

**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

**TENACIDADE À FRATURA DE MATERIAIS COMPÓSITOS DE FRICÇÃO COMO  
REQUISITO DE PROJETO DE COMPONENTES DE FRENAGEM PARA A  
INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA**

por

Alexandre Casaril, MSc.

Defesa de Tese de Doutorado

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

**TENACIDADE À FRATURA DE MATERIAIS COMPÓSITOS DE FRICÇÃO COMO  
REQUISITO DE PROJETO DE COMPONENTES DE FRENAGEM PARA A  
INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA**

por  
Alexandre Casaril, MSc.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre

2013

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Co-orientador: Prof. Hazim Ali Al-Qureshi, PhD.

BANCA EXAMINADORA: Prof. Dr. Dachamir Hotza

Prof. Dr. Afonso Reguly

Dr. Luciano Tedesco Matoso

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Coordenador do PPGE3M

# SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE TABELAS.....	XI
RESUMO .....	1
ABSTRACT .....	3
1. INTRODUÇÃO .....	5
2. OBJETIVOS .....	10
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	11
3.1. Materiais Compósitos .....	11
3.1.1. Materiais Compósitos Reforçados com Fibras .....	13
3.1.2. Materiais Compósitos Particulados.....	15
3.2. Materiais de Fricção.....	16
3.3. Sistemas de Freio.....	22
3.3.1. Tipos de Sistemas de Freio para Veículos de Carga e Passageiros .....	22
3.3.2. Esforços de Frenagem.....	25
3.4. Fundamentos da Mecânica da Fratura .....	28
3.4.1. Defeitos em Componentes .....	28
3.4.2. Fator Concentração de Tensão .....	29
3.4.3. Teoria de Griffith para Propagação de Trincas .....	31
3.4.4. Fator Intensidade de Tensão e Tenacidade à Fratura.....	32
3.5. Comportamento Mecânico da Resina Fenólica e Compósitos de Matriz Fenólica... 35	
3.6. Natureza Estatística de Falha .....	37
3.6.1. Abordagem Determinística .....	37
3.6.2. Abordagem Probabilístico.....	38
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	43
4.1. Seleção da norma para avaliação da tenacidade à fratura de materiais de fricção ....	43
4.2. Teste de flexão em três pontos .....	44
4.2.1. Obtenção dos corpos-de-prova para o teste de flexão em três pontos.....	45
4.2.2. Equipamento, dispositivo e parâmetros do teste de flexão em três pontos.....	47
4.3. Teste de Compressão .....	48
4.3.1. Obtenção dos corpos-de-prova para o teste de compressão.....	49
4.3.2. Equipamento, dispositivo e parâmetros do teste de compressão.....	50
4.4. Interpretação dos resultados de $K_{IC}$ .....	51



4.5.	Avaliação da tenacidade à fratura de materiais de fricção atualmente fornecidos à linha de montagem e ao mercado de reposição.....	53
4.6.	Processo de Fabricação dos Materiais de Fricção .....	56
4.6.1.	Homogeneização.....	57
4.6.2.	Compactação a Quente.....	59
4.6.3.	Tratamento Térmico.....	60
4.7.	Condições Gerais de Avaliação dos Materiais de Fricção.....	61
4.8.	Simulação de esforços em sistemas de freio por elementos finitos.....	63
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	67
5.1.	Fractografia .....	67
5.2.	Tenacidade à Fratura.....	77
5.2.1.	Tenacidade à Fratura dos Materiais de Fricção em Função da Temperatura.....	77
5.3.	Abordagem Estatística e o Conceito de Projeto Robusto .....	90
5.4.	Equacionamento da Tenacidade à Fratura dos Materiais de Fricção em Função da Temperatura como Ferramenta de P&D .....	95
5.5.	Aplicação da Tenacidade à Fratura ao Projeto de Materiais de Fricção.....	97
5.6.	Correlação entre Tenacidade à Fratura e Resistência à Compressão como Ferramenta de Controle de Qualidade.....	103
6.	CONCLUSÕES .....	107
7.	SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE .....	110
8.	PUBLICAÇÕES GERADAS .....	111
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	112

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Detalhe mostrando a ruptura parcial de componentes de fricção do freio de roda traseiro de um protótipo durante testes de homologação em veículo. [fonte: Fras-le S.A.].....	7
Figura 1.2 – Detalhes do freio de roda traseiro de um protótipo falhado que apresentou quebra seguida de desprendimento das lonas de freio na fase de validação em campo [fonte: Fras-le S.A.].....	8
Figura 3.1 – Fibras de asbestos em sua ocorrência natural (esquerda) e após processamento (direita) .....	17
Figura 3.2 – Resina fenólica em pó empregada na fabricação de materiais de fricção. ....	18
Figura 3.3 – Óxido de alumínio em pó utilizado na fabricação de materiais de fricção. ....	19
Figura 3.4 – Grafite natural utilizado na fabricação de materiais de fricção. ....	20
Figura 3.5 – Sulfato de bário utilizado na fabricação de materiais de fricção. ....	20
Figura 3.6 – Fibra de vidro E picada utilizada na fabricação de materiais de fricção. ....	21
Figura 3.7 – Sistemas de freio disco/pastilha para veículo de passageiros [fonte: farm4.static.flickr.com]. ....	23
Figura 3.8 – Sistemas de freio disco/pastilha para veículos pesados de transporte de carga e passageiros [Cortesia Fras-le S.A.]. ....	23
Figura 3.9 – Sistema de freio Meritor Q-Plus acoplado a um eixo trativo [www.meritor.com]. ....	24
Figura 3.10 – Componentes do sistema de freio a disco [fonte: <a href="http://www.alinhanorte.com.br">www.alinhanorte.com.br</a> ]... ..	26
Figura 3.11 – Componentes do sistema de freio a tambor S-Cam [fonte: <a href="http://dmv-test-answers.com">http://dmv-test-answers.com</a> ].....	27
Figura 3.12 – Curvas genéricas de pressão ao longo das lonas de freio durante o processo de frenagem [fonte: Limpert, 1999].....	27
Figura 3.13 – Furo elíptico em uma placa acarreta magnificação da tensão externa aplicada. ....	29
Figura 3.14 – Modos fundamentais de propagação de trincas. ....	33
Figura 3.15 – Distribuição de tensões na vizinhança de uma trinca [Hertzberg, 1996]. ....	34
Figura 3.16 – Distribuição de Weibull típica. Fonte: [Richerson, 1992].....	40
Figura 3.17 – Formato logarítmico da curva de Weibull, comumente utilizado. Fonte: [Richerson, 1992].....	40
Figura 3.18 – Distribuição de Weibull bimodal. ....	42

Figura 4.1 – Corpo-de-prova para teste de flexão em três pontos para avaliação da tenacidade à fratura segundo ASTM D5045-99.....	45
Figura 4.2 – Esquema da extração do corpo-de-prova para teste de flexão a 3 pontos, no plano perpendicular (xz) à direção de compactação (y). .....	46
Figura 4.3 – Detalhe da pré-trinca em corpo-de-prova para teste de flexão em três pontos....	47
Figura 4.4 – Máquina Instron modelo 5569 e dispositivo de flexão em três pontos.....	48
Figura 4.5 – Esquema da extração do corpo-de-prova para teste de compressão. ....	50
Figura 4.6 – Máquina de ensaios universal preparada com dispositivo para realização do teste de compressão.....	50
Figura 4.7 – Parâmetros de interpretação da curva “F vs D” do teste de flexão em três pontos. ....	52
Figura 4.8 – Fluxograma do procedimento experimental adotado no trabalho.....	53
Figura 4.9 – Moinho de arados utilizado na etapa de homogeneização durante o processo de fabricação de materiais de fricção.....	58
Figura 4.10 – Aspecto típico de uma composição de material de fricção após processo de homogeneização. Material B. ....	59
Figura 4.11 – Molde de compactação a quente tipicamente utilizado para moldagem de material de fricção.....	60
Figura 4.12 – Peças de material de fricção posicionadas no interior da estufa para realização do processo de tratamento térmico.....	61
Figura 4.13 – Estufa utilizada para estabilização da temperatura dos corpos-de-prova.....	63
Figura 4.14 – Sistema de freio de 410 mm de diâmetro, aplicação veículos pesados.....	64
Figura 4.15 – Sapata de freio com componente de fricção rebitado.....	64
Figura 4.16 - Campo de temperaturas no conjunto sapata e componente de atrito rebitado. ..	66
Figura 5.1 – Superfícies de fratura dos cinco materiais testados a temperatura ambiente (22°C). Da esquerda para direita, materiais A, B, C, D e E.....	68
Figura 5.2 – Superfícies de fratura dos cinco materiais testados a 100°C. Da esquerda para direita, materiais A, B, C, D e E.....	69
Figura 5.3 – Superfícies de fratura dos cinco materiais testados a 175°C. Da esquerda para direita, materiais A, B, C, D e E.....	69
Figura 5.4 – Superfícies de fratura dos cinco materiais testados a 250°C. Da esquerda para direita, materiais A, B, C, D e E.....	70
Figura 5.5 – Superfícies de fratura dos cinco materiais testados a 325°C. Da esquerda para direita, materiais A, B, C, D e E.....	70

Figure 5.6 – Imagem da superfície fraturada de um corpo-de-prova do material B, testado a temperatura ambiente (22°C). Microscopia Eletrônica de Varredura. ....	71
Figure 5.7 – Imagem da superfície fraturada de um corpo-de-prova do material B, testado a 100°C. Microscopia Eletrônica de Varredura. ....	72
Figure 5.8 – Imagem da superfície fraturada de um corpo-de-prova do material B, testado a 175°C. Microscopia Eletrônica de Varredura. ....	72
Figure 5.9 – Imagem da superfície fraturada de um corpo-de-prova do material B, testado a 250°C. Microscopia Eletrônica de Varredura. ....	73
Figure 5.10 – Imagem da superfície fraturada de um corpo-de-prova do material B, testado a 325°C. Microscopia Eletrônica de Varredura. ....	73
Figure 5.11 – Imagem da superfície fraturada de um corpo-de-prova do material B testado a temperatura ambiente (22°C), mostrando fibras e cavidade. Microscopia Eletrônica de Varredura. ....	74
Figure 5.12 – Imagem da superfície fraturada de um corpo-de-prova do material B testado a 100°C, mostrando fibras e cavidade. Microscopia Eletrônica de Varredura. ....	75
Figure 5.13 – Imagem da superfície fraturada de um corpo-de-prova do material B testado a 175°C, mostrando fibras e cavidade. Intensidade de Elétrons Secundários. ....	75
Figure 5.14 – Imagem da superfície fraturada de um corpo-de-prova do material B testado a 250°C, mostrando fibras e cavidade. Microscopia Eletrônica de Varredura. ....	76
Figure 5.15 – Imagem da superfície fraturada de um corpo-de-prova do material B testado a 325°C, mostrando fibras e cavidade. Microscopia Eletrônica de Varredura. ....	76
Figura 5.16 – Curvas "carga vs alongamento" do teste de flexão em três pontos para determinação do $K_{IC}$ do material A. ....	78
Figura 5.17 – Curvas "carga vs alongamento" do teste de flexão em três pontos para determinação do $K_{IC}$ do material B. ....	78
Figura 5.18 – Curvas "carga vs alongamento" do teste de flexão em três pontos para determinação do $K_{IC}$ do material C. ....	79
Figura 5.19 – Curvas "carga vs alongamento" do teste de flexão em três pontos para determinação do $K_{IC}$ do material D. ....	79
Figura 5.20 – Curvas "carga vs alongamento" do teste de flexão em três pontos para determinação do $K_{IC}$ do material E. ....	80
Figura 5.21 – Resultados de tenacidade à fratura versus resistência à compressão a temperatura ambiente (22°C), dos cinco materiais avaliados, comparados com valores de referência [Ashby, 2005] para resina fenólica. ....	83

Figura 5.22 – Resultados de tenacidade à fratura e resistência à compressão do Material A, em função da temperatura. ....	85
Figura 5.23 – Resultados de tenacidade à fratura e resistência à compressão do Material B, em função da temperatura. ....	85
Figura 5.24 – Resultados de tenacidade à fratura e resistência à compressão do Material C, em função da temperatura. ....	86
Figura 5.25 – Resultados de tenacidade à fratura e resistência à compressão do Material D, em função da temperatura. ....	86
Figura 5.26 – Resultados de tenacidade à fratura e resistência à compressão do Material E, em função da temperatura. ....	87
Figura 5.27 – Resultados de tenacidade à fratura com 10% de probabilidade de falha, em função da temperatura para o material A.....	92
Figura 5.28 – Resultados de tenacidade à fratura com 10% de probabilidade de falha, em função da temperatura para o material B.....	92
Figura 5.29 – Resultados de tenacidade à fratura com 10% de probabilidade de falha, em função da temperatura para o material C.....	93
Figura 5.30 – Resultados de tenacidade à fratura com 10% de probabilidade de falha, em função da temperatura para o material D.....	93
Figura 5.31 – Resultados de tenacidade à fratura com 10% de probabilidade de falha, em função da temperatura para o material E.....	94
Figura 5.32 – Material A: tamanho máximo de trinca admissível em função das tensões às quais o componente de fricção é submetido em serviço no sistema de freio, considerando a faixa de temperatura de serviço para veículos pesados com sistema de freio a tambor. Aplicada probabilidade de falha para $K_{IC}$ de 10%. ...	98
Figura 5.33 – Material B: tamanho máximo de trinca admissível em função das tensões às quais o componente de fricção é submetido em serviço no sistema de freio, considerando a faixa de temperatura de serviço para veículos pesados com sistema de freio a tambor. Aplicada probabilidade de falha para $K_{IC}$ de 10%. ...	99
Figura 5.34 – Material C: tamanho máximo de trinca admissível em função das tensões às quais o componente de fricção é submetido em serviço no sistema de freio, considerando a faixa de temperatura de serviço para veículos pesados com sistema de freio a tambor. Aplicada probabilidade de falha para $K_{IC}$ de 10%. ...	99
Figura 5.35 – Material D: tamanho máximo de trinca admissível em função das tensões às quais o componente de fricção é submetido em serviço no sistema de freio,	

	considerando a faixa de temperatura de serviço para veículos pesados com sistema de freio a tambor. Aplicada probabilidade de falha para $K_{IC}$ de 10%. .	100
Figura 5.36	– Material E: tamanho máximo de trinca admissível em função das tensões às quais o componente de fricção é submetido em serviço no sistema de freio, considerando a faixa de temperatura de serviço para veículos pesados com sistema de freio a tambor. Aplicada probabilidade de falha para $K_{IC}$ de 10%. .	100
Figura 5.37	– Tensões resultantes sobre o material B em serviço no sistema de freio Master 410 mm, aplicação ônibus urbano.....	101
Figura 5.38	– Material B: tamanho máximo de trinca admissível em função das tensões às quais o componente de fricção é submetido em serviço no sistema de freio, considerando temperatura de serviço extremamente crítica para ônibus urbano. Aplicada probabilidade de falha para $K_{IC}$ de 10%. .....	102
Figura 5.39	– Relação entre resistência à compressão e tenacidade à fratura para os cinco materiais avaliados. Linha de tendência e intervalo de $\pm 30\%$ são mostrados. ..	104
Figura 5.40	– Relação entre resistência à compressão e tenacidade à fratura para quatro os cinco materiais avaliados (Materiais A, B, C e D). Linha de tendência e intervalo de $\pm 5\%$ são mostrados. ....	105

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Propriedades elásticas das principais fibras utilizadas para fabricação de materiais compósitos. [Al-Qureshi, 1988] .....	14
Tabela 4.1 – Apresentação dos cinco materiais de fricção selecionados para caracterização de tenacidade à fratura. ....	54
Tabela 4.2 – Descrição geral das composições dos cinco materiais definidos para avaliação da tenacidade à fratura. ....	55
Tabela 4.3 – Matriz de testes e número de corpos-de-prova para caracterização dos cinco materiais de fricção em flexão em três pontos e compressão uniaxial. ....	62
Tabela 4.4 – Propriedades dos materiais considerados na simulação de esforços no freio Master 410 mm por elementos finitos.....	65
Tabela 5.1 – Resultados de $K_{IC}$ e de resistência à compressão dos cinco materiais avaliados em função da temperatura de teste.....	81
Tabela 5.2 – Resultados de $K_{IC}$ associados à probabilidades de falha de 5% e 10%, caracterizados para os cinco materiais de fricção em função da temperatura.....	91
Tabela 5.3 – Equações e fator $R^2$ que representam o padrão de comportamento da tenacidade à fratura de cada um dos materiais A, B, C, D e E em função da temperatura, associado á probabilidade de falha de 10%.....	95

## RESUMO

Este trabalho apresenta a aplicação dos conceitos da mecânica da fratura para materiais de fricção, especificamente sobre a tenacidade à fratura de materiais compósitos de fricção e sua utilização como requisito de projeto de componentes para a indústria automobilística. O conceito de tenacidade à fratura foi abordado como propriedade de desempenho e requisito de aplicação no projeto de novos materiais de fricção com objetivo de mitigar a ocorrência de falhas em serviço por quebra do componente. Foi proposto um método de medição para a tenacidade à fratura dos materiais de fricção, baseado na norma pertinente, ASTM D5045-99. O método foi validado através da caracterização de cinco materiais de fricção, atualmente utilizados na montagem de sistemas de freio destinados a veículos pesados de transporte de carga e passageiros, para os mercados brasileiro, da América Latina e dos Estados Unidos, e pelo confronto dos resultados obtidos, com expectativas de resultados baseados na literatura existente. Foram realizados os testes de medição da tenacidade à fratura em função da temperatura. As análises fractográficas mostraram um padrão de superfície de fratura típica para materiais compósitos de matriz frágil, carregada com componentes granulados, particulados e fibrosos, onde o padrão de propagação da fratura se assemelhou à fratura intergranular dos metais. Verificou-se, através dos resultados quantitativos, que a tenacidade à fratura dos materiais de fricção apresenta um decaimento exponencial em função da temperatura, diferente dos materiais metálicos, por exemplo, que apresentam aumento da tenacidade à fratura quando testados em temperaturas mais elevadas. Esse comportamento diferenciado dos materiais de fricção está diretamente associado à estrutura fundamental dos termorrígidos, e a rede de ligações químicas entre cadeias. Foi escolhida uma abordagem probabilística para análise dos resultados, com foco no conceito de projeto robusto. O modelo de Weibull foi utilizado na análise de probabilidade de falha a partir da determinação do valor de  $K_{IC}$  de cada um dos materiais caracterizados, correspondente ao critério de probabilidade de falha admitida em projeto. Adicionalmente, foi possível estabelecer um equacionamento do comportamento da tenacidade à fratura dos materiais de fricção em função da temperatura, o qual pode ser utilizado como ferramenta de pesquisa e desenvolvimento de materiais de fricção. A tenacidade à fratura dos materiais de fricção em função da temperatura foi correlacionada, através da análise de elementos finitos, com os esforços em serviço do componente de fricção no sistema de freio, possibilitando a estimativa do tamanho de trinca máximo admissível para o componente de fricção submetido a tais esforços. Além disso, foi realizada a correlação da propriedade de tenacidade à fratura dos materiais de fricção com



suas respectivas resistências à compressão. Verificou-se que para todos os cinco materiais, a relação entre  $K_{IC}$  e resistência à compressão obedece a uma função linear crescente. Esta correlação entre tenacidade à fratura e resistência à compressão tem grande utilidade para indústria, visto que o ensaio de resistência à compressão é de fácil implementação e poderia ser utilizado como controle de qualidade indireto para tenacidade à fratura.

## **ABSTRACT**

This work presents the application of fracture mechanics concepts to friction materials, specifically related to composite friction materials fracture toughness and its utilization as a design requirement for components to automotive industry. Fracture toughness concept has been treated as a performance characteristic and application requirement in the design of new friction materials, with the purpose of mitigating service failures due to component breakage. A method was proposed to measure fracture toughness of friction materials, based on adequate standard, ASTM D5045-99. It was validated through characterization of five friction materials, currently used in assembling brake systems for heavy vehicles used for goods transportation as well as for passengers, in Brazilian, Latin American and United States markets, and by comparing results obtained with expected data base of available literature. Fracture toughness measurements were carried out as a function of temperature. Fractographic analyses have shown a fracture surface pattern, typical for composite materials with fragile matrix, filled with granulated, particulate and fibrous components, and the fracture propagation pattern has shown similarities with metals intergranular fracture. It was observed, based on quantitative results obtained, that fracture toughness of friction materials assumes an exponential drop as a function of temperature, different from metallic materials, for example, which show a fracture toughness increase when evaluated at higher temperatures. This unusual behavior of friction materials is directly associated to the structure of thermosetting materials, and its chemical bonds between molecular chains. Probabilistic approach was defined for results analyses, based on concept of robust design. Weibull model was used on analysis of failure probability based on determination of KIC value of each characterized materials, corresponding to failure criteria of design. Additionally, an equation has been established that represents fracture toughness behavior of friction materials as a function of temperature, which can be used as a tool for research and development of friction materials. Fracture toughness of friction materials, associated with temperature has been correlated, through finite element analysis, with stresses on friction component during brake system service, allowing the estimation of maximum admissible crack length on the friction component working under those stresses. Complementarily, a correlation of fracture toughness of friction materials with their respective compression strength has been made. It was verified that, for all materials evaluated, relation between KIC and compression strength is represented by a directly proportional linear function. The correlation between fracture toughness and compression strength has extensive usage for industry, as compression strength

test can be easily implemented, and could be used as an indirect quality control parameter for fracture toughness.

# 1. INTRODUÇÃO

O cenário de pesquisa e desenvolvimento de produtos no segmento de materiais de fricção é bastante peculiar. As grandes empresas do setor, 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 no início do século XX, e desta forma se manteve durante sua consolidação e expansão, ao longo dos últimos cem anos, puxadas pela demanda da indústria automotiva.

De fato, é rara a existência de centros de excelência em pesquisa e desenvolvimento de materiais de fricção fora das companhias manufactureiras. Essa característica do setor pode ser explicada, em parte, pela complexidade do conhecimento agregado ao desenvolvimento de materiais de fricção e a especificidade da sua aplicação no que se refere ao desenvolvimento de produtos para comercialização. Devido aos requisitos técnicos e econômicos associados ao uso, os materiais de fricção, em sua grande maioria, são desenvolvidos à luz do conceito de materiais compósitos, contendo normalmente mais de quinze matérias-primas funcionais em sua composição, onde se destacam as resinas fenólicas – puras e modificadas – grafites, coques, minerais, elastômeros, metais, sulfetos e outras matérias-primas, empregadas normalmente na forma de pós, grânulos e fibras. Esta variedade composicional tem se mostrado ao longo da história da indústria de materiais de fricção como a alternativa mais viável, técnica e economicamente, para atender as necessidades, em serviço, de veículos e máquinas industriais no que compete ao controle de movimento.

Os requisitos associados aos materiais de fricção em serviço dizem respeito basicamente à eficiência de frenagem, vibrações, ruído, resistência mecânica e resistência e condutividade térmicas. Além disso, todos estes aspectos trabalham dinamicamente em largas faixas de temperatura que vão desde a temperatura ambiente e podem superar 500°C em alguns casos, com variação de carga aplicada e de velocidades de deslizamento. Associam-se a isto a complexidade dos fenômenos tribológicos presentes em serviço e a sensibilidade ao envelhecimento térmico de várias das matérias-primas empregadas nas composições de materiais de fricção. Levando em conta o custo, que é imprescindível para a competitividade do produto, pode-se vislumbrar as dificuldades que envolvem o desenvolvimento de produtos para o mercado de materiais de fricção.

De forma geral, para desenvolver materiais de fricção, atualmente, são necessários conhecimentos sobre comportamento térmico dos materiais compósitos de fricção, bem como das matérias-primas utilizadas na sua fabricação; comportamento tribológico dos materiais

compósitos e das propriedades das matérias-primas que influenciam nos fenômenos dessa natureza; comportamento de ruído e vibração dos sistemas de freio; além do comportamento mecânico de materiais compósitos contendo componentes particulados e fibrosos;

Neste contexto, as propriedades mecânicas dos materiais de fricção, destacando a resistência mecânica e o módulo de elasticidade, têm grande importância, pois influenciam praticamente todos os requisitos técnicos desses materiais. A manutenção da integridade estrutural do material de fricção é fundamental para a função primordial do sistema de freio, a fricção que o mesmo promove em conjunto com o rotor, permitindo o controle de movimento do veículo. A quebra do material de fricção em serviço pode levar à perda parcial de função do freio, ou mesmo perda total em caso de desprendimento do componente por completo.

O atendimento dos requisitos mecânicos está atrelado a matérias-primas que são de primeira importância para a resistência mecânica do material, as quais são responsáveis, também pelos maiores impactos no custo do mesmo, sendo as principais para lonas de freio destinadas a veículos pesados, por exemplo, a resina fenólica e a fibra de vidro. Neste contexto, garantir a integridade estrutural do material de fricção e conferir ao mesmo custo competitivo são duas premissas de projeto que competem entre si. Mediante esta situação, o desenvolvimento do conhecimento que permita estabelecer com precisão os requisitos mecânicos do material para determinada aplicação, associado a um coeficiente de segurança razoável – sem superestimativas – é de importância fundamental para a indústria.

O desdobramento das características de aplicação em requisitos mecânicos de projeto se mostra como uma das principais dificuldades relacionadas ao desenvolvimento de materiais de fricção. O paradigma atual no âmbito da engenharia de produto vislumbra a análise e correlação das propriedades estáticas do material de fricção, como resistência à flexão em 3 pontos e resistência ao cisalhamento, a fim de garantir que o material não falhe em serviço. Além disso, simulações de esforços mecânicos e térmicos através de ferramentas como elementos finitos e volumes finitos ainda não são uma prática consolidada.

A consequência deste *status quo* é um baixo índice de precisão no design do produto em relação à resistência mecânica do material, que resulta em custos de não qualidade que crescem exponencialmente dependendo do estágio do projeto onde se detecta esta falha. Caso a resistência mecânica do material de fricção seja um ponto fraco do design, e o mesmo seja detectado na etapa de seleção em laboratório, os impactos em termos de custo e prazo do projeto são baixos. No entanto, caso a detecção de um problema de design desta natureza ocorra numa etapa mais avançada, como a de validação em veículo, o impacto de custo e

principalmente no prazo de desenvolvimento de projeto pode ser de alta criticidade, a ponto de ocasionar o atraso no lançamento do veículo. Entretanto, caso a detecção seja realizada apenas em campo, por usuários finais, após lançamento do veículo, os impactos podem ser catastróficos, pois além de originar o retrabalho de engenharia do produto, ocasiona custos de reposição – em muitos casos, de recall – além de prejudicar a imagem do veículo perante o público consumidor.

Na Figura 1.1 pode-se visualizar uma falha estrutural parcial, ocorrida em um protótipo durante testes de homologação, onde os componentes de fricção de uma das sapatas quebraram, ocasionando desprendimento de parte das lonas de freio.



*Figura 1.1 – Detalhe mostrando a ruptura parcial de componentes de fricção do freio de roda traseiro de um protótipo durante testes de homologação em veículo. [fonte: Fras-le S.A.].*

Na Figura 1.2 pode-se visualizar a ocorrência de falha estrutural completa, consistindo no desprendimento total dos componentes de fricção – lonas de freio – do sistema de freio de roda de um veículo comercial leve, protótipo, submetido ao teste de campo para homologação.



*Figura 1.2 – Detalhes do freio de roda traseiro de um protótipo falhado que apresentou quebra seguida de desprendimento das lonas de freio na fase de validação em campo [fonte: Fras-le S.A.].*

Em ambos os casos, as falhas levaram à necessidade de revalidação e consequente atraso no lançamento do veículo, enquanto a alteração de engenharia para contenção das mesmas ocasionou o aumento do custo do caminhão.

Com base neste cenário, e visando o fortalecimento das práticas de engenharia do produto na indústria de materiais de fricção, propõem-se o desenvolvimento para materiais compósitos de fricção, da abordagem de falha de componentes baseada nos conceitos de mecânica da fratura – tenacidade a fratura – e sua associação com a análise probabilística de falha – análise de Weibull – como ferramentas de projeto.

A mecânica da fratura propõe uma filosofia de abordagem do fenômeno de falha de componentes de Engenharia que tem se consagrado a partir da segunda metade do século XX, principalmente para o tratamento de materiais frágeis. Primordialmente, estabelece a correlação entre os esforços, aos quais o componente é submetido, e os defeitos presentes no componente, sua natureza, geometria e tamanho. A tenacidade a fratura tem, cada vez mais, se consolidado como uma propriedade a ser utilizada na análise do desempenho de um componente de engenharia.

A chamada Abordagem Probabilística tem ganhado reconhecimento e notoriedade, principalmente no projeto de componentes críticos do ponto de vista de segurança. O gerenciamento de custos e riscos passa obrigatoriamente pela análise probabilística de falha do componente em questão. A proposição de uma metodologia de análise consistente, de caráter probabilístico para seleção de materiais de fricção para aplicação em sistemas de freio

automotivos virá a contribuir enormemente para o sucesso do projeto do componente, de forma a evitar a falha do mesmo em serviço.

Além disso, a consolidação de uma correlação da tenacidade a fratura com uma propriedade mecânica cujo teste seja de fácil operacionalização na indústria será de fundamental importância para o estabelecimento de um controle de qualidade. O estabelecimento de uma correlação confiável entre as propriedades representaria uma conquista fundamental na garantia dos critérios de projeto.

Assim sendo, os três pilares deste trabalho são o desenvolvimento de uma abordagem mecânica para materiais compósitos de fricção, fundamentada na tenacidade a fratura, a operacionalização da análise de Weibull como ferramenta de gerenciamento de riscos e o estabelecimento de uma correlação entre tenacidade a fratura e um ensaio mecânico de fácil execução como ferramenta de controle de qualidade. A caracterização da tenacidade à fratura dos materiais de fricção em função da temperatura consiste na principal contribuição científica deste trabalho, em virtude do seu caráter de originalidade e ineditismo.



## 2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver e implementar uma ferramenta de projeto que auxilie na determinação, projeção, mensuração e manutenção do valor de tenacidade à fratura para o material compósito de fricção destinado a determinada aplicação, definida com base nos parâmetros do sistema de freio, do veículo e do regime de serviço almejado.

O atendimento deste escopo macro pode ser desdobrado nos seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver e validar um método de medida da tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ) para materiais compósitos de fricção, baseado na norma ASTM D5045-99;
- Realizar análise fractográfica das superfícies de fratura dos corpos-de-prova dos materiais compósitos de fricção, testados de acordo com o método selecionado;
- Medir o  $K_{IC}$  de diversos materiais compósitos de fricção atualmente utilizados na fabricação de lonas de freio para sistemas de freio a tambor, utilizadas em diversos modelos de veículos atualmente presentes no mercado brasileiro e também no mercado norte-americano;
- Caracterizar o padrão de comportamento do  $K_{IC}$  dos diversos materiais compósitos de fricção selecionados em função da temperatura, num intervalo que abranja as temperaturas de serviço típicas para veículos pesados, entre 25°C e 325°C;
- Consolidar a abordagem probabilística de Weibull como ferramenta estatística de projeto, no intuito de fortalecer a exatidão da análise do  $K_{IC}$ , bem como possibilitar o gerenciamento de riscos e custos do projeto de um material compósito de fricção;
- Investigar a tenacidade à fratura dos materiais compósitos de fricção em função de fatores composicionais e atrelado à temperatura, de forma a permitir o design desta propriedade para utilização em projeto;
- Realizar análise entre os esforços aos quais o componente de fricção é submetido em serviço e a tenacidade à fratura do material de fricção que o compõe, correlacionando esses parâmetros com o tamanho de trinca admitido ao material para que não ocorra falha em serviço;
- Possibilitar o controle de qualidade efetivo da tenacidade à fratura para materiais de fricção.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. Materiais Compósitos**

A necessidade de otimização de custo, desempenho e processo de fabricação de componentes vêm dando suporte para o desenvolvimento dos materiais compósitos. Um material compósito é obtido pela mistura física de, pelo menos, dois constituintes de classes e/ou naturezas diferentes, a fim de formar um terceiro material – este denominado compósito – o qual apresenta propriedades e características de interesse mais adequadas para aplicação do que seus constituintes originais.

Do ponto de vista da utilidade dos materiais compósitos, o que se busca no desenvolvimento dos mesmos é combinar características desejáveis de dois ou mais materiais diferentes gerando um novo material com características de interesse otimizadas e singulares [Verma, 2004].

A categorização de critérios que dão respaldo para que um material seja efetivamente considerado compósito ainda é discutida no meio científico. Porém, alguns critérios já são considerados essenciais para que uma mistura multifásica seja reconhecida como material compósito. É necessário que os componentes sejam insolúveis entre si. O conjunto de propriedades de desempenho deve ser superior ao dos componentes independentes. É necessário que os componentes estejam presentes em quantidade significativa, maior do que 5% em volume. Deve haver uma interação tridimensional, a qual deve atender uma escala microscópica, a fim de garantir a interação dos componentes, bem como a homogeneidade microestrutural e de propriedades [Composites Handbook, 1989; Al-Qureshi, 1988; Callister, 2000].

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

O concreto armado é um dos materiais compósitos, desenvolvidos pelo homem, mais populares e largamente empregados em estruturas atualmente. Neste material, as barras de aço

são adicionadas ao concreto para incrementar sua resistência à tração, enquanto o próprio concreto fornece boa resistência à compressão [Composites Handbook, 1989; Callister, 2000].

O desenvolvimento acelerado dos materiais compósitos tem assegurado seu emprego cada vez mais crescente em diversos segmentos industriais, por vários motivos. Um deles é o desenvolvimento dos processos de produção de insumos, como materiais fibrosos e particulados principalmente, que têm possibilitado as mais diversas geometrias (valorizando a geometria, qualidade superficial e outros parâmetros importantes). O desenvolvimento dos processos de produção de insumos tem permitido, também, o barateamento dos mesmos, o que é de grande importância para viabilidade do emprego de materiais compósitos na indústria. As principais vantagens, quanto à aplicação, segundo Silvestre Filho [2001], podem ser assim resumidas: pelo seu aspecto multifuncional, os materiais compósitos são capazes de satisfazer diversas exigências de projeto:

- Em estruturas, a economia de peso é significativa, freqüentemente varia de 25 a 50% em relação aos materiais metálicos convencionais;
- A alta rigidez à torção, exigida em vários veículos, e principalmente aviões, pode ser satisfeita;
- Excelente resistência à corrosão pode ser obtida;
- Possuem qualidades de fadiga e fratura;
- As características de tolerância ao impacto são excelentes;
- A flexibilidade de seleção e mudança no estilo e considerações estéticas do produto é uma característica importante, e elas podem ser feitas com baixos investimentos;
- Uma baixa expansão térmica pode ser conseguida, mas varia significativamente com a escolha do material da matriz, com o tipo de fibra empregada e com sua orientação;
- A manufatura e montagem são simplificadas por causa da interação dos componentes, reduzindo as uniões e os dispositivos de união.

Essas vantagens são complementadas pelas combinações de propriedades que os materiais compósitos permitem, pela possibilidade de variação da composição e das matérias-primas que podem ser empregadas na fabricação dos mesmos. O custo mais elevado do emprego destes materiais é compensado pelas já citadas vantagens que eles proporcionam, principalmente em produtos de alta tecnologia onde o custo da matéria-prima e do processo

de fabricação não são os principais agregadores de valor – aeroespacial e aeronáutico, por exemplo [Casaril, 2004].

### **3.1.1. Materiais Compósitos Reforçados com Fibras**

A principal função das fibras nos materiais compósitos é carregar carga ao longo da direção de reforço, a direção de alinhamento, sendo que o reforço das fibras incrementa, basicamente, a resistência e a rigidez do material compósito. De fato, o termo “fibra” foi sugerido pela ASTM (*American Society of Tests and Materials*), e o mesmo designa material de qualquer natureza que possui razão de aspecto, ou seja, razão entre comprimento e diâmetro/largura da seção cruzada, maior do que 10:1, uma seção cruzada com área inferior a  $5,1 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ , e uma largura menor do que  $2,54 \times 10^{-4} \text{ m}$  [Al-Qureshi, 1988].

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

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

A Tabela 3.1 apresenta propriedades mecânicas de algumas fibras de Engenharia importantes para a indústria, em especial para o segmento de materiais de fricção.

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

Tipo de Fibra	Módulo de elasticidade (GPa)		Resistência (MPa)	
	Tração	Compressão	Tração	Compressão
Vidro – E	53,8	51,7	1310	965
Aramida (Kevlar 29)	50,0	46,5	1351	238
Carbono (alta resistência)	144,8	141,3	1379	1586

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

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

Do ponto de vista do emprego de fibras no design de materiais de fricção, o maior interesse está na utilização de fibras descontínuas, comumente chamadas de “fibras picadas”. Em relação aos conceitos da micromecânica dos materiais compósitos, as fibras picadas oferecem potencial de incremento das propriedades mecânicas inferior, em comparação às fibras contínuas. A vantagem da sua utilização está associada à sua fácil adaptação a processos de fabricação mais simplificados, como o processo de homogeneização em misturadores de arados, seguido da moldagem a quente ou extrusão.

Nos materiais compósitos reforçados com fibras picadas, a carga é aplicada diretamente sobre a matriz do material compósito, e transferida para as fibras por deformação através da adesão interfacial fibra/matriz. Nesse caso, a resistência do material compósito é função direta do comprimento das fibras [Composites Handbook, 1989; Calister, 2000].

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

### **3.1.2. Materiais Compósitos Particulados**

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

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

Os materiais compósitos particulados, muitas vezes mixados com fibras picadas, oferecem uma grande vantagem em relação aos materiais compósitos fabricados a partir de

fibras contínuas. Os mesmos podem ser moldados numa variedade de formatos complexos, cujas rotinas de fabricação podem ser prontamente automatizadas para produção de grandes volumes [Composites Handbook, 1989]. Os materiais de fricção atualmente empregados em veículos leves e pesados são um exemplo claro disso.

### **3.2. Materiais de Fricção**

A função dos materiais de fricção é possibilitar o controle de movimento do veículo pela desaceleração do mesmo, através da transformação da energia cinética em calor, via fricção, e dissipar o calor gerado para o meio. Tomado como um componente do veículo, o material de fricção apresenta outras funções secundárias que complementam o propósito acima colocado. Alguns requisitos adicionais são a resistência à corrosão, estabilidade de atrito, alta durabilidade, baixa propensão à geração de ruído e vibrações, além da necessidade de custo aceitável versus desempenho [Nicholson, 1995; Limpert, 1999; Casaril, 2004, Casaril, 2009].

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

No começo da década de 1920, foram desenvolvidos os materiais de fricção moldados, à base de asbestos, cuja ocorrência natural no formato de fibras de composição inorgânica tornou-o bastante interessante do ponto de vista de custo-benefício para a indústria de fricção.

As fibras de asbesto foram utilizadas largamente até a década de 1990 para produção de materiais de fricção, especialmente para lonas de freio para sistemas lona/tambor destinados a veículos pesados, pois proporcionam propriedades mecânicas, térmicas e tribológicas muito interessantes a um custo bastante competitivo. Porém, a descoberta de malefícios causados por este material – como a asbestose – acarretou um movimento de proibição da utilização desta matéria-prima, que se iniciou na Europa na década de 1980 e ainda está se consolidando atualmente em países como o Brasil e Índia [Nicholson, 1995].



*Figura 3.1 – Fibras de asbestos em sua ocorrência natural (esquerda) e após processamento (direita)*

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

Atualmente, os desenvolvimentos de novos materiais de fricção têm consolidado a tecnologia de materiais “asbestos-free”, pelas razões já colocadas acima. Tratando-se de materiais de fricção para freios a disco, os mesmos são classificados, basicamente, em quatro grupos, de acordo com o conceito de matérias-primas utilizadas no seu desenvolvimento: *Semi-metallic*, *Low Steel*, *NAO (Non Asbestos organic)* e *Ceramic* [Nicholson, 1995; Casaril, 2009].

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

Essa classificação é um tanto subjetiva e passível de questionamento, visto que todas as classes acima colocadas têm muito mais pontos em comum do que pontos de divergência. Ambas utilizam componentes de atrito e lubrificação, ligantes e cargas semelhantes. As denominações surgiram a partir do mercado, como alternativa para diferenciação de



concepção de materiais de fricção e, de certa forma, como recurso de *marketing*, frente a vários cenários de vantagens e desvantagens apresentadas pelas diferentes classes de materiais de fricção.

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

Atualmente, os materiais de fricção destinados a aplicações no mercado automotivo são desenvolvidos sob a concepção de materiais compósitos, contendo, normalmente, mais de 15 matérias-primas diferentes em sua composição. São utilizadas matérias-primas de todas as classes da Ciência dos Materiais: cerâmicas, metálicas e poliméricas. As diferentes matérias-primas utilizadas possuem variadas funcionalidades no *design* do material compósito. Em termos de funcionalidade, as mesmas são agrupadas, tradicionalmente, em cinco grupos distintos: ligantes, atritantes, lubrificantes, cargas e fibras. É comum o caso de uma matéria-prima assumir características condizentes com mais do que um grupo acima especificado, gerando certa ambiguidade na definição do papel da matéria-prima na composição do material de atrito [Nicholson, 1995; Casaril, 2004; Casaril, 2009].

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

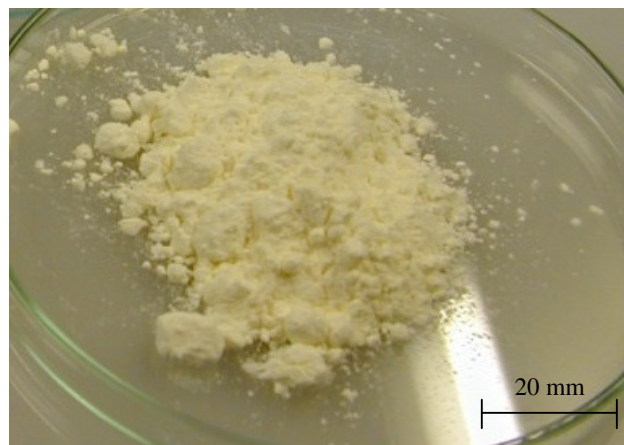
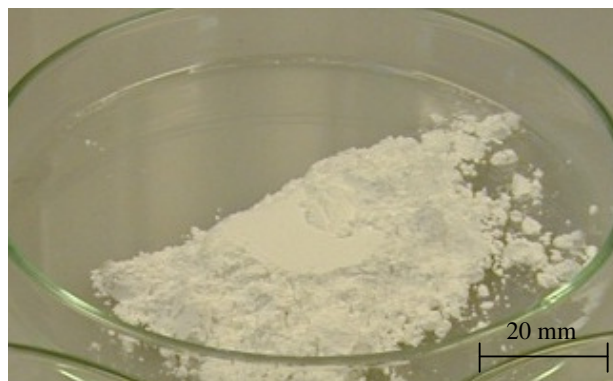


Figura 3.2 – Resina fenólica em pó empregada na fabricação de materiais de fricção.

Os requisitos para os materiais de fricção tem sido consideravelmente incrementados a partir da década de 1980, o que levou a similares demandas no que compete aos ligantes utilizados em sua estrutura. Em serviço, a energia cinética do veículo convertida em calor durante a frenagem podem conduzir a picos de temperatura extremamente altos, da ordem de 600°C na superfície do material de fricção. Nesse contexto, a principal função do ligante é manter a consistência estrutural do material de fricção. A resina fenólica pode prover ao material a resistência mecânica necessária à manutenção da consistência estrutural, bem como oferecer a mais alta resistência ao desgaste quando o material de fricção é submetido a situações de abrasão, combinadas com longos intervalos de tempo em alta temperatura [Gardziella, 2000].

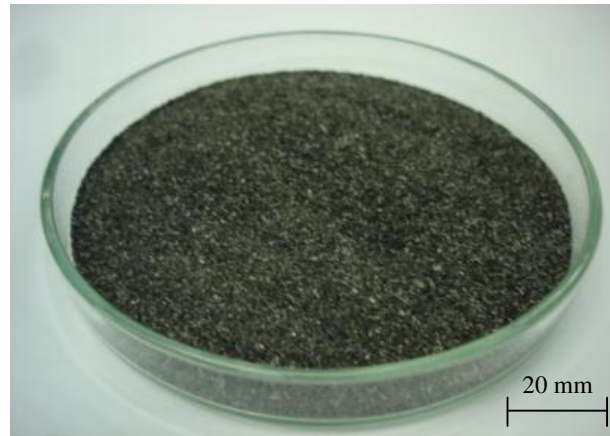
Os atritantes utilizados são geralmente materiais cerâmicos, de alta dureza e fragilidade, empregados na forma de pó, com a função principal de atuar sobre o coeficiente de atrito do material. Óxido de alumínio, silicato de zircônio e óxido de cromo são materiais comumente empregados para esta função. Os atritantes são normalmente adicionados à composição em frações consideravelmente pequenas, porém sua característica de alta dureza faz com que seu papel sobre o desempenho do material de fricção em termos de capacidade de frenagem, durabilidade e propriedades de conforto (ruído e vibrações) seja primordial.



*Figura 3.3 – Óxido de alumínio em pó utilizado na fabricação de materiais de fricção.*

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

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



*Figura 3.4 – Grafite natural utilizado na fabricação de materiais de fricção.*

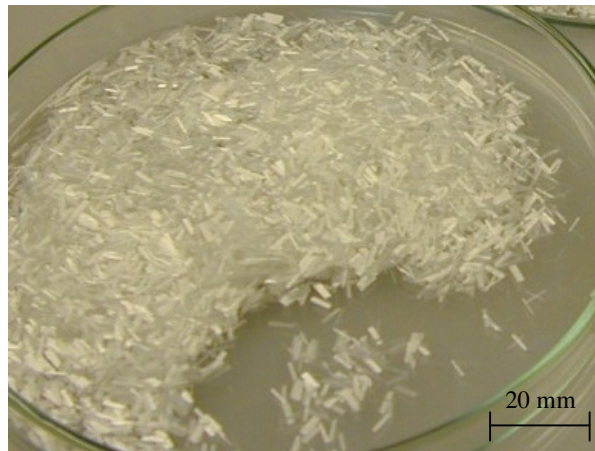
Alguns materiais empregados em grande quantidade na composição de materiais de atrito, visto que têm a função principal de preenchimento, são conhecidos como cargas. São requisitos importantes para estes materiais, a estabilidade térmica e mecânica, e dureza intermediária, a fim de não influenciar significativamente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



*Figura 3.5 – Sulfato de bário utilizado na fabricação de materiais de fricção.*

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

Para incremento da resistência mecânica do material de atrito são empregadas fibras picadas, de pequeno comprimento. Fibra de vidro e fibra de aramida são matérias-primas largamente empregadas em composições de materiais de fricção, todas com comprimento da ordem de milímetro. Em termos de rigidez, estas fibras influenciam o módulo de elasticidade do compósito de fricção da mesma forma que os materiais particulados, e assim podem ser tratados de forma a simplificar o projeto. Isso pode ser devido a alguns aspectos geométricos das mesmas, como o fato de as fibras de vidro serem empregadas na forma de feixes com pequena razão de aspecto e altamente desalinhadas no compósito.



*Figura 3.6 – Fibra de vidro E picada utilizada na fabricação de materiais de fricção.*

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

### 3.3. Sistemas de Freio

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

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

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

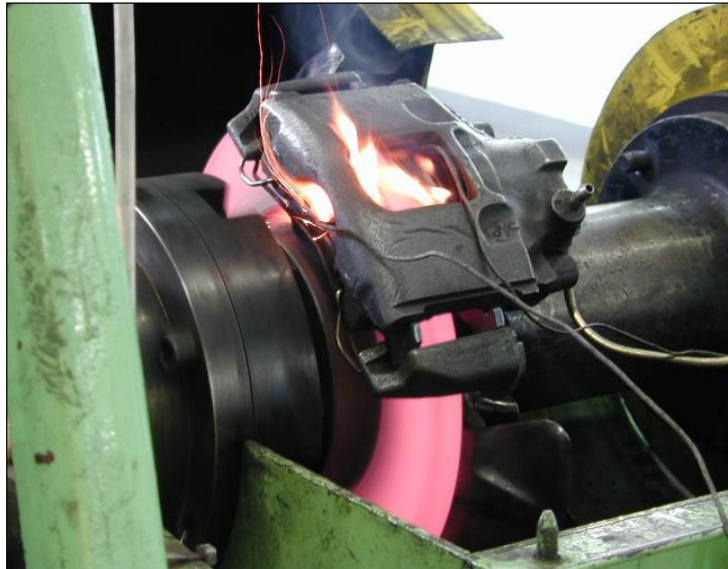
#### 3.3.1. Tipos de Sistemas de Freio para Veículos de Carga e Passageiros

Basicamente, existem dois tipos de sistemas de freio: disco/pastilha e tambor/lona. As Figuras 3.7 e 3.8 mostram dois sistemas de freio disco/pastilha típicos. A Figura 3.7 corresponde a um sistema de freio disco/pastilha de um veículo esportivo de passageiros. A Figura 3.8 apresenta um sistema de freio disco/pastilha durante teste de alta criticidade em dinamômetro. Esta classe de freio disco/pastilha é destinada a veículos pesados. As duas pastilhas de freio são alocadas no interior do *caliper* (em vermelho na Figura 3.7, e em cinza escuro na Figura 3.8 envolvendo o disco ao rubro).



Foto: Renato Bellote

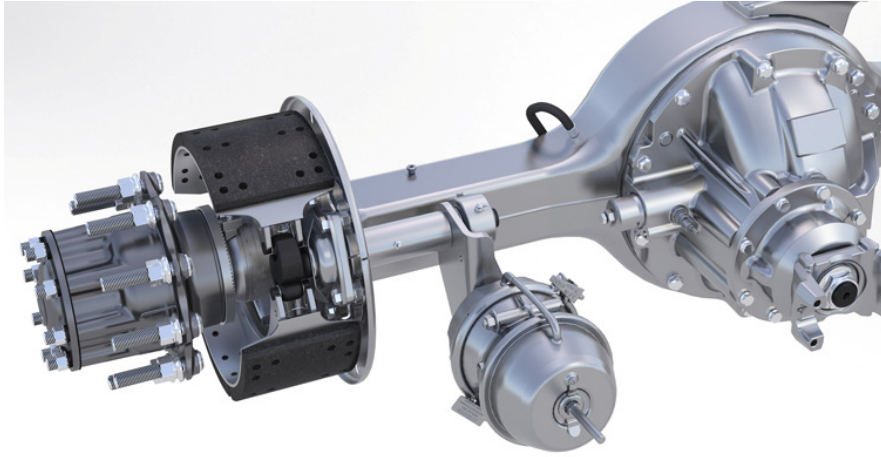
*Figura 3.7 – Sistemas de freio disco/pastilha para veículo de passageiros [fonte: farm4.static.flickr.com].*



*Figura 3.8 – Sistemas de freio disco/pastilha para veículos pesados de transporte de carga e passageiros [Cortesia Fras-le S.A.].*

A Figura 3.9 mostra a configuração de um sistema de freio tambor/lona do fabricante Meritor, classe Q-Plus, acoplado a um eixo trativo destinado a veículos pesados de transporte de carga e de passageiros.





*Figura 3.9 – Sistema de freio Meritor Q-Plus acoplado a um eixo trativo [www.meritor.com].*

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

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

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

No mercado brasileiro, os veículos de passageiros utilizam sistemas de freio disco/pastilha nas rodas dianteiras, que tem maior participação no balanço de frenagem. Já nas rodas traseiras, os dois sistemas são empregados, sendo que veículos ditos “populares” comumente utilizam sistema de freio tambor/lona, enquanto que em veículos das categorias “médios” e “grandes” há uma tendência gradual de aplicação do sistema de freio

disco/pastilha. Para veículos pesados, de cargas e de passageiros, é comum a aplicação do sistema de freio lona/tambor, em todos os eixos do veículo, sendo que a aplicação do sistema disco/pastilha é muito reduzida. Essa mesma tendência é observada em toda América Latina. Este cenário também reflete basicamente o mercado dos Estados Unidos.

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

### **3.3.2. Esforços de Frenagem**

Fundamentalmente, o sistema de freio de roda permite o controle de movimento do veículo, a partir do momento em que promove a fricção do material de atrito contra o rotor do sistema, permitindo a desaceleração do veículo através da dissipação da energia cinética do mesmo, a qual é transformada, predominantemente em calor. Frações de energia ainda são dissipadas de forma mecânica ocasionando ruído, vibrações e desgaste do par em contato.

O processo de frenagem através da fricção entre material de atrito e rotor no sistema de freio envolve esforços mecânicos, que naturalmente geram tensões mecânicas. Para um sistema de freio a disco, a distribuição de pressões é bastante simplificada. O desenho deste sistema favorece uma distribuição quase uniforme de esforços sobre os componentes em contato (disco e pastilha), sendo que a principal causa de gradientes de tensões mecânicas é a rigidez dos componentes estruturais e os momentos fletores inerentes ao processo de fricção.

A Figura 3.10 pode ser utilizada para melhor compreensão da atuação mecânica do sistema de freio a disco. O processo de frenagem se inicia com a aplicação de força no pedal de freio por parte do condutor. No caso do sistema de freio hidráulico, a atuação do pedal de frenagem sobre o cilindro mestre age de forma a elevar a pressão do sistema do sistema, o que provoca a ação dos pistões sobre as pastilhas que são pressionadas contra o disco de frenagem ocasionando a diminuição ou manutenção da velocidade do veículo. Através do esquema da Figura 3.10 é possível compreender a uniformidade de tensões mecânicas na superfície da pastilha de freio e da seção do rotor em contato com a mesma.



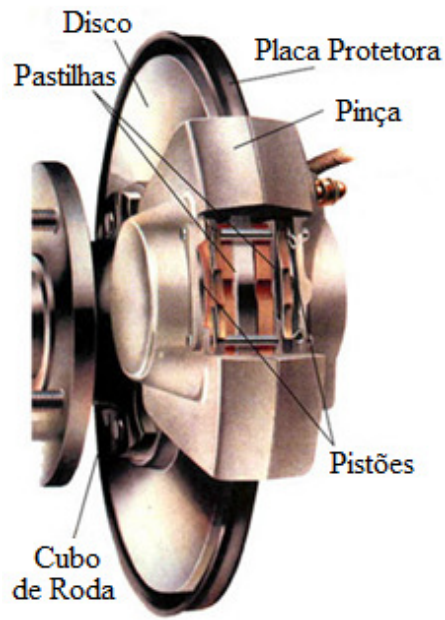


Figura 3.10 – Componentes do sistema de freio a disco [fonte: [www.alinhanorte.com.br](http://www.alinhanorte.com.br)].

Já o sistema de freio a tambor (S-Cam, por exemplo – o mais comum utilizado em veículos comerciais de carga e de passageiros), pelas peculiaridades do seu desenho, apresenta uma distribuição de esforços mecânicos consideravelmente mais complexa sobre o rotor e o material de atrito. O fato de a aplicação da força ocorrer em apenas uma das extremidades das sapatas de freio (a outra extremidade normalmente é pivotada) leva a uma distribuição de pressão variável ao longo do comprimento das lonas de freio. Além disso, o processo de rotação ocasiona, ainda, o incremento da força de atuação de uma das sapatas de freio, chamada autoenergizante.

Em um veículo de carga com sistema de freio a tambor S-Cam acionado por circuito pneumático, a ação do condutor sobre o pedal de freio leva ao aumento da pressão do ar do sistema, a qual preenche a câmara de freio empurrando a haste da mesma que através do ajustador faz girar o eixo S-cam. A ação de girar o eixo S-cam, provoca o afastamento das sapatas de freio, fazendo com o material de atrito disposto sobre elas entrem em contato com o tambor ocasionando a fricção, e conseqüente frenagem do veículo. A Figura 3.11 apresenta os principais componentes de um sistema de freio S-Cam.

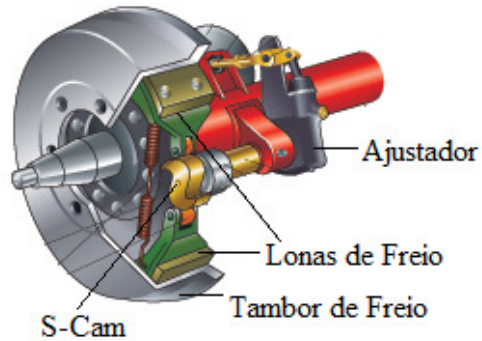


Figura 3.11 – Componentes do sistema de freio a tambor S-Cam [fonte: <http://dmv-test-answers.com>].

A Figura 3.12 apresenta curvas genéricas da pressão ao longo das lonas de freio dispostas sobre a sapata de freio durante o acionamento do sistema. As diferenças entre pressão mínima e máxima aumentam com o aumento da rigidez das lonas de freio.

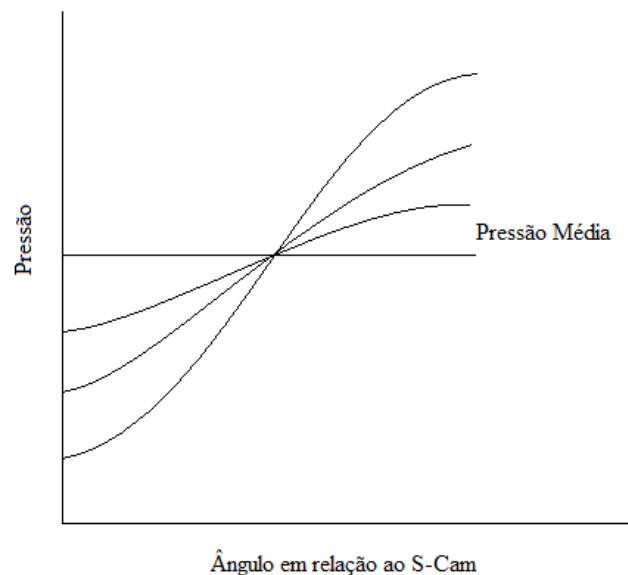


Figura 3.12 – Curvas genéricas de pressão ao longo das lonas de freio durante o processo de frenagem [fonte: Limpert, 1999].

Os esforços mecânicos durante a atuação do sistema de freio são, de certa forma, leves quando julgados frente à rigidez e resistência mecânica dos componentes do sistema. No entanto, aos mesmos se somam durante o processo de frenagem, as tensões térmicas, geradas nos componentes devido à distribuição não uniforme de temperaturas, gerada ao longo do

processo de frenagem. Aumentos praticamente instantâneos de temperatura, da ordem de centenas de graus são comumente observados em frenagens de emergência, por exemplo. Além do incremento rápido de temperatura, o processo de frenagem leva a diferenças de temperatura entre regiões diferentes do material de atrito também da ordem de centenas de graus Celsius, gerando gradientes térmicos e conseqüentemente mecânicos, bastante críticos.

A complexidade de distribuição dos esforços mecânicos no sistema de freio demanda ferramentas de análise avançadas. Este tipo de simulação é comumente realizada com auxílio de ferramentas de análise de elementos finitos.

### **3.4. Fundamentos da Mecânica da Fratura**

#### **3.4.1. Defeitos em Componentes**

Componentes fabricados a partir de materiais de Engenharia apresentam resistência à fratura significativamente inferior à sua resistência teórica, estimada com base nos parâmetros fundamentais do material. Componentes sólidos produzidos a partir de diversos métodos de fabricação plenamente empregados no campo de Engenharia possuem defeitos de origem microestrutural, tais como impurezas, inclusões, partículas de segunda fase, porosidade, etc., e também defeitos originados do trabalho mecânico que o processo de fabricação envolve, como rasgos, cantos vivos, trincas originadas de têmpera e solda, para citar alguns.

A observação do estado da arte atual em termos de processo de fabricação e obtenção de componentes de Engenharia permite concluir, de forma bastante razoável, que defeitos microestruturais estão sempre presentes. A filosofia que rege o projeto de um componente de engenharia invariavelmente deve estar atrelada a esta condição do material, enfim, do componente.

A filosofia que embasa a mecânica da fratura sugere um tratamento diferenciado, do ponto de vista do projeto, para prevenção de falha. Ao invés de focar na prevenção da nucleação de defeitos, admite-se que sempre haverá defeitos no material de um componente. A abordagem sugerida é que seja conduzido o projeto a partir de uma das duas relações a seguir:

- Dada certa tensão de projeto, qual é o tamanho crítico do defeito admissível ao material/componente?
- Dado certo tamanho crítico da população de defeitos do material/componente, qual a máxima tensão de serviço admissível?

Como já citado, se entende por defeito não apenas trincas, mas qualquer descontinuidade, inclusão, fases dispersas no material, etc, que possa atuar como concentrador de tensões. Em materiais compósitos, por exemplo, fases dispersas podem atuar como concentradores de tensão para matrizes frágeis quando a adesão entre matriz e fase dispersa é fraca, ou como tenacificadores, quando possuem boa interação com a matriz e uma geometria favorável que represente um obstáculo à propagação da trinca.

### 3.4.2. Fator Concentração de Tensão

O fato de os materiais de todas as classes apresentarem resistência à fratura muito inferior aos valores previstos teoricamente para os mesmos está associado à presença de defeitos e imperfeições advindos de diversos aspectos do material e do projeto do componente.

Pela análise de uma placa contendo um furo elíptico, conforme Figura 3.13, Inglis [Hertzberg, 1996] mostrou que a tensão aplicada no componente é magnificada na extremidade da trinca, considerando o eixo da trinca perpendicular à direção de aplicação da tensão externa.

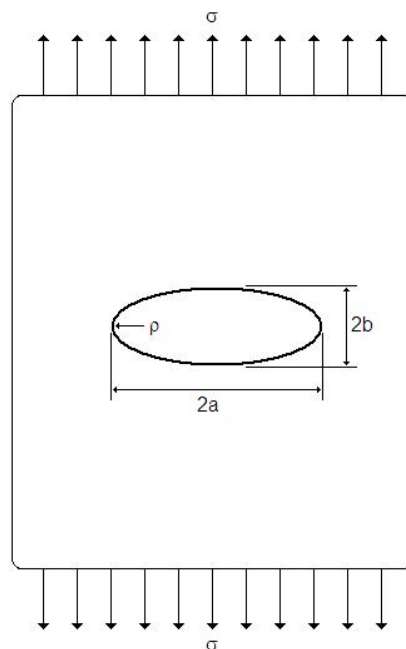


Figura 3.13 – Furo elíptico em uma placa acarreta magnificação da tensão externa aplicada.

De acordo com Inglis, o valor máximo que a tensão externa aplicada alcança, na extremidade do furo elíptico é dado por:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \sigma \left[ 1 + \frac{2a}{b} \right] \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde  $\sigma_{m\acute{a}x}$  é a tensão máxima na extremidade do furo,  $\sigma$  é a tensão externa aplicada,  $a$  é o comprimento de metade da maior dimensão do furo elíptico e  $b$  é o comprimento de metade da menor dimensão do furo elíptico.

Como o raio de curvatura  $\rho$  da extremidade do furo elíptico é dado por:

$$\rho = \frac{b^2}{a} \quad \text{Equação 3.2}$$

A máxima tensão na extremidade do furo elíptico pode ser expressa, também, como segue:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \sigma \left[ 1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right] \quad \text{Equação 3.3}$$

Transferindo essa análise para o caso de trincas em componentes, de forma geral o comprimento da trinca é muito maior do que sua espessura ( $a \gg b$ ) e, por consequência, do que seu raio de curvatura ( $a \gg \rho$ ), sendo que a equação da tensão máxima pode ser simplificada para:

$$\sigma_{m\acute{a}x} \approx 2\sigma \sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad \text{Equação 3.4}$$

O termo  $2\sqrt{(a/\rho)}$  é definido como fator de concentração de tensão ( $K_t$ ), o qual descreve o efeito da geometria da trinca no que diz respeito à magnificação da tensão na ponta da trinca.

$$K_t = 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \therefore K_t = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma} \quad \text{Equação 3.5}$$

Inglis demonstrou através desta função, a dependência fundamental da propagação de trincas em relação à geometria e direção da mesma. No entanto, não oferece uma explanação sobre a natureza da propagação de trincas num componente de engenharia.

### 3.4.3. Teoria de Griffith para Propagação de Trincas

A explanação mais consolidada e aceita no meio acadêmico sobre a natureza da falha de um componente, mais especificamente sobre a propagação de trincas em um componente sólido foi apresentada por Griffith na década de 1920 [Griffith, 1920].

Basicamente, Griffith concluiu através de suas observações que ao introduzir uma trinca em um sólido elasticamente deformado em virtude da aplicação de cargas externas, o balanço sistêmico de energia é necessariamente válido, englobando o decréscimo da energia potencial devido ao alívio de tensões elásticas ocasionado pela formação da trinca, e o incremento da energia superficial decorrente da mesma [Hertzberg, 1995].

De forma similar, para trincas pré-existentes, a propagação das mesmas é promovida caso o acréscimo da energia superficial demandado pelo fenômeno de propagação seja suprido pelo sistema.

O conceito de energia superficial está embasado no fato de que átomos presentes na fronteira de qualquer superfície em um sólido se apresentam num estado de não equilíbrio. Griffith estimou a mudança em energia quando uma trinca elíptica é introduzida numa placa infinita. Ele computou o decréscimo em energia devido à presença da trinca na placa, segundo Inglis, e encontrou  $[(\pi\sigma^2 a^2)/E]$  por unidade de espessura da placa no caso de tensão plana. O acréscimo na energia devido à presença de duas novas superfícies será  $[2a2\gamma_s]$  por unidade de espessura. Assim, pode-se escrever a mudança na energia potencial da placa quando uma trinca é nela introduzida através da Equação 3.6.

$$U - U_0 = -\frac{\pi\sigma^2 a^2}{E} + 4a\gamma_s \quad \text{Equação 3.6}$$

Onde  $U$  é a energia potencial da placa com trinca,  $U_0$  é a energia potencial da placa original sem trinca,  $\sigma$  é a tensão aplicada,  $a$  é metade do comprimento da trinca,  $E$  é o módulo de elasticidade do material da placa, e  $\gamma_s$  é a energia superficial específica do material da placa.

A condição de equilíbrio é obtida através da diferenciação da energia potencial  $U$  e igualando-a a zero, conforme Equação 3.7.

$$\frac{\partial U}{\partial a} = 4t\gamma_s - \frac{2\pi\sigma^2 at}{E} = 0 \quad \text{Equação 3.7}$$

Onde  $t$  representa a espessura.

Na relação 3.7,  $\partial U/\partial a = 0$  porque  $U_0$  é a energia potencial da placa sem trinca e não varia com  $a$  e a mesma, dessa forma, pode ser desdobrada na Equação 3.8.

$$2\gamma_s = \frac{\pi\sigma^2 a}{E} \quad \text{Equação 3.8}$$

A Equação 3.8 representa a condição de equilíbrio. A natureza do equilíbrio descrito acima pode ser determinada pela segunda derivativa,  $\partial^2 U / \partial a^2$ , Equação 3.9.

$$\frac{\partial^2 U}{\partial a^2} = -\frac{2\pi\sigma^2}{E} \quad \text{Equação 3.9}$$

A segunda derivativa na Equação 3.9 é negativa, então a condição de equilíbrio é instável e a trinca avançará até a fratura completa. Pelo rearranjo da equação 3.8, pode-se estimar a tensão necessária para propagação da trinca.

Para o caso de tensão plana ( $\sigma_z = \tau_{zx} = \tau_{zy} = 0$ ), condição de tensão biaxial, a Equação 3.9 resulta na Equação 3.10.

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a}} \quad \text{Equação 3.10}$$

Para o caso de deformação plana, condição de tensão triaxial associada à supressão da deformação em uma das direções ( $e_z = 0$ ), a Equação 3.9 resulta na Equação 3.11.

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a(1 - \nu^2)}} \quad \text{Equação 3.11}$$

É importante ressaltar que o equacionamento proposto pro Griffith foi desenvolvido para materiais de comportamento elástico contendo defeitos, ou trincas, de raio indiscutivelmente crítico. Apesar de as Equações 3.10 e 3.11 não considerarem o raio da trinca como variável de dependência, ao passo que o Fator Concentração de Tensão de Inglis o faz, o mesmo assumidamente deve atender o critério de criticidade. Assim, o critério de Griffith deve ser considerado necessário, mas não suficiente, para ocorrência da falha. O raio de curvatura da trinca deve, necessariamente, ser crítico de forma a incrementar as tensões locais acima da resistência coesiva.

#### 3.4.4. Fator Intensidade de Tensão e Tenacidade à Fratura

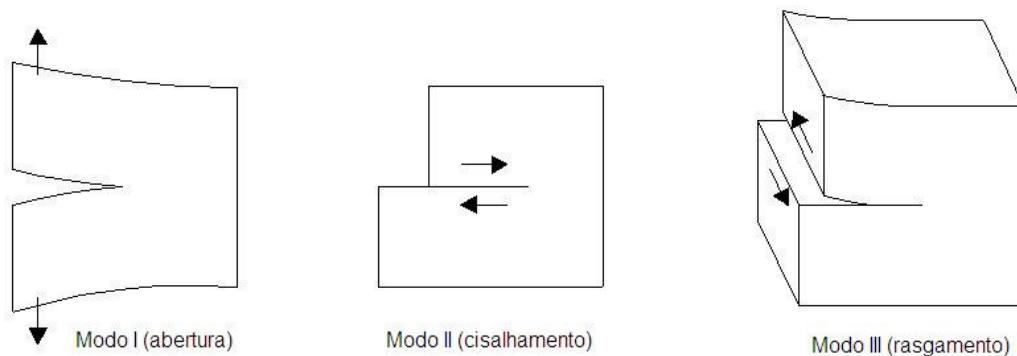
Como visto anteriormente, a resistência dos materiais, ou componentes fabricados a partir de materiais de Engenharia está diretamente associada à presença de defeitos internos no componente. A hipótese do “elo fraco” explica porque a resistência experimental dos materiais é significativamente menor do que sua resistência teórica, sendo demonstrado por

diversos autores [Richerson, 1992; Hertzberg, 1996], que trincas ou defeitos na microestrutura do material funcionam como concentradores de tensões.

Há três modos principais de carregamento que alteram o padrão de tensões na extremidade de um defeito:

- I. Modo de abertura, ou de tração, onde as superfícies da fratura são diretamente afastadas;
- II. Modo de deslizamento, ou de cisalhamento no plano, no qual as superfícies de fratura deslizam uma sobre a outra numa direção paralela à direção de orientação da trinca;
- III. Modo de rasgamento, ou de cisalhamento antiplanar, no qual as superfícies de fratura movem-se uma em relação a outra, numa direção contida no plano da trinca, e perpendicular à direção da trinca.

Os três modos podem ser visualizados na Figura 3.14.



*Figura 3.14 – Modos fundamentais de propagação de trincas.*

A análise da distribuição de tensões na vizinhança da trinca permite determinar a intensidade da tensão em qualquer ponto próximo a ela. A análise de tensões em trincas já foi amplamente demonstrada, com base nos conceitos de elasticidade. Irwin [Hertzberg, 1996], apresentou o desdobramento da distribuição das tensões associadas aos três modos principais de carregamento.

A análise das tensões na vizinhança de uma trinca, conforme demonstrado na Figura 3.15.



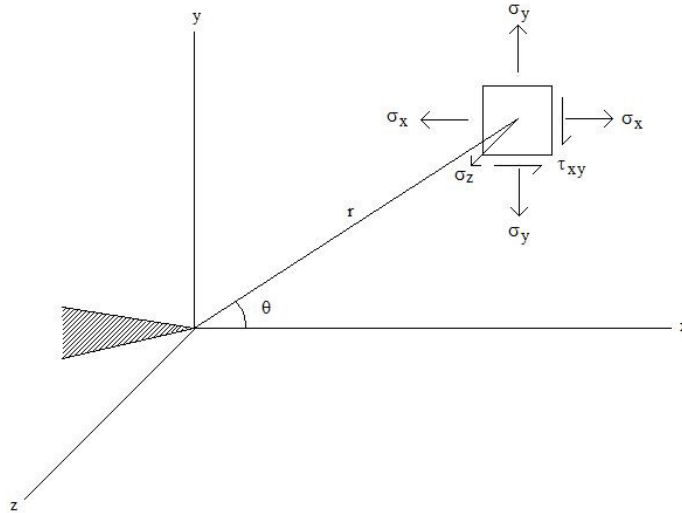


Figura 3.15 – Distribuição de tensões na vizinhança de uma trinca [Hertzberg,1996].

As tensões referidas na Figura 3.15 podem ser equacionadas como:

$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad \text{Equação 3.12}$$

$$\sigma_x = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad \text{Equação 3.13}$$

$$\tau_{xy} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \left( \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \quad \text{Equação 3.14}$$

É evidente, pelas Equações 3.12, 3.13 e 3.14 que as tensões tendem a valores extremamente altos conforme  $r$  tende a zero. Essa situação é prevenida pela ocorrência de deformação plástica na ponta da trinca. Como esse núcleo plástico está cercado por uma extensa região elástica de material e está submetido a tensões biaxiais ( $\sigma_y + \sigma_x$ ) ou triaxiais ( $\sigma_y + \sigma_x + \sigma_z$ ), a extensão da deformação plástica é suprimida nesta região.

Um aspecto importante verificado através das Equações 3.12, 3.13 e 3.14 é o fato de que a distribuição de tensões na vizinhança de uma trinca contida em uma estrutura é puramente dependente dos fatores  $r$  e  $\theta$ . A diferença entre dois componentes que contém uma trinca está no parâmetro  $K$  do campo de tensões desenvolvido em cada um dos mesmos. Este parâmetro  $K$  é definido como fator intensidade de tensões e serve como um fator de escala na determinação da magnitude do campo de tensões que cerca uma trinca.

Dessa forma, o conceito de tenacidade à fratura relacionado à tensão desenvolvida na vizinhança da trinca ou defeito pode ser definido a partir do fator intensidade de tensão  $K$ ,

como sendo um valor crítico do mesmo  $K_C$  e pode ser utilizado para especificar a combinação de tensão e geometria da trinca/peça a fim de garantir que o componente não irá falhar:

$$K_C = Y(a/W)\sigma_c\sqrt{\pi a} \quad \text{Equação 3.15}$$

Nota-se que o fator  $Y$  é uma função do comprimento da trinca,  $2a$ , e da largura do componente que contém a trinca,  $W$ . Para componentes com valor de  $a/W$  próximo de zero, os valores de  $Y$  tendem à unidade.

Para componentes com espessura fina (estado de tensão plana), o valor de  $K_C$  depende da espessura e diminui com o aumento da mesma até um valor crítico de espessura, a partir do qual o componente passa a exibir um estado de deformação plana e o valor de  $K_C$  passa a ser constante, independente da espessura do componente. O valor da constante  $K_C$  para componentes espessos é conhecido como tenacidade à fratura Modo I para deformação plana,  $K_{Ic}$ :

$$K_{Ic} = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad \text{Equação 3.16}$$

### 3.5. Comportamento Mecânico da Resina Fenólica e Compósitos de Matriz Fenólica

A resina fenólica (fenol formaldeído) é o material mais utilizado como matriz em materiais compósitos de fricção para aplicação automotiva. Sua consolidação como a melhor opção de ligante para este rol de materiais foi imediata, segundo Nicholson [1995] e está intimamente ligada à própria evolução da indústria de autopeças para sistemas de freio automotivos. Isso se deu pelo fato de a resina fenólica oferecer propriedades térmicas e mecânicas que condizem com os requisitos de serviço para materiais de fricção, associadas à processabilidade e ao custo competitivo, tornando-a adequada de forma única para este tipo de aplicação.

Do ponto de vista mecânico, a resina fenólica, sendo um termofixo, faz parte do grupo de materiais poliméricos que exibe comportamento frágil. O seu módulo de elasticidade está entre os mais elevados dentre os polímeros, da ordem de 2,8 a 4,8 GPa, de acordo com Callister [2000]. Sua deformação típica até a fratura é bastante limitada, entre 1,5% e 2% em solicitações de tração, conforme apontado por vários autores [Callister, 2000; Ashby, 2005]. A curva tensão versus deformação típica da resina fenólica, em solicitação de tração, é muito similar à curva de um material de alta fragilidade, lembrando materiais cerâmicos, visto que a ruptura ocorre ainda na porção da curva que exibe comportamento elástico, sem deformação permanente antes da quebra. Estas propriedades são esperadas para materiais termofixos, visto

que esta subclasse dos materiais poliméricos apresenta aspectos de comportamento frágil, dentre os quais podemos citar, além da reduzida deformação até a ruptura, uma superfície de fratura típica de material frágil, com aspectos que lembram vidros ou cerâmicos. Valores de tenacidade à fratura da ordem de  $1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , reportados na literatura [Ashby, 2005] reforçam a natureza frágil da resina fenólica.

Silveira [2006] expôs como resultados de seu trabalho a larga distribuição de valores de resistência à flexão em três pontos para corpos-de-prova moldados em resina fenólica. A própria distribuição errática de resultados de resistência mecânica é indício de que o material apresenta um comportamento essencialmente frágil, pois permite inferir com bom grau de segurança que a resistência à ruptura do mesmo está intrinsecamente associada a fatores não estruturais, como defeitos de fabricação. A mesma autora fez, também, observações sobre as superfícies de fratura dos mesmos corpos-de-prova testados em flexão, demonstrando a presença de todos os elementos que caracterizam a fratura frágil, como o ponto de origem da fratura, a região espelhada, a região mista e a região fibrosa.

Outros autores também já respaldaram a aplicação dos princípios da mecânica da fratura na análise de falha de materiais poliméricos de comportamento frágil, visto que a susceptibilidade destes materiais à fratura na presença de defeitos pode ser expressa em termos da tenacidade à fratura [Callister, 2000].

Em seu trabalho, Zheng [2012] cita, corroborando com outros autores, a aplicabilidade da resina fenólica em diversos campos da indústria, dentre os quais a de compósitos estruturais para componentes internos de aeronaves e dispositivos a prova de fogo. Concorde com outros autores, também, sobre a alta fragilidade da resina fenólica na forma pura. Seus estudos estão ligados aos mecanismos de tenacificação da resina fenólica pela incursão de fases elastoméricas de acrilonitrila-butadieno na microestrutura da mesma, tendo verificado que a utilização deste artifício pode incrementar significativamente a propriedade de tenacidade à fratura da resina fenólica. Quantitativamente, constatou que a inserção de 10% em massa de nano partículas de acrilonitrila-butadieno na microestrutura da resina fenólica pode incrementar os resultados de energia absorvida no teste de impacto IZOD para cerca de  $4 \text{ kJ/m}^2$ , frente a  $1,75 \text{ kJ/m}^2$  observado para a resina novolaca pura, indicando um comportamento linear na relação entre o aumento da fração de elastômero na microestrutura da resina e o incremento da energia absorvida no impacto. Observou, também, que a superfície de fratura dos corpos-de-prova no teste de impacto IZOD passa a apresentar rugosidade mais expressiva, incluindo formação de buracos, conforme a fração de nano partículas de acrilonitrila-butadieno é incrementada.

Cardona [2011] procurou desenvolver um entendimento, em seu trabalho, da correlação entre estrutura e propriedades, e também de mecanismos de tenacificação da resina fenólica para aplicação em estruturas para construção civil. Propôs a utilização de Cardanol, um componente fenólico natural proveniente do óleo da castanha de caju, em adição à resina fenólica sintética obtida de petróleo, a fim de incrementar a tenacidade do material, baseado na modificação que este componente ocasiona no desenho da estrutura molecular do polímero termofixo. Basicamente observou em seus resultados que o aumento da fração de Cardanol na blenda polimérica provocou a diminuição da densidade de ligações cruzadas na estrutura polimérica e, da mesma forma, provocou a diminuição da temperatura de transição vítrea do polímero resultante. Isso diminui o grau de rigidez e fragilidade do material. Consequentemente, e conforme esperado, observou um aumento da deformação até a ruptura e da resistência mecânica em testes de flexão em 3 pontos da blenda. Paralelamente, e de forma lógica, observou também um aumento dos valores de  $K_{IC}$  com o aumento da fração de cardanol na blenda.

Conforme mostram os resultados explicitados por Cardona, a redução da rigidez da cadeia polimérica da resina fenólica, neste caso pela adição de Cardanol, pode contribuir efetivamente para a tenacificação da resina fenólica. No entanto, é importante se observar em relação aos materiais compósitos de fricção, que a característica de alta densidade de ligações cruzadas da resina fenólica é responsável não apenas pelas propriedades mecânicas do material, mas influenciam largamente outras propriedades de importância primordial tais como a resistência térmica, estabilidade do coeficiente de fricção em função da temperatura e também a resistência ao desgaste do compósito.

Em seu trabalho de investigação de propriedades mecânicas de compósitos com matriz de resina fenólica/epóxi, Tyberg [1999] reportou valores de  $K_{IC}$  da ordem de  $1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , concluindo ainda, que o aumento da fração de resina fenólica na composição da matriz favorece a tenacificação do compósito.

### **3.6. Natureza Estatística de Falha**

#### **3.6.1. Abordagem Determinística**

Ao projetar componentes de Engenharia, é comum a seleção de materiais para fabricação com base numa análise determinística. A correlação entre as tensões máximas de projeto do componente, estimadas por métodos de elementos finitos, volumes finitos ou por outras aproximações matemáticas consolidadas, e a resistência típica à falha de um material,

atrelada a uma margem de segurança é uma prática vigente ao projetar componentes cuja fabricação é feita com materiais metálicos, por exemplo.

Essa filosofia é plenamente factível pela natureza tenaz da maioria das ligas metálicas. A capacidade de tenacificação de defeitos microestruturais destes materiais confere aos mesmos uma variabilidade de valores de resistência mecânica significativamente pequena, comparada à magnitude do valor médio encontrado para um conjunto de valores de caracterização.

Essa característica primordial embasa a filosofia determinística a partir do momento em que possibilita que um valor típico de resistência seja empregado como propriedade do material com grau de confiança que atende às necessidades de projeto. As variações de amostragem, ou seja, de componente para componente, podem ser compensadas pelo emprego de um fator de segurança razoável do ponto de vista da viabilidade econômica do projeto.

A seleção de materiais utilizando a filosofia determinística praticamente não emprega ferramentas estatísticas. No que concerne à resistência à falha do componente, os parâmetros comumente utilizados para determinação do material mais adequado são o valor de resistência média (Equação 3.17) e o valor característico de sua variabilidade, geralmente observado através do desvio padrão da amostragem de caracterização (Equação 3.18).

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i}{N} \quad \text{Equação 3.17}$$

$$S = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_i - \bar{\sigma})^2}{N} \right] \quad \text{Equação 3.18}$$

Onde  $\bar{\sigma}$  é a tensão média,  $\sigma_i$  representa cada valor individual de tensão na população da resultados,  $S$  é o desvio padrão e  $N$  o número de valores que compõem a população de resultados.

### 3.6.2. Abordagem Probabilístico

No entanto, a abordagem de caráter probabilístico, que está fundamentada na natureza probabilística de falha, é comprovadamente a mais adequada do ponto de vista de projeto. Além de garantir a precisa mensuração do risco técnico do projeto, a mesma não apresenta restrições de aplicabilidade a qualquer classe de materiais.

Atualmente, o método de análise de distribuição de falha mais bem aceito e utilizado é o proposto por Weibull. O conceito proposto por Weibull está baseado na hipótese do elo mais fraco [Richerson, 1992]. Ela estabelece que um componente ou uma fração de volume de um componente submetido a uma tensão uniforme falhará devido ao defeito mais crítico contido no volume de material considerado. O resultado apresentado por esta análise é uma correlação de probabilidade de falha  $PF$  de um componente em função da tensão  $\sigma$  à qual o mesmo é submetido, sendo que a probabilidade de falha é função da tensão aplicada e do volume  $V$  ou área  $A$  sob tensão.

$$F = f(\sigma, V, A) \quad \text{Equação 3.19}$$

Weibull propôs a seguinte abordagem para materiais frágeis, como os cerâmicos.

$$f(\sigma) = \left( \frac{\sigma - \sigma_\mu}{\sigma_0} \right)^m \quad \text{Equação 3.20}$$

Onde  $\sigma$  é a tensão aplicada,  $\sigma_\mu$  é a tensão base abaixo da qual a probabilidade de falha é zero,  $\sigma_0$  é a tensão característica, normalmente associada à probabilidade de falha de 0,632, e  $m$  é o módulo de Weibull que representa a distribuição de falha e também o grau de variabilidade dos dados em análise.

A probabilidade de falha em função do volume de material do componente é dada pela Equação 3.21.

$$PF = 1 - \exp \left[ - \int_V \left( \frac{\sigma - \sigma_\mu}{\sigma_0} \right)^m dV \right] \quad \text{Equação 3.21}$$

A Equação 3.21 resulta numa curva com formato típico da apresentada na Figura 3.14. A mesma pode ser obtida através da correlação de dados experimentais. A probabilidade de falha  $PF$  pode ser obtida através da correlação dada pela Equação 3.22, tendo os dados experimentais organizados em ordem crescente de valores (esta é uma condição básica estabelecida por Weibull).

$$PF = \frac{n}{N + 1} \quad \text{Equação 3.22}$$

Onde  $n$  é o indexador dos dados e  $N$  é o número total de valores do conjunto de dados. Os dados de  $PF$  são *plotados* em função dos valores de resistência, ambos correspondentes entre si e associados ao indexador  $n$ .

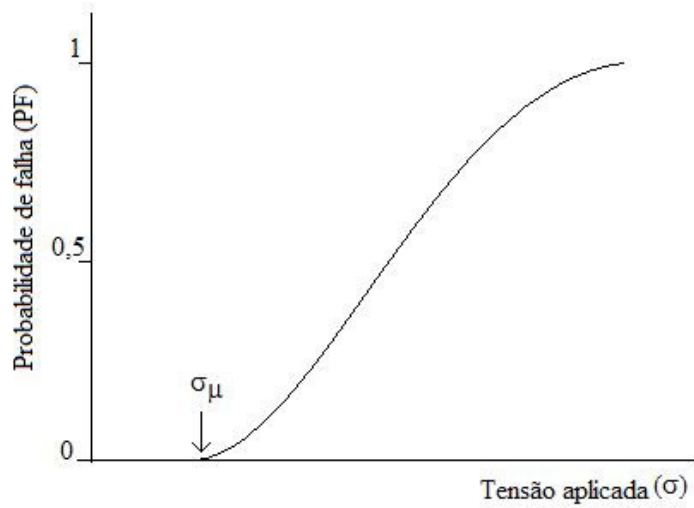


Figura 3.16 – Distribuição de Weibull típica. Fonte: [Richerson, 1992].

A curva mostrada na Figura 3.16 representa uma aproximação da probabilidade de falha e não permite a obtenção do módulo de Weibull  $m$ .

Traçando a linha de tendência (curva de primeiro grau) que relaciona  $\ln \ln [1/(1 - PF)]$  versus  $\ln \sigma$ , obtém-se o módulo  $m$  de Weibull. Esta forma da curva de Weibull (Figura 3.17) é amplamente utilizada para descrever a confiabilidade da resistência à falha para componentes.

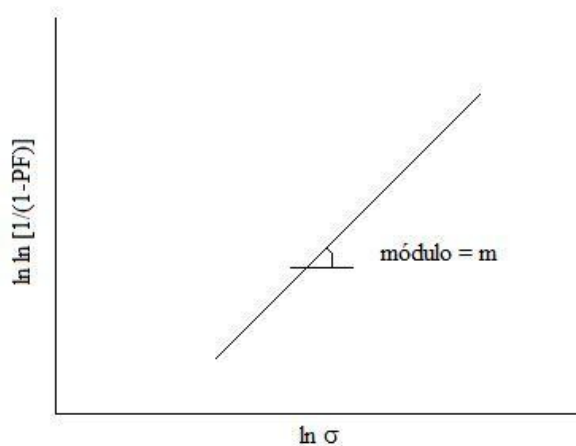


Figura 3.17 – Formato logarítmico da curva de Weibull, comumente utilizado. Fonte: [Richerson, 1992].

As Equações 3.20 e 3.21 representam funções de Weibull com três parâmetros, onde  $\sigma_\mu$ ,  $\sigma_0$  e  $m$  são os três parâmetros. É plenamente razoável para materiais frágeis utilizar uma função de dois parâmetros, na qual a tensão base  $\sigma_\mu$  é assumida como sendo zero. Dessa forma, a Equação 3.21 torna-se:

$$PF = 1 - \exp \left[ - \int_V \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m dV \right] \quad \text{Equação 3.23}$$

É sabido que solicitações de tração são mais críticas em materiais frágeis do que solicitações de compressão, pois levam ao modo I de fratura (abertura), que é tipicamente o mais crítico. Dessa forma, pode-se assumir que a seção do componente sob tração é de interesse da análise. Caso o componente por inteiro esteja sob ação de tensões trativas, a Equação 3.23 de dois parâmetros torna-se:

$$PF = 1 - \exp \left[ -V \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad \text{Equação 3.24}$$

Se o carregamento é realizado por flexão (3 pontos ou 4 pontos), o volume do componente efetivamente sob tensão trativa é significativamente menor. Para flexão 3 pontos, o volume efetivo é igual a  $V/[2(m+1)^2]$  e para flexão 4 pontos, o volume efetivo é igual a  $[V(m+2)]/[4(m+1)^2]$ .

Um número significativo de amostras é necessário para se ter confiabilidade no valor de  $m$  obtido. Uma amostragem com 10 dados pode resultar num erro de  $\pm 40\%$  no valor de  $m$ . Para se obter uma confiabilidade da ordem de 90% para o valor de  $m$  são necessários cerca de 60 dados na amostragem.

Importante mencionar que a curva de distribuição dos dados de uma amostragem em análise nem sempre podem ser representados por uma única linha de tendência de primeiro grau. Pode ocorrer que a população total de dados é composta por mais de uma população de defeitos determinantes para a fratura. Um exemplo típico é mostrado pela Figura 3.18.



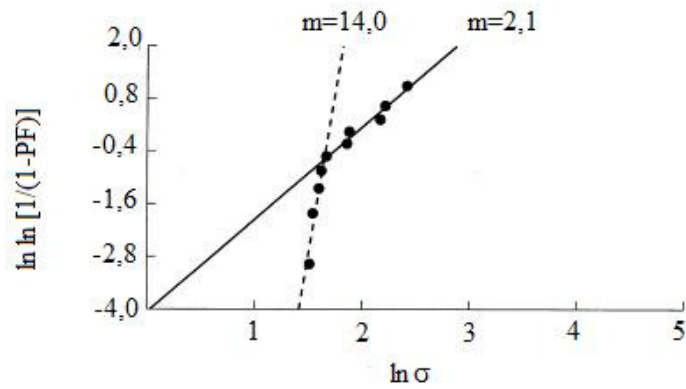


Figura 3.18 – Distribuição de Weibull bimodal.

No caso de uma amostragem com distribuição bimodal ou trimodal de população de defeitos, é recomendável analisar cada população de defeitos em separado, ou concentrar a análise na população e defeitos mais crítica do ponto de vista do projeto (a que relaciona os menores valores de resistência, e a que relaciona os valores de maior dispersão – menor valor de  $m$ ).

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

O desenvolvimento deste trabalho foi motivado, como já ressaltado no capítulo de introdução, pela necessidade da indústria de materiais de fricção de incrementar a precisão na etapa de projeto, durante o desenvolvimento de produtos para o mercado. Dessa forma, o mesmo visa fundamentalmente inovar o processo de desenvolvimento de produtos em si, modificando o paradigma atual em termos de “boas práticas” de engenharia neste âmbito, permitindo assim o aumento da competitividade da indústria regional frente a seus concorrentes em atuação mundial. Este trabalho foi desenvolvido em parceria com o centro de pesquisa e desenvolvimento da Fras-le S.A., onde foram fabricados todos os materiais e corpos-de-prova, desenvolvidos os métodos de teste e realizados todos os procedimentos experimentais.

A inovação nas boas práticas de engenharia proposta neste trabalho diz respeito à adoção e utilização de conceitos da mecânica da fratura e da análise estatística de Weibull no processo de engenheirar novos produtos para o mercado. Ao mesmo tempo, engloba a capacitação da indústria para realização de testes que permitam a avaliação de protótipos em relação às propriedades que os caracterizam frente a estes conceitos da mecânica da fratura.

Serão apresentados a seguir, detalhes sobre seleção de norma, desenvolvimento de método, seleção de produtos atuais para caracterização, confecção de corpos-de-prova e rotina de execução de testes que permitam capacitar a indústria no âmbito de avaliação da tenacidade à fratura de materiais de fricção.

### **4.1. Seleção da norma para avaliação da tenacidade à fratura de materiais de fricção**

Conforme ressaltado no capítulo de introdução, as atividades de pesquisa e desenvolvimento de materiais de fricção são realizadas essencialmente nos centros de engenharia das grandes empresas do setor. No entanto, a cooperação com universidades e a forte interação com setores de engenharia do cliente, mais expressivamente fabricantes de sistemas de freio e montadoras de veículos, traz a necessidade de utilização de normas reconhecidas e utilizadas pela indústria automotiva.

Isto visa possibilitar que resultados gerados por qualquer parte envolvida nesta interação fornecedor/cliente possam ser corretamente interpretados e correlacionados com resultados da outra parte envolvida. Essa prática é fundamental dentro do conceito de Engenharia Simultânea, bastante difundido atualmente na cadeia da indústria automotiva.

Cabe ressaltar, também, a importância de se poder correlacionar resultados obtidos no dia-a-dia do desenvolvimento de produtos com as informações que são geradas e publicadas no corpo acadêmico, de forma a fortalecer os conceitos básicos sobre materiais compósitos, mecânica da fratura, etc.

Estes dois aspectos básicos foram levados em consideração na seleção da norma apropriada para desenvolvimento do método de teste de tenacidade à fratura utilizado neste trabalho para avaliação de materiais de fricção. Foi escolhida a norma *ASTM D5045-99 (Reapproved 2007) – Plane Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of plastic Materials* – para o desenvolvimento do método de avaliação da tenacidade à fratura de materiais de fricção. O mesmo foi incorporado durante o desenvolvimento deste trabalho, como prática de avaliação de protótipos no centro de P&D da Fras-le S.A..

Segundo o escopo desta norma, a mesma foi projetada para caracterizar a tenacidade à fratura de materiais poliméricos em termos do fator intensidade de tensão crítica,  $K_{IC}$ . Dentre as normas atualmente disponíveis para caracterização da tenacidade à fratura de materiais, essa é a que mais bem se enquadra para caracterização de materiais de fricção. Adicionalmente, normas ASTM são largamente utilizadas na indústria automotiva, bem como no meio acadêmico para caracterização mecânica de materiais.

Basicamente, a norma ASTM D5045-99 prevê a execução do teste de flexão em três pontos para avaliação do  $K_{IC}$  dos materiais a caracterizar. A interpretação dos resultados demanda, além deste teste, a caracterização da resistência do material à tração ou compressão.

#### **4.2. Teste de flexão em três pontos**

A opção pelo método de flexão em três pontos definida na norma ASTM D5045-99 corrobora com as indicações da literatura [Richerson, 1992; Barsoum, 1997; Hertzberg, 1996; Adachi *et al.* 2001; Verma, 2004; Koh, 1993; Castellani, 1996]. Este método é largamente utilizado na avaliação da tenacidade à fratura em virtude de permitir o desenvolvimento de sollicitação de tração ao material de forma que os parâmetros como alinhamento e rigidez da máquina de ensaio não sejam tão críticos como no caso do teste de tração propriamente dito.

Fundamentalmente, poderia ser questionado sobre o porquê da não utilização do teste de flexão em quatro pontos ao invés de três pontos. Como já demonstrado extensivamente na literatura por vários autores como por exemplo, por Richerson [1992], e também em manuais orientativos de testes mecânicos para materiais, o teste de flexão em quatro pontos oferece a

vantagem de expor um volume consideravelmente maior do corpo-de-prova à solicitação máxima de tração obtida durante a execução do teste. No entanto, é importante ressaltar que o cuidado demandado para a execução do teste de flexão em quatro pontos em termos de alinhamento de dispositivos, planicidade e paralelismo de faces do corpo-de-prova, etc. é maior quando comparado ao teste de flexão em três pontos.

Esse questionamento motivou, no passado, este doutorando e seus orientadores a tentar utilizar o teste de flexão em quatro pontos para avaliação mecânica de materiais de fricção durante a execução do trabalho *Modelagem Matemática e Avaliação Experimental do Módulo de Elasticidade de Materiais Compósitos Particulados de Matriz Fenólica Para Uso Como Material de Fricção* [Casaril, 2009]. As dificuldade que fizeram com que o teste de flexão em quatro pontos fosse substituído pelo de flexão em três pontos naquele trabalho estavam justamente ligadas ao alinhamento adequado do dispositivo. Basicamente, todos os corpos-de-prova testados à época, apresentaram fratura exatamente em um dos pontos superiores de aplicação de carga, indicando a não uniformidade de aplicação da carga e, conseqüentemente, invalidando os resultados.

#### 4.2.1. Obtenção dos corpos-de-prova para o teste de flexão em três pontos

Os corpos-de-prova para o teste de flexão em três pontos foram obtidos a partir de placas planas fabricadas com os materiais de fricção definidos para caracterização, os quais serão apresentados adiante.

A configuração geométrica dos corpos-de-prova pode ser visualizada na Figura 4.1. A mesma obedece orientações dimensionais estabelecidas pela norma ASTM D5045-99, sendo que as dimensões foram definidas como sendo  $W = 14$  mm,  $B = 7$  mm,  $a = 7,2$  mm.

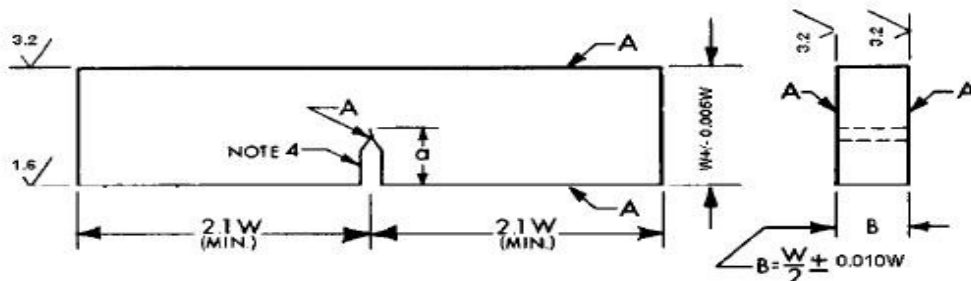


Figura 4.1 – Corpo-de-prova para teste de flexão em três pontos para avaliação da tenacidade à fratura segundo ASTM D5045-99.

Os corpos-de-prova foram extraídos, conforme já mencionado, de placas fabricadas com materiais de fricção. A Figura 4.2 apresenta o posicionamento e orientação da retirada dos corpos-de-prova em relação à placa.

No que diz respeito à extração dos corpos-de-prova, foi observada a necessidade de avaliar a propriedade de tenacidade à fratura no plano e direção adequados. Isto está relacionado à susceptibilidade, por menor que seja, das propriedades de resistência mecânica dos materiais poliméricos e compósitos de matriz polimérica em relação ao processo de fabricação. Sabe-se que o processo de moldagem por compactação a quente sob pressão, que é o processo típico de fabricação de materiais compósitos de fricção, resulta, por exemplo, em uma resistência à compressão do compósito que é maior na direção  $y$  (direção de compactação) do que nas direções  $x$  e  $z$  (perpendiculares à direção de compactação). Tal susceptibilidade é ressaltada pela própria norma em questão e é comumente observada, por exemplo, em testes mecânicos de materiais de fricção.

Por esse motivo, os corpos-de-prova foram extraídos das placas de forma a garantir que o rasgo e a pré-trinca observados na Figura 4.1 concordassem com o plano de ocorrência e propagação das trincas observados em componentes de fricção em serviço, e que o sentido da carga de flexão corroborasse com a aplicação dos esforços ao qual o componente de fricção é submetido no sistema de freio.

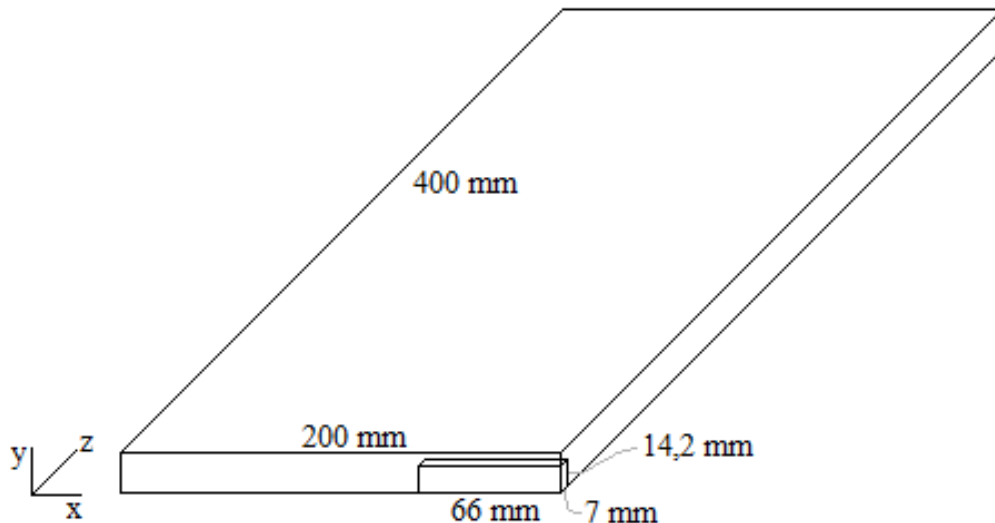
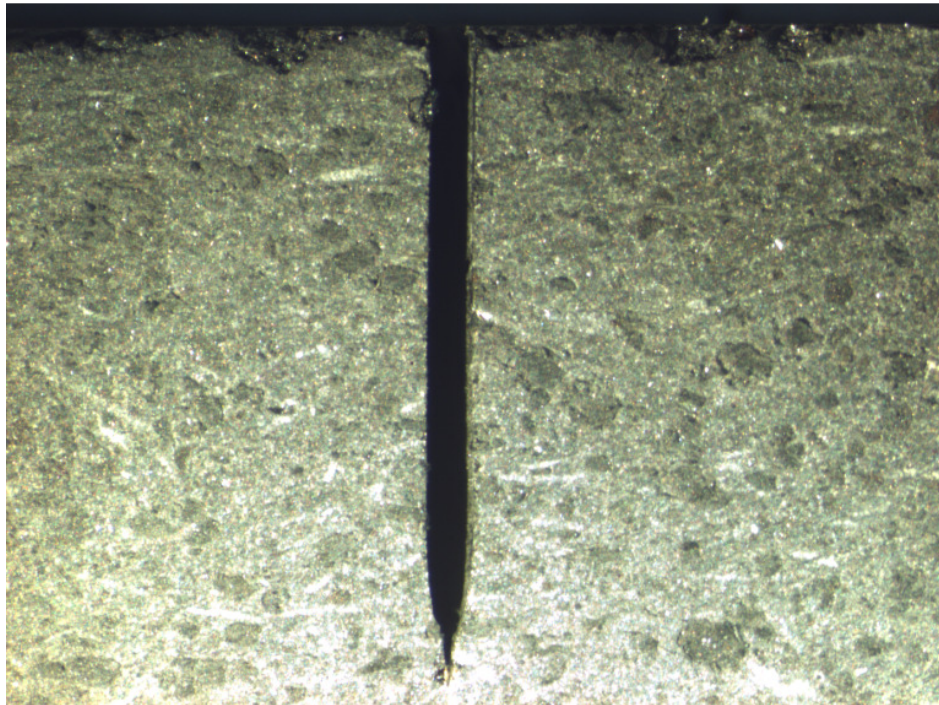


Figura 4.2 – Esquema da extração do corpo-de-prova para teste de flexão a 3 pontos, no plano perpendicular ( $xz$ ) à direção de compactação ( $y$ ).

Um aspecto fundamental do corpo-de-prova do teste de flexão em três pontos para determinação do  $K_{IC}$  do material avaliado é a criticidade da pré-trinca que deve ser imposta ao mesmo. Para garantir que a trinca feita no corpo-de-prova tivesse o aspecto de criticidade necessário, a ponta da trinca foi complementada com uma lâmina de corte, conforme orientação da própria norma ASTM D5045-99. Assim, foi possível imprimir à ponta da trinca o aspecto conforme pode ser visualizado na Figura 4.3.



*Figura 4.3 – Detalhe da pré-trinca em corpo-de-prova para teste de flexão em três pontos.*

#### **4.2.2. Equipamento, dispositivo e parâmetros do teste de flexão em três pontos**

Para execução do teste de flexão em três pontos, foi empregada uma máquina de ensaios universal Instron, modelo 5569 com célula de carga de 5 kN, e dispositivo para ensaio de flexão em três pontos originalmente contido no kit fornecido pelo fabricante. Os mesmos podem ser visualizados na Figura 4.4.

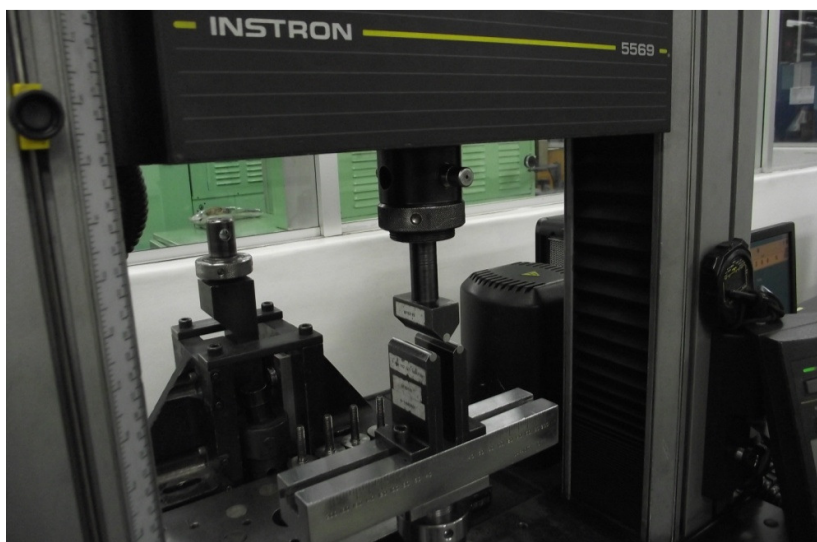


Figura 4.4 – Máquina Instron modelo 5569 e dispositivo de flexão em três pontos.

Os parâmetros de interesse do ensaio de flexão em três pontos são:

- Distância entre os apoios: 56 mm;
- Raio de curvatura dos apoios e do punção: 5 mm;
- Velocidade de deslocamento do punção: 10 mm/min.

### 4.3. Teste de Compressão

A interpretação e análise dos resultados do teste mecânico de valoração da tenacidade à fratura em acordo com a norma ASTM D5045-99 envolve procedimentos de tratamento dos dados, os quais serão apresentados adiante. Um destes procedimentos contempla além do valor da tenacidade à fratura obtido no teste de flexão em três pontos, também o valor da resistência à tração do material, a ser obtido em acordo com a norma *ASTM D638-03 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics* ou, alternativamente, da resistência à compressão, em acordo com a norma *ASTM D695-02 Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*.

Frente a ambas as possibilidades oferecidas pela norma ASTM D5045-99, em se determinar a resistência à tração, ou alternativamente a resistência à compressão do material de fricção para aplicação do critério de validação da tenacidade à fratura, foi definido como mais adequado para este trabalho a realização do teste de compressão.

Esta decisão foi tomada com base em alguns critérios. Primeiramente, pela facilidade em se extrair os corpos-de-prova de acordo com a norma ASTM D695-02. Adicionalmente, a realização do teste de compressão é significativamente mais fácil quando comparada com a realização do teste de tração, principalmente em se tratando de materiais com característica frágil, tais como os materiais de fricção. A realização do teste de tração demandaria cuidados extremos na confecção dos corpos-de-prova, dentre eles a rugosidade de toda superfície do mesmo e o arredondamento das suas arestas, a fim de evitar a quebra preferencial devido a concentradores de tensão. Essas dificuldades são aqui apontadas com base em experiências de outros projetos desenvolvidos no centro de P&D da Fras-le S.A. no passado. As tentativas de desenvolver um método de avaliação da resistência à tração de materiais de fricção com base na norma ASTM D638-03 esbarraram nas dificuldades em se operacionalizar um procedimento que permitisse a realização de testes válidos em termos de significância dos resultados obtidos, e ao mesmo tempo pudesse ser implementado como um método rotineiro, com equipamentos e técnicos capacitados.

#### **4.3.1. Obtenção dos corpos-de-prova para o teste de compressão**

Os corpos-de-prova para realização do teste de compressão foram extraídos das mesmas placas compactadas utilizadas para providência dos corpos-de-prova para o teste de flexão em três pontos

A geometria do corpo-de-prova corresponde ao arranjo preferencial indicado pela norma ASTM D695-02, um prisma com dimensões de 12,7 mm x 12,7 mm x 25,4 mm, sendo os mesmos retirados de forma que a direção de aplicação da carga de compressão coincidissem com a direção do eixo principal do corpo-de-prova de flexão, conforme pode ser visualizado na Figura 4.5



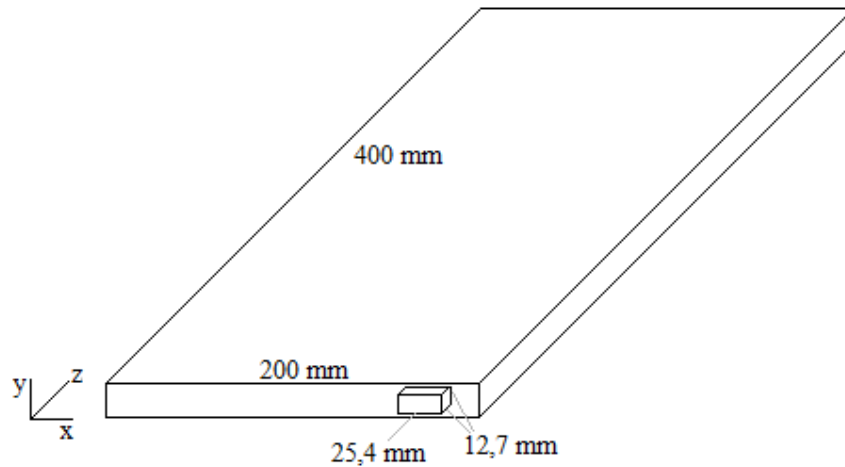


Figura 4.5 – Esquema da extração do corpo-de-prova para teste de compressão.

#### 4.3.2. Equipamento, dispositivo e parâmetros do teste de compressão

O teste de compressão foi executado utilizando-se o mesmo equipamento, anteriormente citado, empregado na realização dos testes de flexão em três pontos, ou seja, uma máquina de ensaios universal Instron, modelo 5569, com célula de carga de 5 kN. O dispositivo para ensaio de compressão faz parte, também, do kit original fornecido pelo fabricante da máquina. Os mesmos podem ser visualizados na Figura 4.6.

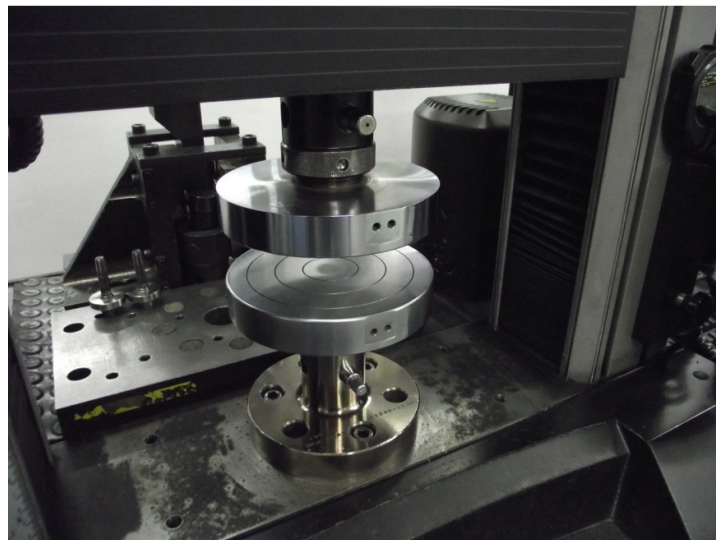


Figura 4.6 – Máquina de ensaios universal preparada com dispositivo para realização do teste de compressão.

O parâmetro de ensaio, de interesse do ponto de vista da realização do teste de compressão, é a velocidade de avanço do punção. Nesse caso, foi utilizada a velocidade determinada na norma D695-02, de 1,3 mm/min.

#### 4.4. Interpretação dos resultados de $K_{IC}$

A interpretação dos resultados de tenacidade à fratura envolve uma série de desdobramentos e checagem de critérios para serem considerados válidos.

A primeira análise envolve a interpretação do gráfico Força vs Deslocamento – adiante denominado “F vs D” – de cada corpo-de-prova do teste de flexão em três pontos. Com objetivo de verificar a validade do  $K_{IC}$  medido, é necessário calcular um resultado condicional denominado  $K_Q$  que fornece uma interpretação de consistência do resultado em função do tamanho do corpo-de-prova. A partir da curva Força vs Deslocamento, deve-se traçar a melhor reta que represente a inclinação da curva em relação ao eixo vertical do gráfico (força), na sua porção linear. A reta é representada na Figura 4.7 pelo segmento AB, e o parâmetro de concordância C da mesma é dado pela  $\tan \theta$ , estabelecido em relação ao eixo vertical.

A partir do parâmetro de concordância C, é estabelecido um novo segmento de reta AB’ cujo ângulo  $\theta'$  é definido a partir da Equação 4.1.

$$1,05C = \tan \theta' \quad \text{Equação 4.1}$$

Se a carga máxima  $P_{m\acute{a}x}$  que o corpo-de-prova pôde sustentar estiver posicionada na curva “F vs D” entre os segmentos AB e AB’, então usa-se a mesma para o cálculo do resultado condicional  $K_Q$ . Caso  $P_{m\acute{a}x}$  estiver além do segmento de reta AB’, então utiliza-se a carga  $P_Q$  localizada na intersecção de AB’ com a curva “F vs D” para o cálculo de  $K_Q$ . Adicionalmente, neste caso último considere que se  $P_{m\acute{a}x}/P_Q > 1,1$  o teste é invalidado.

O parâmetro condicional  $K_Q$  é calculado a partir da equação 4.2.

$$K_Q = \left( \frac{P_Q}{BW^{1/2}} \right) f(x) \quad \text{Equação 4.2}$$

$$f(x) = 6x^{1/2} \frac{[1,99 - x(1 - x)(2,15 - 3,93x + 2,7x^2)]}{(1 + 2x)(1 - x)^{3/2}}$$

Onde  $P_Q$  é a carga de ruptura do corpo-de-prova [kN]. Conforme Figura 4.1,  $B$  é a espessura do corpo-de-prova [cm],  $W$  é a altura do corpo-de-prova [cm],  $a$  é o comprimento da trinca e  $x = a/W$ .

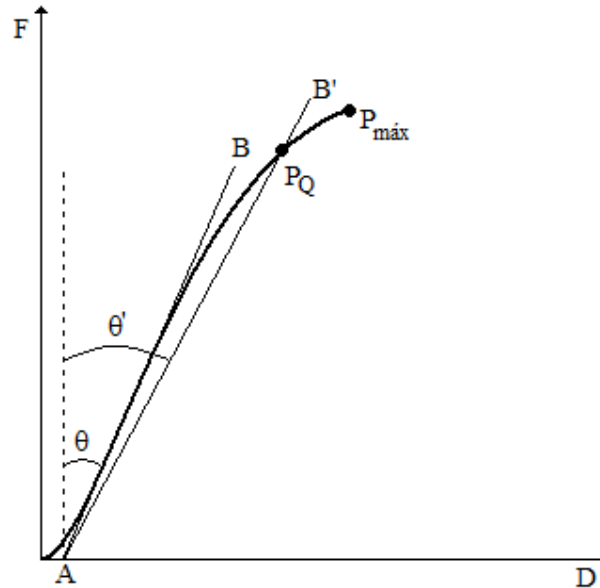


Figura 4.7 – Parâmetros de interpretação da curva “F vs D” do teste de flexão em três pontos.

A validade do resultado condicional  $K_Q$  é verificada em relação ao critério do tamanho do corpo-de-prova através da Equação 4.3.

$$2,5 \left( \frac{K_Q}{0,7\sigma} \right)^2 < B, a, W - a \quad \text{Equação 4.3}$$

Onde  $\sigma$  é, neste caso, a tensão de escoamento do material no teste de compressão. Se a quantidade calculada através da Equação 4.3 for menor do que a espessura  $B$ , do que o comprimento da trinca  $a$  e do que o segmento “ $W-a$ ” então  $K_Q$  é igual à  $K_{IC}$ . Caso contrário, o teste não é válido.

#### 4.5. Avaliação da tenacidade à fratura de materiais de fricção atualmente fornecidos à linha de montagem e ao mercado de reposição

A implementação do método de medida de tenacidade à fratura é um dos pilares deste trabalho. Da mesma forma, a geração de resultados de tenacidade à fratura de materiais de fricção faz parte do rol de objetivos desta tese. Assim, foram selecionados materiais de fricção para serem caracterizados, os quais foram fabricados apropriadamente para posteriormente serem testados. O fluxograma da Figura 4.8 resume o procedimento experimental adotado neste trabalho.

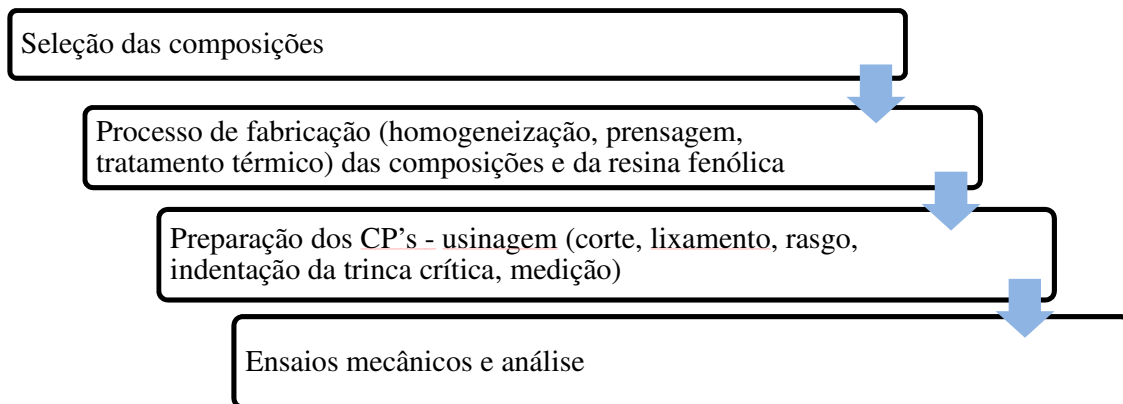


Figura 4.8 – Fluxograma do procedimento experimental adotado no trabalho.

A caracterização da tenacidade à fratura para materiais compósitos tais quais os materiais de fricção é um trabalho de caráter inovador, e representa a contribuição original deste trabalho. A pesquisa bibliográfica realizada para embasar esta tese não encontrou na literatura disponível nas principais bases de dados internacionais, trabalhos que pudessem ser utilizados para fins de comparação, ou mesmo resultados que pudessem ser confrontados de forma a verificar a coerência dos resultados gerados no plano de trabalho da tese.

Assim, definiu-se que, para os propósitos desta tese, que fortalecerá as boas práticas de engenharia objetivando aumentar a taxa de sucesso da aprovação de protótipos selecionados para validação e homologação em veículo, e também proporcionará o desenho inicial de um banco de dados de tenacidade à fratura de materiais de fricção, seria adequado que se iniciasse o trabalho de caracterização com materiais cujo desempenho em serviço já fosse conhecido.

Desta forma, optou-se por concentrar os experimentos de caracterização de tenacidade à fratura para avaliar materiais que foram desenvolvidos de forma empírica e validados em campo, e que já estão consolidados no mercado. Foram selecionados, no portfólio de lonas de

freio para veículos pesados da Fras-le S.A., cinco materiais que são utilizados em linhas de montagem das principais montadoras de caminhões, ônibus e trailers, brasileiras e americanas, bem como materiais que são vendidos no mercado de reposição para estes mesmos veículos. Na Tabela 4.1 são apresentados os cinco materiais avaliados neste trabalho, bem como os veículos aos quais os mesmos são aplicados. Devido à política de privacidade e sigilo de informações inerentes ao processo de P&D da Fras-le S.A., serão omitidos os nomes comerciais dos produtos avaliados neste trabalho. Os cinco materiais serão identificados com as letras de A a E.

*Tabela 4.1 – Apresentação dos cinco materiais de fricção selecionados para caracterização de tenacidade à fratura.*

		Material	Material	Material	Material	Material
		A	B	C	D	E
Mercados	Brasil	X	X	X	X	
	EUA	X	X			X
	América Latina	X	X	X		
Aplicação	Caminhões/ônibus leves	X	X	X		
	Caminhões Pesados	X	X			
	Caminhões Extra-Pesados	X	X		X	X
	Ônibus Urbanos	X	X	X		
	Ônibus Rodoviário	X	X		X	
	Trailers Rodoviários	X	X			

Na Tabela 4.2 são fornecidas informações de caráter composicional dos cinco materiais selecionados para caracterização. Estão apontadas as principais matérias-primas que presentes na composição de cada material, bem como os componentes que são reconhecidamente influentes na susceptibilidade da resistência do material compósito à presença de trincas no componente (tenacificadores).

Os componentes apontados como influentes quanto à tenacidade à fratura dos materiais de fricção foram selecionados a partir da composição de cada material, com base

nas informações atualmente disponíveis na literatura sobre tenacidade à fratura e materiais compósitos. Nesse sentido, ressaltam-se aqui os trabalhos de Lauke *et al.* 2012, Green *et al.* 1979, Fu *et al.* 2008, Rubinstein *et al.* 1998, Hussain *et al.* 1996 e Liu *et al.* 2011, que validaram o conceito geral de que a adição de componentes em dispersão diminui a fragilidade de matrizes frágeis, como é o caso da resina fenólica empregada na fabricação de materiais de fricção, refletindo em aumento da tenacidade à fratura do material.

As matérias-primas em pó, empregadas na fabricação dos cinco materiais de fricção e referidos na Tabela 4.2, tem granulometria menor do que 100 µm. De forma geral, fases dispersas com tamanho de partícula refinado atuam de forma a desviar ligeiramente o caminho de propagação da trinca no material compósito, mas não aumentam significativamente a tenacidade à fratura do mesmo.

A fibra de vidro utilizada na fabricação dos materiais de fricção da Tabela 4.2 é empregada na forma de feixes, com cerca 200 filamentos de 17 µm, tem comprimento da ordem de 3 mm, e tem função de reforço estrutural. De forma geral, matérias-primas com tamanhos de partícula maiores atuam de forma mais significativa do que as matérias-primas refinadas no aumento da tenacidade à fratura do material compósito, principalmente pela sua influência na mudança de direção de propagação da trinca. As matérias-primas referidas na Tabela 4.2 como “tenacificadores”, com exceção da fibra de vidro, são granuladas e tem tamanho de grão da ordem de 0,5 a 1,5 mm.

*Tabela 4.2 – Descrição geral das composições dos cinco materiais definidos para avaliação da tenacidade à fratura.*

	Material A	Material B	Material C	Material D	Material E
Resina fenólica novolaka					
Grafite natural					
Coque de petróleo					
MP's em Pó					
Sulfato de bário	85,0%	74,0%	77,0%	38,0%	52,5%
Alumino-silicato de potássio					
Carbonato de cálcio					
Óxidos					

Tabela 4.2 - Continuação

	Material A	Material B	Material C	Material D	Material E
Fibra de Vidro	3,5%	7,0%	14,0%	6,0%	6,5%
Alumino-silicato expandido	-	-	-	11,0%	-
Limalha de aço ASTM 1010	-	-	-	4,0%	-
Polpa de aramida	-	-	-	2,0%	-
Compostos pneumáticos granulados	11,5%	9,0%	-	-	11,0%
Compostos granulados a base de elastômero	-	-	-	-	25,0%
Borracha nitrílica granulada	-	-	9,0%	6,0%	-
Granulados de resina de óleo de caju polimerizada	-	10,0%	-	28,0%	5,0%
Poros	-	-	-	5,0%	-

#### 4.6. Processo de Fabricação dos Materiais de Fricção

O processo de fabricação de materiais de fricção obedece a um conceito já consolidado há bastante tempo. Isso decorre, também, do fato de que o ligante – sendo o principal agente que sofre transformação química durante o processo – mais largamente utilizado para fabricação de materiais de fricção é a resina fenólica.

O primeiro passo do processo de fabricação do material de fricção é a homogeneização da composição. A mesma, posteriormente, é compactada a quente, sob pressão. O processo de moldagem a quente sob pressão proporciona a formação das ligações cruzadas entre as cadeias do polímero da resina fenólica, consolidando a estrutura, a forma e as propriedades mecânicas da peça. Posteriormente, é realizada a etapa de tratamento térmico, na qual o

processo de formação de ligações cruzadas é finalizado. A etapa final do processo de fabricação compreende a usinagem das peças moldadas para o atendimento da geometria e das especificações dimensionais de desenho.

As etapas do processo de fabricação serão detalhadas a seguir.

#### **4.6.1. Homogeneização**

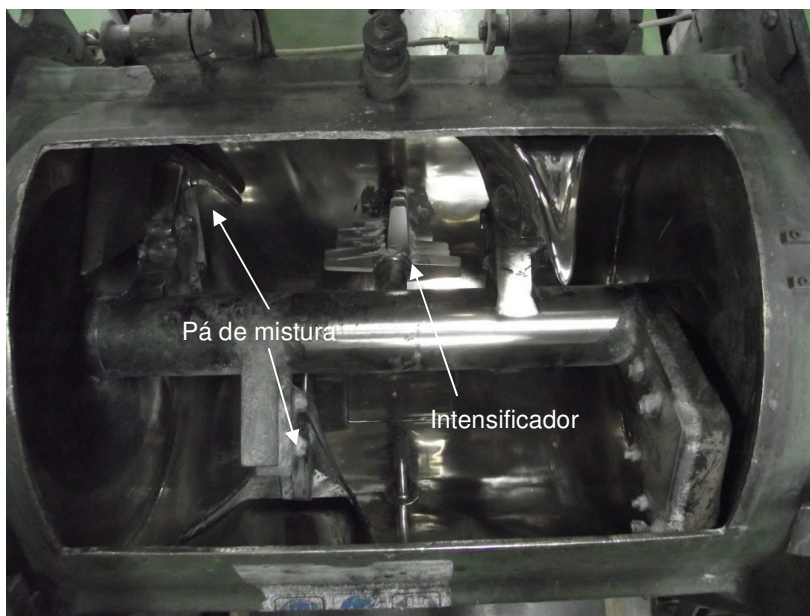
A primeira etapa do processo de fabricação consiste em homogeneizar as matérias-primas que fazem parte da composição do material de fricção. Essa etapa é crítica do ponto de vista da formação de uma estrutura robusta e homogênea de toda a peça, sem elos enfraquecidos que possam proporcionar falhas em serviço e consequente perda de função do sistema de freio.

A homogeneização de materiais de fricção é comumente realizada em moinho cilíndrico de pás, a exemplo do mostrado na Figura 4.9. A configuração de um moinho para materiais de fricção envolve dois tipos de componentes essenciais para a homogeneização. O primeiro deles são os arados, fixados no eixo concêntrico à câmara do moinho. Os mesmos são responsáveis pela movimentação interna das matérias-primas por todo o volume da câmara do misturador. O outro componente chave do moinho são os intensificadores do tipo “árvore de natal”. Esses são arranjos de pequenas navalhas que são fixados em pequenos eixos na parede da câmara do misturador direcionados para o centro da mesma. As navalhas giram com alta rotação a fim de maximizar a dispersão dos componentes formando um turbilhão no interior da câmara. Os intensificadores são imprescindíveis para a homogeneização adequada e alta produtividade do moinho.

O processo de homogeneização é realizado em etapas. As matérias-primas são adicionadas em uma sequência definida de forma a otimizar o tempo de processo e o grau de homogeneização da composição. De forma geral, os pós são adicionados nas etapas iniciais para homogeneização com atuação dos intensificadores. Matérias-primas que não devem sofrer ação dos intensificadores são adicionadas nas etapas finais, onde o mesmo é dispensado do processo.

O moinho utilizado no processo de homogeneização dos materiais testados neste trabalho possui 4 pás de homogeneização e um rotor “intensificador” do tipo árvore de natal (Figura 4.9).





*Figura 4.9 – Moinho de arados utilizado na etapa de homogeneização durante o processo de fabricação de materiais de fricção.*

Novamente por motivo de sigilo de informações, o processo de homogeneização não será aqui descrito detalhadamente em termos de seus parâmetros. No entanto, alguns parâmetros macro são mencionados a seguir:

- Velocidade de rotação do eixo das pás de homogeneização foi de 150 rpm;
- Velocidade de rotação do eixo do intensificador foi de 3600 rpm;
- O processo de homogeneização dos cinco materiais foi realizado em três etapas pela adição sequencial das MP's;
- O tempo de homogeneização dos materiais foi de 10 a 12 min, dependendo do material.

A Figura 4.10 mostra o aspecto típico de uma composição de material de fricção após processo de homogeneização. A imagem mostrada se refere, especificamente neste caso, ao material B.



*Figura 4.10 – Aspecto típico de uma composição de material de fricção após processo de homogeneização. Material B.*

#### **4.6.2. Compactação a Quente**

O processo de moldagem do material de fricção é o processo de maior importância dentre as etapas do processo de fabricação. Essa etapa é realizada em prensas, sob pressão típica de cerca de 20 MPa, e em temperaturas da ordem de 150°C.

Durante o processo de compactação a quente, a resina fenólica originalmente no estado sólido, em pó, se funde (a aproximadamente 80°C), passando para o estado gel e adquirindo a capacidade de fluir e permear as demais matérias-primas contidas na composição. Em seguida, a cerca de 120°C, inicia-se o processo de formação das ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas da resina fenólica, sendo que a temperatura de pico e estabilização do processo de compactação a quente para materiais de fricção de forma geral vai de 130°C a 180°C, dependendo da composição do material. Aproximadamente 60% do processo de formação de ligações cruzadas é realizado durante a compactação a quente, sendo que o restante é realizado na etapa seguinte, o tratamento térmico.

Durante o período em que a resina fenólica se encontra no estado gel, e apresenta capacidade de fluir e permear as demais matérias-primas da composição do material de fricção, a ação da pressão de compactação é o fator determinante para a formação de uma estrutura compacta, consolidada, com a matriz contínua de resina e com a menor fração de poros possível.

Na etapa de compactação a quente do material de fricção, trabalha-se com pressões típicas compreendidas no intervalo de 10 a 30 MPa. A Figura 4.11 mostra um molde compactação a quente para materiais de fricção.



*Figura 4.11 – Molde de compactação a quente tipicamente utilizado para moldagem de material de fricção.*

Em relação aos cinco materiais de fricção avaliados neste trabalho, os parâmetros principais do processo de compactação a quente são:

- Temperatura: de 140 a 160°C, dependendo da composição;
- Pressão de compactação: de 10 a 25 MPa, também de acordo com o processo de fabricação definido para cada composição;
- Tempo total do ciclo de prensagem: 14 min, para todos os materiais.

#### **4.6.3. Tratamento Térmico**

A etapa de tratamento térmico é realizada na rotina de fabricação dos materiais de fricção com a finalidade de completar o processo de formação das ligações cruzadas da resina fenólica. Na etapa anterior, de compactação a quente, procura-se alcançar uma fração de ligações cruzadas que garanta a manutenção da estrutura compactada da peça até que a mesma possa ser submetida ao tratamento térmico. Esse artifício de realizar a parte final do processo de formação de ligações cruzadas da resina na estufa de tratamento térmico visa incrementar a produtividade dos equipamentos de compactação a quente, visto que este passo do processo representa a maior parte do custo de fabricação.

Para a realização do tratamento térmico, as peças compactadas são posicionadas no interior da estufa de forma a facilitar o fluxo de ar quente, o qual essencialmente transfere calor para as peças, conforme mostrado na Figura 4.12.



*Figura 4.12 – Peças de material de fricção posicionadas no interior da estufa para realização do processo de tratamento térmico.*

De forma geral, o processo de tratamento térmico é realizado em uma temperatura próxima à de compactação a quente, durante o período de tempo adequadamente determinado para cada composição.

Para os cinco materiais de fricção utilizados para caracterização neste trabalho, o processo de tratamento térmico foi realizado em patamares de temperatura entre 140 e 180°C, com tempo total de tratamento entre 4 e 10h.

#### **4.7. Condições Gerais de Avaliação dos Materiais de Fricção**

As peças de material de fricção produzidas de acordo com o processo de fabricação descrito anteriormente foram utilizadas para extração dos corpos-de-prova necessários para os testes definidos para este trabalho.

Os materiais foram caracterizados através dos testes de flexão em três pontos para determinação da tenacidade á fratura dos mesmos, e do teste de compressão uniaxial.

Uma característica importante do regime de trabalho do sistema de freio, e por consequência do material de fricção montado no mesmo, é a temperatura de aplicação. Os sistemas de freio transformam a energia cinética do veículo basicamente em calor e desgaste, sendo que o intervalo típico de temperatura de serviço vai da temperatura ambiente até cerca

de 300°C, dependendo do veículo, do terreno e da carga transportada. São menos comuns, mas não raros os casos onde a temperatura de serviço do freio ultrapassa os 400°C.

Dessa forma, considerou-se imprescindível que os testes mecânicos definidos para este trabalho fossem realizados em diversas temperaturas, cobrindo a faixa de temperatura de trabalho típica de veículos pesados. A matriz de testes estabelecida pode ser verificada na Tabela 4.3.

*Tabela 4.3 – Matriz de testes e número de corpos-de-prova para caracterização dos cinco materiais de fricção em flexão em três pontos e compressão uniaxial.*

	22°C		100°C		175°C		250°C		325°C	
	Compressão	Flexão 3 ptos	Compressão	Flexão 3 ptos	Compressão	Flexão 3 ptos	Compressão	Flexão 3 ptos	Compressão	Flexão 3 ptos
Material A	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30
Material B	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30
Material C	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30
Material D	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30
Material E	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30

No total, foram utilizados 1000 corpos-de-prova para caracterização dos cinco materiais de fricção em função da temperatura, 250 para o teste de compressão uniaxial e 750 para o teste de flexão em três pontos.

Para realização dos testes em cada uma das temperaturas definidas (com exceção de 22°C, que é a temperatura de controle do laboratório onde foram realizados os testes), foi necessário o auxílio de uma estufa, mostrada na Figura 4.13, a qual foi posicionada próximo à máquina de ensaios universal anteriormente apresentada.



*Figura 4.13 – Estufa utilizada para estabilização da temperatura dos corpos-de-prova.*

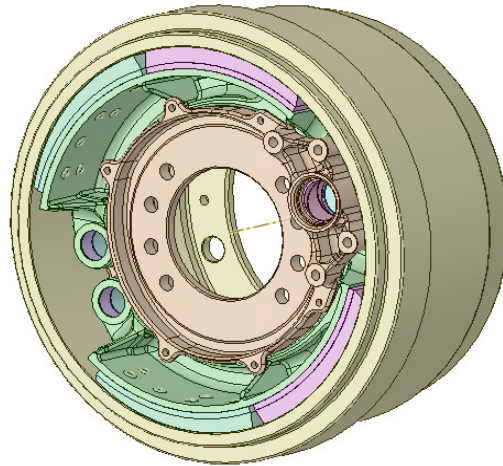
A rotina definida para aquecimento dos corpos-de-prova consistia em que os mesmos fossem submetidos à temperatura especificada em cada condição por 1 h, na estufa. Após o período de estabilização, cada um deles foi retirado da estufa e imediatamente submetido ao teste mecânico pertinente. O intervalo de tempo típico entre a retirada do corpo-de-prova da estufa e a finalização do teste de flexão a três pontos foi menor do que 30 s. Neste intervalo de tempo, verificou-se a ocorrência de uma queda de temperatura na superfície do corpo-de-prova da ordem de 10 a 20°C. Já para o teste de compressão uniaxial, este intervalo foi de cerca de 2 min, e a queda na temperatura na superfície do corpo-de-prova quando do término do teste mecânico foi da ordem de 10 a 30°C. Dessa forma, a perda de temperatura até a finalização do teste foi desconsiderada como um fator preponderante para o resultado, sendo tomada como um ruído do teste.

#### **4.8. Simulação de esforços em sistemas de freio por elementos finitos**

A simulação dos esforços no sistema de freio é utilizada com o objetivo de confrontar esforços mecânicos do processo de frenagem e as propriedades mecânicas dos materiais de fricção. Será utilizada neste trabalho para correlacionar os esforços de frenagem com e a tenacidade à fratura dos materiais de fricção, a fim de determinar os tamanhos máximos de trincas aceitáveis no componente de fricção.

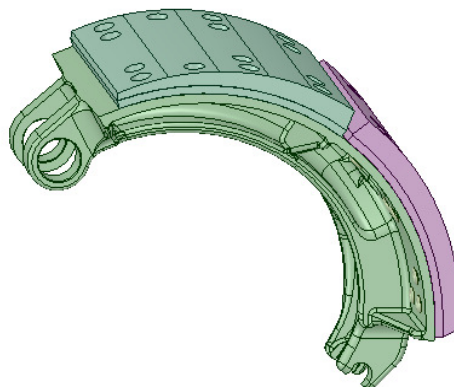


A simulação de esforços no componente de fricção foi feita utilizando-se um software comercial de análise por elementos finitos (Ansys Workbench 14.0) em um sistema de freio a tambor de 410 mm de diâmetro, utilizado na montagem de veículos, com carga média de 10 toneladas por eixo.



*Figura 4.14 – Sistema de freio de 410 mm de diâmetro, aplicação veículos pesados.*

De modo a simplificar a análise, os cálculos foram restritos a apenas uma sapata de freio, para se evitar efeitos de contato e fricção que dificultariam a convergência da análise. A Figura 4.15 mostra a parte do freio a ser analisada, consistindo de sapata de freio, lonas de freio e rebites.



*Figura 4.15 – Sapata de freio com componente de fricção rebitado.*

As propriedades mecânicas dos materiais que compõem o sistema, e que foram utilizadas na simulação estão sumarizadas na Tabela 4.4. Na simulação, foi considerada a

aplicação do material B ao sistema de freio. As propriedades do aço do rebite e do ferro fundido da sapata são fornecida pela biblioteca de materiais do programa. As propriedades do material B foram obtidas a partir do banco de dados interno da Fras-le S.A., caracterizados via ensaio de resistência à flexão (Módulo Elástico) e calorimetria de pulso de calor (Condutividade Térmica).

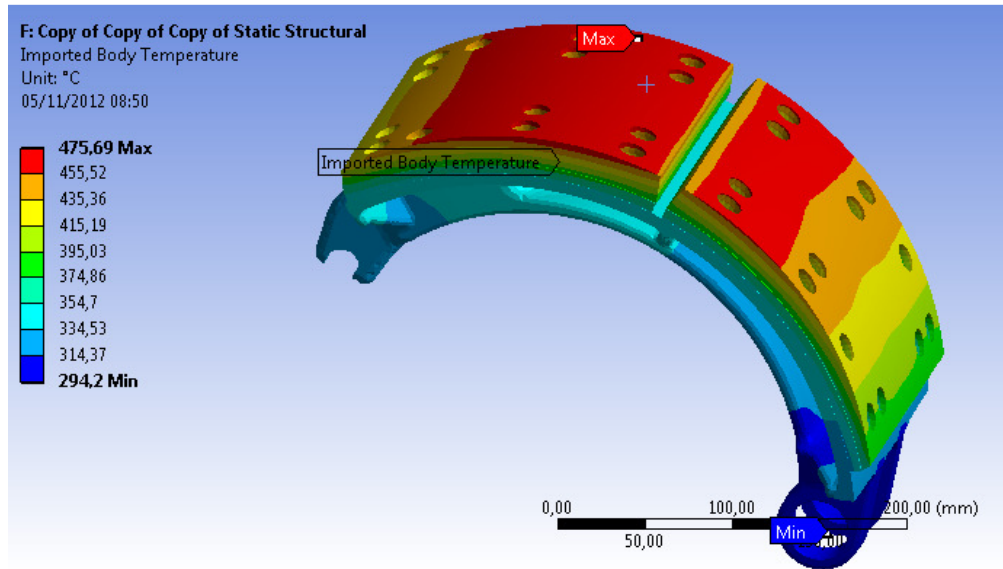
Na simulação foram considerados, além dos esforços resultantes do processo de frenagem (máxima pressão de frenagem – 10 bar no sistema pneumático do veículo), as tensões térmicas associadas e as tensões mecânicas induzidas durante o processo de rebitagem do material sobre a sapata de freio.

*Tabela 4.4 – Propriedades dos materiais considerados na simulação de esforços no freio Master 410 mm por elementos finitos.*

Material	Módulo Elástico (GPa)	Condutividade Térmica (W/m.K)
Aço 1020	200	30
Ferro Fundido Cinzento	92	45
Material de Atrito B	13	0,88

Para se calcular a magnitude das tensões térmicas e o campo de temperaturas no material de atrito, foi considerada uma simulação do campo de temperaturas (regime estacionário) no sistema simplificado. Foi tomada como condição de contorno a convecção com ar parado em todas as superfícies expostas ao ar, exceto na superfície de atrito, onde foi estimado um fluxo de calor de magnitude suficiente a atingir a temperatura de aplicação registrada em veículo. De forma a representar os casos mais críticos, foram utilizados valores de temperatura obtidos em medições de veículo numa aplicação de ônibus urbano na cidade de São Paulo, na qual foi observado um regime de temperatura extremamente crítico, devido à configuração do veículo, à rotina de frenagens e ao relevo da rota típica de trabalho. Nesta aplicação foram registradas temperaturas da ordem de 475°C na superfície das lonas de freio, sendo que o padrão de temperatura de serviço considerado crítico para ônibus urbanos situa-se na faixa de 250°C a 350°C. O campo de temperaturas obtido está representado na Figura 4.16.





*Figura 4.16 - Campo de temperaturas no conjunto sapata e componente de atrito rebitado.*

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Voltado à área de pesquisa e desenvolvimento de materiais compósitos de fricção para aplicação em veículos automotores de carga e de passageiros, este trabalho tem caráter de inovação, visto que a abordagem e os conceitos da mecânica da fratura propostos aqui não são de fato explorados como ferramentas de engenharia pela indústria atualmente.

Com vistas a este cenário, a geração de dados experimentais que permitam a avaliação da tenacidade à fratura e de outras características dos materiais de fricção relacionadas à mecânica da fratura são tão importantes quanto o desdobramento dos conceitos teóricos relativos aos mesmos, já que dados experimentais de caracterização se fazem indispensáveis quando se contempla a transformação de conceitos em ferramentas de engenharia.

Nas próximas seções serão apresentados e discutidos os resultados decorrentes dos experimentos propostos neste trabalho. Inicialmente, serão apresentados resultados referentes às análises fractográficas realizadas, bem como resultados referentes à caracterização da tenacidade à fratura para os cinco materiais avaliados. Serão abordados especificamente neste ponto, os padrões de comportamento da tenacidade à fratura em função da temperatura e sua correlação com os componentes presentes nos materiais compósitos. Do ponto de vista da transformação das informações geradas neste trabalho em ferramenta de engenharia, será abordada a interpretação dos resultados a partir da abordagem probabilística e dos conceitos do projeto robusto. Adicionalmente, será abordada a possibilidade do equacionamento matemático do comportamento de tenacidade à fratura dos materiais compósitos de fricção em função de suas propriedades e características fundamentais.

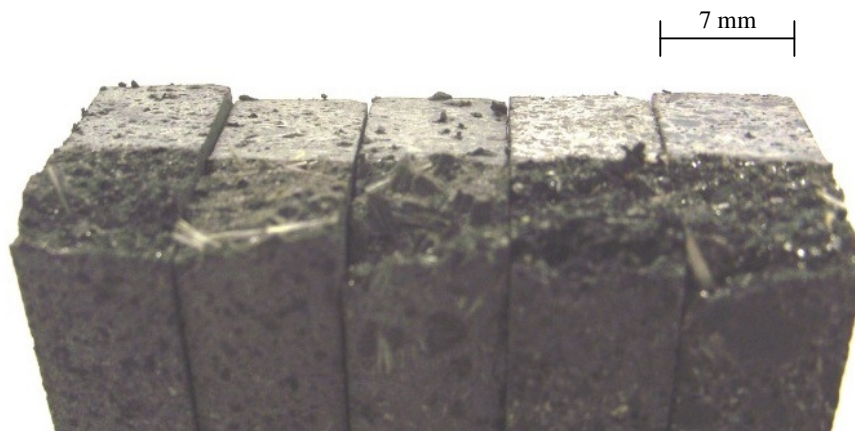
De caráter probatório, serão apresentadas correlações entre os esforços mecânicos de um sistema de freio em serviço e a tenacidade à fratura dos materiais de fricção que fazem parte do escopo de caracterização deste trabalho. Finalmente, com a intenção de operacionalizar o controle de qualidade na indústria, será proposta a correlação entre tenacidade à fratura e a resistência à compressão para materiais de fricção.

### **5.1. Fractografia**

A análise das superfícies de fratura dos materiais compósitos de fricção caracterizados no desenvolvimento deste trabalho permitiu a correlação com outros materiais compósitos de concepção semelhante, a fim de fortalecer a confiabilidade dos experimentos realizados, bem

como dos resultados obtidos, além de fortalecer conceitualmente a abordagem escolhida para o desenvolvimento deste trabalho como um todo.

Foram analisadas as superfícies de fratura de corpos-de-prova submetidos ao teste de flexão em três pontos. A seguir são apresentadas imagens das superfícies de fratura dos cinco materiais avaliados, em todas as temperaturas nas quais foi caracterizada a tenacidade à fratura dos mesmos. Na Figura 5.1, podem ser visualizadas as características das superfícies de fratura dos corpos-de-prova dos cinco materiais testados a temperatura ambiente (22°C). É possível diferenciar claramente o padrão uniforme da região seccionada com auxílio do disco e da lâmina de corte, e a região irregular da seção onde ocorreu a propagação da trinca induzida pelo carregamento durante o teste de flexão em três pontos.



*Figura 5.1 – Superfícies de fratura dos cinco materiais testados a temperatura ambiente (22°C). Da esquerda para direita, materiais A, B, C, D e E.*

Pode ser observado, pela Figura 5.1, a característica frágil dos materiais de fricção avaliados. A mesma é esperada em virtude de que a matriz polimérica utilizada na composição destes materiais é a resina fenólica, um material termorrígido. As irregularidades na seção de cada uma das superfícies fraturadas pelo carregamento de flexão são originadas a partir das geometrias particulares dos componentes, tais como fibras, pós e granulados. Estas fases dispersas presentes contribuem para aumentar a abertura das trincas, diminuindo a criticidade do seu raio, ao mesmo tempo em que modificam a orientação da propagação das mesmas. Pode-se estabelecer um paralelo com o padrão de propagação intergranular dos metais, uma vez que o caminho de propagação da trinca tende a contornar os particulados do material compósito.

Nas Figuras 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5, podem ser visualizadas as superfícies de fratura dos cinco materiais, correspondentes aos testes realizados a 100, 175, 250 e 325°C, respectivamente. A análise das superfícies de fratura dos corpos-de-prova, através das imagens, evidencia fortemente a manutenção dos padrões e das características de fratura observadas quando da análise das superfícies de fratura dos corpos-de-prova testados à temperatura ambiente (22°C). Isto é, irregularidades nas superfícies de fratura, originadas a partir das geometrias particulares dos componentes fibrosos e granulados, levando a alterações bruscas e constantes na direção de propagação da fratura. Esta manutenção corrobora com as expectativas iniciais, em se tratando de um material com matriz termofixa (resina fenólica), cuja característica em termos de fragilidade e deformabilidade não são intensamente afetadas pelo efeito de temperatura [Gardziela, 2000].



*Figura 5.2 – Superfícies de fratura dos cinco materiais testados a 100°C. Da esquerda para direita, materiais A, B, C, D e E.*



*Figura 5.3 – Superfícies de fratura dos cinco materiais testados a 175°C. Da esquerda para direita, materiais A, B, C, D e E.*



*Figura 5.4 – Superfícies de fratura dos cinco materiais testados a 250°C. Da esquerda para direita, materiais A, B, C, D e E.*



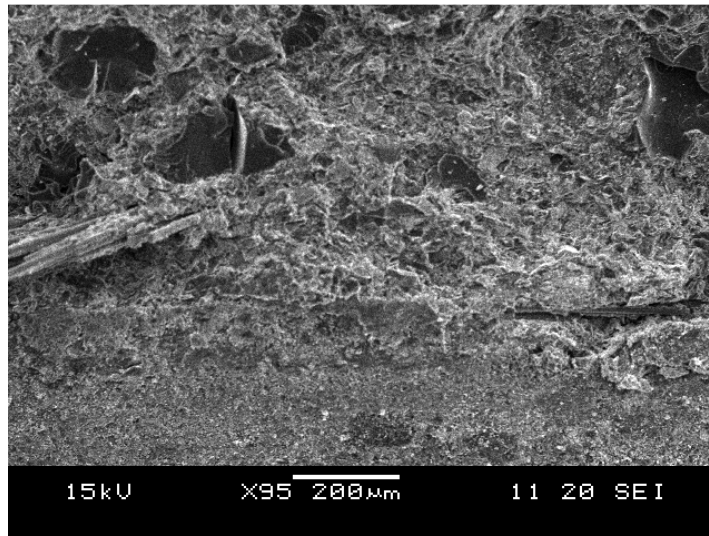
*Figura 5.5 – Superfícies de fratura dos cinco materiais testados a 325°C. Da esquerda para direita, materiais A, B, C, D e E.*

A fim de possibilitar a análise das características já mencionadas da superfície de fratura dos materiais, foram obtidas imagens da superfície de fratura de corpos-de-prova do material B testados em todas as temperaturas do escopo do trabalho, em escala microscópica através de microscopia eletrônica de varredura.

A superfície fraturada de um dos corpos-de-prova do material B, testado a temperatura ambiente (22°C) é mostrada na Figuras 5.6. A imagem foi coletada na região que compreende



a faixa terminal do rasgo realizado durante a preparação do corpo-de-prova e a faixa inicial da superfície fraturada durante o ensaio mecânico.



*Figure 5.6 – Imagem da superfície fraturada de um corpo-de-prova do material B, testado a temperatura ambiente (22°C). Microscopia Eletrônica de Varredura.*

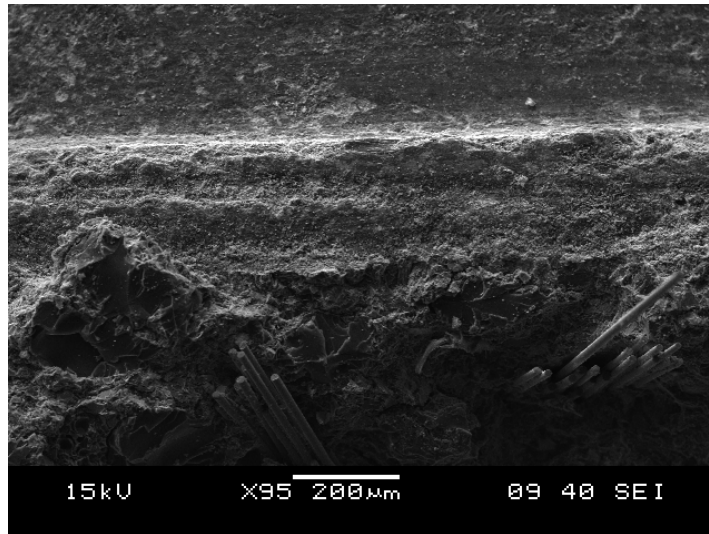
A micrografia obtida a partir da microscopia eletrônica de varredura mostra uma mudança clara no padrão da superfície da trinca, passando de uma topografia plana e regular na região inferior, correspondente ao rasgo, para topografia irregular na região superior, onde a propagação da trinca ocorreu durante o ensaio de flexão em três pontos.

Green *et al.* (1979) observou em seu trabalho que a adição de esferas de níquel em matriz vítrea ocasiona mudanças abruptas na direção de propagação de trincas, além de aumentar significativamente a resistência ao impacto.

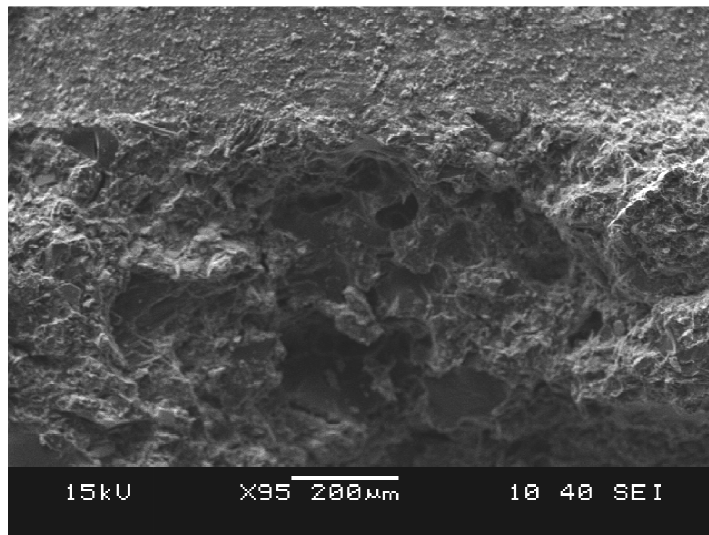
Hussain *et al.* (1996) observou em seu trabalho resultados similares em compósitos de matriz epoxy carregada com particulados nano e micronizados de  $\text{TiO}_2$ , reportando que o aumento da fração volumétrica de  $\text{TiO}_2$  resulta na modificação do padrão da superfície de fratura que torna-se mais rugosa e irregular, além de resultar no significativo incremento da tenacidade à fratura do compósito.

Similar modificação do padrão de rugosidade da superfície de fratura e aumento da tenacidade à fratura também foi explicitado por Liu *et al.* (2011) em seu trabalho com compósitos de matriz epoxy carregada com nanoparticulados de sílica e elastômero, e por Qiao (2003) em seu trabalho com compósitos de matriz de polipropileno com dispersão de particulados de carbonato de cálcio.

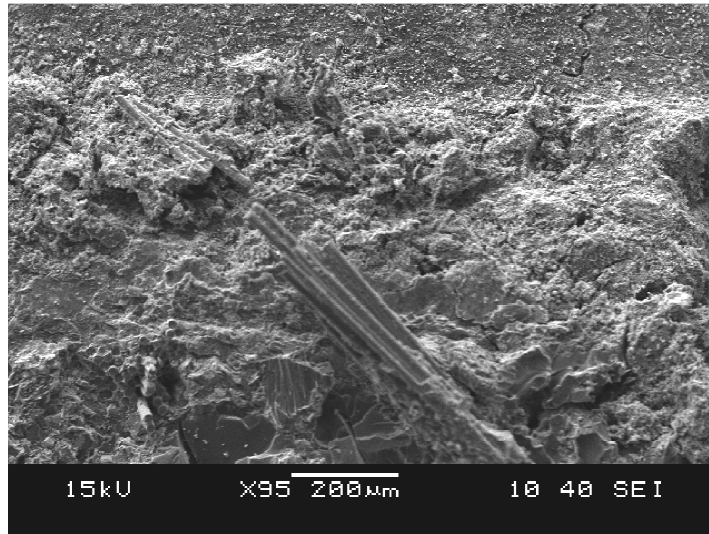
As Figuras 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10 mostram o mesmo padrão de análise de MEV, na fronteira entre o rasgo usinado no corpo-de-prova e a região de propagação da trinca, para corpos-de-prova do material B cujos testes de flexão em três pontos foram conduzidos, respectivamente, a 100°C, 175°C, 250°C e 325°C.



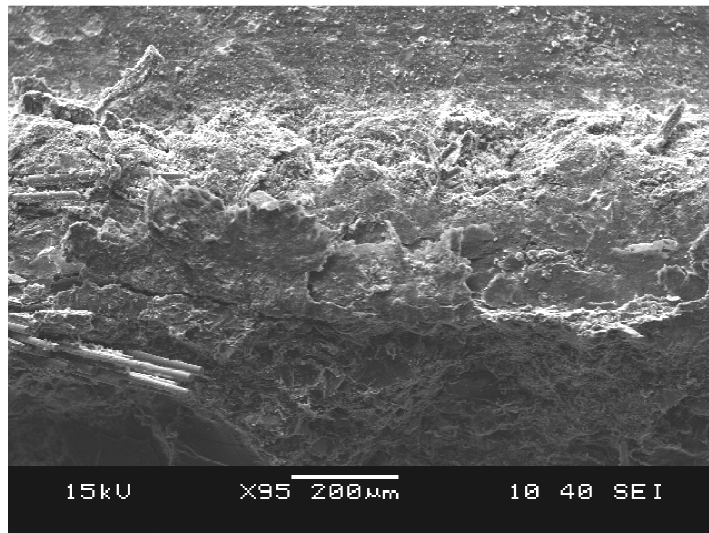
*Figure 5.7 – Imagem da superfície fraturada de um corpo-de-prova do material B, testado a 100°C. Microscopia Eletrônica de Varredura.*



*Figure 5.8 – Imagem da superfície fraturada de um corpo-de-prova do material B, testado a 175°C. Microscopia Eletrônica de Varredura.*



*Figure 5.9 – Imagem da superfície fraturada de um corpo-de-prova do material B, testado a 250°C. Microscopia Eletrônica de Varredura.*



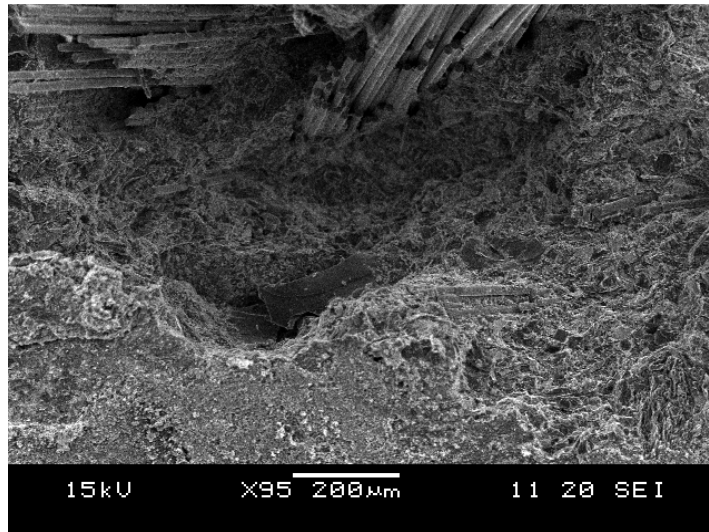
*Figure 5.10 – Imagem da superfície fraturada de um corpo-de-prova do material B, testado a 325°C. Microscopia Eletrônica de Varredura.*

Através das análises de MEV, verifica-se que a mudança na característica da superfície de fratura, partindo de um padrão regular no rasgo usinado, passando para um padrão irregular na região onde a fratura se propagou em virtude do carregamento durante o teste de flexão em três pontos é similar em todos os corpos-de-prova analisados, indicando que não existe uma modificação de comportamento em função da temperatura, no intervalo que



corresponde ao escopo deste trabalho. Isto corrobora com o que já havia sido observado em escala macroscópica, na análise das superfícies de fratura mostradas nas Figuras 5.1 a 5.5.

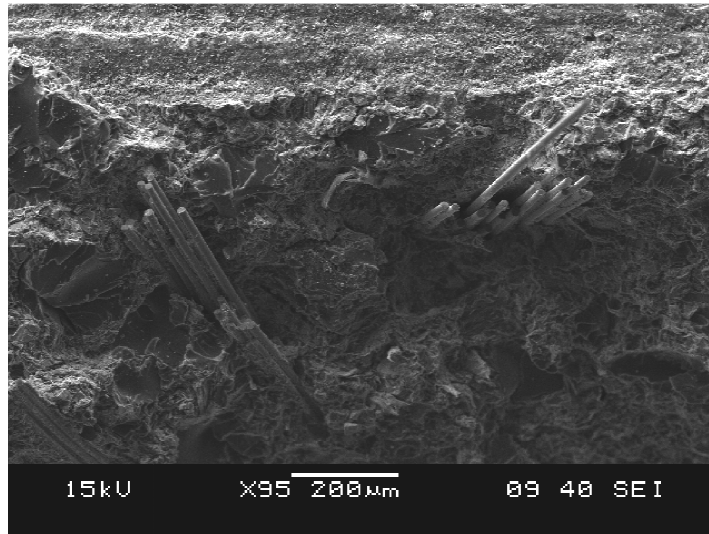
A Figura 5.11, mostrada a seguir, também relativa à superfície de fratura do material B a temperatura ambiente, fortalece as observações já apontadas, visto que mostra uma região da superfície de fratura onde ocorre mudança drástica de orientação da trinca – neste caso específico, em decorrência da presença de fibras no volume do material – e por consequência, o aumento do caminho de propagação.



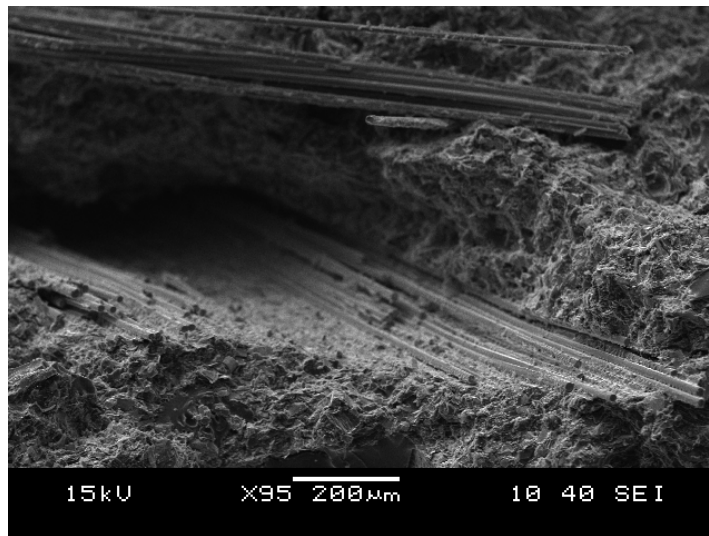
*Figure 5.11 – Imagem da superfície fraturada de um corpo-de-prova do material B testado a temperatura ambiente (22°C), mostrando fibras e cavidade. Microscopia Eletrônica de Varredura.*

Esse aspecto é típico para materiais de fricção que contém componentes tenacificadores em sua composição, levando à fratura de aspecto intergranular, ou interfases neste caso. Fibras podem ser observadas saindo da superfície de fratura, bem como uma cavidade, que representa mudança considerável no caminho da fratura.

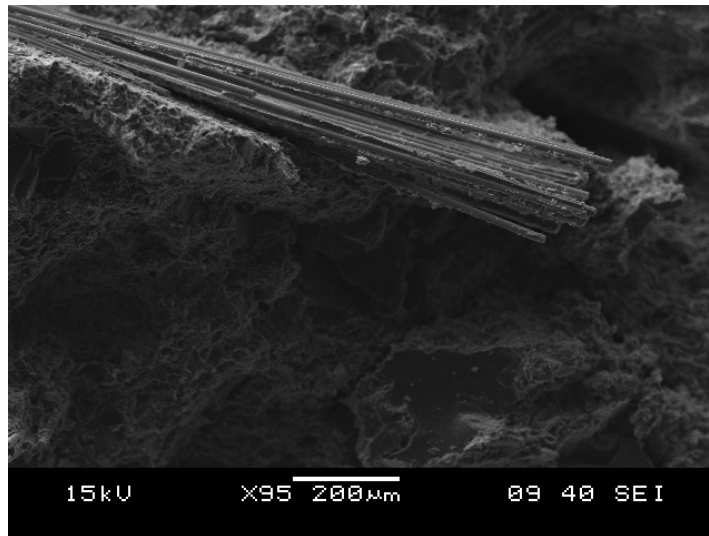
As mesmas características podem ser observadas nas superfícies de fratura de corpos-de-prova testados nas temperaturas de 100°C (Figura 5.12), 175°C (Figura 5.13), 250°C (Figura 5.14) e 325°C (Figura 5.15).



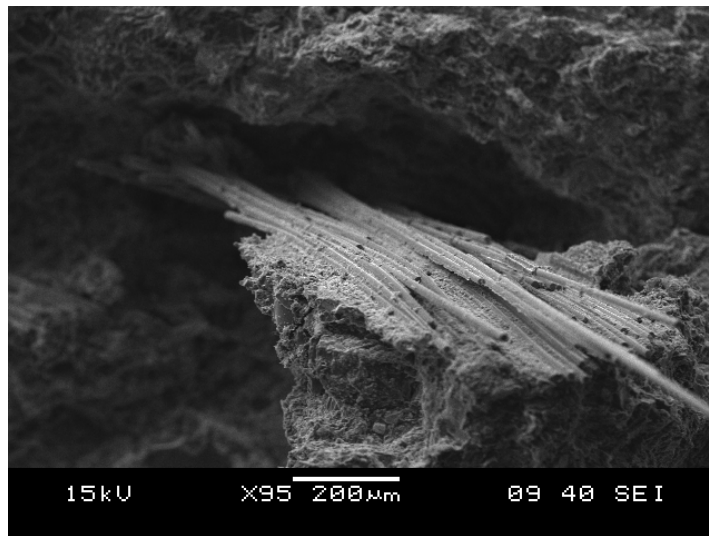
*Figure 5.12 – Imagem da superfície fraturada de um corpo-de-prova do material B testado a 100°C, mostrando fibras e cavidade. Microscopia Eletrônica de Varredura.*



*Figure 5.13 – Imagem da superfície fraturada de um corpo-de-prova do material B testado a 175°C, mostrando fibras e cavidade. Intensidade de Elétrons Secundários.*



*Figure 5.14 – Imagem da superfície fraturada de um corpo-de-prova do material B testado a 250°C, mostrando fibras e cavidade. Microscopia Eletrônica de Varredura.*



*Figure 5.15 – Imagem da superfície fraturada de um corpo-de-prova do material B testado a 325°C, mostrando fibras e cavidade. Microscopia Eletrônica de Varredura.*

Novamente, agora em escala microscópica, é possível confirmar a expectativa pela manutenção nas características da superfície de fratura dos corpos-de-prova testados em todas as temperaturas.

O exame das superfícies de fratura dos outros quatro materiais analisados apresentam características similares ao que foi observado em relação ao material B, conforme esperado. Dessa forma, não serão apresentadas imagens específicas de cada um dos materiais.

Fundamentalmente os resultados relacionados à análise das superfícies de fratura dos materiais compósitos de fricção analisados corroboram com os dados disponíveis na literatura referentes a materiais de natureza, composição e arranjo estrutural semelhante. Dessa forma, também corroboram com as expectativas iniciais dos pesquisadores envolvidos neste trabalho e reforçam a confiabilidade na linha de abordagem adotada no desenvolvimento do mesmo.

## **5.2. Tenacidade à Fratura**

A caracterização da tenacidade à fratura dos materiais compósitos de fricção é um dos principais pilares deste trabalho. Associada à implementação dos conceitos da mecânica da fratura como ferramenta de projeto, constitui a essência da contribuição desta tese para a expansão do conhecimento na área de ciência dos materiais e para inovação industrial do ponto de vista do desenvolvimento de novos componentes de fricção para atender as demandas tecnológicas e mercadológicas do setor automotivo.

As condições nas quais foram realizados os experimentos de caracterização da tenacidade à fratura foram resumidas previamente na Tabela 4.3. De forma objetiva, os cinco materiais elencados para serem caracterizados neste trabalho foram submetidos ao teste de flexão em três pontos para avaliação da sua tenacidade à fratura, através do método exposto no capítulo anterior, o qual foi desenvolvido em acordo com as orientações da norma pertinente, também já apresentada. Os testes foram realizados em função da temperatura, com objetivo de englobar a faixa de temperatura de serviço pertinente para a classe de veículos à qual os materiais são destinados, ou seja, desde a temperatura ambiente típica (22°C) até 325°C.

### **5.2.1. Tenacidade à Fratura dos Materiais de Fricção em Função da Temperatura**

As curvas "carga vs alongamento" típicas resultantes do teste de flexão em três pontos para medição de  $K_{IC}$  dos materiais de fricção em função da temperatura serão apresentadas a seguir, pelas Figuras 5.16 a 5.20. O padrão das mesmas mostra praticamente ausência de

deformação plástica, e corrobora com a característica frágil da fratura dos corpos-de-prova obtida durante o teste, e já discutida na sessão 5.1.

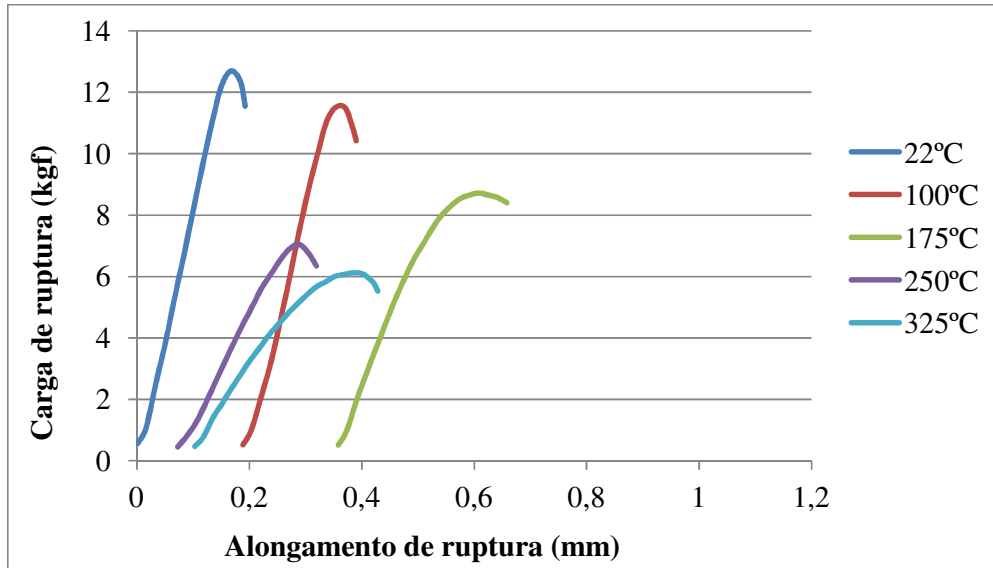


Figura 5.16 – Curvas "carga vs alongamento" do teste de flexão em três pontos para determinação do  $K_{IC}$  do material A.

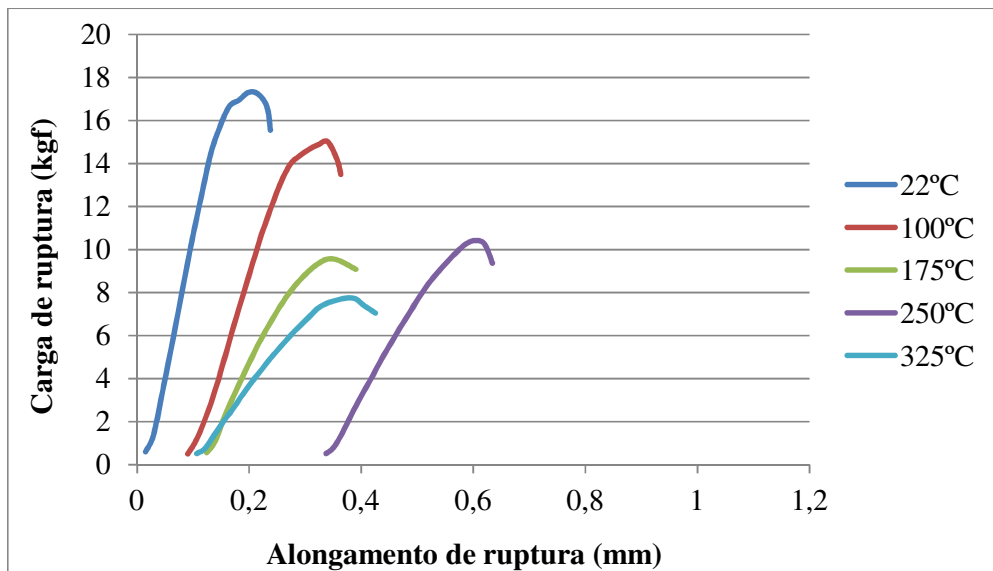


Figura 5.17 – Curvas "carga vs alongamento" do teste de flexão em três pontos para determinação do  $K_{IC}$  do material B.

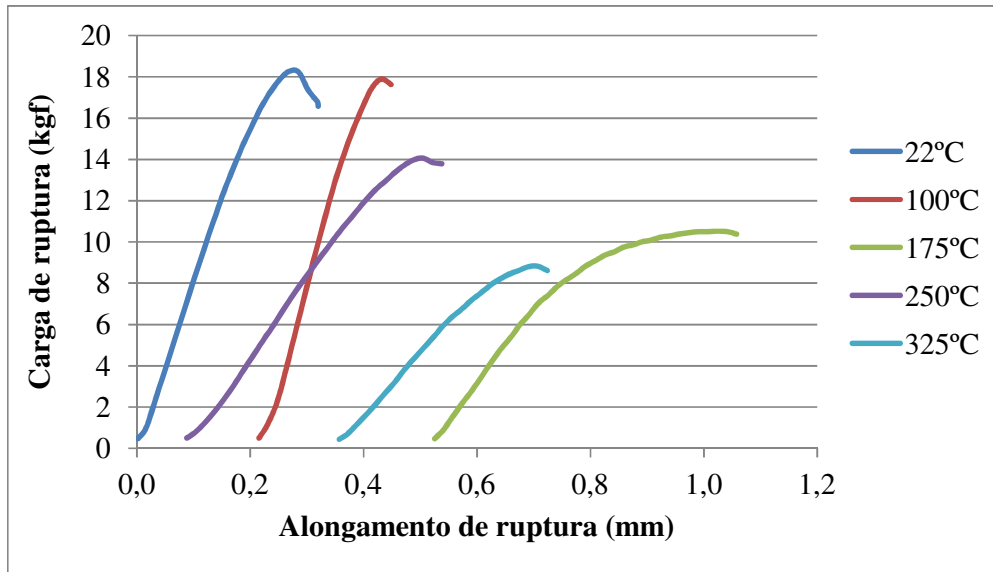


Figura 5.18 – Curvas "carga vs alongamento" do teste de flexão em três pontos para determinação do  $K_{IC}$  do material C.

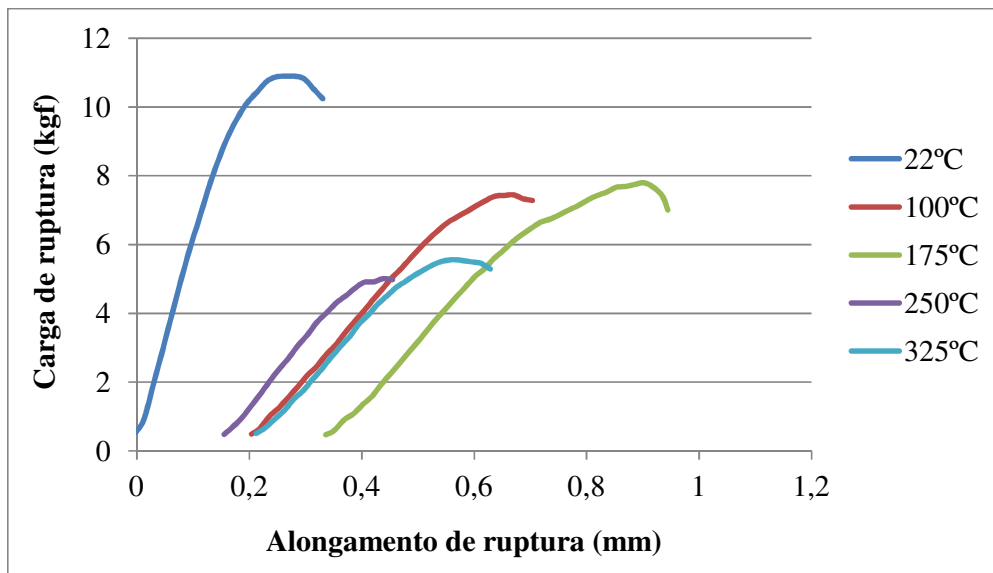


Figura 5.19 – Curvas "carga vs alongamento" do teste de flexão em três pontos para determinação do  $K_{IC}$  do material D.

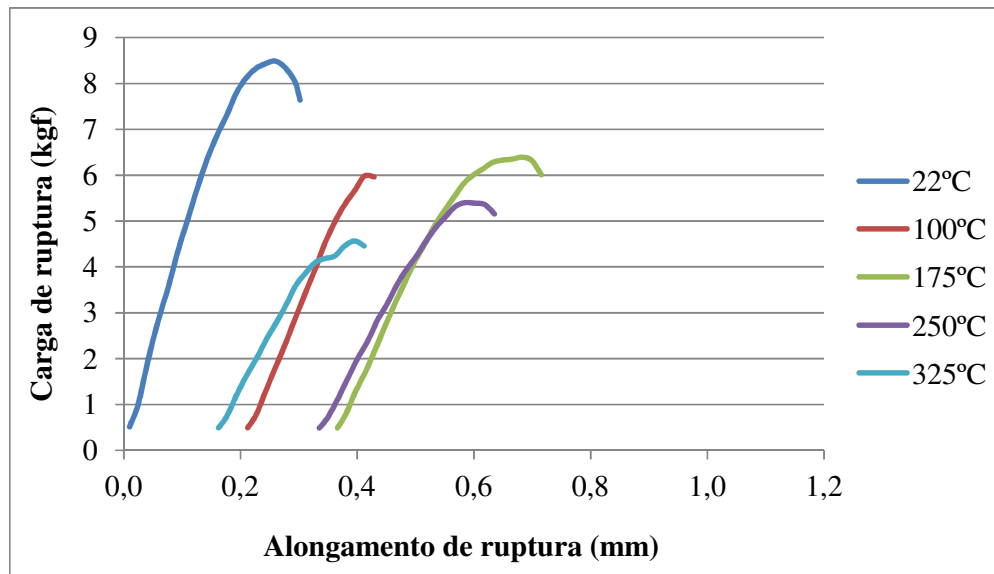


Figura 5.20 – Curvas "carga vs alongamento" do teste de flexão em três pontos para determinação do  $K_{IC}$  do material E.

A fragilidade dos materiais, evidenciada pela ausência de deformação plástica no processo de deformação sob carga seguida de ruptura, é uma característica que reforça a susceptibilidade dos mesmos à trincas e concentradores de tensão presentes na sua estrutura. Enquanto a alta capacidade de deformação plástica antes da fratura é uma característica do material que permite ao mesmo o "arredondamento" da ponta de uma trinca presente na estrutura do componente e a diminuição da sua criticidade, ou seja, tenacificação, a ausência de deformabilidade evidencia a fragilidade do material e a importância de sua caracterização no que se refere à tenacidade à fratura.

Os resultados da caracterização dos cinco materiais avaliados, em todas as temperaturas estipuladas para o escopo do trabalho estão resumidos na Tabela 5.1, sendo que os mesmos serão reacesados e discutidos ao longo desta seção 5.2. Para efeito de análise, os resultados de resistência à compressão uniaxial também foram adicionados à Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Resultados de  $K_{IC}$  e de resistência à compressão dos cinco materiais avaliados em função da temperatura de teste.

		Temperatura				
		22°C	100°C	175°C	250°C	325°C
Material A	$K_{IC}$ - Média (MPa.m <sup>1/2</sup> )	1,30	1,43	0,92	0,86	0,61
	$K_{IC}$ - Desvio Padrão (MPa.m <sup>1/2</sup> )	0,13	0,10	0,08	0,10	0,07
	Nº de CP's (Teste de $K_{IC}$ )	29	29	29	27	29
	$\sigma$ Compressão* - Média (MPa)	62,0	59,5	48,1	53,4	47,7
	$\sigma$ Compressão - Desv Pad (MPa)	3,8	1,7	3,3	5,5	4,5
Material B	$K_{IC}$ - Média (MPa.m <sup>1/2</sup> )	2,12	1,52	0,97	0,88	0,78
	$K_{IC}$ - Desvio Padrão (MPa.m <sup>1/2</sup> )	0,39	0,19	0,23	0,16	0,13
	Nº de CP's (Teste de $K_{IC}$ )	25	29	29	26	27
	$\sigma$ Compressão* - Média (MPa)	78,2	75,7	69,3	69,3	55,3
	$\sigma$ Compressão - Desv Pad (MPa)	9,6	2,9	5,4	3,9	5,3
Material C	$K_{IC}$ - Média (MPa.m <sup>1/2</sup> )	1,60	1,77	1,13	1,24	1,05
	$K_{IC}$ - Desvio Padrão (MPa.m <sup>1/2</sup> )	0,28	0,27	0,18	0,24	0,15
	Nº de CP's (Teste de $K_{IC}$ )	26	30	30	30	29
	$\sigma$ Compressão* - Média (MPa)	73,0	78,5	58,3	74,7	76,1
	$\sigma$ Compressão - Desv Pad (MPa)	9,8	8,0	6,6	4,4	6,4
Material D	$K_{IC}$ - Média (MPa.m <sup>1/2</sup> )	1,56	0,94	0,76	0,79	0,59
	$K_{IC}$ - Desvio Padrão (MPa.m <sup>1/2</sup> )	0,18	0,14	0,13	0,13	0,11
	Nº de CP's (Teste de $K_{IC}$ )	27	31	30	32	31
	$\sigma$ Compressão* - Média (MPa)	65,3	65,3	66,5	68,1	48,3
	$\sigma$ Compressão - Desv Pad (MPa)	6,6	2,9	4,3	5,8	3,9



Tabela 5.1 - Continuação

Material E	$K_{IC}$ - Média (MPa.m <sup>1/2</sup> )	0,97	0,74	0,54	0,51	0,35
	$K_{IC}$ - Desvio Padrão (MPa.m <sup>1/2</sup> )	0,13	0,07	0,08	0,07	0,06
	Nº de CP's (Teste de $K_{IC}$ )	23	28	27	30	26
	$\sigma$ Compressão* - Média (MPa)	28,5	25,0	22,0	23,2	18,0
	$\sigma$ Compressão - Desv Pad (MPa)	2,3	0,7	1,0	0,6	0,9
* A população de resultados de resistência à compressão de cada material em cada uma das condições de temperatura é composta por 10 valores.						

Inicialmente serão abordados os resultados relativos à tenacidade à fratura em temperatura ambiente, visto que há subsídios para discussão e comparação com dados da literatura. Na sequência, serão discutidos especificamente resultados relativos ao comportamento da tenacidade à fratura em função da temperatura de serviço dos materiais de fricção.

Como pode ser observado na Tabela 5.1, os resultados de tenacidade à fratura dos cinco materiais na condição de temperatura ambiente (22°C) variaram entre o mínimo de 0,97 MPa.m<sup>1/2</sup> para o Material E e máximo de 2,12 MPa.m<sup>1/2</sup> para o Material B. Os mesmos corroboram com o esperado para materiais compósitos de matriz fenólica reforçados com particulados e fibras picadas, visto que o  $K_{IC}$  esperado para a resina fenólica é da ordem de 1 MPa.m<sup>1/2</sup>, conforme já demonstrado por Ashby (2005). Valores de tenacidade à fratura para resina fenólica da ordem de 1 MPa.m<sup>1/2</sup> também foram reportados por Tyberg (1999), em seu trabalho.

A Figura 5.21 apresenta uma correlação entre Tenacidade a Fratura ( $K_{IC}$  – MPa.m<sup>1/2</sup>) no eixo das ordenadas e o limite elástico ( $\sigma$  - MPa) no eixo das abscissas, para resina fenólica e também para os cinco materiais compósitos de fricção avaliados. É possível traçar um paralelo com as informações apresentadas por Ashby (2005), no gráfico da página 72 de sua obra.

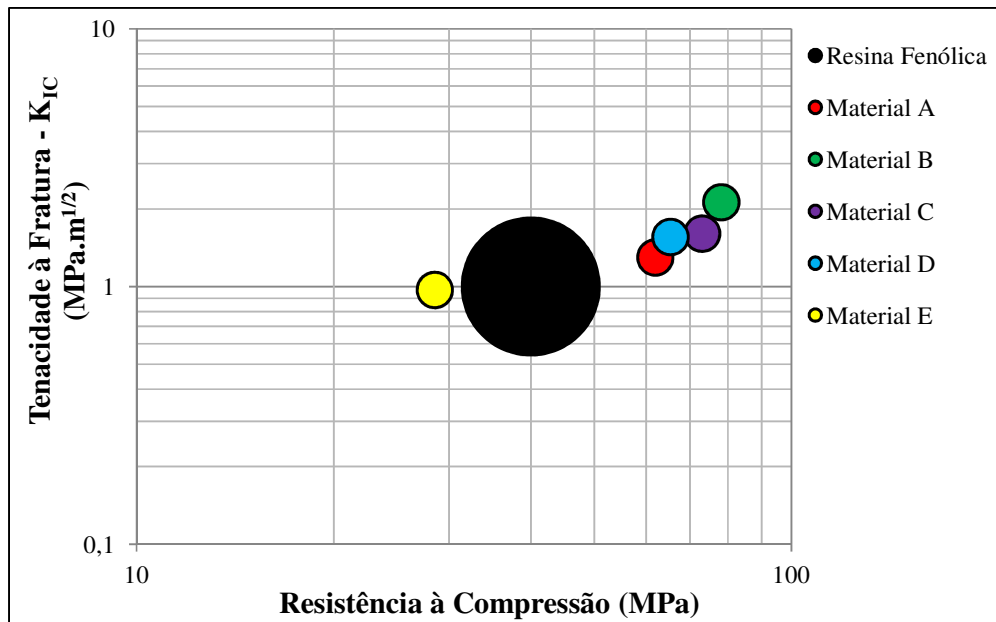


Figura 5.21 – Resultados de tenacidade à fratura versus resistência à compressão a temperatura ambiente (22°C), dos cinco materiais avaliados, comparados com valores de referência [Ashby, 2005] para resina fenólica.

Os resultados de tenacidade à fratura a temperatura ambiente, obtidos para os cinco materiais avaliados, mostram que ao adicionar componentes à resina fenólica para a construção do material compósito, obtém-se um incremento no  $K_{IC}$ . De certa forma, as características das superfícies de fratura dos materiais compósitos observadas na seção 5.1 a partir dos corpos-de-prova do teste de flexão em três pontos (irregularidades, mudanças constantes na direção de propagação da fratura, etc.) se traduzem mecanicamente em aumento do valor de tenacidade à fratura, tomando como base a resina fenólica. Observa-se, também, que o incremento da tenacidade à fratura é acompanhado por um ganho significativo em termos de resistência à compressão quando se comparam os materiais compósitos à resina fenólica pura.

A única exceção a essa tendência é o material E, visto que o mesmo sustenta um resultado de  $K_{IC}$  próximo do apresentado pela resina fenólica, sendo 0,97 MPa.m<sup>1/2</sup> conforme a Tabela 5.1. Ao mesmo tempo, ao se analisar este resultado de  $K_{IC}$  do Material E em associação à sua resistência mecânica, verifica-se que há a manutenção da sua tenacidade à fratura, apesar da significativa diminuição da resistência à compressão do mesmo em relação à resina fenólica (28,54 MPa para o Material E, e cerca de 40 MPa para a resina fenólica). Conforme citado na Tabela 4.2, o Material E possui uma fração de componentes

elastoméricos significativamente maior do que os demais materiais (36% em volume para o Material E, enquanto para todos os demais materiais está abaixo de 11%). Trabalhos previamente realizados com materiais de fricção [Casaril, 2004; Yuhás, 2006; Casaril, 2007; Casaril, 2009] mostraram que a adição de componentes elastoméricos diminui significativamente o módulo de elasticidade de um material compósito de matriz fenólica, obedecendo uma função exponencial, ao passo que sua capacidade de deformação não aumenta significativamente em virtude de continuar sendo governada pela capacidade de deformação da resina fenólica, que constitui a matriz.

Dessa forma, ressalta-se esta particularidade do Material E, que diz respeito ao incremento do seu quociente entre  $K_{IC}$  e resistência à compressão, que é maior do que o dos demais materiais testados. Aparentemente, este incremento pode estar associado à um aumento significativo da flexibilidade do material compósito em virtude da grande fração de componentes elastoméricos presentes na composição ou pode, em contrapartida, simplesmente estar associado a um limite inferior no valor de tenacidade à fratura, conferido pela própria resina fenólica, e governado pelo próprio grau de fragilidade da resina em si, não podendo ser inferior à mesma.

Na sequência serão analisados resultados de tenacidade à fratura em função da temperatura, obtidos a partir dos experimentos realizados. Esta investigação é vanguardista a partir do momento em que não encontra paralelo na literatura especificamente para materiais compósitos. Essencialmente não foram encontrados resultados semelhantes que pudessem ser utilizados para o balizamento dos resultados gerados durante o desenvolvimento deste trabalho. Porém, pela análise dos valores de  $K_{IC}$  em função da temperatura, já apresentados na Tabela 5.1, pode-se afirmar que o padrão de comportamento da tenacidade à fratura dos materiais compósitos de fricção se mostra em acordo com a expectativa inicial do trabalho, apresentando decaimento com aumento da temperatura, acompanhando a tendência da resistência à compressão destes mesmos materiais.

As Figuras 5.22, 5.23, 5.24, 5.25 e 5.26 explicitam os resultados de tenacidade à fratura e de resistência à compressão para os materiais A, B, C, D e E respectivamente, em função da temperatura.

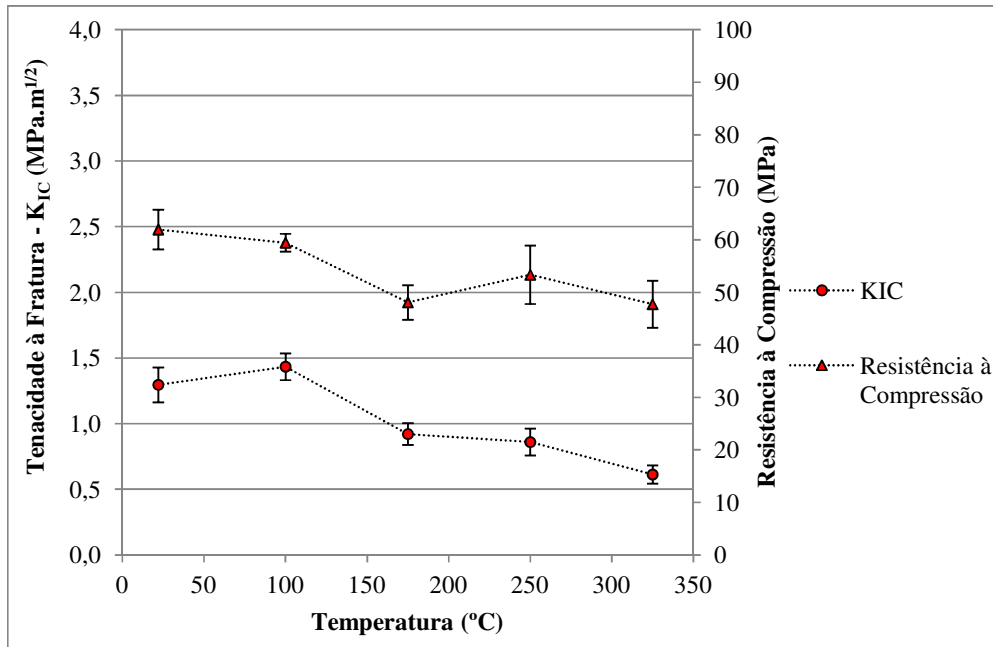


Figura 5.22 – Resultados de tenacidade à fratura e resistência à compressão do Material A, em função da temperatura.

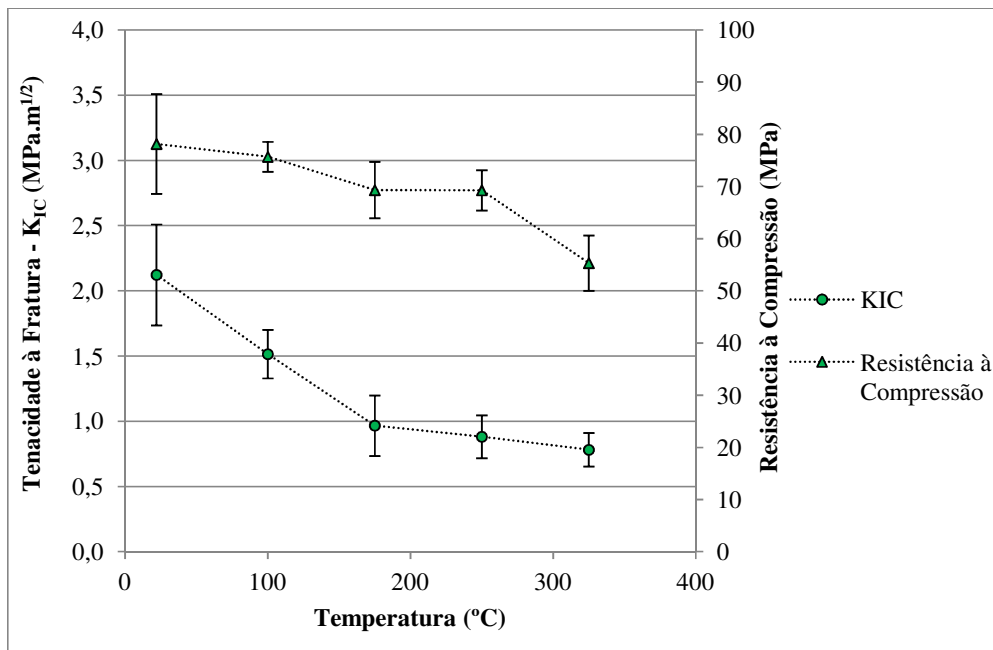


Figura 5.23 – Resultados de tenacidade à fratura e resistência à compressão do Material B, em função da temperatura.

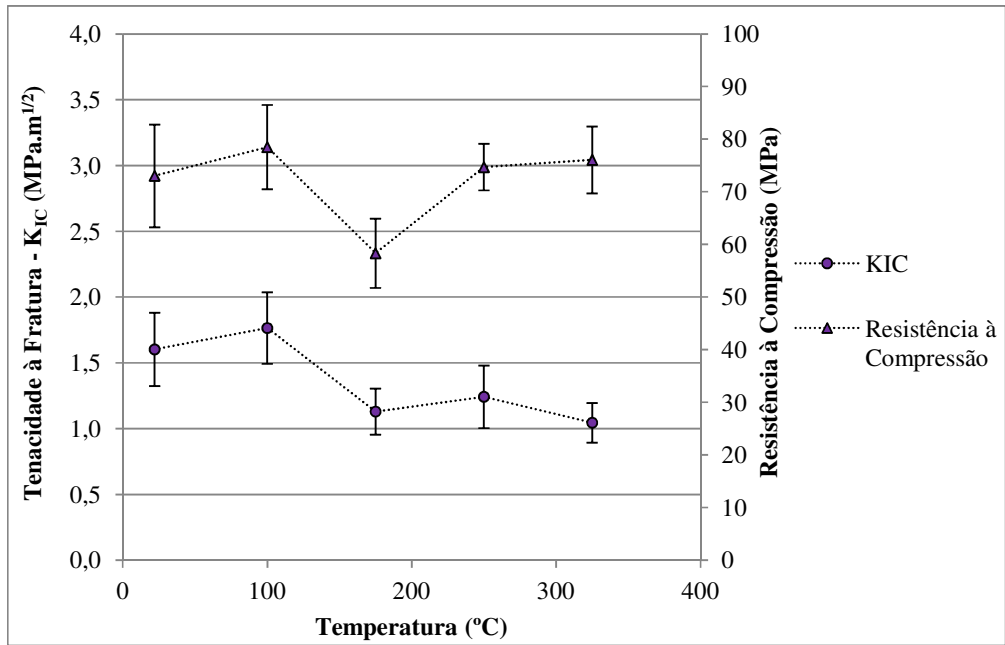


Figura 5.24 – Resultados de tenacidade à fratura e resistência à compressão do Material C, em função da temperatura.

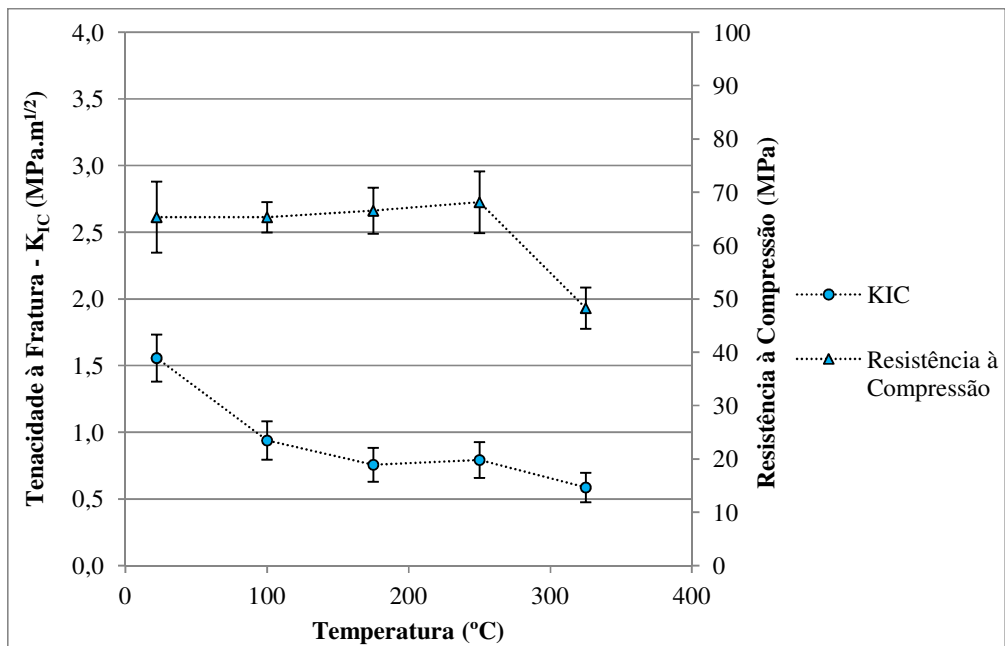


Figura 5.25 – Resultados de tenacidade à fratura e resistência à compressão do Material D, em função da temperatura.

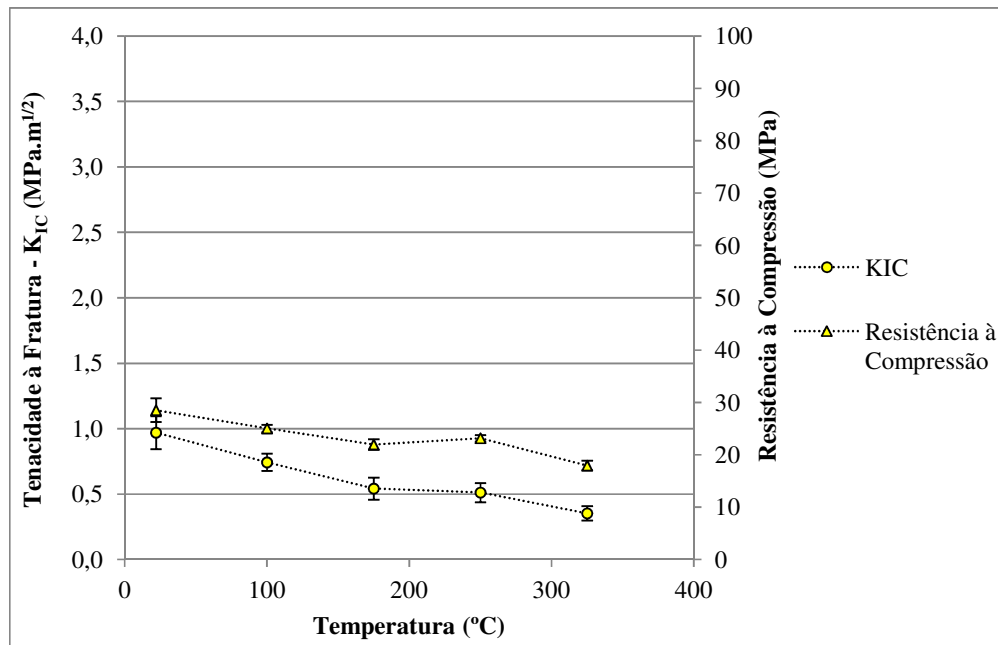


Figura 5.26 – Resultados de tenacidade à fratura e resistência à compressão do Material E, em função da temperatura.

Em relação ao comportamento da resistência à compressão em função da temperatura, pode-se verificar que existe uma tendência de perda desta propriedade conforme a temperatura na qual o material é avaliado aumenta. Esta tendência é bastante clara para os materiais A, B e E, enquanto o material D mantém sua resistência à compressão até 250°C, e apresenta uma queda abrupta a 325°C. Para o material C verifica-se, a exemplo do material D, a manutenção da resistência à compressão com aumento de temperatura, mesmo a 325°C, sendo observado ainda um comportamento errático do resultado a 175°C.

A tendência de perda de resistência à compressão em função da temperatura corrobora com as expectativas do trabalho, e também com o conhecimento disponível na literatura [Callister, 1999; Al-Qureshi, 1988; Gardziella, 2000], pelo fato de esta propriedade mecânica dos materiais compósitos particulados, reforçados com fibras curtas, estar intimamente associada à matriz, neste caso de resina fenólica, a qual tem papel preponderante e, de forma geral, apresenta um comportamento mecânico marcado pela queda de resistência mecânica em função da temperatura.

O comportamento mais estável dos materiais C e D, em relação à resistência à compressão, pode estar fundamentado nas peculiaridades da composição dos mesmos. Consultando a Tabela 4.1, é possível verificar que no caso do material C, há uma elevada

fração volumétrica de fibra de vidro em sua composição, sendo esta reconhecida como um componente chave para resistência mecânica, em associação ao ligante da matriz. A fração de fibra de vidro presente na composição do material C (~14%) é significativamente diferente do patamar empregado nos outros quatro materiais (~3,5% a ~7%). Para o caso do material D, verifica-se pela Tabela 4.1, que este é o único dentre as cinco composições avaliadas que apresenta uma fração volumétrica significativa de poros (~5%), a qual poderia modificar o padrão do comportamento mecânico do material a partir do momento em que sua influência suplantasse o papel da temperatura no comportamento mecânico, pelo menos até o patamar de 325°C, onde ocorre a queda abrupta do valor de resistência, que poderia ser explicada pelo fato de que, nesta temperatura, o material já estaria sendo exposto a um patamar térmico que é significativo do ponto de vista da degradação térmica da matriz de resina fenólica, através do rompimento de ligações cruzadas.

No que concerne à tenacidade à fratura para materiais compósitos de fricção, investigações relacionadas ao comportamento desta propriedade em função da temperatura ainda são incomuns na literatura. De forma objetiva, não foi possível localizar referências bibliográficas que tratem deste tipo de avaliação, tanto para resina fenólica como para componentes de matriz fenólica, e que pudessem ser utilizadas como fonte de dados para verificação da coerência dos resultados encontrados no trabalho.

No entanto, traçando paralelos com os conhecimentos disponíveis para outras classes de materiais, verifica-se que este padrão de comportamento contradiz o que se observa, por exemplo, para os materiais metálicos. A evolução da tenacidade à fratura para uma liga de aço Cr-Mo-V apresentado por Hertzberg [1996], na página 382 de sua obra, mostra um incremento significativo de  $K_{IC}$  com aumento da temperatura, ao passo que a resistência ao escoamento do material diminui. Este padrão de comportamento é o que se tem como coerente para ligas metálicas.

Esta contradição entre o comportamento de  $K_{IC}$  de materiais metálicos e dos materiais compósitos de fricção avaliados neste trabalho pode ser explicada essencialmente pelos mecanismos de alteração estrutural e microestrutural de ambos quando expostos a solicitações mecânicas, em condições de temperatura variável.

O mecanismo de deformação plástica dos metais está intrinsecamente associado ao movimento de discordâncias, que, de forma objetiva é responsável também pela sua tenacidade [Hertzberg, 1996; Callister, 1999]. Na ponta de uma trinca crítica presente no componente metálico e cuja direção é perpendicular à de aplicação de tensão, o movimento de

discordâncias atua de forma a aumentar o raio da frente de propagação da trinca, diminuindo sua criticidade. O fato de o movimento de discordâncias ser um fenômeno termicamente ativado, explica o aumento do  $K_{IC}$  do material metálico em função da temperatura, visto que favorece o mecanismo principal de tenacificação.

No caso dos materiais de fricção em avaliação, o comportamento de tenacidade à fratura está intimamente ligado ao comportamento da matriz de resina fenólica e dos componentes presentes no material. No entanto, o padrão de alteração do  $K_{IC}$  dos materiais em função da temperatura pode ser atribuído essencialmente à matriz, visto que é a mesma que comanda o processo de ruptura quando da propagação da trinca, enquanto o papel dos componentes presentes no material restringe-se a modificar a direção e incrementar o percurso do caminho de propagação da trinca.

Para a resina fenólica, o processo de formação das ligações cruzadas covalentes entre cadeias poliméricas resulta num material termofixo com alta densidade de ligações entre as moléculas, tridimensionalmente atreladas umas às outras, formando um “polímero de rede” [Callister, 1999; Gardziella, 2000]. No que concerne às ligações entre a matriz de resina fenólica e os componentes presentes no material compósito (fases dispersas), o que ocorre geralmente são interações químicas de segunda importância, como forças de Van der Waals.

Neste caso, quando submetida a tensões mecânicas, a microestrutura do material não dispõe de mecanismos tais como o movimento de discordâncias que ocorre nos metais. A deformação decorrente da aplicação de tensões mecânicas se dá, primeiramente pelo alongamento das ligações cruzadas entre moléculas do polímero, seguido da ruptura das mesmas. As interações de Van der Waals, que apesar de ter importância química secundária na integridade mecânica da estrutura, são alçadas a uma representatividade grande devido à alta fração de fases dispersas e à extensão da área superficial de interação entre as mesmas e a matriz, também se rompem por ação mecânica. Dessa forma, não há um mecanismo de tenacificação associado à deformação do material, que possa diminuir a criticidade do raio de um trinca presente no componente.

Adicionalmente, a ação da temperatura não tem atuação de tenacificação dos polímeros termofixos. Ao contrário, os efeitos ocasionados pela aplicação de temperatura diminuem a quantidade de energia necessária para quebrar as ligações cruzadas entre cadeias. Da mesma forma, do ponto de vista da interação da matriz de resina fenólica com as demais fases dispersas, o efeito da temperatura é o de enfraquecer as interações de Van der Waals.



### 5.3. Abordagem Estatística e o Conceito de Projeto Robusto

O desdobramento dos conceitos de mecânica da fratura aplicados ao projeto de materiais de fricção, e o estabelecimento de práticas experimentais que permitam a geração de dados para alimentação do projeto do componente representam um avanço significativo no campo de pesquisa e desenvolvimento de componentes de fricção.

Todavia, a interpretação dos resultados experimentais pode ser mais bem capitalizada englobando-se métodos estatísticos que permitam incrementar a confiabilidade dos mesmos. Essencialmente, o desenvolvimento de produtos para indústria de componentes de segurança, como é o caso do material de fricção, envolve a mitigação e gerenciamento de riscos de falha. Neste sentido, a agregação de uma ferramenta que permita a estimativa correta do coeficiente de segurança adotado se mostra de extrema importância.

Neste trabalho, foi utilizada a abordagem estatística baseada na metodologia proposta por Weibull, correlacionando o valor de  $K_{IC}$  de cada um dos cinco materiais caracterizados que corresponde a uma probabilidade determinada de que o material falhe. O objetivo principal, neste caso, é estabelecer uma correlação que seja útil do ponto de vista do projeto do componente do sistema de freio, incrementando a confiabilidade da análise com base na abordagem probabilística, corroborando com o conceito de projeto robusto. Evidentemente, do ponto de vista da Engenharia, o objetivo é garantir a precisão na estimativa de propriedades para, em primeiro lugar, evitar falhas em serviço, e em segundo lugar, preservar a competitividade ao evitar coeficientes de segurança superestimados. Do ponto de vista do projeto de componentes utilizando materiais de fricção, a determinação do valor de  $K_{IC}$  a ser considerado em projeto pode ser feito a partir do estabelecimento de critérios de falha admitidos.

A Tabela 5.2 apresenta um resumo dos resultados de  $K_{IC}$  dos cinco materiais de fricção caracterizados em função da temperatura, analisados a partir da abordagem estatística estabelecida pela metodologia de Weibull. Com base na distribuição de probabilidade de falha em função do valor de  $K_{IC}$ , para cada material, em cada uma das temperaturas escolhidas para caracterização, foram estabelecidos dois valores de probabilidade de falha admitida tipicamente utilizados em projetos mecânicos: 5% e 10%. Também estão mostrados na Tabela 5.2 os valores do módulo de Weibull ( $m$ ) para cada distribuição, bem como o número de corpos-de-prova testados para cada condição.

Tabela 5.2 – Resultados de  $K_{IC}$  associados à probabilidades de falha de 5% e 10%, caracterizados para os cinco materiais de fricção em função da temperatura.

		Temperatura				
		22°C	100°C	175°C	250°C	325°C
Material A	$K_{IC}$ - PF = 10% (MPa.m <sup>1/2</sup> )	1,10	1,28	0,80	0,71	0,51
	$K_{IC}$ - PF = 5% (MPa.m <sup>1/2</sup> )	1,03	1,22	0,75	0,66	0,47
	Nº de CP's (Teste de $K_{IC}$ )	29	29	29	27	29
	Módulo de Weibull - m	10,8	15,4	12,3	9,2	9,6
Material B	$K_{IC}$ - PF = 10% (MPa.m <sup>1/2</sup> )	1,56	1,24	0,65	0,71	0,59
	$K_{IC}$ - PF = 5% (MPa.m <sup>1/2</sup> )	1,38	1,14	0,56	0,66	0,53
	Nº de CP's (Teste de $K_{IC}$ )	25	29	29	26	27
	Módulo de Weibull - m	5,8	8,7	4,4	9,7	6,6
Material C	$K_{IC}$ - PF = 10% (MPa.m <sup>1/2</sup> )	1,21	1,33	0,86	0,90	0,77
	$K_{IC}$ - PF = 5% (MPa.m <sup>1/2</sup> )	1,08	1,20	0,77	0,79	0,69
	Nº de CP's (Teste de $K_{IC}$ )	26	30	30	30	29
	Módulo de Weibull - m	6,4	6,9	6,6	5,7	6,3
Material D	$K_{IC}$ - PF = 10% (MPa.m <sup>1/2</sup> )	1,29	0,70	0,57	0,61	0,43
	$K_{IC}$ - PF = 5% (MPa.m <sup>1/2</sup> )	1,20	0,70	0,51	0,55	0,38
	Nº de CP's (Teste de $K_{IC}$ )	27	31	30	32	31
	Módulo de Weibull - m	9,5	6,5	6,5	7,0	5,9
Material E	$K_{IC}$ - PF = 10% (MPa.m <sup>1/2</sup> )	0,80	0,64	0,41	0,40	0,27
	$K_{IC}$ - PF = 5% (MPa.m <sup>1/2</sup> )	0,74	0,61	0,37	0,37	0,24
	Nº de CP's (Teste de $K_{IC}$ )	23	28	27	30	26
	Módulo de Weibull - m	9,2	12,1	6,8	7,5	6,9

Os dados da Tabela 5.2 podem ser também visualizados de forma gráfica através das Figuras 5.27 a 5.31, que apresentam as curvas de tenacidade à fratura em função da temperatura correspondente à 10% de probabilidade de falha para os dados analisados dos materiais A, B, C, D e E respectivamente.

Em adição às curvas representativas da tenacidade à fratura de cada material, são mostradas também as linhas de tendência das mesmas, correlacionando tenacidade à fratura e temperatura.

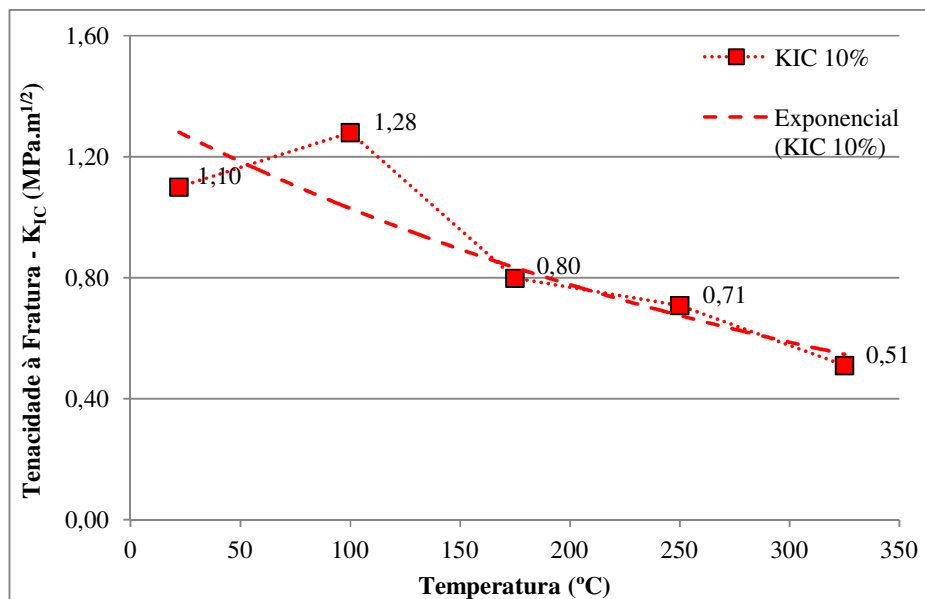


Figura 5.27 – Resultados de tenacidade à fratura com 10% de probabilidade de falha, em função da temperatura para o material A.

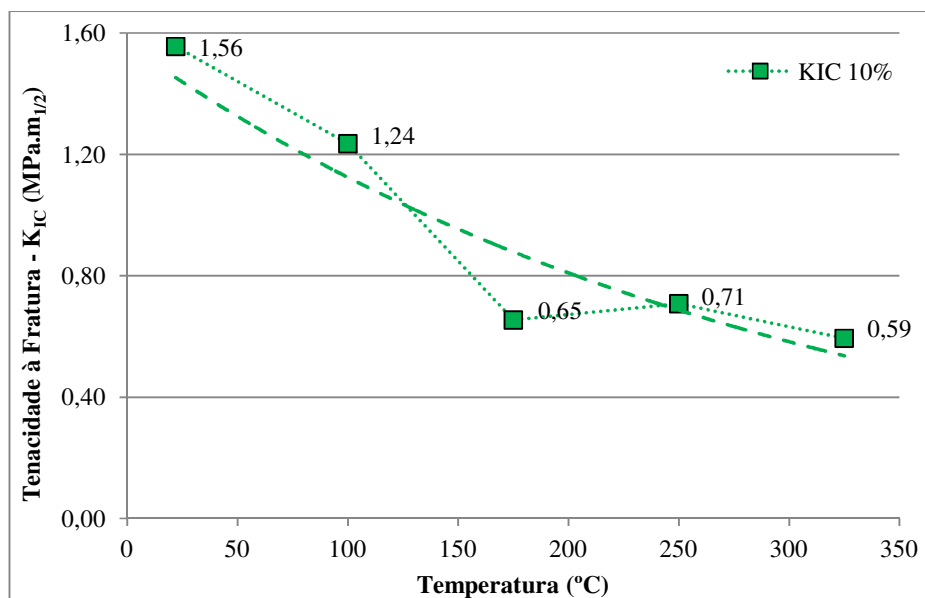


Figura 5.28 – Resultados de tenacidade à fratura com 10% de probabilidade de falha, em função da temperatura para o material B.

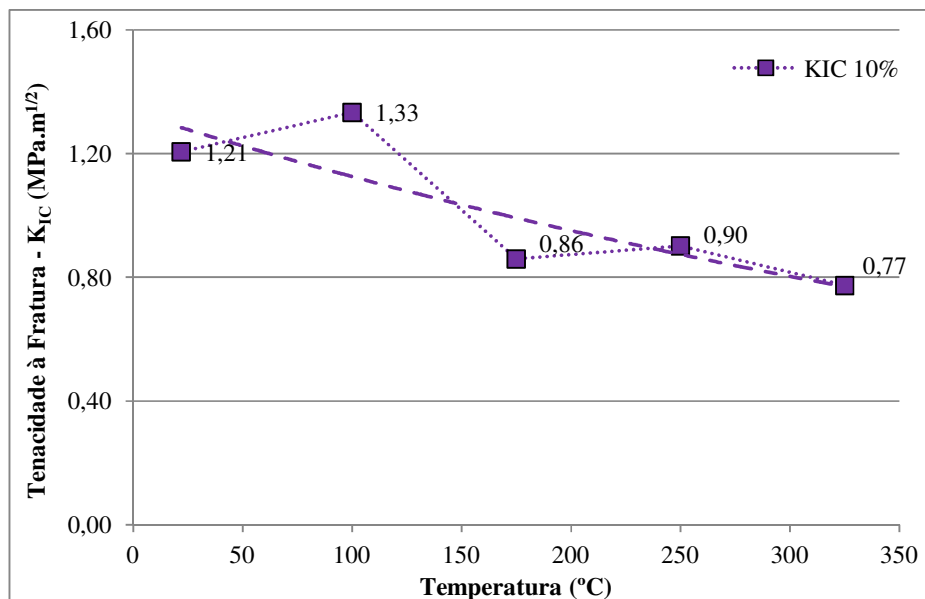


Figura 5.29 – Resultados de tenacidade à fratura com 10% de probabilidade de falha, em função da temperatura para o material C.

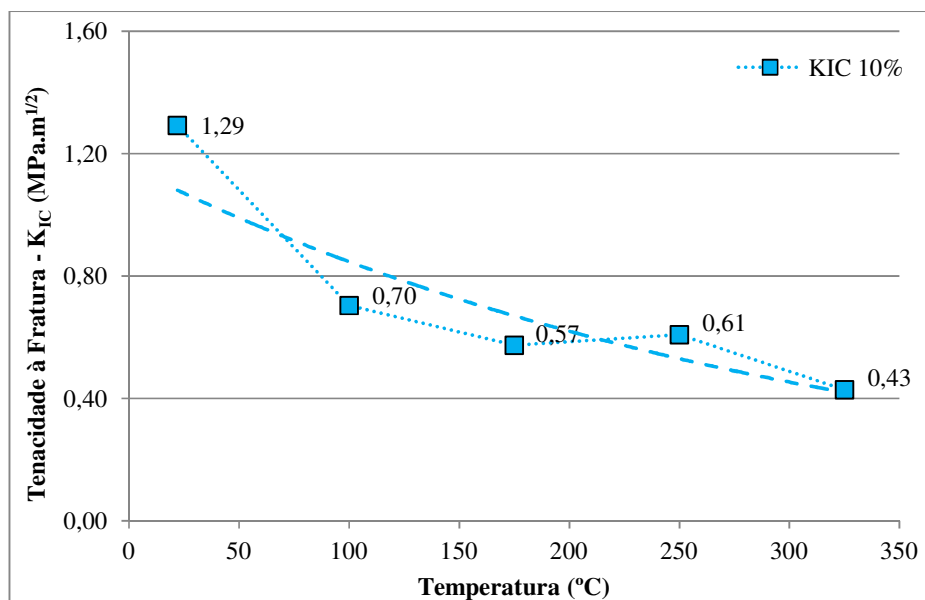


Figura 5.30 – Resultados de tenacidade à fratura com 10% de probabilidade de falha, em função da temperatura para o material D.

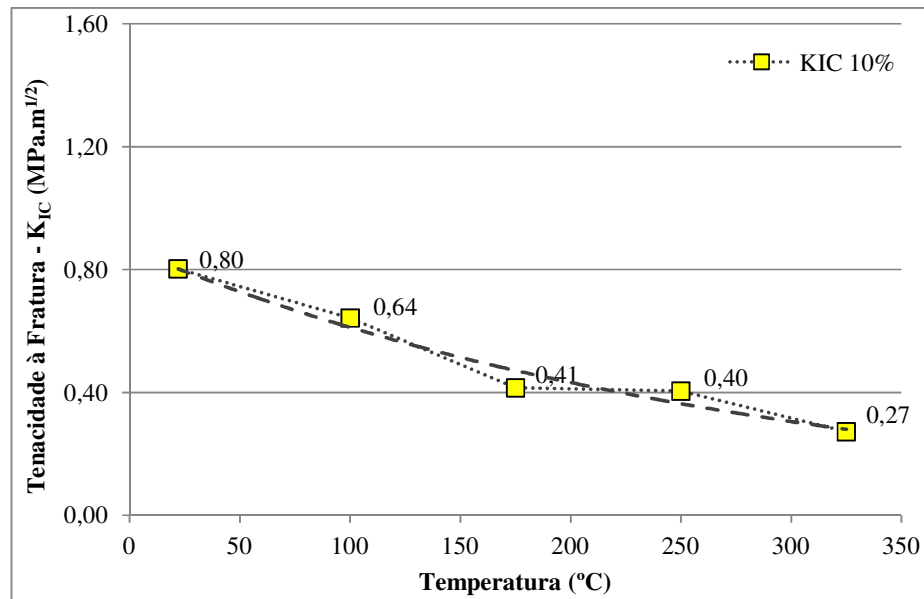


Figura 5.31 – Resultados de tenacidade à fratura com 10% de probabilidade de falha, em função da temperatura para o material E.

Essencialmente, a interpretação dos gráficos das Figuras 5.27 a 5.31 ressalta que o projeto de um componente a partir de um dos materiais de fricção analisados (Materiais A, B, C, D e E) apresentará uma probabilidade de falha de 10% caso os valores de  $K_{IC}$  empregados no projeto sejam os indicados pelas séries em cada um dos gráficos.

As equações descritivas do padrão de comportamento da tenacidade à fratura de cada material compósito em função da temperatura, bem como seu fator  $R^2$  estão apresentadas mais adiante na Tabela 5.3, e serão abordadas com foco no equacionamento da tenacidade à fratura dos materiais de fricção em função da temperatura.

A utilização da abordagem estatística para interpretação dos resultados de tenacidade à fratura, quando empregados no equacionamento do comportamento do  $K_{IC}$  dos materiais de fricção e análise do tamanho crítico de trinca associados aos esforços no sistema de freio, que serão apresentados na sessão que segue, complementa as propostas fundamentais de caracterização da propriedade em si, através do embasamento estatístico dos dados permitindo o gerenciamento da confiabilidade e do coeficiente de segurança do projeto, mitigando fontes de erro e variação provenientes dos métodos de medida e caracterização, do processo de fabricação, bem como o grau de variabilidade inerente ao conceito estrutural do material de fricção, devido à sua complexidade composicional e à sua escala de homogeneidade.

#### 5.4. Equacionamento da Tenacidade à Fratura dos Materiais de Fricção em Função da Temperatura como Ferramenta de P&D

O comportamento da tenacidade à fratura dos cinco materiais de fricção avaliados em função da temperatura obedece a uma tendência clara, e sem exceções, de queda exponencial em função do aumento da temperatura dentro do range avaliado. Esta afirmação pode ser comprovada através das Figuras 5.27 a 5.31, anteriormente apresentadas.

O equacionamento deste comportamento faz surgir uma importante ferramenta de pesquisa e desenvolvimento de novos produtos, a partir do momento em que permite extrapolar a propriedade de tenacidade à fratura de um protótipo nas condições de serviço, baseado em uma população reduzida de testes e dados.

A Tabela 5.3 apresenta as equações que descrevem a linha de tendência da correlação entre tenacidade à fratura e temperatura para os dados estatisticamente analisados na sessão 5.3 e apresentados graficamente nas Figuras 5.27 a 5.31, bem como o fator  $R^2$  correspondente.

*Tabela 5.3 – Equações e fator  $R^2$  que representam o padrão de comportamento da tenacidade à fratura de cada um dos materiais A, B, C, D e E em função da temperatura, associado à probabilidade de falha de 10%.*

	<b>Equação padrão</b> <b>(<math>K_{IC}</math> correspondente à probabilidade de falha 10%)</b>	<b><math>R^2</math></b>
Material A	$K_{IC} = 1,3625e^{-0,003T}$	0,85
Material B	$K_{IC} = 1,5622e^{-0,003T}$	0,85
Material C	$K_{IC} = 1,3326e^{-0,002T}$	0,75
Material D	$K_{IC} = 1,1569e^{-0,003T}$	0,84
Material E	$K_{IC} = 0,8658e^{-0,003T}$	0,96

De forma objetiva, conforme descrito na sessão de Materiais e Métodos, os materiais compósitos de fricção definidos para caracterização neste trabalho foram selecionados de forma a englobar representantes do portfólio completo de produtos da Fras-le S.A., e por estarem adequados para o atendimento de vários mercados em escala global. Neste sentido, o conjunto dos cinco materiais de fricção caracterizados apresenta atributos bastante distintos no que se refere à rigidez, resistência mecânica, taxa de desgaste, etc. Uma amostra desta

diversidade de características é o range de resultados de resistência à compressão que pôde ser observado para os cinco materiais na Tabela 5.1, entre 28 e 78 MPa, a 22°C.

Apesar da distinção de propriedades entre os materiais, o comportamento de todos eles evidencia um padrão exponencial na relação entre tenacidade à fratura e temperatura, conforme pode ser verificado pela análise das equações das curvas representativas dos resultados de tenacidade à fratura em função da temperatura. Este padrão pode ser descrito pela Equação 5.1.

$$K_{IC} = C_2 e^{C_1 T} \quad \text{Equação 5.1}$$

Onde  $C_1$  e  $C_2$  são constantes específicas e particulares de cada material e  $T$  é a temperatura, em °C.

A interpretação da Equação 5.1 mostra que a constante  $C_1$  está valorada como -0,003 para quatro dos cinco materiais avaliados, conforme mostram as equações representativas da Tabela 5.2., evidenciado que o comportamento da tenacidade à fratura em função da temperatura obedece a um padrão similar para todos os materiais de fricção. Isto corrobora com a hipótese anteriormente levantada, de que a susceptibilidade dos materiais de fricção à propagação de trincas está intimamente ligada a um fator estrutural preponderante, sendo a resina fenólica o componente dominante a ser associado a esta hipótese. Esta afirmação se baseia também, na compreensão de que o processo de propagação de trincas no material compósito essencialmente ocorre pela ruptura da matriz, sendo que os demais componentes podem influenciar positiva ou negativamente o processo de propagação, mas com representatividade secundária.

Apenas a constante  $C_1$  da equação representativa do material C apresenta um valor diferenciado (-0,002), e mesmo assim bastante próximo do valor padrão -0,003. Há que se analisar, no entanto, o valor da constante  $C_1$  do material C com ressalvas, visto que o valor da tenacidade à fratura deste material a 100°C não condiz com o que se espera dele, e se mostra incoerente em relação aos demais dados que compõem a curva da tenacidade à fratura do material C em função da temperatura. Em concordância a isto, ressalta-se o coeficiente de ajuste  $R^2$  da curva, cujo valor - 0,75 - é o menor dentre todas as cinco curvas dos materiais caracterizados. Essencialmente, no intuito de operacionalizar um modelo que seja útil e auxilie nos processos de P&D de materiais de fricção, pode-se assumir, com um índice satisfatório de precisão, uma constante  $C_1$  padrão para materiais de fricção de matriz fenólica pura, sendo a mesma “-0,003”.

Em contrapartida ao padrão do valor da constante  $C_1$ , a constante  $C_2$  de cada um dos materiais apresenta uma variação mais significativa sem associação aparente com algum padrão preponderante, e pode ser considerada uma característica de cada material em si. A análise dos valores da constante  $C_2$  em relação à propriedade de resistência à compressão, e em relação aos fatores de composição (fração de tenacificadores, fração e fibra de vidro, etc.) não permitiu o estabelecimento de uma correlação direta e objetiva que pudesse proporcionar o desdobramento da mesma a partir de um parâmetro fundamental. Dessa forma, ao contrário da constante  $C_1$ , não é possível pré-estabelecer uma constante  $C_2$  para um protótipo de material de fricção, sendo que a mesma necessita ser medida.

Do ponto de vista prático, o desdobramento matemático proposto na Equação 5.1 se apresenta extremamente útil para o engenheiro desenvolvedor de materiais de fricção, a partir do momento em que permite a caracterização com um grau satisfatório de precisão, do padrão de comportamento da tenacidade à fratura do protótipo do material de fricção em teste, através da mensuração desta característica do material a frio, pela qual pode ser estabelecido o valor da constante  $C_2$ . Essa informação, associada à análise de tensões no sistema de freio pode vir a possibilitar uma análise suficientemente confiável do risco técnico em se aplicar determinado material de fricção ao sistema de freio considerado. Essa análise será discutida na seção que segue.

### **5.5. Aplicação da Tenacidade à Fratura ao Projeto de Materiais de Fricção**

Todo o desdobramento teórico e experimental desenvolvido neste trabalho busca, fundamentalmente, contribuir de forma significativa e inovadora para o processo de pesquisa e desenvolvimento de componentes de materiais de fricção para a indústria automotiva. Mais especificamente abordando a etapa de “design” da composição do material de fricção, este trabalho se propõe a agregar uma série de fundamentos da mecânica da fratura, bem como estabelecer um conjunto de práticas experimentais que possibilitem robustecer o projeto e aumentar a taxa de sucesso na seleção do material de fricção à luz dos requisitos técnicos que sejam representativos dos esforços aplicados ao componente de fricção em serviço. Dessa forma, espera-se reduzir o tempo de desenvolvimento do material, reduzir o custo do mesmo, tornar mais eficiente e confiável o processo de seleção de protótipos para etapas avançadas de validação em veículo, e aumentar a competitividade da indústria.

Conforme discutido na seção 5.4, é possível estabelecer um padrão de comportamento da tenacidade à fratura para o universo de materiais de fricção que fazem parte do escopo



deste trabalho. Viu-se, também, que o padrão de decaimento da tenacidade à fratura dos materiais de fricção obedece a uma tendência exponencial. A partir das curvas características dos resultados de tenacidade à fratura dos materiais de fricção caracterizados em função da temperatura, é possível analisar o tamanho de defeito máximo admissível em função das tensões resultantes dos esforços do sistema de freio em serviço, para determinada temperatura de aplicação.

Com auxílio da Equação 3.16, a seguir reproduzida, os valores de  $K_{IC}$  foram desdobrados em tamanhos máximos de trinca admissível em função da temperatura, para não ocorrência de falha.

$$K_{IC} = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad \text{Equação 3.16}$$

Os gráficos apresentados nas Figuras 5.32 a 5.36 correspondem às curvas de tamanho máximo de trinca em função das tensões de serviço no sistema de freio, para diversas temperaturas de aplicação. Os valores de  $K_{IC}$  utilizados para construção das curvas em cada gráfico foram estimados para cada material a partir da sua equação característica conforme apresentado na Tabela 5.3 da seção 5.4.

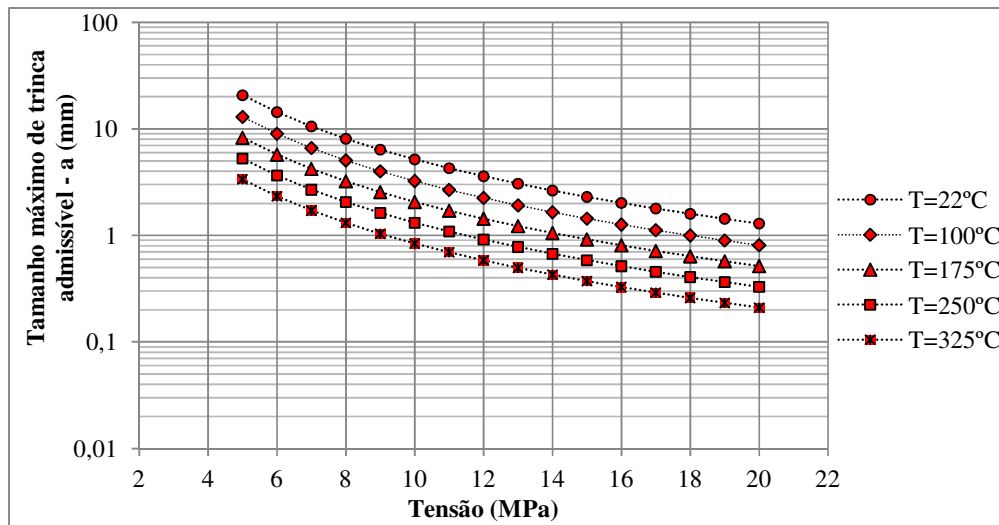


Figura 5.32 – Material A: tamanho máximo de trinca admissível em função das tensões às quais o componente de fricção é submetido em serviço no sistema de freio, considerando a faixa de temperatura de serviço para veículos pesados com sistema de freio a tambor. Aplicada probabilidade de falha para  $K_{IC}$  de 10%.

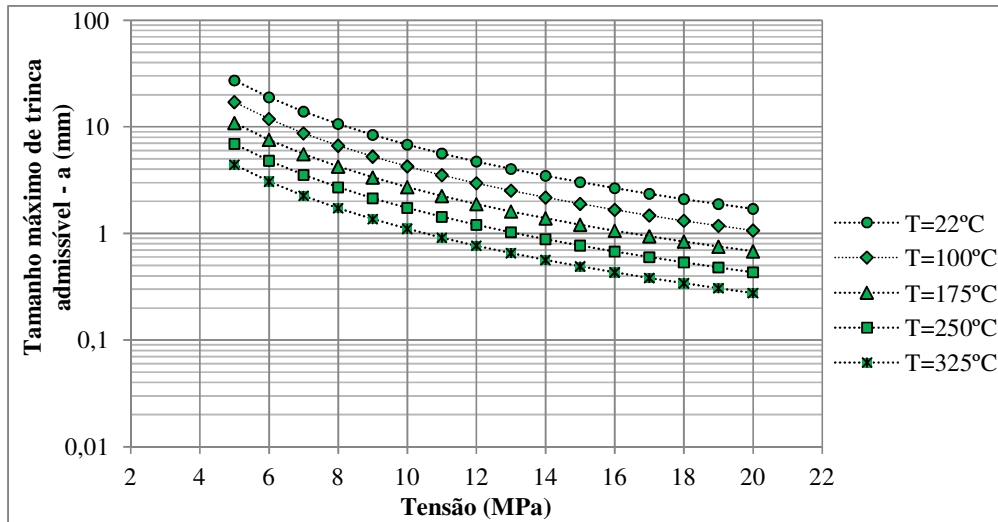


Figura 5.33 – Material B: tamanho máximo de trinca admissível em função das tensões às quais o componente de fricção é submetido em serviço no sistema de freio, considerando a faixa de temperatura de serviço para veículos pesados com sistema de freio a tambor. Aplicada probabilidade de falha para  $K_{IC}$  de 10%.

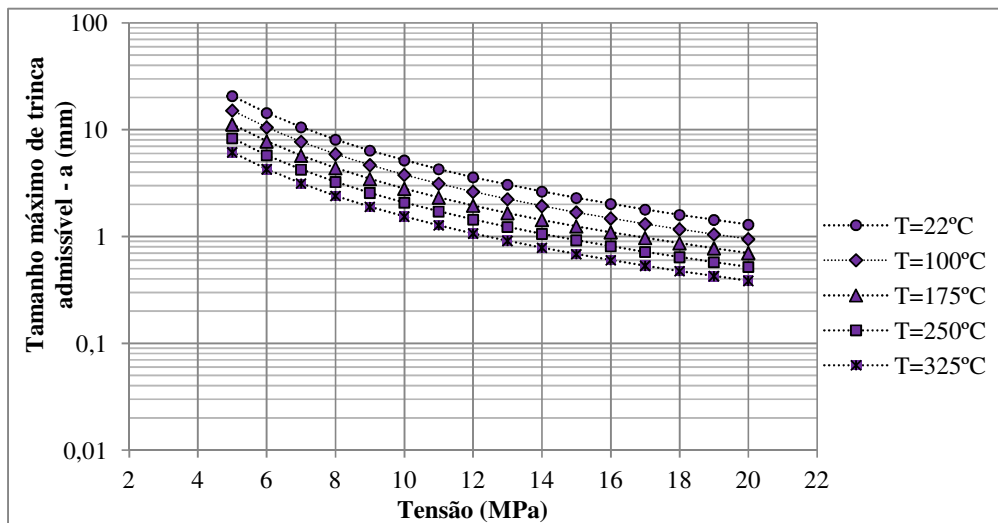


Figura 5.34 – Material C: tamanho máximo de trinca admissível em função das tensões às quais o componente de fricção é submetido em serviço no sistema de freio, considerando a faixa de temperatura de serviço para veículos pesados com sistema de freio a tambor. Aplicada probabilidade de falha para  $K_{IC}$  de 10%.

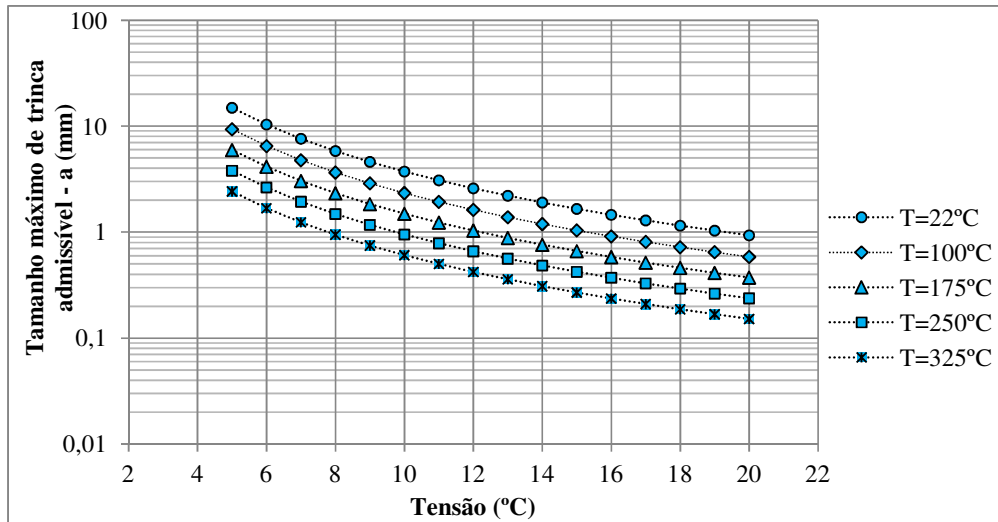


Figura 5.35 – Material D: tamanho máximo de trinca admissível em função das tensões às quais o componente de fricção é submetido em serviço no sistema de freio, considerando a faixa de temperatura de serviço para veículos pesados com sistema de freio a tambor. Aplicada probabilidade de falha para  $K_{IC}$  de 10%.

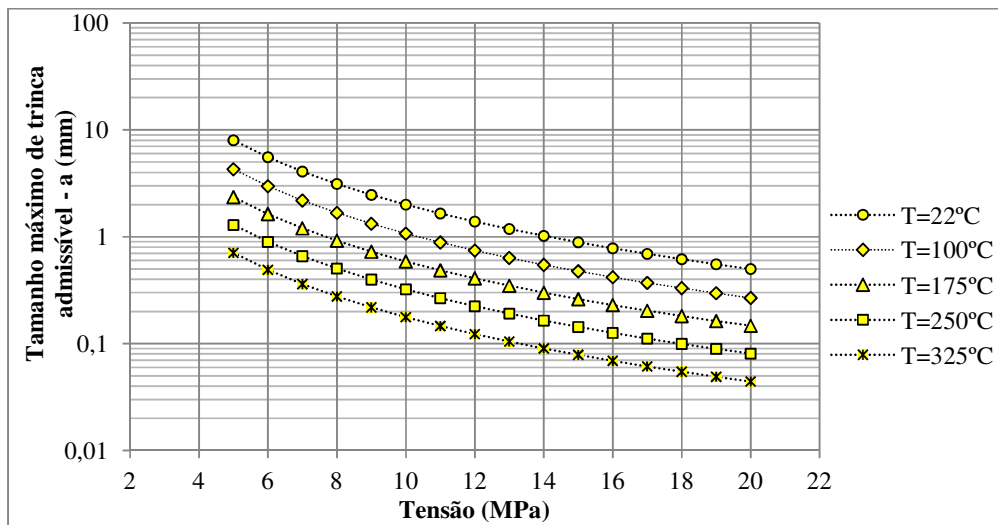


Figura 5.36 – Material E: tamanho máximo de trinca admissível em função das tensões às quais o componente de fricção é submetido em serviço no sistema de freio, considerando a faixa de temperatura de serviço para veículos pesados com sistema de freio a tambor. Aplicada probabilidade de falha para  $K_{IC}$  de 10%.

Com objetivo de correlacionar os dados de tamanho máximo de trinca admissível, mostrados nas Figuras 5.32 a 5.36, com os esforços do sistema de freio em serviço, foi

utilizada uma simulação básica por elementos finitos, conforme descrito na seção 4.8, em análise de um sistema de freio de 410 mm de diâmetro cujo componente de fricção é feito com o material B. Este tipo de sistema de freio é comumente destinado à montagem de veículos pesados, tais como ônibus urbanos e caminhões de transporte rodoviário.

O resultado da simulação pode ser visualizado através da Figura 5.37, que mostra através do gradiente de cores as magnitudes de tensões atuantes às quais o componente de material de fricção está submetido, bem como a sua distribuição em todo o volume da peça.

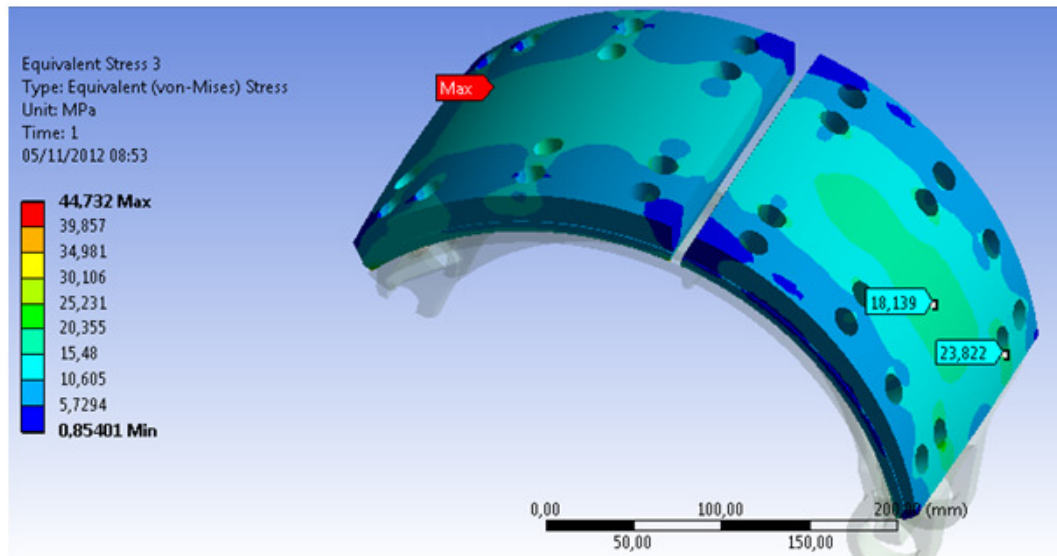


Figura 5.37 – Tensões resultantes sobre o material B em serviço no sistema de freio Master 410 mm, aplicação ônibus urbano.

Os resultados da simulação por elementos finitos mostram que as tensões resultantes sobre o componente do material de fricção durante aplicação no sistema de freio 410 mm, alcançando temperatura de 475°C situa-se na faixa de 1 a 20 MPa. A partir da equação exponencial do comportamento da tenacidade à fratura do material B, apresentada na Tabela 5.3, foram extrapoladas as curvas que refletem o tamanho máximo de trinca  $a$  em função das tensões aplicadas sobre o material de fricção para temperaturas de 400°C e 475°C, em complemento às curvas do material B apresentadas na Figura 5.33. As mesmas podem ser visualizadas na Figura 5.38 a seguir, e mostram que associando as tensões máximas geradas durante a frenagem com as temperaturas máximas registradas nesta aplicação, o tamanho de

trinca admissível ao componente do material de fricção remete a valores da ordem de décimos de milímetro.

Esse cenário se apresenta, em primeira análise, bastante crítico, visto que descontinuidades da ordem de décimos de milímetro podem surgir durante o processo de fabricação, mais especificamente na etapa de usinagem final, ou mesmo resultantes do processo de liberação de gases durante a moldagem a quente. Da mesma forma, a ação de impurezas tais como partículas de poeira e grânulos de sujeira de alta dureza que por ventura venham a ser lançados na interface de frenagem lona/tambor poderiam ocasionar pequenos rasgos durante o processo de frenagem que não dificilmente podem alcançar décimos de milímetros. Mesmo a ocorrência de adesão fraca da matriz de resina fenólica com partículas de componentes do material de atrito poderiam levar a situações nas quais os mesmos poderiam atuar como uma “trinca de dimensão e raio críticos”, em virtude do tamanho crítico admissível estar situado nesta faixa de décimos de milímetro.

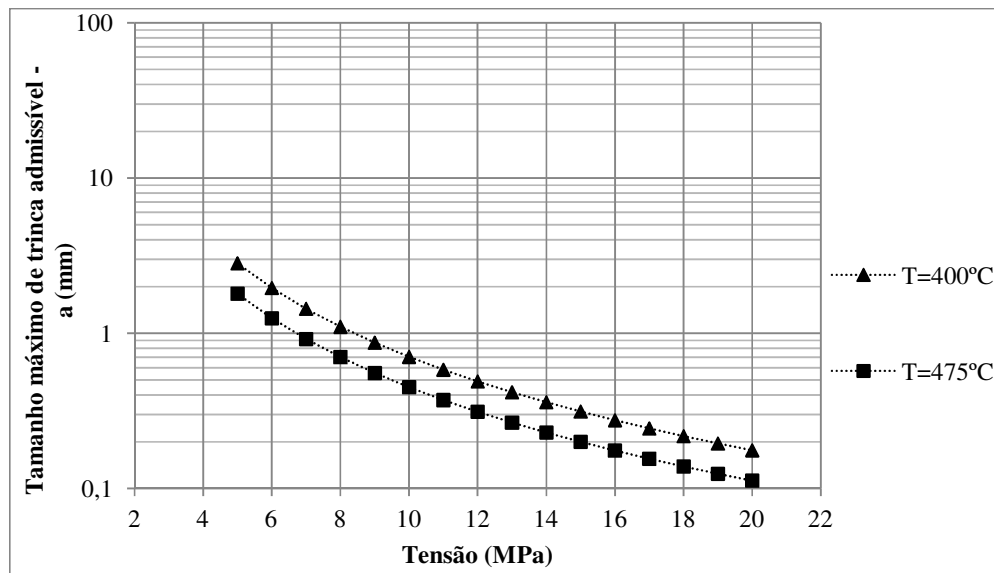


Figura 5.38 – Material B: tamanho máximo de trinca admissível em função das tensões às quais o componente de fricção é submetido em serviço no sistema de freio, considerando temperatura de serviço extremamente crítica para ônibus urbano. Aplicada probabilidade de falha para  $K_{IC}$  de 10%.

Este caso em análise para o freio 410 mm considerando o material B, onde a tenacidade à fratura do material é analisada no contexto da aplicação, considerando esforços

de frenagem e temperatura, exemplifica de forma bastante clara o potencial de utilização desta propriedade como requisito de projeto.

Análises deste porte podem indicar de antemão o risco de, por exemplo, se levar adiante a validação do material B no sistema de freio 410 mm montado no veículo cuja rota de validação apresenta as características acima citadas. Os dados resultantes desta análise são extremamente importantes para o engenheiro embasar uma decisão positiva ou negativa em relação à continuação do projeto. Servem, também, para sinalizar à gestão de tecnologia de P&D de materiais de fricção sobre a necessidade de desenvolvimento de produtos mais robustos para aplicações críticas, e em contrapartida, são importantes também para indicar ao projetista do veículo que o desenho do mesmo não é favorável do ponto de vista do controle de movimento, visto que rompe paradigmas que serviram de base para o estabelecimento dos padrões de tecnologia estabelecidos atualmente no que se refere ao regime de serviço de veículos de determinada categoria, ocasionando necessidade de emprego de materiais e componentes com tecnologias diferenciadas, as quais fatalmente tornarão o veículo menos competitivo do ponto de vista de custo e lucratividade.

#### **5.6. Correlação entre Tenacidade à Fratura e Resistência à Compressão como Ferramenta de Controle de Qualidade**

A responsabilidade da engenharia no âmbito da indústria não se limita ao projeto e homologação de determinado componente. O estabelecimento de métodos de controle de qualidade e faixas de especificação que garantam o desempenho do componente em acordo com sua homologação também são de responsabilidade da engenharia.

No caso específico deste trabalho, as inovações até agora propostas, visando a utilização dos conceitos de mecânica da fratura no projeto do material de fricção, o estabelecimento das práticas experimentais para geração de dados de  $K_{IC}$ , a abordagem estatística na interpretação dos resultados experimentais, o equacionamento do comportamento do  $K_{IC}$  para os materiais de fricção em função da temperatura, bem como a aplicação destes conceitos confrontados com os requisitos mecânicos em serviço do componente, precisam ser complementados com o estabelecimento de um método de controle de qualidade que garanta que os componentes produzidos em escala atendam as especificações de projeto.

Neste sentido, o estabelecimento de uma correlação confiável entre resistência mecânica e tenacidade à fratura seria de grande importância do ponto de vista industrial, levando em consideração esta perspectiva de controle de qualidade. Para uma indústria de materiais de fricção, por exemplo, uma rotina de testes de controle de qualidade que envolva métodos elaborados como os utilizados para medida de  $K_{IC}$  seria dificilmente implementável como rotina. No entanto, há testes mecânicos mais simplórios que são implementáveis como rotina de controle.

A correlação entre a resistência à compressão dos cinco materiais caracterizados neste trabalho e seus respectivos valores de  $K_{IC}$  mostra uma relação de tendência linear, como foi demonstrado na seção 5.2.1, através da Figura 5.21.

A Figura 5.39 apresenta a correlação de dados de resistência à compressão e de tenacidade à fratura, ambos à temperatura ambiente, para os cinco materiais de fricção que fazem parte do escopo deste trabalho.

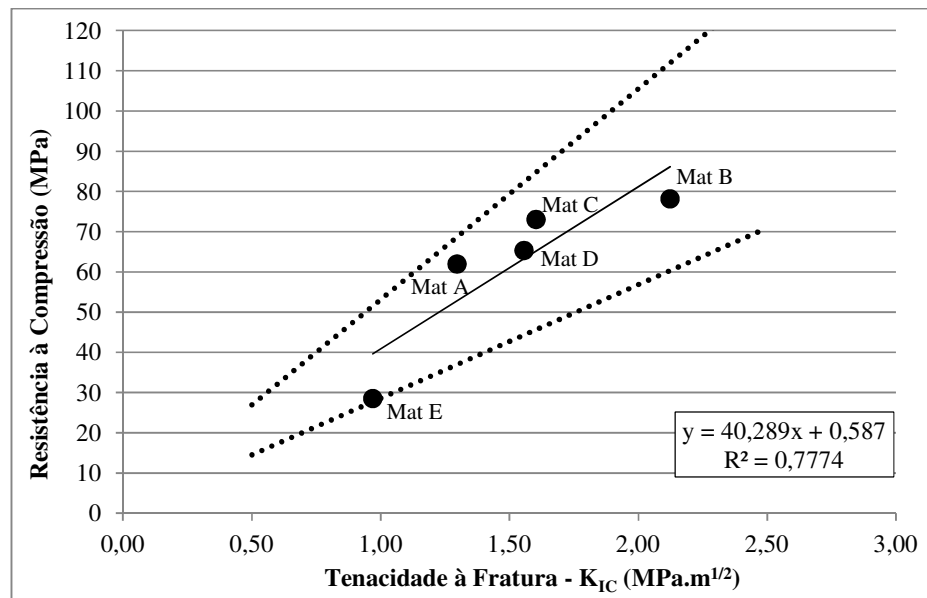


Figura 5.39 – Relação entre resistência à compressão e tenacidade à fratura para os cinco materiais avaliados. Linha de tendência e intervalo de  $\pm 30\%$  são mostrados.

Levando em consideração a correlação entre resistência à compressão e tenacidade à fratura, fica evidente a possibilidade de se utilizar o ensaio de compressão como procedimento de controle de qualidade, com a vantagem de que este poderia ser facilmente

implementado no meio industrial, pela facilidade de execução e análise dos dados. A Figura 5.39 mostra que a correlação entre resistência à compressão e tenacidade à fratura, ambas em temperatura ambiente, de todos os materiais avaliados se enquadra dentro do intervalo de  $\pm 30\%$  em relação à linha de tendência traçada.

Caso o material E seja desconsiderado no cenário, verifica-se que o conjunto de dados composto pelos quatro materiais remanescentes mostra uma correlação bem mais refinada. A Figura 5.40 apresenta uma correlação similar à da Figura 5.39, porém desconsiderando o material E do intervalo de análise.

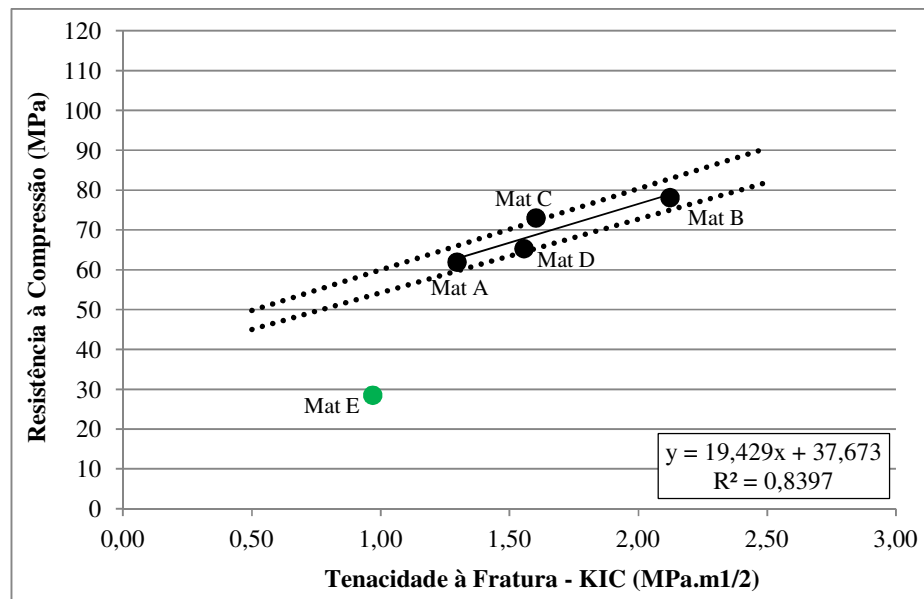


Figura 5.40 – Relação entre resistência à compressão e tenacidade à fratura para quatro os cinco materiais avaliados (Materiais A, B, C e D). Linha de tendência e intervalo de  $\pm 5\%$  são mostrados.

Como resultado, a significância da linha de tendência da Figura 5.40 aumenta –  $R^2$  de 0,78 para 0,84 – e todos os resultados se enquadram num intervalo de  $\pm 5\%$ . Esta análise dá maior sustentabilidade à proposta de utilização do ensaio de resistência à compressão como indicador de qualidade para materiais de fricção.

Uma característica importante do material E que pode estar atrelada à causa do seu descolamento em relação à linha de tendência do conjunto de dados mostrados na Figura 5.36 é que o mesmo possui em sua composição uma alta fração de componentes elastoméricos com



características viscoelásticas e baixo módulo de Young ( $v \approx 36\%$ ) dentre os mecanismos de tenacificação apontados na Tabela 4.1. Como já investigado anteriormente [Casaril, 2009], a presença de grandes frações de componentes com estas características influenciam propriedades mecânicas dos materiais compósitos de fricção de modo peculiar, ocasionando decaimento de padrão exponencial conforme a fração volumétrica dos mesmos é aumentada na composição, diferentemente de componentes com comportamento elástico/plástico e alto módulo de Young, tais como metais e cerâmicos.

## 6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho de doutorado versando sobre a tenacidade à fratura de materiais compósitos de fricção e sua utilização como requisito de projeto de componentes para a indústria automobilística permitem concluir:

➤ Foi possível desenvolver um método para medição da tenacidade à fratura para materiais de fricção, através do teste de flexão em três pontos. O mesmo foi baseado na norma pertinente, ASTM *D5045-99*, e permitiu a caracterização dos materiais de fricção selecionados no escopo do trabalho.

➤ Foi realizada a análise fractográfica das superfícies de fratura dos materiais testados. Pode-se concluir que os materiais compósitos de fricção possuem uma característica predominantemente frágil. O padrão de comportamento frágil se mantém com o aumento da temperatura, da mesma forma que o padrão das superfícies de fratura. A análise realizada através de microscopia eletrônica de varredura mostra que as características da superfície de fratura de materiais de fricção é altamente influenciada, como esperado, pela geometria dos componentes, como fibras e granulados presentes na composição dos mesmos. A presença de fases dispersas na matriz do material compósito contribui para tenacificação do mesmo, pois modifica a direção e aumenta o caminho de propagação das trincas. Estas observações corroboram com outros trabalhos semelhantes publicados na literatura.

➤ No que se refere à caracterização da tenacidade à fratura dos materiais compósitos de fricção, foi possível medir esta propriedade ( $K_{IC}$ ) dos materiais selecionados no escopo do trabalho, através do método proposto, baseado na norma ASTM *D5045-99*. Os resultados mostraram que os cinco materiais analisados apresentam valores de tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ) entre  $0,97 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  e  $2,12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  a temperatura ambiente ( $22^\circ\text{C}$ ), que são coerentes com valores publicados na literatura para materiais de matriz de resina fenólica, cujo  $K_{IC}$  é da ordem de  $1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ . Os resultados quantitativos de  $K_{IC}$  mostram que esta propriedade é maior para os materiais compósitos do que para a resina fenólica pura, corroborando com as conclusões das análises fractográficas sobre efeito tenacificador das fases dispersas;

➤ Foi realizada a caracterização do  $K_{IC}$  dos materiais de fricção em função da temperatura, no intervalo entre  $22^\circ\text{C}$  e  $325^\circ\text{C}$ . Foi observado que esta propriedade, no caso dos materiais compósitos de fricção decai com o aumento da temperatura, ao contrário do que ocorre com a tenacidade à fratura dos metais. Isto se deve ao fato de que as características mecânicas dos termorrígidos estão fundamentalmente associadas à resistência das ligações

cruzadas, as quais são enfraquecidas por ação de carregamento mecânico e exposição à temperatura;

➤ A utilização da metodologia probabilística de análise de falha proposta por Weibull na análise de resultados de tenacidade à fratura permitiu determinar o valor de  $K_{IC}$  dos materiais com base na probabilidade de falha admitida para o componente. A interpretação dos dados utilizando a abordagem probabilística suporta o gerenciamento dos riscos técnicos do projeto, a determinação do coeficiente de segurança, e auxilia na otimização do custo/benefício do mesmo. Do ponto de vista de projeto, esta metodologia de análise fortalece a precisão da tomada de decisão no que concerne à seleção de protótipos para testes de longa duração, incrementando a produtividade e a taxa de sucesso do mesmo;

➤ Através da investigação do comportamento da tenacidade à fratura dos materiais de fricção em função da temperatura, foi observado que os mesmos apresentam decaimento exponencial, que pode ser equacionado. A equação que rege o comportamento do  $K_{IC}$  dos materiais de fricção em função da temperatura possui duas constantes, sendo que o valor da primeira é comum a todos os materiais compósitos avaliados e atribuída à natureza dos mesmos, e o valor da segunda é inerente às particularidades da composição de cada material de fricção em si. O equacionamento do  $K_{IC}$  de um material de fricção em função da temperatura é funcional a partir do momento em que permite estimar com boa precisão o comportamento desta característica do protótipo avaliado em determinadas condições de serviço, com base numa população reduzida de dados, consolidando-se assim com uma importante ferramenta de P&D com aplicação direta na indústria;

➤ Foi realizada a análise de esforços críticos em um sistema de freio utilizando uma ferramenta de elementos finitos. A análise da tenacidade à fratura dos materiais de fricção em função da temperatura foi desdobrada em tamanhos críticos de trinca admissíveis no componente em função dos esforços de frenagem. A combinação de ambas as análises permite julgar de forma contundente o risco de falha de um componente de material de fricção em determinadas condições de serviço;

➤ Foi observada uma forte correlação entre tenacidade à fratura e a resistência à compressão dos materiais de fricção. O  $K_{IC}$  e a resistência à compressão dos materiais A, B, C e D apresentaram uma concordância bastante acurada, sendo que os seus resultados se enquadram no intervalo de 5% em relação à linha de tendência da população de dados dos mesmos. O material E, no entanto, apresenta um comportamento distinto dos demais materiais, possivelmente devido à alta fração de viscoelásticos na sua composição, da ordem de 36%. A correlação entre  $K_{IC}$  e resistência à compressão é fundamental para implementação

do controle de qualidade da tenacidade à fratura no sistema produtivo da indústria, visto que a resistência à compressão é de fácil execução, e também porque representa a garantia de que os produtos adequadamente projetados terão sua performance mantida ao longo do histórico da produção, embasando da forma mais fundamental a manutenção da competitividade do produto no mercado.

## 7. SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE

Os resultados obtidos neste trabalho permitem sugerir os seguintes temas para trabalhos futuros, complementares ao estudo da tenacidade à fratura:

➤ Investigar a influência das características e propriedades das matérias-primas sobre a tenacidade à fratura dos materiais compósitos, como tamanho de partícula, módulo de elasticidade, etc., englobando aspectos como empacotamento e continuidade efetiva da matriz;

➤ Investigar a influência dos parâmetros do processo de fabricação sobre a tenacidade à fratura dos materiais compósitos, sendo os principais a pressão de compactação e temperatura de moldagem;

➤ Enfatizar a análise de componentes cuja influência sobre a tenacidade à fratura pode ser confirmada e quantificada.

Do ponto de vista de utilização deste trabalho como ferramenta de projeto de materiais de fricção, os seguintes estudos complementares são sugeridos:

➤ Complementar este estudo através da investigação do processo de formação das trincas, como a fadiga termomecânica;

➤ Estender a caracterização da tenacidade à fratura aos demais materiais de fricção do portfólio, para formação de uma base de dados efetiva como ferramenta de novos projetos;

➤ Mapear, com auxílio de ferramenta de simulação de esforços termo-mecânicos, os veículos e seus sistemas de freio, de acordo com o regime de serviço típico para cada vocação, a fim de aumentar a precisão na seleção de materiais para determinada aplicação;

## 8. PUBLICAÇÕES GERADAS

Casaril, A., Pereira, C. H. S., Bergmann, C. P., Al-Qureshi, H. A.; **Caracterização da tenacidade à fratura de materiais de fricção e critérios de projetos**; Exacta, São Paulo, vol 9 nº 3 pg 157-168; 2011.

Casaril, A., Pereira, C. H. S., Spiller, A. L., Bergmann, C. P., Varante, P. E. D., Al-Qureshi, H. A.; **Fracture Toughness Characterization as a Criterion for Selection of Friction Materials**; International Journal of Science and Advanced Technology, ISSN 2221-8386, Vol 2, nº 1, 2012.

Casaril, A.; da Silva, J. G. P.; Pereira, C. H. S.; Bergmann, C. P.; Al-Qureshi, H. A.; **Modeling the Elastic Modulus of Hot-Pressed Fiber Reinforced Composite**, International Journal of Science and Advanced Technology, ISSN 2221-8386, 2013.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adachi, T.; Araki, W.; Nakahara, T.; Yamaji, A.; Gamou, M.; **Fracture Toughness of Silica Particulate Filled Epoxy Composite**; Journal of Applied Polymer Science, Vol 86, pgs 2261-2265, 2002.

Adachi, T.; Araki, W.; Higuchi, M.; **Mixture Law Including Particle-Size Effect on Fracture Toughness of Nano and Micro-Spherical Particle Filled Composites**; Acta Mech, Vol 214, pgs 61-69; 2010.

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

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

Ashby, M. F.; **Materials Selection in Mechanical Design**; 3rd Edition, Butterworth-Heinemann; 2005.

ASM International; **Engineered Materials Handbook: Composites**; 3<sup>rd</sup> printing; ASM International; 1989.

ASTM D5045-99, **Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials**, ASTM International.

ASTM D695-02, **Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics**, ASTM International.

Barsoum M., **Fundamentals of Ceramics**, 1st Edition, McGraw-Hill, NY, 1997.

Brown, H. R.; **A Model for Brittle-Ductile Transitions in Polymers**; Journal of Materials Science, Vol 17, pgs 469-476, 1982.

Cardona, F., Kin-Tak, A. L., Fedrigo, J.: **Novel Phenolic Resins with Improved Mechanical and Toughness Properties**; Journal of Applied Polymer Science, vol 123, pgs 2131-2139, 2012.

Casari, A.; **Modelagem Matemática e Avaliação Experimental do Módulo de Elasticidade de Materiais Compósitos Particulados de Matriz Fenólica Para Uso Como Material de Fricção**, Dissertação de Mestrado; Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 56 pgs; 2009.

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

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

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

Castellani, L.; Frassine, R.; Pavan, A.; Rink, M.; **Rate and Temperature Dependence of Fracture Toughness in ABS Resins in Relation to Dispersed-Phase Structure**; Polymer, Vol 37, N° 8, pgs 1329-1338, 1996.

Day, A.J.; **Drum Brake Interface Pressure Distributions**; Journal of Automobile Engineering; Vol 205, pgs 127-136, 1991.

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

Fu, S. Y.; Feng, X. Q.; Lauke, B.; Mai, Y. W.; **Effects of Particle Size, Particle/Matrix Interface Adhesion and Particle Loading on Mechanical Properties of Particulate Polymer Composites**; Composites: Part B; Vol 39, pgs 933-961, 2008;

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

Green, D. J.; Nicholson, P. S.; Embury, J. D.; **Fracture of a Brittle Particulate Composite**; Journal of Materials Science, Vol 14, pgs 1413-1420; 1979.

Griffith, A. A.; **The phenomenon of rupture and flow in solids**; Philosophical Transactions of the Royal Society, Vol. A221, pgs 163-198; 1920.

Hertzberg, R.W., **Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials**, 4th Edition, John Wiley & Sons, Inc, NY; 1996.

Hussain, M.; Nakahira, A.; Nishijima, S.; Niihara, K.; **Fracture Behavior and Fracture Toughness of particulate Filled Epoxy Composites**; Materials Letters, Vol 27, pgs 21-25, 1996.



Koh, S. W.; Kim, J. K.; Mai, Y. W.; **Fracture Toughness and Failure Mechanisms in Silica-Filled Epoxy Resin Composites: Effects of Temperature and Loading Rate**; Polymer, Vol 34, Nº 16, pgs 3446-3455; 1993.

Lauke, B.; Fu, S. Y.; **Aspects of Fracture Toughness Modelling of Particle Filled Polymer Composites**; Composites: Part B, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.07.021>, aceito em Julho/2012.

Lauke, B.; **On the Effect of Particle Size on Fracture Toughness of Polymer Composites**; Composites Science and Technology, Vol 68, pgs 3365-3372, 2008.

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

Liu, H. Y.; Wang, G. T.; Mai, Y. W.; Zeng, Y.; **On Fracture Toughness of Nano-Particle Modified Epoxy**; Composites: Part B, Vol 42, pgs 2170-2175; 2011.

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

Pal, R.; **Modeling Viscoelastic Behavior of Particulate Composites with High Volume Fraction of Filler**; Materials Science and Engineering; Vol 412, pgs. 71-77; 2005.

Qiao, Y.; **Fracture Toughness of Composite Materials Reinforced by Debondable Particles**; Scripta Materialia, Vol 49, pgs 491-496, 2003.

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

Rubinstein, A. A.; Wang, P.; **The Fracture Toughness of a Particulate Reinforced Brittle Matrix**; Journal of Mechanical and Physical Solids, Vol 46, Nº 7, pgs 1139-1154; 1998.

Silveira, C. C. ; Fredel, M. C. ; Gomes, E. R. ; Casaril, A. ; Soares, M. R. ; Al-Qureshi, H. A.; **Weibull Distribution analysis applied to phenolic resin- Poster-E580**. In: V- Encontro da SBPMat, Brazilian MRS Meeting, 2006, Florianópolis.

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

Song, M.; Huang, B.; **Effects of Particle Size on Fracture Toughness of SiCp/Al Alloy Metal Matrix Composites**; Materials Science and Engineering A, Vol 488, pgs 601-607, 2008.

Tyberg, C. S.; Sankarapandian, M.; Bears, K.; Shih, P.; Loos, A. C.; Dillard, D.; McGrath, J. E.; Riffle, J. S.; Sorathia, U.; **Tough, void-free, flame retardant phenolic matrix materials**; Construction and Building Materials, Vol 13, pgs 343-353, 1999.

Verma, A. P.; **Effective Fracture Toughness of Particulate Composites**; IE Journal, Vol 85, pgs 59-64; 2004.

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

Zheng, Y.; Jingfeng, L.; Limin, Y.; Yalin, Y.; Zhiqiang, S.; Xiaonong, C.; **Synthesis and Properties of nano Carboxylic Scrylonitrile Butadiene Rubber Latex Toughened Phenolic Resinn**; Journal of Applied Polymer Science; Vol. 123, pgs 1079-1084, 2012.

Zok, F. W.; Levi, C. G.; **Mechanical Properties of Porous-Matrix Ceramic Composites**; Advanced Engineering Materials, Vol 3, N° 1, pgs 15-23, 2001.