diversidade de produtos de fibra de vidro (*roving*), fibras entrelaçadas e fibras picadas; b) Fibra picada (Owens Corning, 2012).

A fibra de vidro tem alta resistência à tração, flexão e impacto, sendo muito empregada em aplicações estruturais. É leve e não conduz corrente elétrica, sendo utilizada também como isolante térmico. Permite ampla flexibilidade de projeto, possibilitando a moldagem de peças complexas, grandes ou pequenas, sem emendas e com grande valor funcional e estético. Ainda, pode-se citar o fato de não oxidar e ter excepcional resistência a ambientes altamente agressivos, comparada aos materiais convencionais. Possuem um amplo campo de aplicações, como, por exemplo, em carrocerias de automóveis, elementos estruturais para construção civil, cascos de barcos, carcaças de foguetes, varas de pescar e tacos de golfe, ainda aplicações domésticas, como poltronas, e bancos de praça.

### 3.1.2.2 Fibra Aramida

A fibra aramida é uma fibra sintética, encontrada sob diversas formas e com diferentes secções transversais. Sua designação decorre da junção dos termos poliamida aromática, que

expressam sua composição química. Isto significa que esta fibra contém grupos amida e grupos aromáticos.

De acordo com a *U.S. Federal Trade Commission*, a palavra aramida é utilizada como um termo genérico para designar um conjunto de fibras manufaturadas, formadas por longas cadeias sintéticas de poliamidas, nas quais 85% das ligações de amidas são formadas pela união direta de anéis aromáticos (YANG, 1993). Esta característica as diferencia das poliamidas convencionais, como *nylon*.

A fibra aramida consiste em uma série de cadeias com grupos amida e aromáticos arranjados em sequência, orientadas paralelamente umas as outras. Este arranjo ordenado de moléculas forma uma estrutura cristalina, bastante estável e resistente, que justifica a sua elevada resistência e rigidez (DONG, 2009).

O processo de fabricação da fibra aramida é conhecido como fiação por fusão (MANO, 1999), envolve a passagem de uma pasta de material fundido através de uma fiação de pequenos orifícios (*spinneret*), formando filamentos viscosos ordenados em cadeias poliméricas. Quando a pasta é forçada através dos orifícios de moldagem, a cadeia polimérica se orienta de forma paralela ao eixo da fibra. Isto confere a mesma natureza anisotrópica, favorecendo sua resistência axial. A Figura 3.6 mostra o plano de ligação de pontes de hidrogênio em uma cadeia polimérica de aramida, neste caso produzida pela DuPont Co.



Figura 3.6: Plano de ligação de pontes de hidrogênio na estrutura do Kevlar (adaptado de <http://www.alunosonline.com.br/quimica/polimero-prova-bala-kevlar.html>, consultado em julho de 2013).

As fibras aramidas são produzidas principalmente por quatro companhias, sob designações comerciais diferentes. A francesa DU PONT produz o *Kevlar* e o *Nomex*, a AKZO, da Holanda produz o *Twaron*, a TEJIAN do Japão produz a *Technora* e *Tejinconexe* e finalmente a RHODIA, também francesa, produz a *Kermel*.

A fibra aramida Kevlar foi introduzida no mercado de fibra de alto desempenho como um fio de filamentos contínuos denominados de Fibra B. Posteriormente, uma versão de alto módulo foi desenvolvida e chamada de PDR-49. Este nome foi substituído pela designação

Kevlar 49, utilizada para a comercialização. Outros tipos de fios de Kevlar foram produzidos em alguns períodos, para usos especiais. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** exibe as denominações e as características dos mesmos. As fibras aramidadas são fornecidas sob diversas formas, tais como fios, segmentos curtos, flocos, polpa e tecidos, conforme Figura 3.7.

Tabela 3: Denominação dos tipos de Kevlar e suas características (YANG, 1993)

Denominação	Característica
Kevlar 29	Indicado para todas as utilizações
Kevlar 49	Alto módulo de elasticidade
Kevlar 68	Módulo de elasticidade moderado
Kevlar 100	Fibra colorida
Kevlar 119	Fibra de alto alongamento
Kevlar 129	Fibra de alta tenacidade
Kevlar 149	Fibra de ultra alto módulo

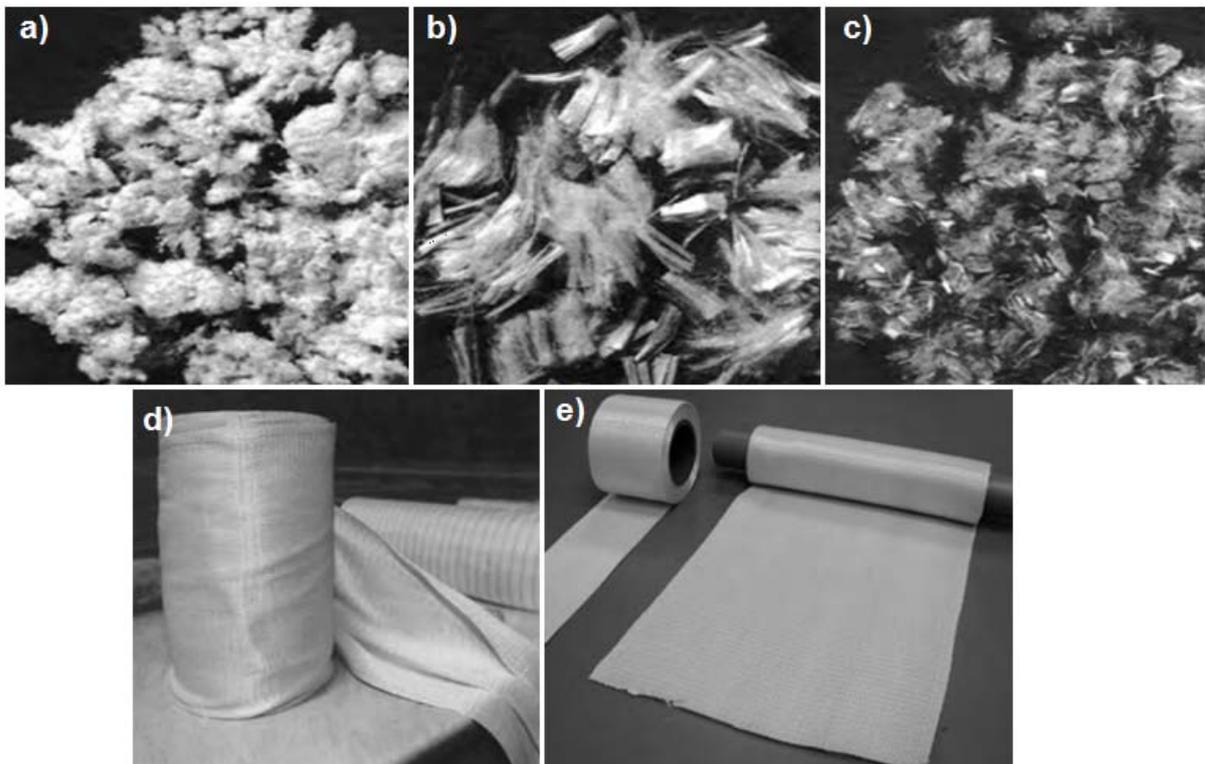


Figura 3.7: Apresentação da fibra aramida na forma de: a) polpa; b) segmentos; c) flocos; d e e) tecidos (Du Pont, 199-).

A principal diferença entre elas é a finalidade de aplicação. Os tecidos são utilizados principalmente na confecção de vestimentas resistentes a impacto e ao fogo. São também empregadas na laminação de estruturas como raquetes, capacetes e pranchas para esportes aquáticos. Os segmentos de fibra, obtidos do corte dos filamentos mais longos, com comprimento de pelo menos 6 mm, são utilizados na formação de fios torcidos de alta resistência ao desgaste ou na fabricação de feltros, com o intuito de criar elementos de isolamento acústico ou de amortecimento de vibrações. A aramida em floco apresenta comprimento inferior ao da forma de segmentos curtos, em torno de 1 mm e é utilizada para aumento da resistência sem afetar significativamente a viscosidade do sistema. A fibra aramida na forma de polpa é usada para melhorar o desempenho dos elastômeros e resinas, principalmente quando é requerida resistência a altas temperaturas (DU PONT, 199-). Este último é o tipo de aramida que será utilizado neste trabalho.

As fibras aramidadas possuem diâmetros entre 12 $\mu$ m e 15 $\mu$ m, com densidade variando de 1,43g/cm<sup>3</sup> e 1,47g/cm<sup>3</sup>. Para efeito de comparação, o *nylon* possui densidade de 1,14g/cm<sup>3</sup>, o poliéster 1,38g/cm<sup>3</sup>, a fibra de carbono 1,8 g/cm<sup>3</sup>, a fibra de vidro 2,55g/cm<sup>3</sup> e a fibra de aço 7,8 g/cm<sup>3</sup>. Ou seja, as fibras de aramida do tipo Kevlar são ligeiramente mais densas do que as fibras de *nylon* e de poliéster; porém consideravelmente menos densas do que as fibras de carbono, vidro e aço. Por isso, apresentam vantagem, em termos de peso, para a mesma referência de resistência mecânica (YANG, 1993; GORDON, 2009).

As propriedades mecânicas mais importantes decorrem de relaxações moleculares, que dependem em alto grau da temperatura e da capacidade de desenvolver deformações reversíveis pronunciadas. De acordo com Mano (2000), os polímeros com cadeias formadas por anéis aromáticos, interligados por um ou dois átomos pertencentes a grupos não-parafínicos, oferecem maior dificuldade à destruição da ordenação molecular e, portanto, apresentam propriedades mecânicas mais elevadas, as quais se mantêm ao longo de uma ampla faixa de temperatura.

De acordo com Salaverría *et al.* (1997), as fibras de aramida apresentam resistência à tração em torno de 3,15GPa, módulo de elasticidade de 125 GPa e nenhuma resistência à compressão. Segundo YANG (1993), a fibra aramida é proporcionalmente mais resistente à ruptura que o aço e a fibra de vidro, conforme dados da Tabela 4.

Segundo YANG (1993), sendo o Kevlar uma aramida, essa fibra é estável em temperaturas relativamente altas. De fato, as poliamidas aromáticas tendem a apresentar

resistência à temperaturas da ordem de 550°C. Por esta razão são usadas extensivamente em equipamentos de combate a incêndios e materiais anti-chama. De acordo com Rocha (2000), a aramida quando adicionada a uma resina epóxi promove uma resistência ao calor em torno de 400°C.

Tabela 4: Comparação de fibras de alto desempenho (DU PONT, 199-).

	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência à Ruptura (N/m <sup>2</sup> )	Resistência à Ruptura /Densidade (Nm/kg)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Módulo de Elasticidade /Densidade (Nm/kg)	Alongamento (%)
<b>Kevlar 29</b>	1,44	2,92	2,0	70,33	48,8	3,6
<b>Kevlar 49</b>	1,44	3,00	2,1	112,39	78,0	2,4
<b>S-Glass</b>	2,49	4,5	1,8	85,50	34,3	5,4
<b>E-Glass</b>	2,55	2,4	0,9	72,40	28,4	4,8
<b>Aço</b>	7,75	1,97	0,3	199,95	25,8	2
<b>Nylon-66</b>	1,16	0,99	0,8	5,52	4,8	18,3
<b>Carbono</b>	1,8	3,10	1,7	220,63	122,6	1,4

Além de resistentes a altas temperaturas, as fibras aramidas podem ser consideradas, de forma geral, como sendo bastante duráveis. Apresentam também uma retração muito pequena, baixa fluência e uma temperatura de transição vítrea bastante elevada. Além disso, não são condutivas e são resistentes a ácidos e a bases (ROCHA, 2002).

A aramida não é um material frágil, como o carbono ou as fibras de vidro e, por essa razão, apresenta vantagens em um grande número de usos finais. Como aplicações, podem-se citar satélites espaciais, cabos subaquáticos de comunicação de dados e coletes a prova de bala.

### 3.2 MATERIAIS DE FRICÇÃO

Atualmente, os materiais de fricção assumiram posição de destaque na cadeia automotiva, quer pelo seu caráter de item de segurança, quer pelo conforto requerido durante a frenagem.

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 (NICHOLSON, 1995).

Originalmente, os materiais de fricção usados em freios consistiam de pedaços de madeira ou couro. A tecnologia emergente da estrada de ferro no século 19 exigiu materiais de fricção para atuar sob altas cargas e altas velocidades. Nos anos de 1870, foram realizadas experiências usando sapatas de ferro fundido como elemento de freio.

O desenvolvimento dos materiais de fricção como se conhece atualmente é creditado ao inglês Herbert Froad, que em 1897 criou um material baseado em cabelos e tiras de algodão, impregnados com uma solução de betume. Embora houvesse uma sensível melhoria na qualidade do produto, ainda a maior limitação era a temperatura de degradação das fibras utilizadas, algo em torno de 150°C. A necessidade de uma fibra que conferisse ao material de fricção boa resistência mecânica e que suportasse elevadas temperaturas levou Froad, em 1908, a utilizar-se de tecidos a base de fibras de amianto (NICHOLSON, 1995).

Com a proibição do uso do amianto em determinados países, as indústrias fabricantes de materiais de fricção iniciaram pesquisas com a finalidade de se obter fibras alternativas ao amianto. Estas pesquisas resultaram no desenvolvimento de materiais chamados NAO (*non asbestos organic*), os quais podem fazer uso de diferentes tipos de fibras alternativas ao amianto, como fibra de vidro, fibras cerâmicas, fibras metálicas, fibras orgânicas e fibra de carbono.

Durante as últimas duas décadas, um esforço muito grande vem sendo feito em relação à *performance* do material de fricção nos sistemas de freio automotivos, desta forma busca-se um material orgânico que não se desintegre em altas temperaturas de trabalho e que, ao mesmo tempo, mantenha o nível de atrito.

### **3.2.1 Propriedades dos Materiais de Fricção**

Materiais de fricção para sistemas de freios automotivos correspondem a um dos materiais compósitos mais complexos já que contêm muitos componentes, cada qual com suas propriedades físicas e químicas. Esta natureza multi-fase é necessária para satisfazer a grande variedade de solicitações advindas das condições de serviço.

Esses requisitos 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 sistemas de freio (DADKAR, 2010; PATNAIK, 2010).

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 (CASARIL, 2009).

### **3.2.2 Matérias-Primas**

As propriedades dos compósitos como materiais de fricção estão diretamente relacionadas às características de seus componentes e ao processo de manufatura. Dessa maneira, é de fundamental importância o conhecimento de todas as características das matérias-primas que causarão um maior impacto no desempenho do produto final a ser projetado (OSTERLE, 2001).

Os materiais de fricção para freios automotivos são usualmente compósitos de matriz polimérica, formados pela compactação a quente de matérias-primas, com variadas

granulometrias, incluindo diferentes aditivos (tipicamente entre 10 e 20) (NICHOLSON, 1995; ERIKISSON, 2002). O tipo e a quantidade de cada aditivo no material de fricção são determinados, em grande parte, por observações empíricas.

As diferentes matérias-primas utilizadas têm variadas funcionalidades no desempenho do material compósito (SATAPATHY, 2004). Em termos de funcionalidades, as mesmas são agrupadas em: aglomerantes, materiais estruturais, lubrificantes, abrasivos, cargas e modificadores de atrito (NICHOLSON, 1995).

O emprego de uma grande variedade de matérias-primas na forma de pó é bastante importante, do ponto de vista de fabricação, para determinação do processo de homogeneização da composição do material, 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.

### 3.2.2.1 Aglomerantes

O propósito do aglomerante é manter a integridade estrutural do material de fricção sob carga térmica ou mecânica. Ele deve manter os componentes do material de fricção juntos e impedir que seus constituintes sejam desprendidos separadamente, funcionando como matriz do compósito.

A escolha do aglomerante para o material de fricção é uma questão muito importante, pois se ele não mantiver a estrutura intacta durante todo o tempo durante a aplicação do freio, os outros constituintes, como fibras de reforço ou modificadores de atrito poderão se desprender.

Aglomerantes são resinas poliméricas, geralmente 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.

### 3.2.2.2 Materiais estruturais

As fibras de reforço são usadas nos materiais de fricção para a melhoria da resistência mecânica e de seu desempenho. As fibras utilizadas são normalmente picadas e possuem 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. Estas fibras têm grande influência no módulo de elasticidade do compósito de fricção, no coeficiente de atrito e no desgaste do material (ÖZTÜRK, 2011).

### 3.2.2.3 Lubrificantes

São comumente empregados materiais de dureza extremamente baixa e estrutura lamelar, visto que a razão do emprego dos mesmos é estabilizar e regular o coeficiente de atrito com os constituintes atritantes. Em grande parte dos casos, há a formação de um filme de baixa resistência ao cisalhamento entre as superfícies em contato. Observa-se ainda que a formação deste filme acaba protegendo as superfícies contra a corrosão, estabiliza o coeficiente de atrito, remove o calor gerado pelo atrito e as partículas geradas pelo desgaste e serve para o amortecimento de vibrações geradoras de ruído. Os lubrificantes sólidos, tais como o grafite e vários sulfetos metálicos, são usados principalmente em temperaturas elevadas (CHAN, 2004).

### 3.2.2.4 Abrasivos

Os abrasivos nos materiais de fricção aumentam o coeficiente de atrito e ao mesmo tempo aumentam a taxa de desgaste do contra-material. Eles removem o óxido de ferro do contra-material bem como outros filmes indesejáveis formados durante a frenagem. Por isso, os materiais de fricção que possuem grandes quantidades de abrasivos exibem uma grande variação do coeficiente de atrito, resultando na instabilidade do torque de frenagem.

Partículas duras de óxidos metálicos e silicatos são exemplos de abrasivos. Os abrasivos possuem valores de dureza Mohs ao redor de 7-8 e alguns exemplos de abrasivos usados em materiais de fricção incluem o óxido de zircônio, silicato de zircônio, óxido de alumínio calcinado ou fundido, óxido de magnésio e óxido de cromo (CHAN, 2004).

### 3.2.2.5 Modificadores de Atrito

As cargas são adicionadas aos materiais de fricção para melhorar a processabilidade, bem como para reduzir o custo geral do material de fricção. São requisitos importantes para estes materiais a estabilidade térmica e mecânica, e a dureza intermediária, a fim de não influenciar significativamente no sistema de atritantes/lubrificantes.

As cargas são divididas em dois grupos: orgânicas e inorgânicas. As cargas orgânicas mais comumente usadas em materiais de fricção são o pó de caju e o pó de borracha, ambos são incorporados nos materiais de fricção com o objetivo de reduzir ruído de frenagem através de sua maior visco-elasticidade. Já dentre as cargas inorgânicas, as mais comumente usadas são a barita (sulfato de bário), mica, vermiculita e o carbonato de cálcio (mineralita), onde a propriedade mais comum entre elas é que possuem ponto de fusão relativamente alto (NICHOLSON, 1995; ARJMAND, 2011).

## 3.3 INTERFACE MATRIZ-ELEMENTO DE REFORÇO

As propriedades de materiais compósitos são determinadas por quatro fatores: propriedades dos componentes, composição, estrutura e interação interfacial. A adesão interfacial é extremamente importante em todos os compósitos usados para carregamento da carga. A adesão imprópria leva à separação dos componentes, a qual leva ao surgimento de espaços vazios que propiciam o início de uma fratura (RENER *et al.*, 2010; LANGE, 2007).

A principal função da interface é permitir que ocorra uma adequada transferência dos esforços entre o reforço e a matriz. Conseqüentemente, ela é a principal responsável pela existência de um trabalho conjunto. A Figura 3.8 mostra uma imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) de uma fratura em um compósito de polipropileno reforçado com fibra de vidro. Esta denota que a fraca interação interfacial faz com que a superfície de fratura na matriz e nas fibras não seja coincidente.

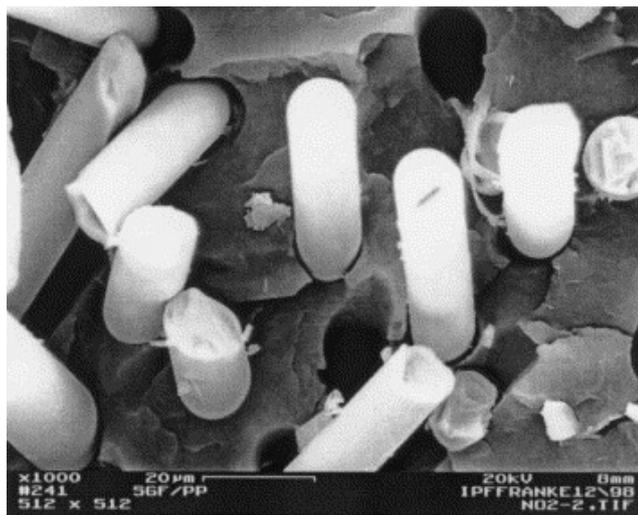


Figura 3.8: Imagem por MEV da superfície de fratura de um compósito de polipropileno com 25% em volume de fibra de vidro (FU *et al.*, 2000).

A transferência de carga entre matriz e fibra deve ser proporcionada de acordo com a aplicação do material (LEAL, 2009). Compósitos com adesão interfacial muito forte se apresentam como materiais de elevada rigidez e frágeis. Por outro lado, em materiais com fraca adesão matriz-fibra os componentes se separam sob ação de forças externas. Desta forma, a transferência de carga para a fibra é pequena ou nula. O ideal é utilizar uma adesão média visando às propriedades finais do compósito.

Na teoria, geralmente se aceita a premissa de que as fibras de maior desempenho tendem a fornecer compósitos de maior desempenho. Porém, isso não ocorre, necessariamente dessa forma. De acordo com Hannat (1978), a maioria das fibras é arrancada, demonstrando assim que o fator crítico não é a resistência da fibra e sim a eficiência da aderência desta na matriz. Banthia e Trottier (1995) demonstraram que a geometria e orientação da fibra, e a resistência da matriz, influem diretamente no comportamento da aderência (*bond-slip strength*) e que uma abordagem conjunta é essencial na estimativa da resposta de aderência fibra-matriz.

A aderência entre os elementos pode ser mecânica ou físico-química e está centrada nas características da interface entre eles. Um fator que contribui para uma maior adesão na interface é a atração física entre os átomos polares da matriz e a superfície inorgânica de algumas fibras. Essas forças de baixa energia ocorrem somente quando ambos os componentes apresentam similaridade química. Outro fator importante é a possibilidade de

existência de ligação química entre os componentes, quando um dos grupos presentes na matriz é capaz de reagir com os grupos existentes nas fibras (FÉLIX, 2002; MERLINI, 2011).

Félix (2002) ainda explica que a interação química entre as superfícies permite que as tensões mecânicas sofridas pelo material sejam transferidas com mais eficiência da matriz para o reforço, fazendo com que melhorem as propriedades mecânicas do material.

Esta ideia vem alimentando o desenvolvimento de tecnologias para incrementar a adesão ou aderência da fibra à matriz. Já se encontram disponíveis comercialmente várias fibras pré-tratadas superficialmente com agentes de adesão específicos, com o intuito de melhorar a aderência do reforço com a matriz para garantir uma melhor transferência de esforços.

De acordo com Santos (2002), problemas associados com o deslocamento na interface matriz-fibra também podem ser prevenidos pela utilização de materiais com baixos valores de módulo de elasticidade. Isto significa que, quando associados, eles não vão variar intensamente sua seção transversal, prevenindo problemas de aderência.

### **3.4 MORFOLOGIA DE POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS CURTAS**

Assim como abordado nos itens anteriores, a estrutura do compósito e a interação fibra-matriz são de extrema importância, mas além destes fatores deve ser considerado o volume de fibra presente no compósito. Desta forma os próximos tópicos irão abordar dois pontos principais quanto a este fator: volume crítico e volume máximo de fibras.

#### **3.4.1 Teor de Fibras**

Por definição, as propriedades dos compósitos são dependentes do teor de fibras presente no material, visto que estas formam o componente estrutural. Em princípio, quanto maior o teor de fibras, melhor será o desempenho, pois maior será o número de fibras que intercepta cada microfissura, evitando a propagação das mesmas. É desta maneira que as fibras melhoram a eficiência no controle de fissuração da matriz. Como o carregamento imposto à matriz é parcialmente transferido às fibras, que passam a absorver parte das tensões internas, o aumento no teor de fibras resulta ainda, na maioria dos casos, no aumento de módulo de elasticidade e da tensão máxima do compósito (FU, 2000 *apud* FELIX, 2002).

Um fator que pode ser importante na definição do comportamento que será obtido, entretanto, é o processo de fabricação. Em compósitos laminados com fibra de vidro, as propriedades mecânicas seguem ligeiramente a regra da mistura, para proporções entre 20 a 30% em volume de fibra. Entretanto, Vu-Khanh e Ramsteiner *apud* FÉLIX (2002) observaram que, para compósitos extrudados ou injetados se constata uma redução nas propriedades mecânicas com o aumento do teor de fibra.

O percentual de fibras utilizados possui dois pontos críticos: o volume mínimo para que as fibras comecem a exercer um reforço estrutural e o volume máximo, acima do qual a fibra não estará aumentando a resistência.

#### 3.4.1.1 Volume Crítico de Fibras

A definição conceitual do volume crítico é a de que ele corresponde ao teor de fibras que mantém a mesma capacidade de carregamento de carga para o compósito a partir da ruptura da matriz. Ou seja, abaixo do volume crítico ( $0 < v_f < v_{fcrit}$ ), no momento em que houver a ruptura da matriz, ocorre necessariamente uma queda na carga que o material tem capacidade de suportar. Isto ocorre porque a tensão que o material está sendo submetido é suficiente para romper as fibras. As fibras rompidas, as quais não contribuem para a resistência do compósito, podem ser consideradas furos alinhados. Este efeito pode fazer com que a tensão suportada pelo compósito ( $\sigma_c$ ) seja menor que a tensão suportada somente pela matriz ( $\sigma_m$ ).

Acima do volume crítico, o compósito continua aceitando níveis de carregamentos crescentes mesmo após a ruptura da matriz. Este conceito se encontra ilustrado na Figura 3.9.

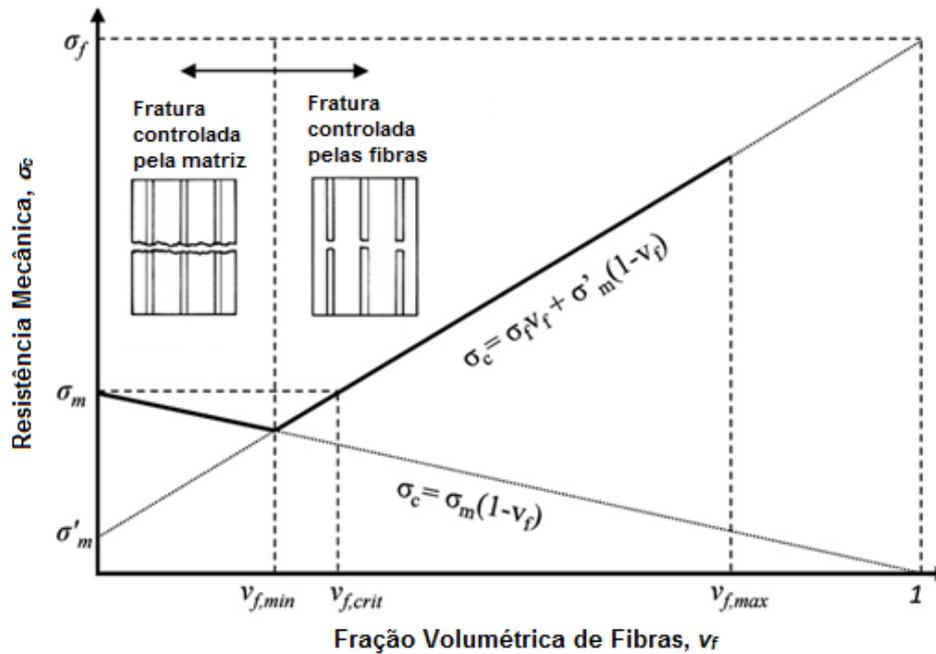


Figura 3.9: Variação de tensão em um compósito unidirecional que possui fibra resistente e matriz dúctil (SHAH *et al.*, 2012).

A determinação do volume crítico está associada à modelagem proposta por Aveston, Cupper e Kelly (1971) a qual focaliza um compósito ideal, com fibras contínuas e alinhadas à direção do esforço principal (Equação 3.1). Esta dedução pode ser encontrada no Anexo 1 deste trabalho.

$$v_{f,crit} = \frac{(\varepsilon_{mu} E_c)}{\sigma_{fu}} \quad \text{Equação 3.1}$$

onde  $v_{f,crit}$  indica o volume crítico de fibras, dado em porcentagem em relação ao volume total do compósito,  $\varepsilon_{mu}$  é a deformação final da matriz,  $E_c$  o módulo de elasticidade do compósito e  $\sigma_{fu}$  que indica a tensão máxima suportada pelas fibras.

Pela modelagem representada pela Equação 3.1, chega-se a um volume de fibra utilizado em uma matriz com fibras contínuas. No presente trabalho, utilizou-se fibras descontínuas, o que gera uma disparidade no modelo devido à falta de orientação e distribuição das fibras no compósito. Assim, quando ocorre a ruptura da matriz, ocorrerá uma inclinação da fibra em relação à fissura que não estará na posição ortogonal prevista pelo modelo de Aveston, Cupper e Kelly (1971). Além disso, o comprimento de fibra que permanecerá embutido na matriz e definirá a carga de arrancamento que ela sustentará será,

no máximo, igual à metade do seu comprimento, caso a fissura ocorra exatamente na metade do comprimento da fibra.

Assim, o apresentado na Equação 3.1 não representa com precisão a realidade quando as fibras são descontínuas e distribuídas randomicamente. Para corrigir estes desvios é normalmente utilizado o chamado fator de eficiência, que permite uma maior aproximação do  $v_{f,crit}$  teórico e aquele obtido experimentalmente. O fator de eficiência considerado é basicamente o  $\beta$ , que está associado ao efeito da orientação da fibra. O efeito da orientação da fibra será abordado com mais detalhes no item 3.7.1. Considerando a orientação da fibra, a Equação 3.1 passa ao formato da Equação 3.2 (que será a utilizada neste trabalho):

$$v_{f,crit} = \frac{\varepsilon_{mu} \times E_c}{\sigma_{fu} \times \beta} \quad \text{Equação 3.2}$$

#### 3.4.1.2 Volume Máximo de Fibras

A definição de volume máximo de fibras pode ser considerada como a quantidade máxima de fibras suportada pelo compósito antes que ele apresente uma queda de resistência. Com o aumento da concentração de fibras, a resistência do compósito tende a sofrer incrementos cada vez menores. Isto leva ao conceito de um volume máximo de fibras, ou seja, a máxima quantidade de fibras que pode ser incorporada à matriz. Em outras palavras, a fração volumétrica máxima de fibras é também o valor máximo de resistência adquirido pelo compósito (SHAH *et al.*, 2012).

Na definição de valor máximo de fibras, ressalta-se a necessidade de averiguar o espaçamento entre as fibras. Quando o espaçamento for menor que o estipulado, o compósito tenderá a fraturar devido à tensão de cisalhamento gerada entre as fibras. Esta definição de mínimo espaçamento corresponde ao limite superior de fibras que poderá ser incorporado à matriz (PAN, 1993).

Como mostra a Figura 3.10, uma célula unitária triangular possui área de  $\sqrt{3}R^2$ , sendo a área da fibra  $\pi R^2/2$ . Desta forma, em um compósito com fibras unidirecionais, o cálculo da fração volumétrica de fibras pode ser descrito pela Equação 3.3 (PAN,1993).

$$v_f^{max} = \frac{\frac{\pi R^2}{2}}{\sqrt{3}R^2} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} = 0,908 \sim 91\% \quad \text{Equação 3.3}$$

onde  $v_f^{\max}$  indica o percentual máximo de fibras suportado pelo composto e  $R$  indica o espaçamento entre as fibras. Teoricamente, um compósito com fibra unidirecional pode ter até 91% de fibras, porém na prática não é aplicado, pois é quase impossível que as fibras fiquem totalmente alinhadas.

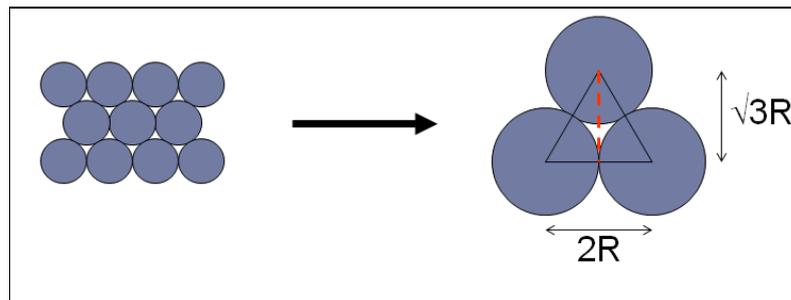


Figura 3.10: Cálculo da área transversal definida pelas fibras em uma célula unitária hexagonal (CALLISTER, 2002).

O volume máximo de fibra utilizada possui grande dependência com o formato da fibra e com o método da confecção do compósito. Desta forma, também há a necessidade de multiplicar o valor encontrado por um fator de eficiência  $\beta$ . A Tabela 5 apresenta alguns valores típicos de volume máximo de acordo com o formato das fibras.

Tabela 5: Proporção máxima de fibra empregada de acordo com o formato da fibra (SHAH *et al.*, 2012).

Formato da Fibra	Proporção máxima empregada (%)*
Entrelaçadas	60
Manta	55
Picada	25

\*Valor aproximado

### 3.5 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS

Muitas variáveis necessitam ser consideradas quando se busca caracterizar o desempenho potencial de um material compósito. Félix (2002) considera que a caracterização das propriedades mecânicas e reológicas de um compósito é função da fração volumétrica, da distribuição e da orientação das fibras, as quais são definidas durante o processo de fabricação. Como explicam Tanesi e Agopya (1997), as etapas de fabricação e a natureza do

processo são críticas, porque as propriedades e o comportamento do compósito dependem não só das características da matriz, mas também da orientação e dispersão das fibras. De forma geral, pode-se dizer que dentre as variáveis que devem ser analisadas para a caracterização de um compósito além do tipo de matriz, do tipo de reforço e da interface entre eles, destacam-se o teor de fibras, seu volume relativo e a sua distribuição dentro da matriz (EL-TAYEB, 2008).

Como técnicas de análise de interesse aplicadas a materiais compósitos, pode-se citar: para a verificação da interação química matriz-fibra: XPS (*X-ray photoelectron spectroscopy*), SIMS (*secondary ion mass spectroscopy*) e LEIS (*low energy ion scattering*); para a análise da polaridade e presença de interações ácido/base ICG (*inverse gas chromatography*); para a verificação da superfície da microestrutura AFM (*atomic force microscopy*) e finalmente para as propriedades mecânicas há um amplo número de testes que podem ser realizados; tração, compressão, impacto, tenacidade à fratura e flexão. Um ensaio muito utilizado para verificação da adesão fibra matriz é o ensaio de *pull-out*, porém só é aplicado para fibras longas. Neste trabalho, pelo emprego de fibras curtas nos materiais compósitos investigados, a caracterização do comportamento mecânico utilizará o ensaio de resistência à flexão.

Outra forma de caracterizar o compósito é quanto à porosidade. O material poroso pode ser caracterizado por parâmetros como o tamanho do poro, a conectividade de poros, rugosidade da superfície e fração volumétrica de poros (porosidade). Destes, a porosidade é o parâmetro mais comumente utilizado e o parâmetro que será medido neste trabalho.

### **3.6 POROSIDADE**

A característica que determina a utilização em Engenharia de muitos materiais é a sua porosidade. A forma, o tamanho e o volume de poros que um material apresenta pode tornar esse material útil para uma determinada aplicação.

A porosidade está diretamente ligada ao empacotamento sofrido pelo material (Figura 3.11). Segundo McGearry (1961) apud Oliveira et al. (2000), o empacotamento pode ser definido como: “correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente”.

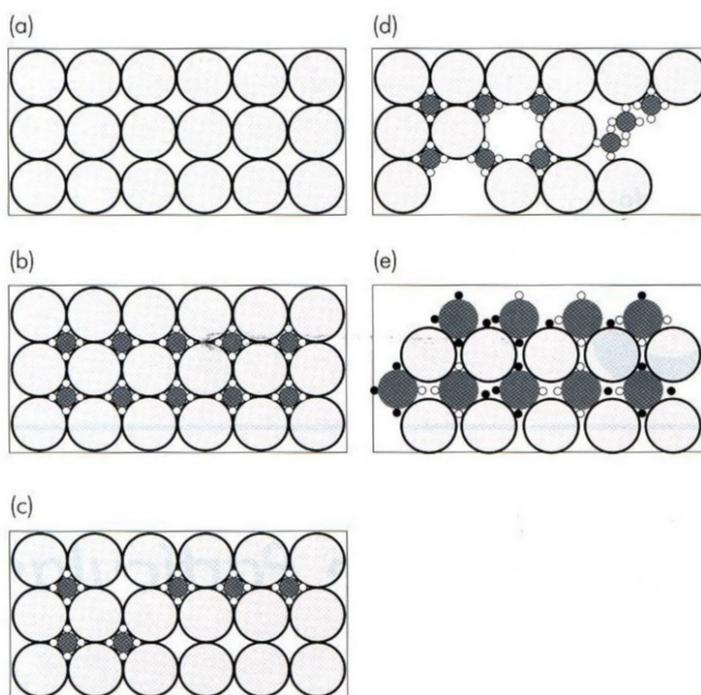


Figura 3.12: Efeito da quantidade e do tamanho das partículas na eficiência de empacotamento: a) sistema monodisperso; b) máxima densidade de empacotamento teórica; c) deficiência de partículas dispersas; d) deficiência de partículas grandes; e) distribuição inadequada de tamanhos de partículas (OLIVEIRA, 2000).

O empacotamento das partículas pode ter como principais causas, a existência de diversas distribuições granulométricas alterando a condição de dispersão inicial, segundo Oliveira (2000). Com isso, pode-se obter sistemas com fatores de empacotamento elevados – próximos de 1 – até misturas onde esse fator se aproxima do nível das monodispersões.

Outro fator relevante a ser considerado no empacotamento é a morfologia das partículas. Quanto mais afastada do formato esférico for a partícula, menor é a densidade de empacotamento no compósito, devido à fricção entre partículas que surge pelo contato das superfícies irregulares das mesmas. Quanto menor o tamanho das partículas irregulares, maior esse efeito, em função da maior área superficial específica. Além do efeito de fricção, a irregularidade das formas das partículas pode gerar estruturas que nunca alcançarão um máximo empacotamento, devido a considerações geométricas.

A porosidade interna das partículas altera a densidade de um material. Para efeito de distribuição granulométrica, as partículas que apresentam porosidade fechada são semelhantes às densas, mas resultam em misturas com densidade menor. Já as partículas que apresentam

porosidade aberta perturbam o empacotamento devido ao seu formato irregular e também resultam em misturas com menores densidades de empacotamento (OLIVEIRA, 2000).

A sequência de preenchimento dos vazios existentes entre as partículas, ou melhor, a distribuição granulométrica do sistema determina a densidade de empacotamento da monodispersão. Empacotamentos densos são desejáveis na obtenção de concretos, cerâmicas estruturais, eletrônicas, nucleares, além da metalurgia do pó, entre outros exemplos. Empacotamentos de baixa densidade são necessários na produção de revestimentos isolantes térmicos.

Para um material que possui partículas sólidas presentes em um fluido, pode-se verificar a interferência na movimentação das linhas de fluxo do meio líquido e assim a influência no comportamento reológico de suspensões, provocando aumento de sua viscosidade e desviando seu comportamento do comportamento newtoniano.

A porosidade tem influência direta na densidade, condutividade térmica e na resistência mecânica. Desta forma, estas propriedades têm grande importância na caracterização do material. É bem conhecido que o comportamento mecânico de um material é predominantemente dependente da sua microestrutura. A presença de poros pode afetar adversamente estas propriedades. São exemplos das propriedades que podem ser alteradas: resistência à ruptura, módulo de elasticidade e resistência à fluência.

### **3.6.1 Modelos para Relacionar Porosidade e Módulo de Elasticidade**

Para entender o comportamento mecânico do material é necessário entender propriedades do material poroso. Diversas expressões já foram propostas para descrever estas relações. Modelos para propriedades mecânicas em materiais muito porosos (porosidade superior a 70%) possuem uma melhor base teórica.

São vários os modelos que descrevem a dependência dos módulos de elasticidade com a porosidade ou com a densidade relativa de um corpo sólido, porém a grande maioria está baseada em dados empíricos. A

Tabela 6 traz um resumo das principais equações que relacionam módulo de elasticidade e porosidade, assim como o pesquisador que propôs e o percentual de porosidade para o qual é indicado o uso desta equação.

Tabela 6: Equações que correlacionam módulo de elasticidade e porosidade (CHOREN *et al.*, 2013)

Equação Proposta	Pesquisador	Ano	%P	Comentário
$E_p/E_0=1-aP$	Dewey	1947		
	Gatto	1950		$a= 2,36$ ou $2,63$ proposto por Rice
	Fryxell e Chandler	1964	2-17	com $a \approx 1,9$
	Hasselman e Fulrath	1964	<2,5	Com $m$ de Dewey, Mackenzie e Hashin; $a=3(9+5V_0)(1-\nu_0)/[2(7-5\nu_0)]$
	Rossi	1968	$\leq 10$	Mesma equação de Hashin para materiais com baixa porosidade; $a= (1-\nu_0)(27+15\nu_0)/[(2(7-5\nu_0)]$
$E_p/E_0=(1-jP)^i$	Bal'shin	1949		para $j=1$ (se $i$ for de 3 a 6); usado para tensão, não aplicável para módulo
	McAdam	1951	0-40	Para $j=1$ e $i=3,4$
	Phani <i>et al.</i>	1968	-88	$1 \leq j \leq 3,85$ para partículas esféricas, $i$ deve estar entre 2 e 3
	Wagh <i>et al.</i>	1993	0-60	$j=1$ ; dados experimentais; $i$ deve possuir valores entre 2 e 4
$E_p/E_0=1-uP^{2/3}$	Eudier	1962	0-50	$u=1,21$
	Ishai e Cohen	1967	0-30	$u=1$
	Martin e Haynes	1971	0-50	$u$ de 1,3 a 2,5
	Herakovich e Baxter	1999	0-50	$u=1,15$
$E_p/E_0=[1-(P/Q)]^{kQ}$	Bert	1985	0-20	$K$ é o fator de concentração de tensão ( $k=2$ para esferas) e $Q$ é a máxima porosidade obtida
$E_p/E_0=(1-p^{2/3})^s$	Boccaccini	1987	0-40	$s=(z/x)^{1/3}(1+[(z/x)^2-1]\cos^2\theta)^{1/2}$ , onde $z/x$ é a razão entre os eixos principais
$E_p/E_0=(1-P^{2/3})/(1-P^{2/3}+P)$	Paul	1960		Para poros em um material cúbico
$E_p/E_0=(1-dP+gP^2)$	MacKenzie	1950		
	Chung	1963		Cita MacKenzie e Gatto como fontes para a sua equação
	Spinner <i>et al.</i>	1963	0-40	Dados apresentam valores de $2,7 \leq d \leq 3,3$ e $1,3 \leq g \leq 1,5$
$E_p/E_0=(1-KP+(k-1)P^2)$	Dörre e Hubner	1984		$K$ é uma função do módulo de cisalhamento
$E_p/E_0=[1-(P/t)]^s$	Roberts e Garboczi	2000	0-50	$t$ e $s$ são fatores de correlação empíricos
$E_p/E_0=e^{-(mP)}$	Duckworth e Ryshkewitch	1953	0-50	$m$ provém de dados empíricos e é independente do tamanho do poro
	Knudsen	1959	5-31	Para tensão não para módulo
	Spriggs	1961	0-37	Para poros abertos e fechados, $m$ compreende o range de 2,7 a 4,3
	Knudsen	1962	0-40	$m=3,95$ para alumina
	Rice	1977	0-40	Menciona Knudsen
$E_p/E_0=1-e^{r(1-P)}$	Rice	1976	>50	Para poros com $r \approx 0,5$
$E_p/E_0=e^{-(nP+qP^2)}$	Wang, J.C.	1984	0-32	
	Panakkal <i>et al.</i>	1990	0-22	
$E_p/E_0=(1-P)/(1+wP)$	Hashin	1962		$w=[(1+\nu_0)(13-15\nu_0)]/2(7-5\nu_0)$ para poros esféricos; $w \approx 1$ para metais
	Wang, L. e Tseng	2003	0-50	Mesma equação utilizada por Hashin se for negligenciada a interação entre os poros
$E_p/E_0=1+[AP/(1-AP-P)]$	Hasselman	1962	0-16	$A$ é uma constante empírica, normalmente $A=-4$
$E_p/E_0=(1-P)^2/(1+yP)$	Ramakrishnan	1990	5-40	$y=2-3\nu_0$
	Mondal <i>et al.</i>	2007	<80	Materiais com porosidade fechada

Algumas relações listadas na

Tabela 6 serão comentadas com mais detalhes para um melhor entendimento da equação a ser proposta. Na hipótese de que um material contém poros com simetria esferoidal, Asmani *et al.* (2001) mostram através da equação de Boccaccini (1997), derivada do trabalho de Ondracek (1987), que a dependência do módulo de elasticidade aparente  $E$  com a porosidade total  $P$  pode ser descrita como segue:

$$E_p = E_0 \cdot (1 - P^{\frac{2}{3}})^s \quad \text{Equação 3.4}$$

onde  $E_0$  é o módulo de elasticidade para o material denso e o expoente  $s$  é calculado através de:

$$s = 1,21 \cdot \left(\frac{z}{x}\right)^{1/3} \cdot \left\{1 + \left[\left(\frac{z}{x}\right)^{-2} - 1\right] \cdot \cos^2(\emptyset)\right\}^{1/2} \quad \text{Equação 3.5}$$

onde  $z/x$  é a razão entre os eixos principais dos poros (fator de forma) e  $\cos^2(\emptyset)$  é um fator de orientação desses poros (para orientação aleatória  $\cos^2(\emptyset)=1/3$ ). Para poros esféricos,  $z/x=1$ ,  $s$  assume o valor de 1,21 e para poros alongados, por exemplo, com  $z/x=1,5$ ,  $s$  seria igual a 1,25.

De acordo com as equações propostas, a Figura 3.13 traça o módulo normalizado versus o percentual de porosidade estudado por cada pesquisador indicando o percentual de porosidade o qual a equação proposta se aplica.

Dörre e Hübner (1984) mostram, segundo o modelo de MACKENZIE (1950), que se baseia na concentração de tensão nos poros, que para um corpo isotrópico e homogêneo, contendo um grande número de vazios esféricos e distribuídos aleatoriamente, a dependência do módulo de elasticidade com a porosidade total pode ser descrita pela Equação 3.6:

$$E_p = E_0 \cdot (1 - k \cdot P + (k - 1) \cdot P^2) \quad \text{Equação 3.6}$$

onde  $k$  é uma constante definida em função dos valores de módulo de cisalhamento  $G_0$ , e do módulo volumétrico  $K_0$ , ambos do material denso, segundo a Equação 3.7:

$$k = \frac{5(3k_0 + 4G_0)}{9k_0 + 8G_0} \quad \text{Equação 3.7}$$

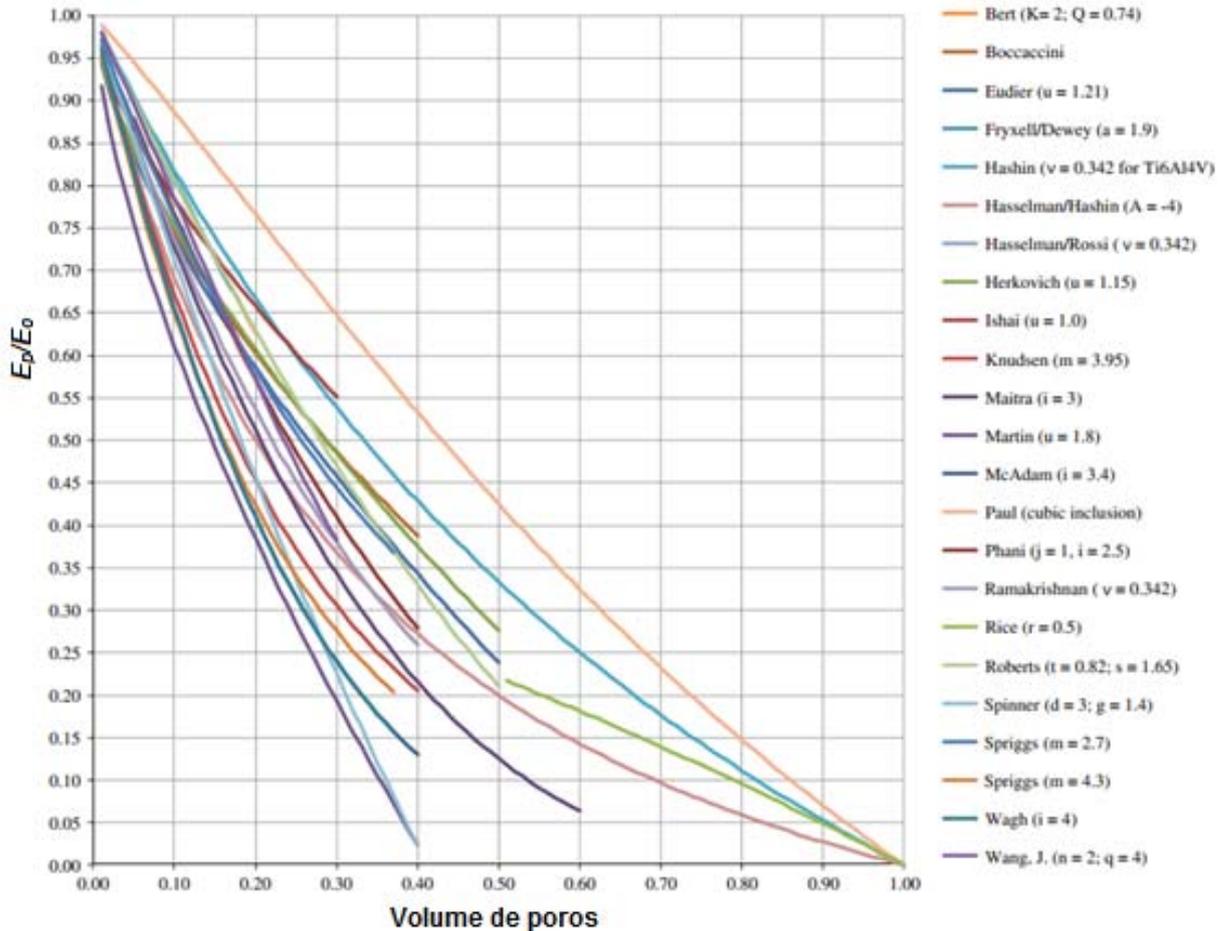


Figura 3.132: Comparação gráfica do  $E_p/E_0$  em função da porosidade de acordo com equações proposta por diferentes pesquisadores (CHOREN *et al.*, 2013).

Já que se assume a homogeneidade e a isotropia do material, as relações entre os módulos de elasticidade e a razão de Poisson, podem ser empregadas, ou seja:

$$k_0 = \frac{E_0}{3(1-2\mu_0)} \quad \text{Equação 3.8}$$

e

$$G_0 = \frac{E_0}{2(1+\mu_0)} \quad \text{Equação 3.9}$$

onde  $\mu_0$  é a razão de Poisson do material denso. Substituindo-se as Equações 3.8 e 3.9 na Equação 3.7 tem-se a Equação 3.10 como função somente da razão de Poisson, como segue:

$$k = \frac{15}{7} \cdot \left( \frac{1-\mu_0}{1-\frac{5}{7}\mu_0} \right) \quad \text{Equação 3.10}$$

A Tabela 7 mostra alguns valores de  $k$  para diferentes valores da razão de Poisson.

Tabela 7: Alguns valores de  $k$  para diferentes valores de  $\mu_0$ .

$\mu_0$	K
0,20	2,00
0,25	1,96
0,31	1,90

Nota-se, portanto, que ao se assumir o valor de  $\mu_0=0,20$ ,  $k$  fica igual a 2, o que transforma a Equação 3.7 na Equação 3.11:

$$E_P = E_0 \cdot (1 - 2 \cdot P + P^2) \quad \text{Equação 3.11}$$

Considerando-se que a relação entre porosidade total e densidade relativa,  $\rho/\rho_0$ , do material poroso pode ser escrita como:

$$P = 1 - \frac{\rho}{\rho_0} \quad \text{Equação 3.12}$$

onde  $\rho$  e  $\rho_0$  são as massas específicas (densidade) do material poroso e do material denso, respectivamente, a substituição da Equação 3.11 e Equação 3.12, gera a Equação 3.13:

$$E \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right) = E_0 \cdot \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^2 \quad \text{Equação 3.13}$$

A menos de uma constante  $C$ , a Equação 3.13 é a relação apresentada por Gibson e Ashby (1997) entre o módulo de elasticidade e a densidade relativa. A Equação 3.14, descreve a relação:

$$E\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) = C \cdot E_0 \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^n \quad \text{Equação 3.14}$$

onde  $C$  e  $n$  são constantes que para sólidos celulares de baixas massa específicas, dependem da microestrutura do material sólido. Os valores de  $n$ , geralmente encontram-se entre 1 e 4. No caso de esponjas cerâmicas de células fechadas,  $1 < n < 2$ . Os fatores que influenciam os valores de  $C$  e de  $n$  são o fato de serem abertas ou fechadas, o seu arranjo geométrico e a forma de suas paredes. A Equação 3.14 se torna a Equação 3.13 quando  $C=1$  e  $n=2$ . Em uma simulação com células abertas de uma esponja do tipo tetrakaidecaedral, Roberts e Carbozci (2001) obtiveram os valores de  $C=0,93$  e  $n=2,04$  para  $\rho/\rho_0 < 0,5$ , muito próximos dos valores 1 e 2, respectivamente.

Por outro lado, o valor de  $k$  para  $\mu_0=0,31$  é 1,9 (Tabela 7) transformando a Equação 3.6 em:

$$E_p = E_0 \cdot (1 - 1,9 \cdot P + 0,9 \cdot P^2) \quad \text{Equação 3.15}$$

que é a equação atribuída a Mackenzie, referenciada por Kingery (1976).

Também com as mesmas hipóteses anteriores, Hashin (1968), referenciado por Dörre e Hübner (1961), propõe outra solução para o módulo de elasticidade:

$$E(P) = E_0 \left[ 1 - \frac{q \cdot P}{1 + (q-1) \cdot P} \right] \quad \text{Equação 3.16}$$

onde  $q$  é uma constante.

Kingery (1976) referencia um modelo de Voigt que calcula o módulo de elasticidade para um material bifásico, no seu limite superior, em que a deformação sofrida por ambas as fases é a mesma. A expressão matemática decorrente deste modelo é dada por:

$$E = V_2 \cdot E_2 + (1 - V_2) \cdot E_1 \quad \text{Equação 3.17}$$

onde  $V_2$  é a fração volumétrica de uma fase 2 que tem seu módulo de elasticidade igual a  $E_2$  e  $(1-V_2)$  é a fração volumétrica da fase 1 que tem módulo  $E_1$ . Adotando-se a porosidade como sendo a fase 2, cujo valor de  $E_2$  deve-se atribuir o valor zero, e por definição  $V_2=P$ , a Equação 3.18 se converte em:

$$E_p = E_0 \cdot (1 - P) \quad \text{Equação 3.18}$$

Os mesmos autores referenciam ainda Spriggs (1961), que propõe uma expressão baseada no princípio de carga residual suportada pela secção transversal da matriz e na mínima distância entre os poros e que é dada por:

$$E(P) = E_0 \cdot e^{(-bP)} \quad \text{Equação 3.19}$$

onde  $b$  é uma constante. Knudsen (1962) mostrou que a Equação 3.17 apresenta bons resultados para a alumina na faixa de porosidade entre 0 e 0,40, da qual deduziu um valor para  $b$  igual a 3,95.

O valor de  $b$  é inerente às diferenças na natureza da porosidade. Desta forma, é afetado pela geometria, tamanho e interconectividade dos poros. O processo e o método de medição de resistência mecânica também possuem forte influência nesta constante.

Todas as expressões descritas acima são extremamente sensíveis à relação entre módulo e níveis de porosidade. Não há uma equação que seja aplicável a uma ampla faixa de porosidade. As constantes mais utilizadas são fracamente relacionadas com características da microestrutura, e estas mudam com uma alteração relativamente pequena da microestrutura. Assim, os modelos desenvolvidos para descrever o comportamento de materiais porosos são muito gerais e apresentam somente relações básicas de parâmetros do modelo.

### 3.7 MODELO MATEMÁTICO

A principal dificuldade em projetar produtos a partir de materiais compósitos reforçados com fibras curtas, é prever as propriedades do material final. Isto porque a lei das misturas, originalmente desenvolvida para os materiais compósitos de fibras contínuas, não prevê de forma eficaz as propriedades deste tipo de material compósito.

A ausência de modelos na literatura, que governem as propriedades mecânicas em compósitos com fibras curtas de forma clara, pragmática e eficiente prejudica a utilização do mesmo no projeto de produtos e, pode, muitas vezes, dificultar o projeto, e até mesmo inviabilizá-lo (CASARIL *et al.*, 2007). O objetivo do trabalho é investigar um compósito simples com elementos básicos utilizados em materiais de fricção, de forma a modificar a Lei das Misturas clássica aplicada aos materiais compósitos de fibras contínuas, adequando a mesma ao material compósito reforçado com fibras curtas, de forma a prever o módulo elástico pertinente ao mesmo.

### 3.7.1 Revisão do Modelo Al-Qureshi

A Lei das Misturas está baseada no princípio da aditividade, que estabelece que as propriedades do compósito serão intermediárias entre as propriedades dos componentes que o constituem, segundo a Equação 3.20 (AL-QURESHI, 1988).

$$P_c = P_f V_f + P_m V_m \quad \text{Equação 3.20}$$

Na Equação 3.20,  $P$  indica a propriedade a que esta relação é válida, por exemplo, para o cálculo da resistência à ruptura, módulo de elasticidade e deformação. Os índices  $c$ ,  $f$  e  $m$  indicam compósito, fibra e matriz, respectivamente e  $V$  refere-se à fração volumétrica apresentada no compósito.

No compósito reforçado com fibras curtas, o carregamento deve ser feito na matriz, que transfere carga para as fibras e para as partículas através das interfaces. Dessa forma, a resistência ao cisalhamento interfacial e a efetividade do recobrimento destes componentes são aspectos críticos para o modelamento mecânico do compósito, segundo Al-Qureshi (1997). Dessa forma, cabe introduzir nos termos independentes da Equação 3.20, fatores de correção de modo a ajustar a eficiência da contribuição de cada um para a resistência mecânica do compósito. Assim,  $P_c = P_f V_f + P_m V_m$  Equação

3.20 pode ser reescrita na forma da Equação 3.21.

$$P_c = \beta P_f V_f + \lambda P_m V_m \quad \text{Equação 3.21}$$

Esta modificação leva em consideração a geometria, o alinhamento das fibras e a sua adesão na matriz. Na Equação 3.21,  $\beta$  é o fator de eficiência do alinhamento das fibras, variando de 0 a 1, de acordo com a

Tabela 8.

Tabela 8: Eficiência do reforço das fibras no compósito para alguns ângulos de orientação de fibra em relação à aplicação da tensão (AL-QURESHI, 1988).

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

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

A outra variável presente na Equação 3.21,  $\lambda$ , é o fator de adesão entre as fibras e a matriz, variando de 0 a 1, podendo ser obtido experimentalmente. Para o caso de fibras curtas dispostas aleatoriamente, a determinação do módulo de elasticidade é complexa, por esta razão utiliza-se a Equação 3.22, baseada em dados experimentais.

$$E_{aleat.} = \frac{3}{8}E_1 + \frac{5}{8}E_2 \quad \text{Equação 3.22}$$

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

### 3.7.2 Modelo Proposto

A equação listada por Al-Qureshi (Equação 3.21) é de fundamental importância para o conhecimento de propriedades mecânicas em materiais compósitos, porém esta não contempla a porosidade presente no compósito. Visando à aplicação em materiais de fricção, há a necessidade de considerar a porosidade, pois esta além de influenciar na resistência mecânica pode também influenciar em outros fatores como ruído e vibração.

A fase porosa é característica de materiais de fricção por envolver um grande número de matérias-primas e utilizar, em sua grande maioria, a resina fenólica como matriz. Esta pode ser considerada uma grande causadora da porosidade intrínseca neste tipo de material, pois durante sua cura ocorre liberação de água, que será responsável pela formação dos poros nas etapas de prensagem e tratamento térmico no material em questão.

Para a proposta de modelo, a equação de Al-Qureshi serviu como base, tendo em vista os bons resultados apresentados em termos de propriedades de compósito, e inclui a abordagem de porosidade segundo os modelos de Spriggs (Equação 3.19) e Kingery (Equação 17).

Kingery (1976) propôs que a fração volumétrica de matriz fosse calculada de acordo com o percentual volumétrico de fibra, segundo a Equação 3.23.

$$V_m = 1 - V_f \quad \text{Equação 3.23}$$

A fim de entender o fator porosidade, partiu-se da Equação 3.17 proposta por Spriggs (1961) que correlaciona o módulo de elasticidade do material denso com a porosidade. No presente trabalho, foram considerados os poros advindos da matriz, conforme Equação 3.24.

$$E(P) = E_m \cdot e^{(-bP)} \quad \text{Equação 3.24}$$

Juntando-se a Equação 3.23 e Equação 3.24 na Equação 3.21, é possível ter um modelo para o cálculo do módulo de elasticidade que inclua o fator porosidade (Equação 3.25).

$$E_c = E_m(1 - V_f)e^{(-bP)} + \beta E_f V_f \quad \text{Equação 3.25}$$

A Equação 3.25 sugere que, no que diz respeito ao cálculo para a fibra, não houve necessidade de alteração no modelo proposto por Al-Qureshi, porém para as características de porosidade houve a necessidade de complemento com outros modelos.

## 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O trabalho experimental foi desenvolvido no Centro de Pesquisa da FRAS-LE S/A. A Figura 4.1 apresenta um fluxograma representativo do trabalho experimental realizado.

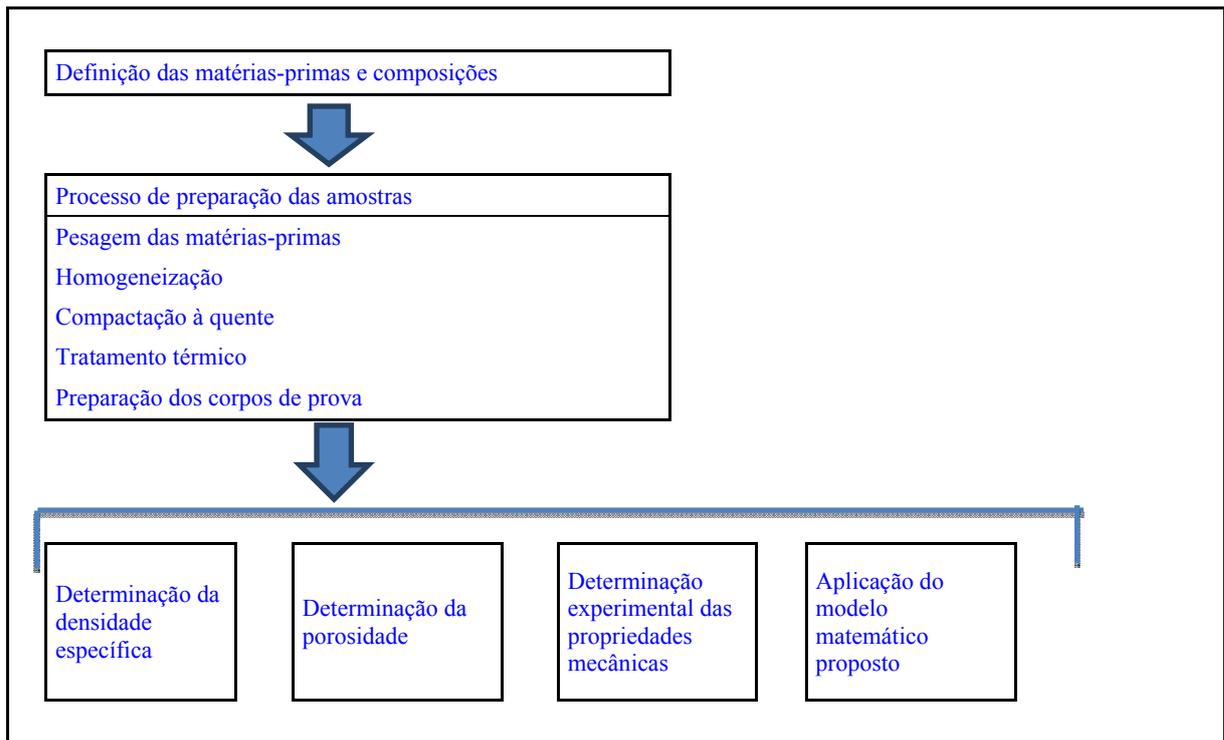


Figura 4.1: Fluxograma da metodologia experimental utilizada neste trabalho.

### 4.1 MATERIAIS

Para a realização do trabalho, primeiramente, foram selecionadas as matérias-primas. Para todos os testes foram utilizadas matérias-primas provenientes do mesmo lote de produção a fim de reduzir variações decorrentes do fornecedor assim como aumentar a sensibilidade do experimento.

Os ensaios foram realizados utilizando fibra de vidro fornecida pela JUSHI GROUP CO. A fibra aramida foi fornecida pela DU PONT. A resina fenólica em pó foi fornecida pela REICHHOLD DO BRASIL. As especificações das matérias primas utilizadas estão listadas na Tabela 9. A Figura 4.2 apresenta uma fotografia com amostras dessas matérias-primas.

Tabela 9: Especificações das matérias-primas utilizadas e suas especificações (dados fornecidos pelos fabricantes).

	<b>Módulo de elasticidade</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Faixa Especificação</b>
<b>Resina Fenólica</b>	5,3GPa	REICHHOLD DO BRASIL	Densidade: 1,2 – 1,3g/cm <sup>3</sup> Tempo de cura: 30- 40s Teor de hexa: 7-10% Fluidez: 30- 40mm Classe: Novolaca
<b>Fibra de vidro</b>	72,5GPa	JUSHI GROUP	Densidade: 2,5- 2,6 g/cm <sup>3</sup> Diâmetro do filamento: 15-20µm Comprimento: 2-4mm Nº filamentos/feixe: 100-300
<b>Fibra Aramida</b>	70 GPa	DUPONT	Densidade: 1,4-1,7 g/cm <sup>3</sup> Diâmetro do filamento: 10-15 µm Material em forma de polpa Nº filamentos: 500-2000



Figura 4.2: Amostras: resina fenólica (acima), fibra aramida (esquerda) e fibra de vidro (direita).

## 4.2 MÉTODOS

### 4.2.1 Preparação dos Corpos de Prova

A preparação dos corpos de prova foi feita em etapas. Primeiramente, foram pesadas as matérias-primas selecionadas na proporção pré-determinada para cada formulação. Para a verificação da influência do teor de fibra foram realizados experimentos variando o percentual volumétrico de fibra e resina fenólica. A Tabela 4.2 informa a nomenclatura e as proporções correspondentes, bem como a massa específica teórica, dos compósitos formulados.

Tabela 10: Formulações dos corpos de prova: proporção de resina e fibra de vidro e resina e fibra aramida em fração volumétrica.

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

\*FV indica uso de fibra de vidro e FA indica uso de fibra aramida.

#### 4.2.1.1 Homogeneização

Após pesagem e formulação, as matérias-primas foram homogeneizadas, utilizando um misturador tipo moinho de pás fabricado pela EIRICH, o qual possui uma pá de homogeneização e um rotor intensificador.

Para a confecção da mistura empregada nos experimentos, foi utilizada uma rotação de com 1800 rpm durante 2 minutos com uma carga de 6 kg. A mistura foi feita com os intensificadores desligados, pois o uso de intensificador pode levar à abertura das fibras.



Figura 4.3: Misturador do tipo moinhos de pás, empregado na homogeneização do material.

#### 4.2.1.2 Conformação

Os corpos de prova foram conformados por compactação a quente. Para tanto, foram manufaturadas placas com espessura de 5mm, largura de 200mm e comprimento de 300mm. Na compactação a quente, os seguintes parâmetros foram controlados: peso da mistura, espalhamento da mistura no molde, temperatura do molde (cavidade e punção), pressão aplicada à mistura e ciclo de cura do material, o que inclui o tempo sob pressão e o tempo de degasagem, conforme dados na Tabela 11.

Tabela 11: Parâmetros utilizados na conformação dos corpos de prova por conformação a quente.

Peso da mistura	2,5kg
Temperatura do molde (cavidade e punção)	140- 180°C
Pressão aplicada à mistura	5- 20Mpa
Ciclo de cura do material	12min Subdivididos em: -7 minutos para degasagem na forma de 14 ciclos (20s sob pressão e 10s de degasagem) - 5 minutos sob pressão

#### 4.2.1.3 Tratamento Térmico

Os corpos de prova foram submetidos ao tratamento térmico objetivando a sua estabilidade dimensional e finalização da reação de cura do material aglomerante. Para a

realização do tratamento térmico, usou-se uma estufa do tipo estática, controlando-se a temperatura e o tempo de residência.

O processo de tratamento térmico possui 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. Em seguida, o material foi mantido em isoterma de 160°C por 1 hora e 30 minutos.

### 4.2.3 Determinação da Massa e Densidade Específica

#### 4.2.3.1 Massa Específica das Matérias-Primas

A massa específica das matérias-primas foi determinada de acordo com a norma técnica ABNT NBR 11513/90, baseada no método denominado "*le chatelier*". Para tanto, se faz uso do frasco *le chatelier*, contendo álcool até determinada marcação e, então, é acrescentada determinada massa de amostra ( $m$ ) e verificada a diferença na leitura de volume final ( $VF$ ) e inicial ( $VI$ ), segundo Equação 4.1.

$$ME = \frac{m}{VF - VI} \quad \text{Equação 4.1}$$

O valor de massa específica obtido foi utilizado para o cálculo da densidade do compósito.

#### 4.2.3.2 Densidade Específica dos Corpos de Prova

A determinação da densidade específica dos corpos de prova baseou-se na norma técnica ABNT NBR 5544/98, onde a massa da amostra é medida na condição normal ( $m$ ) e posteriormente imersa em água ( $m_a$ ). A densidade do material é dada pela relação:

$$\rho = \frac{m}{m - m_a} \quad \text{Equação 4.2}$$

Para esta medição foi utilizada balança da marca MARTE, modelo AS500, com sensibilidade de 0,1 g e capacidade de carga de 5.000 g.

#### 4.2.4 Determinação da Resistência Mecânica

Para a determinação da resistência mecânica dos corpos de prova, foram realizados ensaios de flexão a 3-pontos. O ensaio seguiu a norma ASTM D790-07, método de teste I, segundo procedimento A. As dimensões do corpo-de-prova são apresentadas na Tabela 12. Os corpos de prova mantiveram superfície original da etapa de conformação, sem sofrer polimento ou lixamento. Foram confeccionados 30 corpos de prova de cada um dos materiais de fricção investigados.

A escolha do ensaio de flexão a 3-pontos deve-se ao fato de que este ensaio é muito utilizado para avaliação de materiais com características frágeis. O compósito ensaiado possui matriz fenólica, um polímero termofixo, e apresenta fragilidade característica desse material. Materiais frágeis têm sua resistência mecânica condicionada à presença de defeitos como trincas, que atuam como concentradores de tensão. Para o cálculo da resistência mecânica à flexão a 3-pontos foi utilizada a Equação 4.3.

$$\sigma = \frac{3LC}{2ld^2} \quad \text{Equação 4.3}$$

onde  $\sigma$  é a tensão necessária para romper o corpo de prova (em MPa),  $L$  é a distância entre apoios (em mm),  $C$  é a carga à qual o corpo de prova é submetido (em N),  $l$  é a largura do corpo de prova (em mm) e  $d$  é a espessura do mesmo (em mm).

Tabela 12: Dimensões dos corpos de prova e parâmetros do ensaio utilizado no ensaio de flexão a 3-pontos segundo a norma ASTM D790-07.

Comprimento	64 mm
Espessura	3,2 mm
Largura	12,7 mm
Distância entre apoios	50 mm
Velocidade de deflexão	1,36 mm/min
Número de amostras ensaiadas para cada material	30

#### 4.2.5 Determinação do Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade foi calculado com dados obtidos no ensaio de resistência mecânica à flexão a 3-pontos, utilizando a Equação 4.4.

$$E = \frac{mL^3}{4ld^3} \quad \text{Equação 4.4}$$

onde  $E$  é o módulo de elasticidade (em MPa),  $m$  é o coeficiente da curva força-deslocamento na porção linear da mesma (em N/mm). A deformação  $\varepsilon$  pode ser calculada pela Equação 4.5.

$$\varepsilon = \frac{6Dd}{L^2} \quad \text{Equação 26}$$

onde  $D$  é o deslocamento (em mm) apresentado pelo corpo de prova.

#### 4.2.6 Determinação da Porosidade

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

Para a realização desta análise, deve-se primeiramente medir a densidade do material, como descrito no item 4.2.3.1. Após, o material a ser ensaiado é triturado, com temperatura controlada a fim de evitar modificações na amostra. O tamanho do pó deve ser menor que o tamanho dos poros.

O material triturado é colocado em uma ferramenta de prensagem, que sofre uma força de 200kN sob vácuo. Neste é fixado o ponto zero para a altura, após o preenchimento da ferramenta com cerca de 4g de pó. A ferramenta fechada é evacuada por cerca de 1 min e, sob vácuo, sofre lentamente uma força de 200kN. Após forçar e liberar 3 vezes sob carga, é constatada no relógio medidor a altura ( $h$ ) do prensado e a amostra é retirada. Para o cálculo da porosidade foi utilizada a Equação 4.6.

$$\% \text{ Porosidade} = 100 - \frac{\rho \phi^2 h \pi 25}{m} \quad \text{Equação 4.6}$$

onde  $\rho$  representa a densidade do material (em  $\text{g/cm}^3$ ),  $\phi$  indica o diâmetro do prensado (em cm),  $h$  a altura do prensado sob carga (em cm), e  $m$  indica a massa do prensado (em g).

#### **4.2.7 Análise Visual da Porosidade**

Para verificação visual da quantidade e formato dos poros, foram feitas imagens com auxílio do microscópio ótico WILD GM7A com aumento de 12 vezes. A captura de imagens foi feita pela câmera *RS Image* e analisadas através do *software Roper Scientific Cool Snap*.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 DENSIDADE DO COMPÓSITO

A Tabela 13 apresenta um comparativo entre os valores teóricos e os obtidos experimentalmente das densidades específicas dos materiais de fricção investigados neste trabalho. A alteração dos teores dos componentes durante o seu processamento (prensagem e tratamento térmico) não ocasionou variação acima de 3%. Esta variação entre a densidade teórica e a experimental não foi considerada suficientemente elevada para justificar um recálculo nas composições dos materiais de fricção investigados, lembrando que a variação entre as formulações é de 5%, em volume, do percentual de fibra de uma amostra para outra.

Tabela 13: Resultados teóricos e experimentais da densidade específica dos materiais.

Material	Densidade Teórica- $\rho_T$ (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade Experimental- $\rho_E$ (g/cm <sup>3</sup> )	Varição entre $\rho_T$ e $\rho_E$
5%FV	1,27	1,29	2%
10%FV	1,34	1,36	1%
15%FV	1,41	1,45	3%
20%FV	1,48	1,5	1%
25%FV	1,55	1,58	2%
30%FV	1,62	1,63	1%
5%FA	1,22	1,25	2%
10%FA	1,25	1,27	2%
15%FA	1,27	1,27	0%
20%FA	1,29	1,29	0%
25%FA	1,31	1,32	1%
30%FA	1,34	1,30	3%

### 5.2 POROSIDADE

Os resultados obtidos nas medidas dos teores de porosidade estão explícitos na Tabela 14. A Figura 5.1 apresenta os resultados da Tabela 14, onde o eixo das abcissas indica o percentual de fibra utilizado e o eixo das ordenadas o percentual volumétrico encontrado. De acordo com esses dados, para o compósito com fibra de vidro o percentual de porosidade diminuiu com o aumento de fibra. Este fato pode estar relacionado a dois fatores: à quantidade de resina fenólica, visto que esta é que fará a liberação de água durante a formação das ligações cruzadas, segundo Artmann (2008).

Outro fator a ser considerado é o formato da fibra, como mostrado na Figura 4.2. O vidro utilizado encontra-se sob a forma de pequenos filamentos, o que facilita a penetração da resina. No entanto, para a aramida, que está na forma de polpa, quando a quantidade é aumentada, a resina apresenta maior dificuldade de penetração. Desta forma, após 15% de aramida o material apresentou estabilidade quanto ao grau de porosidade.

Tabela 14 Percentual de fibra e de porosidade nos materiais de fricção investigados neste trabalho.

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

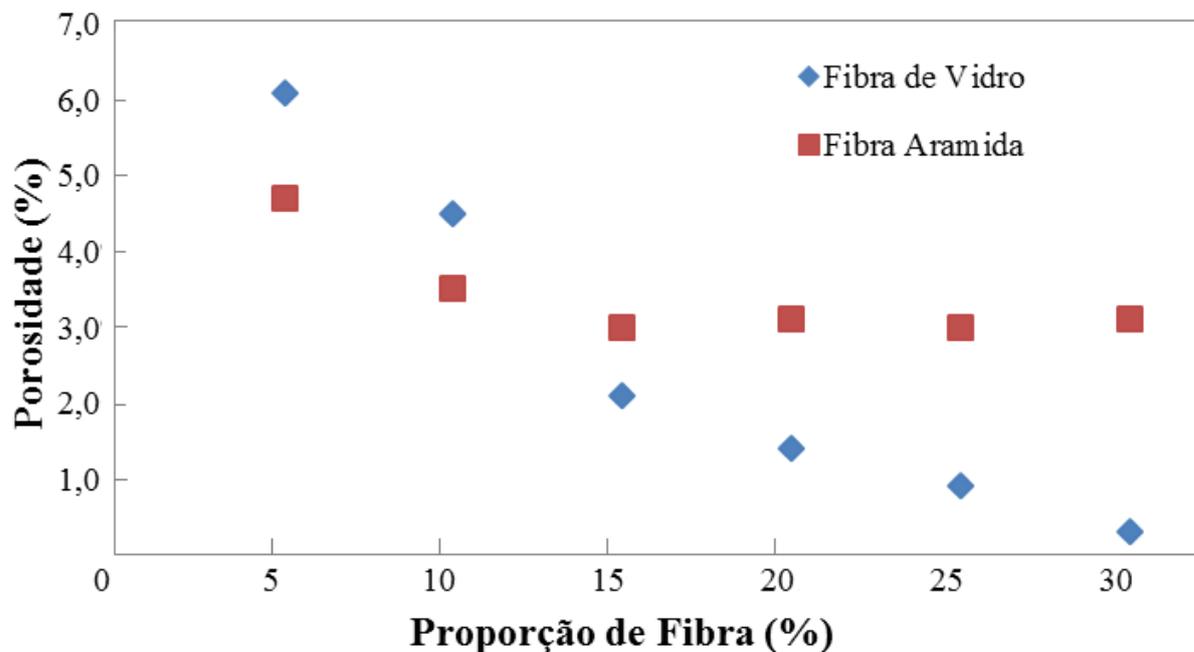
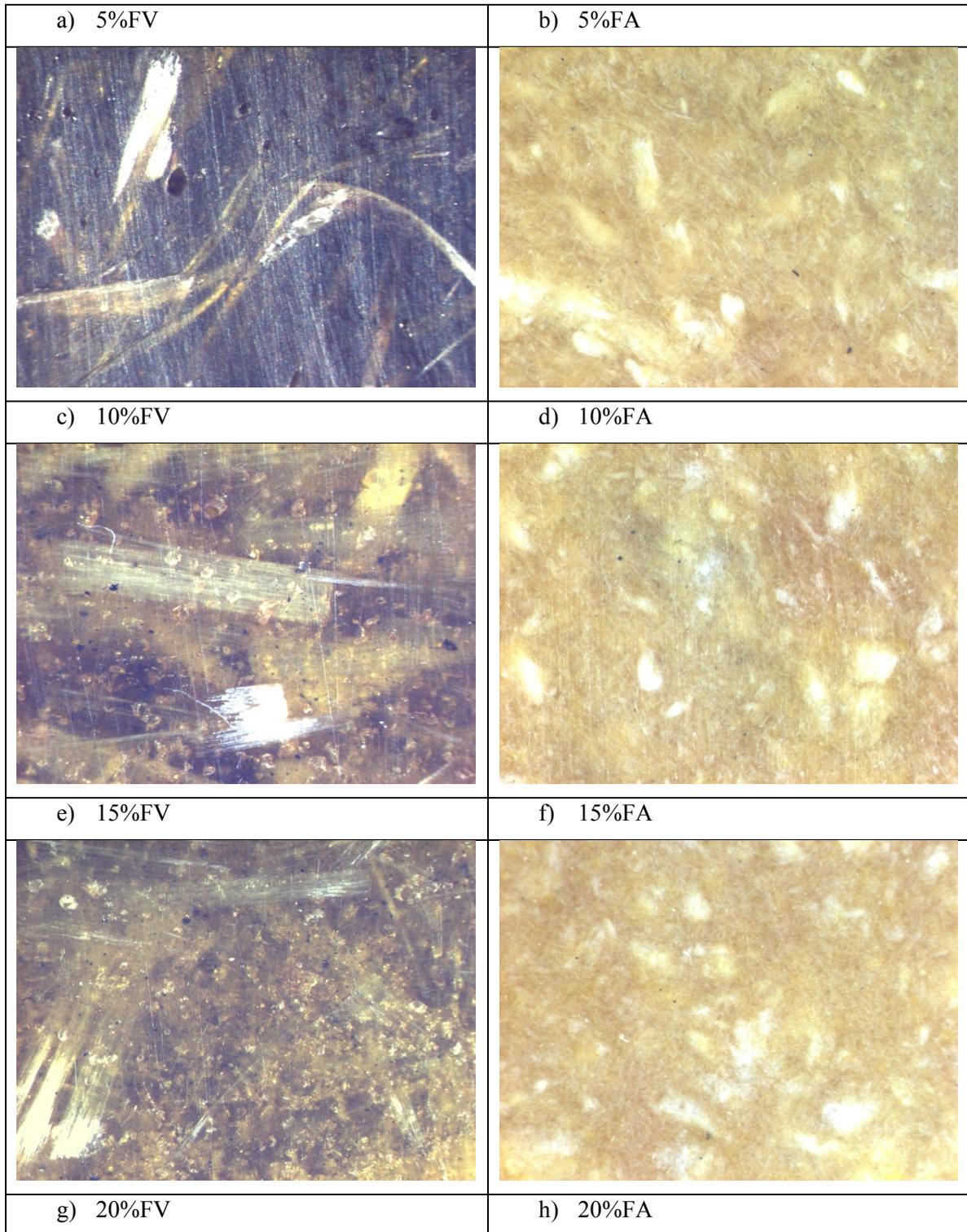


Figura 5.1: Percentual de porosidade apresentado nos materiais de fricção investigados.

A Figura 5.2 apresenta imagens por microscopia ótica dos materiais de fricção investigados com aumento de 12X.



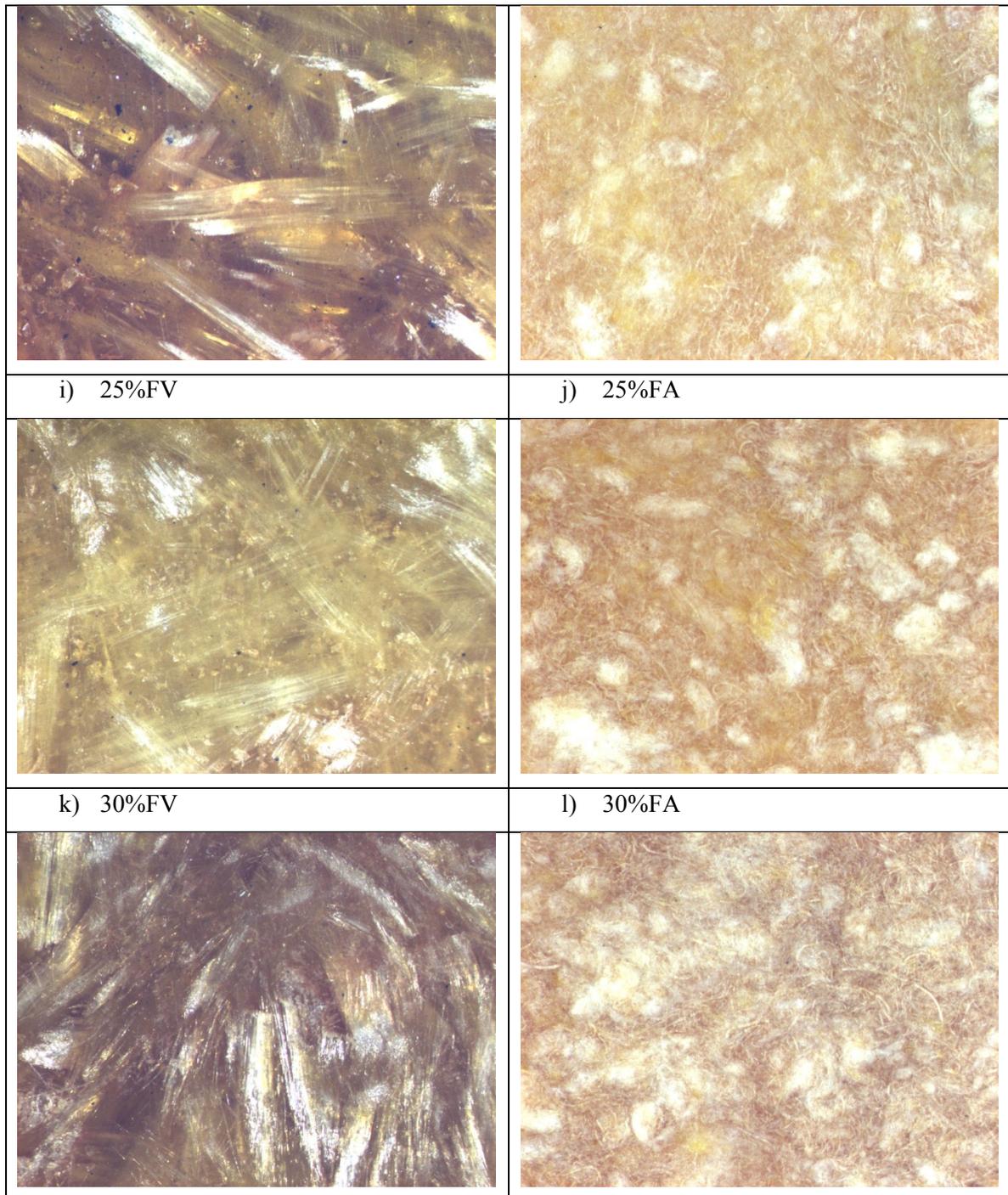


Figura 5.2: Imagens por microscopia ótica dos materiais de fricção investigados.

### 5.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

A Tabela 15 apresenta a média (de 30 corpos de prova) dos resultados de tensão de ruptura ( $\sigma$ ), módulo de elasticidade ( $E$ ) e deformação ( $\epsilon$ ), obtidos nos ensaios de flexão a 3-pontos.

Tabela 15 Média (de 30 corpos de prova) dos resultados de tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação apresentados no ensaio de flexão 3-pontos, segundo a norma ASTM D790-07.

<b>Material</b>	<b><math>\sigma</math> (MPa)</b>	<b>E (GPa)</b>	<b><math>\varepsilon</math> (%)</b>
<b>5%FV</b>	55,23	6,78	0,008
<b>10%FV</b>	88,11	8,85	0,010
<b>15%FV</b>	104,16	10,40	0,012
<b>20%FV</b>	99,16	10,17	0,009
<b>25%FV</b>	118,25	10,73	0,011
<b>30%FV</b>	132,76	14,78	0,009
<b>5%FA</b>	78,93	6,03	0,013
<b>10%FA</b>	91,91	6,11	0,014
<b>15%FA</b>	93,56	6,93	0,014
<b>20%FA</b>	97,84	7,17	0,014
<b>25%FA</b>	111,52	7,44	0,015
<b>30%FA</b>	110,90	7,96	0,015

Para efeito de visualização das diferenças nos dados da Tabela 15, a Figura 5.3 apresenta a média da tensão de ruptura e o respectivo desvio padrão de cada material de fricção investigado. Para tanto, o eixo das abcissas indica a proporção de fibra presente no material de fricção e o eixo das ordenadas a tensão de ruptura suportada pelo material em um ensaio de flexão a 3-pontos.

De acordo com a Equação 3.2, para ambos os materiais de fricção, tanto com a fibra de vidro quanto com fibra aramida, o volume crítico é de aproximadamente 2%. Como o percentual mínimo de fibra utilizado é de 5%, em todos os compósitos investigados, a fibra exerceu função estrutural.

Pode-se notar que até 15% de volume de fibra de vidro, houve um aumento considerável da tensão de ruptura suportada pelo material. Entretanto, para concentrações de fibra de vidro superiores a 15%, o material não rompeu a tensões significativamente superiores. De acordo com a Equação 3.3, esta tendência seria indicada para percentuais próximos a 25%. Nesses cálculos, foi considerado o fator de eficiência de 0,375, por ser um material ortotrópico.

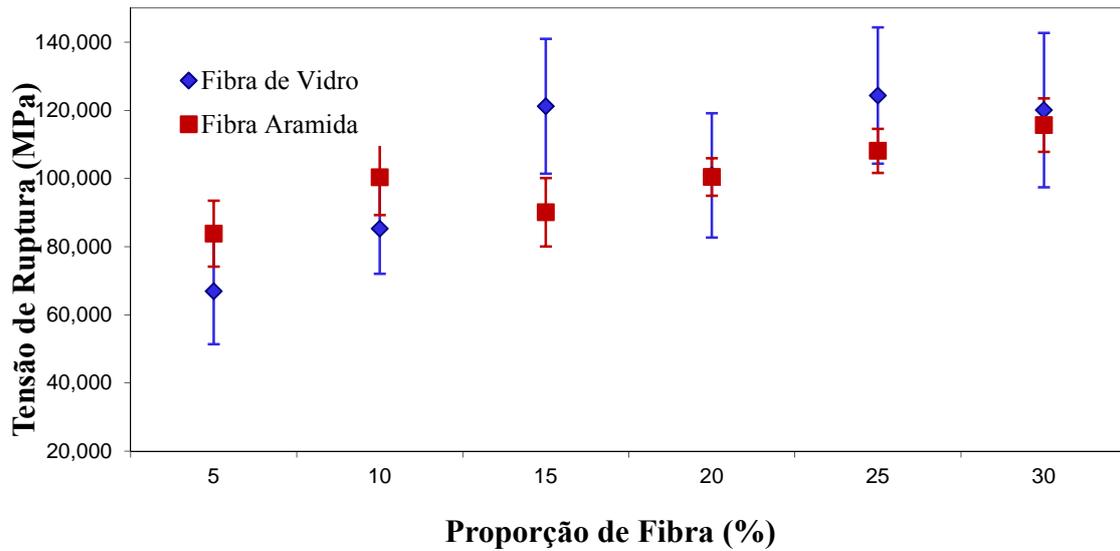


Figura 5.3 Média e desvio padrão da tensão de ruptura dos materiais de fricção investigados.

O material de fricção com fibra aramida apresentou aumento crescente da tensão de ruptura em função do teor de fibra, mais acentuado do que o obtido com a fibra de vidro.

A Figura 5.4 informa o comportamento apresentado pelos materiais de fricção compósitos em relação à deformação sofrida, onde o eixo das abcissas indica o teor de fibras e o eixo das ordenadas o percentual da deformação sofrida até a ruptura.

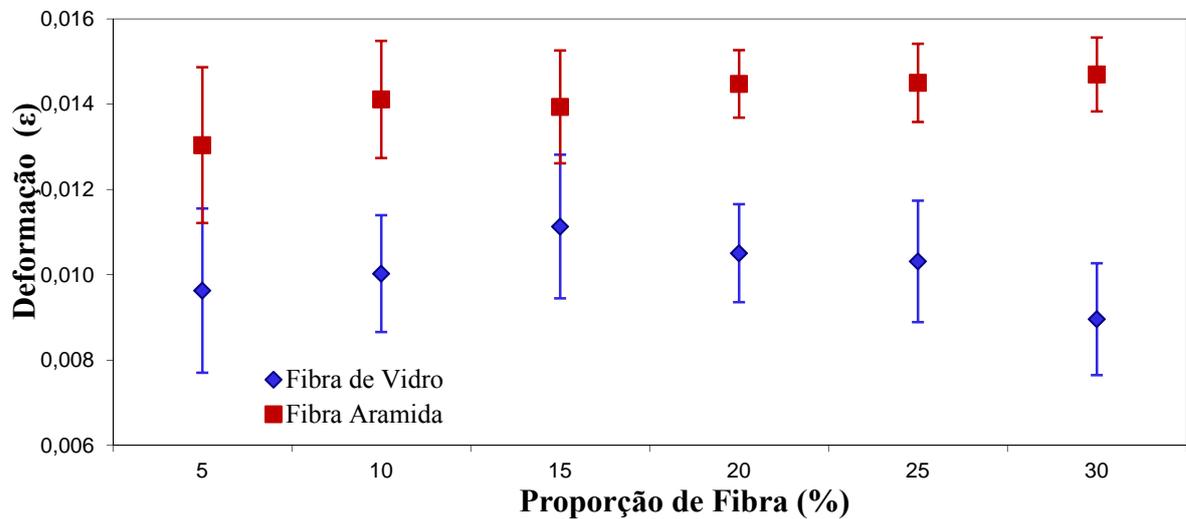


Figura 5.4 Média e desvio padrão da deformação dos materiais de fricção investigados.

Como comentado anteriormente, o material de fricção apresenta comportamento frágil, desta forma a deformação sofrida é pequena e praticamente a mesma em todos os percentuais de fibras analisados.

Quando comparada a fibra de vidro com a fibra aramida, percebe-se que a aramida possui deformação em torno de 25% superior, o que pode ser atribuído ao fato da aramida ser um material polimérico, enquanto a fibra de vidro é um cerâmico.

Além disso, todas as amostras contêm uma alta proporção de resina fenólica, material que apresenta comportamento frágil, desta forma tem-se um alto desvio padrão, cerca de 18%. Isto é ocasionado pelo fato do material apresentar comportamento frágil e totalmente elástico, concordando com a Lei de Hooke em todo seu perfil de deformação até a ruptura.

A Figura 5.5 apresenta a variação do módulo de elasticidade obtido no ensaio de flexão em função do teor de fibras no material de fricção investigado. Os resultados indicam que quanto maior o teor de fibras utilizado, tanto de vidro quanto aramida, maior o módulo de elasticidade do compósito. Para efeito de comparação, foram acrescentadas na Figura 5.4 as curvas com os valores do módulo de elasticidade do compósito segundo a lei das misturas (Equação 3.20).

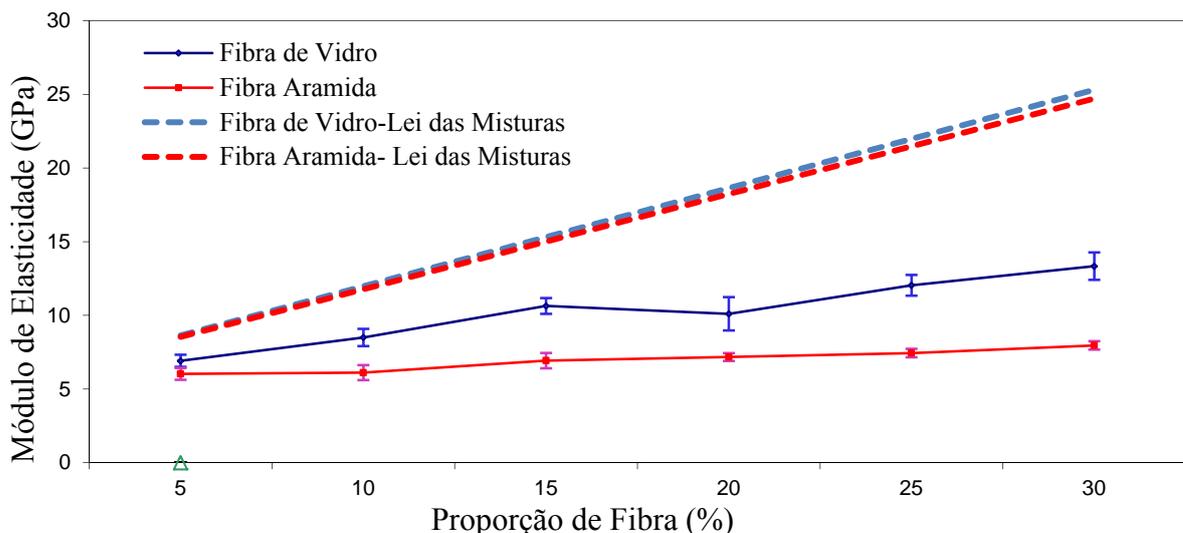


Figura 5.5 Média e desvio padrão do módulo de elasticidade dos materiais de fricção investigados.

É possível averiguar que os materiais de fricção investigados não seguem a Lei das Misturas. Assim, a seguir, será considerada a influência da porosidade nos materiais analisados.

### 5.3 RELAÇÃO ENTRE POROSIDADE E MÓDULO DE ELASTICIDADE

Na busca por uma relação porosidade e módulo de elasticidade, primeiramente, foi verificado se estas propriedades podem ser correlacionadas linearmente para os compósitos investigados. Para detalhar os valores de módulo de elasticidade e porosidade foi montada a Tabela 16.

Tabela 16 Módulo de elasticidade e porosidade dos materiais de fricção investigados.

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

A Figura 5.6 apresenta a relação entre porosidade e módulo de elasticidade e os fatores de correlação apresentados pelos compósitos com resina fenólica e fibra de vidro e resina fenólica e fibra aramida. O eixo das abcissas indica o percentual de porosidade e o eixo das ordenadas o módulo de elasticidade dos materiais de fricção investigados.

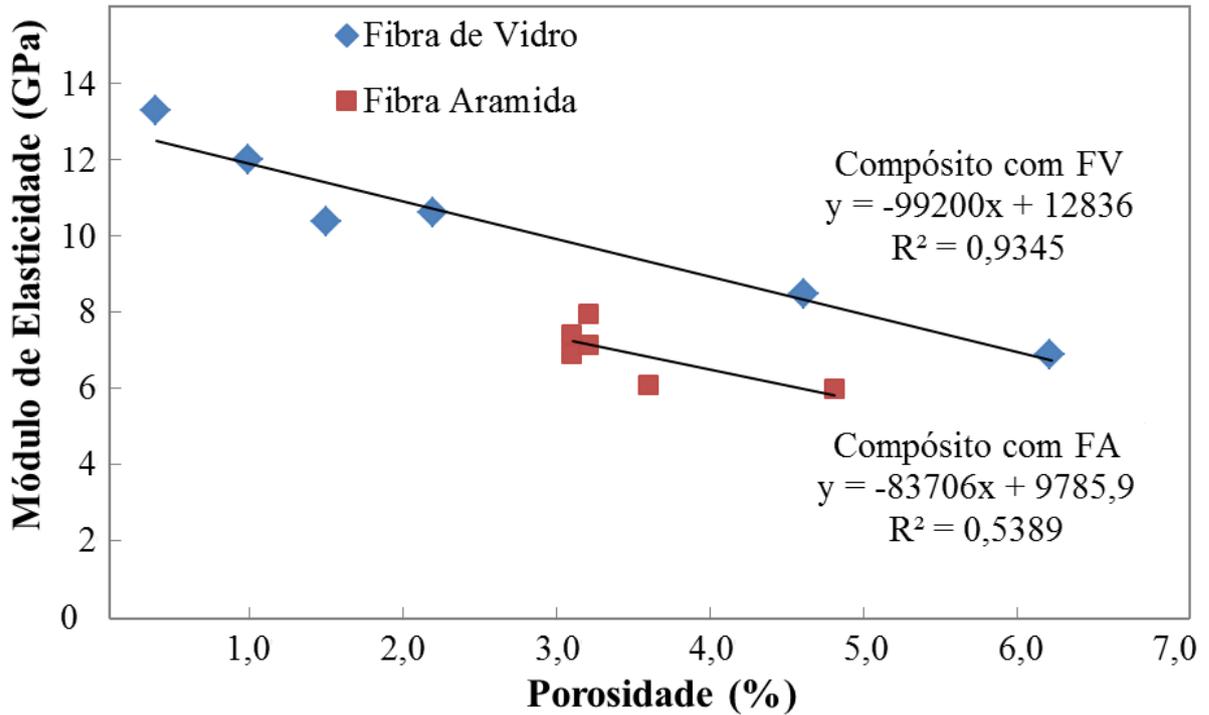


Figura 5.6 Relação entre porosidade e módulo de elasticidade dos materiais de fricção investigados e os fatores de correlação da regressão linear proposta.

A relação porosidade e módulo de elasticidade para a fibra de vidro apresenta fator de correlação linear razoável de  $R^2=0,93$ . Já para a aramida, o fator de correlação é de  $R^2=0,54$ , ou seja a relação linear entre o percentual de fibra de aramida e módulo de elasticidade é muito fraca. Desta forma o material deverá ser correlacionado por outra equação.

#### 5.4 APLICAÇÃO DO MODELO

Conforme verificado nos itens anteriores, os materiais de fricção investigados não podem ser modelados através da Lei das Misturas simples e não apresentam uma relação linear com a porosidade. Assim, baseado nestes fatores foi proposta a Equação 3.25, conforme descrito no item 3.7.2.

Para o cálculo do modelo é necessário definir a constante  $b$  que mais se adequa ao material de fricção, baseado nos experimentos de Spriggs (1961) e Knudsen (1962). Foram sugeridos valores de 0 a 7 e o valor que encontrou maior proximidade com os resultados de módulo experimental foi de 1,8. Desta forma, a partir da Equação 3.25, chega-se à Equação 5.1.

$$E_c = E_m(1 - V_f)e^{(-1,8P)} + 0,375E_fV_f \quad \text{Equação 5.1}$$

A Tabela 17 apresenta os valores obtidos com a aplicação da Equação 5.1, com uma comparação com os resultados encontrados experimentalmente para o material de fricção com fibra de vidro e resina fenólica.

Tabela 17 Resultados teóricos e experimentais dos módulos de elasticidade testados para o material de fricção com fibra de vidro.

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

A variação média entre o módulo de elasticidade obtido experimentalmente e o calculado segundo o modelo proposto é de 13%. Se este valor fosse proveniente de um material cerâmico, polimérico ou metálico seria considerado elevado, porem por se tratar de um material compósito onde dispomos da variação proveniente de dois módulos elásticos este valor é considerado aceitável. Correlacionando o módulo de elasticidade teórico com o módulo de elasticidade experimental, conforme a Figura 5.7, verifica-se uma significativa correlação,  $R^2 = 0,94$ , indicando que a Equação 5.1 é aplicável para este compósito.

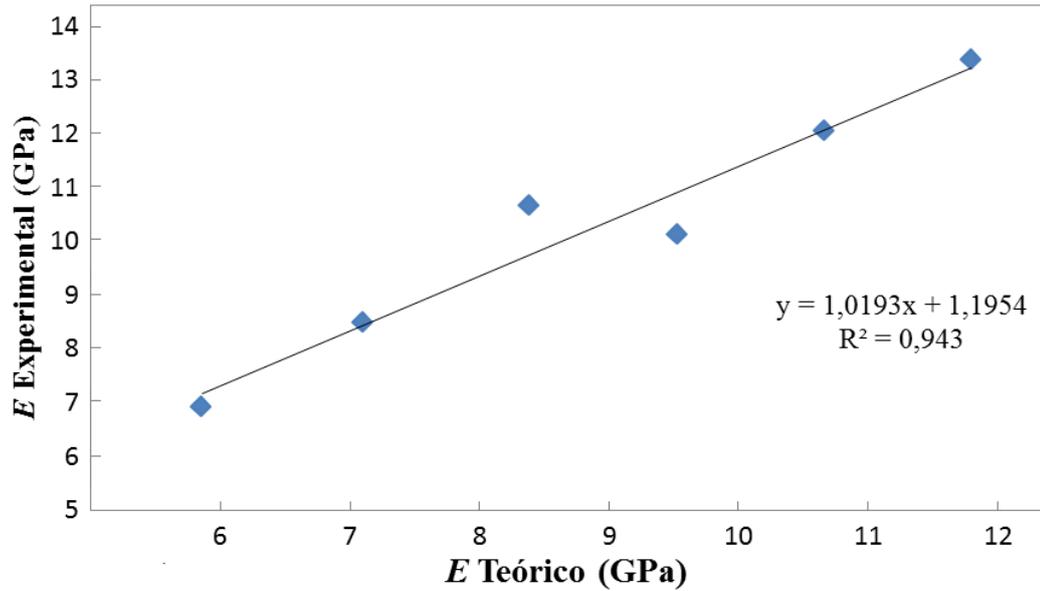


Figura 5.7: Correlação entre os resultados de módulo de elasticidade teórico e experimentais para o compósito com fibra de vidro.

Para o material de fricção com fibra aramida foi repetido o mesmo procedimento feito com o material de fricção com fibra de vidro. A Tabela 18 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 18: Resultados teóricos e experimentais dos módulos de elasticidade testados para o compósito com fibra aramida.

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

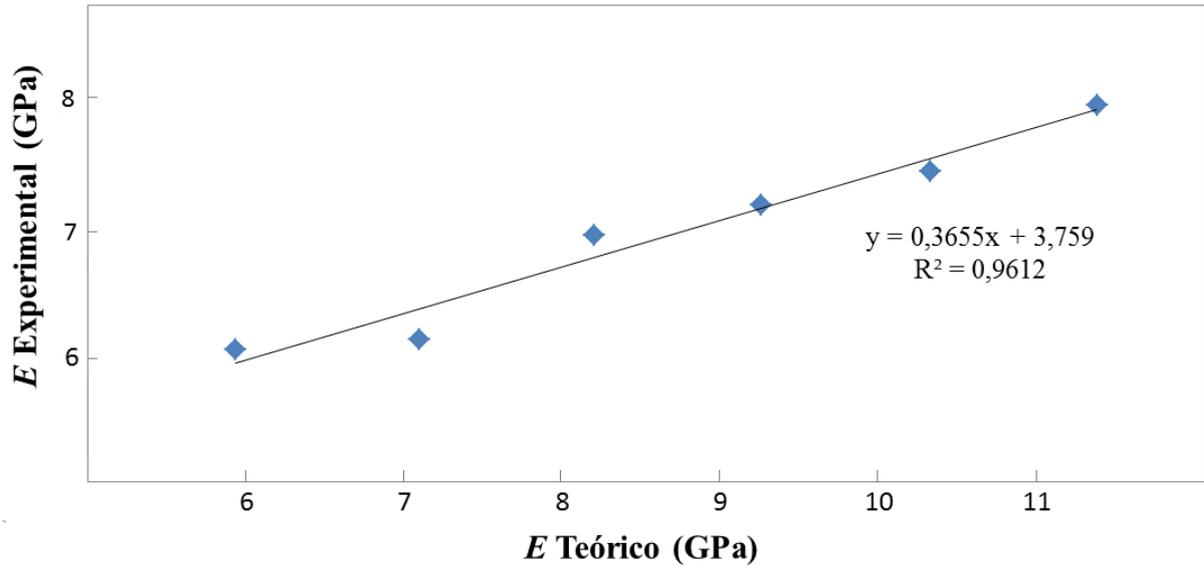


Figura 5.8: Correlação entre os resultados de módulo de elasticidade teórico e experimentais para o compósito com fibra aramida.

Como comentado anteriormente, o formato da fibra tem forte influencia na penetração da resina e conseqüentemente na porosidade apresentada pelo material, de tal modo que a variação entre módulo de elasticidade teórico e experimental apresentada pelo material de fricção com fibra aramida também se mostrou superior a variação apresentada pelo material de fricção com fibra de vidro (variação média de 24%). Porém este fato não foi relevante para o fator de correlação, que se mostrou plausível  $R^2=0,96$ , desta forma é possível aplicar a Equação 5.1 na ampla gama de compósitos investigados.

## 6. CONCLUSÕES

A partir do desenvolvimento deste trabalho experimental, é possível inferir as seguintes conclusões:

-Para os materiais de fricção investigados, foi constatado que o volume crítico de fibras para os dois compósitos é de 2%,. Portanto, em todas as amostras a fibra exerceu função estrutural.

-A presença de fibra de vidro no material de fricção acarretou na obtenção de um menor crescimento da tensão de ruptura após 15% de volume de fibra de vidro. Já o material de fricção com fibra aramida apresentou maior crescimento da tensão de ruptura em função da proporção de fibra aramida no compósito até 30% de fibra (que foi a máxima adição investigada). Este fato pode estar relacionado ao formato da fibra e a interação fibra/resina. A fibra de vidro utilizada possui tratamento químico para obter maior interação química com a resina fenólica, o mesmo não ocorre com a fibra aramida utilizada, que não possui um tratamento químico específico.

-A densidade teórica e a densidade experimental não apresentaram grande variação, ou seja, durante o processo de confecção das amostras não houveram perdas acentuadas de matéria prima .

-Foi constatada uma fraca correlação linear entre porosidade e módulo de elasticidade principalmente para materiais de fricção com fibra aramida. A taxa de diminuição de porosidade apresentada pelo compósito com fibra de vidro diferiu significativamente do compósito com fibra aramida (possivelmente pelo formato de fibras curtas das fibras de aramida).

-A modelagem matemática simplificada proposta, desenvolvida a partir da Lei das Misturas Modificada do equacionamento proposto por Al-Qureshi e por Spriggs e Kingery, a partir de agregação de mais uma variável, a porosidade, permitiu uma correlação entre o módulo de elasticidade e a porosidade. Os dados calculados através do modelo proposto concordam de forma satisfatória com os resultados experimentais, dando suporte para a afirmação de que as modificações propostas ao modelo base foram feitas de forma correta. Na aplicação do modelo houve a necessidade de uso de uma constante relacionada à porosidade,  $b$ , assumido para a resina fenólica um valor de 1,8.

-A utilização da modelagem matemática proposta em projetos de materiais de fricção pode trazer benefícios em termos de redução do tempo de desenvolvimento de produto e acurácia no projeto, conseqüentemente, na redução do custo do desenvolvimento do produto. Já que, de acordo com o conhecimento empírico, a porosidade está fortemente relacionada a propriedades como o ruído e vibração conseqüências da rigidez e frequência residual. Desta forma quando houver necessidade de controle destas propriedades em um compósito de fricção a matéria prima que deve ser tratada de forma especial é a resina fenólica utilizada.

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos no presente trabalho, é possível sugerir temas para trabalhos futuros. Muitas das sugestões visam à validação do modelo proposto em um material de fricção pela verificação de alguns aspectos que não foram englobados neste trabalho. O equacionamento em materiais com maior número de matérias-primas e a necessidade de avaliação de correlações entre microestrutura, porosidade e resistência mecânica são fatores que devem ser considerados. É importante ressaltar que o material investigado possui somente duas matérias-primas e um compósito para fricção pode possuir até mais de 10 diferentes matérias-primas.

Nesse contexto, é possível sugerir:

- i) Estudar o comportamento mecânico de outras fibras, como fibra de aço, cobre e latão e basálticas que também possuem uma ampla aplicação em materiais de fricção;
- ii) Investigação de correlações entre tamanho, forma, orientação e disposição dos poros e módulo de elasticidade;
- iii) Investigar a integridade na adesão interfacial, entre a resina fenólica e as fases presentes no compósito.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**ABNT NBR 11513/90.** Materiais granulares usados em fundição - Determinação da massa específica pelo uso do frasco volumétrico de "Le Chatelier". **Rio de Janeiro- Brasil, 1990.**

**ABNT NBR 5544/98.** Guarnições da embreagem e do freio - Determinação da densidade relativa. **Rio de Janeiro- Brasil, 1998.**

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

AL-QURESHI, H.A., STAEL, G.C., **Modified Rule of Mixtures for natural Fiber Composites**, In: 16th Canadian Congress of Applied Mechanics, CANCAM-97, University of Laval, Québec, Canada, v.1, pp. 49-50, 1997

ARJMAND, M., SHOJAEI, A., **Tribological Characteristics of Rubber-Based Friction Materials**, Tribol Lett, 2011.

ARTMANN A., **Estudo para a otimização do processamento de formulações de resina fenólica aplicada à material de fricção**, Caxias do Sul, UCS; Dissertação de Mestrado, 2008

ASMANI, M., KERMEL, C., LERICHE, A., OURAK, M., **J. Eur. Ceram. Soc**; **21**, 2001, p 1081-1086.

ASTM STANDARDS D790-07; **Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**; Manual Book of ASTM Standard; 2007.

AVESTON, J.; COOPER, G. A.; KELLY, A. **Single and multiple fracture. In: Conference on the Properties of Fiber Composites**, London, 1971. Proceedings. NPL.

BANTHIA, N.; TROTTIER, J-F. **Concrete reinforced with deformed steel fibers - Part II: Toughness characterization.** ACI Materials Journal, v.92, n.2, Detroit, USA, mar-abr., 1995b.

BAYER, A. **Ber. Dtsh Chem. Ges.** v.5, 1872, p. 1095 *apud* KNOP, A.; SCHEIB, W. **Chemistry and Application of Phenolic Resin (Polymer/Properties and Application 3)** Springer-Verlag, Berlim, Heidelberg, New Youk, 1979. 269

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites.** United Kingdom. Barking, Elsevier. 1990.

BERNARDI, S. T., **Avaliação do Comportamento de Materiais Compósitos de Matrizes Cimentícias Reforçadas com Fibra Aramida Kevlar**, Porto Alegre, UFRGS; Dissertação de Mestrado no Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, 2003.

BLUMMER, L. **DE-PS 172877**. 1902 *apud* KNOP, A.; SCHEIB, W. **Chemistry and Application of Phenolic Resin (Polymer/Properties and Application 3)** Springer-Verlag, Berlim, Heidelberg, New Youk, 1979. 269

BOCCACCINI, D. N., BOCCACCINI, A. R., **J. Nondestructive Evaluation** **16**, 1997, p187-192.

CALLISTER, W.D., **Materials science and engineering introduction**, 5a edição, Rio de Janeiro: LTC, 2002.

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

CASARIL, A.; **Modelagem Matemática e Avaliação Experimental do Módulo de Elasticidade de Materiais Compósitos Particulados de Matriz Fenólica para uso como Material de Fricção**. Porto Alegre, UFRGS; Dissertação de Metrado, 2009.

CHAN, D., STACHOWIAK G.W., **Review of automotive brake friction materials**, J. Automobile Engineering, 2004, vol. 218 parte D, 953 – 966.

CHOREN, J. A., HEINRICH, S. M., SILVER-THORN, M. B., **Young's modulus and volume porosity relationships for additive manufacturing applications**, Springer Science+ Business Media, New York, 2013

CLAISEN, L. **Justus Liebigs Ann Chem.** v.237, 1891 p. 283 *apud* KNOP, A.; SCHEIB, W. **Chemistry and Application of Phenolic Resin (Polymer/Properties and Application 3)** Springer-Verlag, Berlim, Heidelberg, New York, 1979. 269

CLAUS, A; TRAINER, E. **Ber. Dtsh Chem. Ges.** v.19, 1886 p. 3009 *apud* KNOP, A.; SCHEIB, W. **Chemistry and Application of Phenolic Resin (Polymer/Properties and Application 3)** Springer-Verlag, Berlim, Heidelberg, New York, 1979. 269

DADKAR, N., TOMAR, B.S., SATAPATHY, B.K., **Evaluation of Flayash-Filled and Aramid Fiber Reinforced Hybrid Polymer Matrix Composite (PMC) for Friction Brake Applications**, Materials & Design, Volume 30, Issue 10, 2010, p. 4369-4376.

DONG, Z., SUN, C. T. **Testing and Modeling of Yarm Pull-out in Plain Wovem Kevlar Fabrics**, Composites, 2009

DÖRRE, E., HÜBNER, H., **Alumina Processing, Properties and Applications**, Springer-Verlag, Berlin, 1984, p74-104.

DU PONT. Du Pont de Nemours & Co., Inc., E.I Catálogo Técnico, 199-

EL-TAYEB, N.S.M., YOUSIF, B.F., YAP, T.C., **An Investigation on Worn Surfaces of Chopped Glass Fiber Reinforced Polyester Through SEM Observation**, Tribology International 41, 2008, p331-340.

ELZEI D.M., *et al.*, Multi-criteria optimization in the design of composites for friction applications. In: Proceedings of the International Conference on Brakes, 10-11 Julho. Leeds: 2000, 197-206.

ERIKSSON, M., *et al.*, **One the nature of tribological contact in automotive brakes**. Wear, 252, p 26-36, 2002.

FARBENFABR. BAYER **DE-PS 87335**. 1895 *apud* KNOP, A.; SCHEIB, W. **Chemistry and Application of Phenolic Resin (Polymer/Properties and Application 3)** Springer-Verlag, Berlim, Heidelberg, New Youk, 1979. 269

FÉLIX, A.H.O., **Compósitos de Polipropeleno com Fibras de Vidro Utilizando Viniltriexisilano como Agente de Adesão**, 2002, Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

**Fibre-matrix property compatibility of short fiber composites**. J.Polymer Composites, 1993, P. 85–93

FRAS-LE S/A, Catálogo de produtos, Disponível em: <http://catalogo.fras-le.com.br/>, Aceso em maio de 2012.

GIBSON, L. J., ASHBY, F. M., **Cellular Solids- Struture and Properties**, 2<sup>nd</sup> ed., Cambridge University Press, 1997, p175-234.

**Glass-Phenolic Composite Journal Bearings**, Composites: Part A 40, 2009, p. 1186-1191.

GORDON, D.H., KUKUREKA, S.N., **The Wear and Friction of Polyamide 46 and Polyamide 46/Aramide- Fiber Composite in Sliding-Rolling Contact**, Wear 267, 2009, p. 669-678.

GURUNATH, P.V., BIJWE, J., **Friction and Wear Studies on Brake-Pad Materials based on Newly Developed Resin**, *Wear* 263, 2007, p. 1212-1219.

HANNANT, D. J. (1978) **Fibre cements and fibre concretes**. Chichester, John Wiley.

HASHIM, Z., **Elasticity of Ceramic System**, in R. M. Fulrath, J. A. Pask (eds.), *Ceramics Microstructures*, John Wiley and Sons, New York, 1968, p 313.

KIM, J., MAI Y., **Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites**, Elsevier Science, Oxford, 1998.

KINGERY, W. D., BOWEN, H. K., UHLMANN, D. R., **Introduction to Ceramics**, 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley & Sons, New York (1976) p.1032.

KLEEBOEG, **Justus Liebigs Ann Chem.** v.263, 1891 p. 283 *apud* KNOP, A.; SCHEIB, W. **Chemistry and Application of Phenolic Resin (Polymer/Properties and Application 3)** Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1979. 269

KNUDSEN, F. P., **J. Am. Ceram. Soc.** 45, 1962, p 94-95.

LANGE, P.J., AKKER, P.G., MÄDER, E., GAO, S.L.PRASITHPHOL,W., YOUNG, R.J., **Controlled Interfacial Adhesion of Twaron Aramid fibers in Composites by the Finish Formulation**, *Composites Science and Technology* 67, 2007, p. 2027-2035.

LARSEN, T.O., ANDERSEN, T.L., THORNING, B., HORSEWELL, A., VIGILD, M.E., **Comparison of Friction and Wear for Epoxy Resin Reinforced by a Glass or Carbon/Aramid Hybrid Weave**, *Wear* 262, 2007, p. 1013-1020.

LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY. Kevlar-Putting it all Together. Disponível em: [www.lbl.gov/MicroWorlds/Kevlar](http://www.lbl.gov/MicroWorlds/Kevlar). Acesso em março de 2012.

LEAL, A.A., DEITZEL, J.M., MCKNIGHT, S.H., GILLESPIE JR, J.W., **Interfacial Behavior of High Performance Organic Fibers**, *Polymers* 50, 2009, p. 1228-1235.

LEDERER, L. **Prakt Chem.** v.50, 1894 p. 223 *apud* KNOP, A.; SCHEIB, W. **Chemistry and Application of Phenolic Resin (Polymer/Properties and Application 3)** Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1979. 269

LI, J.F.H.J., FU, Y.W., QI, L.H., ZHANG, Y.L., **Effect of Phenolic Resin Content on Performance of Carbon Fiber Reinforced Paper-Based Friction Material**, *Wear* 269, 2010, p. 534-540.

- LUFT, A. **DE-PS 140552**. 1902 *apud* KNOP, A.; SCHEIB, W. **Chemistry and Application of Phenolic Resin (Polymer/Properties and Application 3)** Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New Youk, 1979. 269
- MACKENZIE, J. K., **Proc. Phys. Soc. 63B**, 1950, p2-11.
- MANASSE, O. **Ber. Dtsh Chem. Ges.** v.27, 1894 p. 2409 *apud* KNOP, A.; SCHEIB, W. **Chemistry and Application of Phenolic Resin (Polymer/Properties and Application 3)** Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New Youk, 1979. 269
- MANO, E. B., MENDES, L.C., **Introdução à Polímeros**, São Paulo: Edgar Blucher, 2 ed., 1999.
- MANO, E. B., **Polímeros como Materiais de Engenharia**, São Paulo: Edgar Blucher, 2 ed., 2000.
- MERLINI, C., SOLDI, V., BARRA, M.O., **Influence of Fiber Surface Treatment and Lenght on Physico-Chemical Properties of Short Random Banana Fiber-Reinforced Oil Polyuretane Composites**, Polymer Testing 30, 2011, p. 833-840.
- NAIR C. P. R., **Advances in addition-cure phenolic resins**, Progress in Polymer Science, Elsevier, 2004, p 404.
- NICHOLSON G., **Facts about friction**, 1995.
- NIKOLAEV, P., MENAMPARAMBATH, M.M., BOUL, P.J., MOLONEY, P., AREPALLI, S. **Raman Probing of Adhesion Loss in Carbon Nanotube- Reinforced Composite**, Composite Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 42, Issue 21, p. 1681-1686.
- ONDRACEK, G., **Reviews on power Metallurgy and Physical Ceramics 3**, 1987, p205-322.
- OSTERLE W., Urban I., **Chemical and microstructure aspects controlling friction and wear of brakes**. Wear 2001; 251: 1469-1476.
- OWENS CORNING, Catálogo De Produtos, Disponível em: <http://www.owenscorning.com.br/lineup.asp>, Aceso em maio de 2012.
- ÖZTÜRK, B., ÖZTÜRK, S., **Effects of Resin Type and Fiber Length on the Mechanical and Tribological Properties of Brake Friction Materials**, Tribol Lett, 2011, V. 42, p. 339-350.
- PAN N., **Theoretical determination of the optimal fiber volume fraction and**

PATNAIK, A., KUMAR, M., SATAPATHY, B.K., TOMAR, B.S., **Performance Sensitivity of Hybrid Phenolic Composites in Friction Braking: Effect of Ceramic and Aramid Fiber Combination**, *Wear*, 2010, Volume 269, Issues 11-12, p. 891-899.

PILATO, LOUIS A., MICHAEL J. **Advanced Composites Materials**. 1ed. Springer-Verlag, New York, 1994. 208p.

RENNER, K., MÓCZO, J., VÖRÖS, PUKÁNSZKY, B. **Quantitative Determination of Interfacial Adhesion in Composites with Strong Bonding**, *European Polymer Journal*, 2010.

ROBERTS, A. P., GARBOCZI, E. J., *Acta Mater.* **49**, 2001, p 189-197.

ROCHA, C. C., **A Fibra Aramida**. Disponível em: [www.casadagua.com/casa\\_viewcasa.asp?idcase=179](http://www.casadagua.com/casa_viewcasa.asp?idcase=179). Acesso em março de 2012.

SALVERRÍA, J.H., CASAS, J. R., APARICIO, A. C. **Estúdio Experimental sobre el uso de Fibras Aramidas para Reparación y Refuerzo de Puentes Existentes**, IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções, 1997.

SANTOS, C. G., LARANJEIRA, D. A., CARAZZA, F. **A Utilização de Alcatrão Vegetal na Produção de Resinas Fenólicas**, ICEX- UFMG 30.161, Belo horizonte, MG, 1988.

SANTOS, L.A. **Desenvolvimento de Cimento de fosfato de cálcio Reforçado por Fibras para uso na Área Médico-Odontológica**, 2002, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica Universidade Federal de Campinas, Campinas.

SEYMOR, RAYMOND B. **Polymers for Engineering Applications**. 1ed. ASTM International, Carnes Publications Services, 1987. 198p.

SHAH, D.U., SCHUBEL, P.J., LICENCE, P. CLIFFIRD, M.J., **Determining the minimum, critical and maximum fibre content**, *Composite Science and Technology*, 2012.

SMITH, A. **DE-PS 112685**. 1899 *apud* KNOP, A.; SCHEIB, W. **Chemistry and Application of Phenolic Resin (Polymer/Properties and Application 3)** Springer-Verlag, Berlim, Heidelberg, New Youk, 1979. 269

SPEIER, A. **DE-PS 99570**. 1897 *apud* KNOP, A.; SCHEIB, W. **Chemistry and Application of Phenolic Resin (Polymer/Properties and Application 3)** Springer-Verlag, Berlim, Heidelberg, New Youk, 1979. 269

SPRIGGS, R. M., *J. Am. Ceram. Soc.* **44**, 1961, p 628-629.

STAR, TREVOR F. **Pultrusion form Engeneers**. 1ed. Boca Raton, Cambridge, CRC Press, 2000. 303p.

TANESI, J., AGOYPAN, V., **Compósitos Reforçados com Fibras Plásticas para Construção Civil**. II Encontro de Tecnologia de Sistemas Plásticos na Construção Civil. EPSP. São Paulo, 1997.

TER MEER, E. **Ber. Dtsh Chem. Ges.** v.7, 1874, p. 1200 *apud* KNOP, A.; SCHEIB, W. **Chemistry and Application of Phenolic Resin (Polymer/Properties and Application 3)** Springer-Verlag, Berlim, Heidelberg, New Youk, 1979. 269

VOLKSWAGEN PV3005, **Determinação da Porosidade**, Guarnição para Freios à Tambor e a Disco- Ensaio de Material, 1997

YANG, H. H., **Kevlar Aramid Fiber**. Willey, 1993

YU, H.N., KIM, S.S., LEE, D.G., **Optimum Design of Aramid-Phenolic/**

ZHONG, L.X., FU, S.Y., ZHOU, X.S., ZHAN, H.Y., **Effect of Surface Microfibrillation of Sisal/Aramid Fiber Hybrid Composite**, Composites: Part A 42, 2011, p. 244-252.

## Anexo I- Determinação do Volume Crítico

A determinação do volume crítico está associada à modelagem proposta por AVESTON, CUPPER e KELLY (1971) a qual focaliza um compósito ideal, com fibras contínuas e alinhadas à direção do esforço principal.

A seguir será feita a dedução algébrica para determinação do volume crítico de fibras:

Definições iniciais:

$\epsilon_{mu}$  = deformação última da matriz

$\sigma_{mu}$  = tensão última da matriz

$V_{fcrit}$  = volume crítico de fibras dado em percentual em relação ao volume total do compósito

$\sigma_{fu}$  = tensão última das fibras

$E_f$  = módulo de elasticidade da fibra

$E_m$  = módulo de elasticidade da matriz

$V_c$  = volume de compósito = 1

$V_f$  = volume de fibra no compósito

$V_m$  = volume da matriz no compósito

Assim,

$$V_c = V_f + V_m = 1$$

O estado de tensões e deformação do compósito no exato momento em que há a ruptura da matriz define as condicionantes do volume crítico de fibras. Assim, a deformação da fibra é a mesma da matriz nessa situação:

$$\epsilon_f = \epsilon_{mu}$$

A tensão aplicada na fibra é dada por:

$$\sigma_f = \epsilon_{mu} E_f$$

A tensão de ruptura da matriz é obtida por:

$$\sigma_{mu} = \epsilon_{mux} E_m$$

Assim temos:

$$\sigma_c \times V_c = \sigma_f \times V_f + \sigma_{mu} \times V_m$$

$$\sigma_c \times 1 = \sigma_f \times V_f + \sigma_{mu} \times (1 - V_f)$$

$$\sigma_c = \epsilon_{mux} E_f \times V_{fcrit} + \sigma_{mux} (1 - V_{fcrit}) \quad (1)$$

Logo após a ocorrência da ruptura da matriz há a transferência do carregamento da matriz, que perde a sua capacidade portante, para a fibra, que a assume da seguinte forma:

$$\sigma_c = \sigma_{fu} V_{crit}$$

aplicando-se esta equação em (1) temos:

$$\sigma_{fu} V_{crit} = \epsilon_{mux} E_f V_{crit} + \sigma_{mux} (1 - V_{crit}) \quad (2)$$

isolando-se o  $V_{crit}$  na equação (2) temos:

$$V_{crit} = \sigma_{mu} / (\sigma_{fu} - \epsilon_{mux} E_f + \sigma_{mu}) \quad (3)$$

Sabendo-se que:

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m = E_f x V_{crit} + E_m (1 - V_{crit})$$

tem-se:

$$E_f = (E_c - E_m + E_m V_{crit}) / V_{crit} \quad (4)$$

Substituindo-se (4) em (3), temos:

$$V_{crit} = (\epsilon_{mux} E_c) / \sigma_{fu} \quad (5)$$