

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS – PPGE3M**

ANDRÉ LUÍS SPILLER

**MODELAMENTO DA PROPAGAÇÃO DE TRINCA: APLICADO A COMPÓSITO
PARTICULADO DE MATRIZ TERMOFIXA EMPREGADO COMO GUARNIÇÃO
DE FREIO**

**PORTO ALEGRE
2012**

André Luís Spiller

Modelamento da propagação de trinca: aplicado a compósito particulado de matriz termofixa empregado como guarnição de freio

Trabalho realizado no Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia da UFRGS, através do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Orientador: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Porto Alegre
2012

(Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária
Hellen Christina Ferreira – CRB 14/1255)

S756m Spiller, André Luís.

Modelamento da propagação de trinca: aplicado a compósito particulado de matriz termofixa empregado como guarnição de freio / André Luís Spiller. – Porto Alegre: 2012.
92 p.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais.

1. Fadiga. Compósitos particulados. Modelo matemático. Material de fricção. I. Título.

CDU: 620.17

André Luís Spiller

Modelamento da propagação de trinca: aplicado a compósito particulado de matriz termofixa empregado como guarnição de freio

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais como requisito final para a obtenção do título de Mestre em Engenharia da Escola de engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sendo submetido à Banca Examinadora e considerado aprovado em 28/02/2012.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

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

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Guilherme Mariz de Oliveira Barra

EMC / PGMAT / UFSC

Prof. Dra. Juliane Vicenzi

Pós-Doutorado / UFRGS

Prof. Dra. Liane Roldo

DEMAT / PGDesign / UFRGS

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Coordenador do PPG3M

DEDICATÓRIA

À minha esposa e sempre companheira, Hellen Christina Ferreira.
Aos meus pais, Herocilde e Luiz.

AGRADECIMENTOS

Expresso aqui meus sinceros agradecimentos a todos que colaboraram direta ou indiretamente com a realização do presente trabalho. Inicialmente ao orientador, Professor Carlos P. Bergmann pela incontestável colaboração que tornou viável a condução deste trabalho, através do qual estendo os agradecimentos ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Ao co-orientador e amigo, Professor Hazim Ali Al-Qureshi, pelo empréstimo de seu vasto conhecimento e pelo constante apoio e incentivo profissional e pessoal.

Agradeço à Fras-le S.A. pela oportunidade e suporte para a condução do presente trabalho como parte do programa de pesquisa e desenvolvimento de produtos mantido pela empresa. Ao Sr. Paulo E. D. Varante, gerente do departamento de Engenharia do Produto, Pesquisa e Desenvolvimento da Fras-le S.A., através do qual estendo estes agradecimentos à toda equipe dos Laboratórios Físico, Químico e Piloto que colaboraram com a fabricação de amostras e realização de testes. Aos colegas engenheiros Alexandre Casaril e Carlos Henrique Selle Pereira pela inestimável colaboração no desenvolvimento de técnicas, equipamentos e acompanhamentos de testes e análises.

Não menos importante, agradeço aos meus pais, Luiz e Herocilde, por todas as oportunidades e incentivos de uma vida. E finalmente, à minha noiva, Hellen Christina Ferreira, que têm me acompanhado e apoiado em todos os desafios na última década.

Muito obrigado!

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 PROBLEMA DE PESQUISA	21
2.1 OBJETIVO GERAL.....	21
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
3.1 MATERIAIS COMPÓSITOS	23
3.1.1 Materiais compósitos reforçados com fibras.....	25
3.1.2 Materiais compósitos particulados	27
3.2 SISTEMAS DE FREIOS.....	28
3.2.1 Freios a Tambor	30
3.2.2 Freios a Disco	34
3.3 MATERIAIS DE FRICÇÃO.....	36
3.3.1 Matérias-Primas e Funcionalidades.....	38
3.3.1.1 Ligantes	39
3.3.1.2 Atritantes	39
3.3.1.3 Lubrificantes	40
3.3.1.4 Fibras	40
3.3.1.5 Cargas	41
3.4 FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO – K	41
3.5 FADIGA	45
3.5.1 Falha por Fadiga em Materiais Metálicos.....	48
3.5.1.1 Iniciação da Trinca (Estágio I)	48
3.5.1.2 Propagação da Trinca (Estágio II)	49
3.5.1.3 Fratura Catastrófica (Estágio III).....	50
3.5.2 Falha por Fadiga em Materiais Compósitos	51
3.5.3 Lei de Paris para Fadiga	55
3.5.3.1 Testes de Fadiga e Determinação dos parâmetros de Paris m e A	56
3.5.3.2 Exemplo da determinação dos parâmetros de Paris m e A para materiais compósitos particulados.....	59
4 MODELO MATEMÁTICO	63
5 MATERIAIS E MÉTODOS	67

5.1 SELEÇÃO DO COMPÓSITO A ESTUDAR.....	68
5.2 MATERIAIS E CARACTERIZAÇÃO	70
5.3 DETERMINAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA - K_{IC}	73
5.4 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PARIS A e m	75
5.5 MÉTODO APLICADO E MODELO MATEMÁTICO	76
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	79
6.1 TENACIDADE À FRATURA – K_{IC}	79
6.2 RESULTADOS DA PREVISÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO EM FADIGA PARA O MATERIAL DE FRICÇÃO ANALISADO.....	80
7 CONCLUSÕES.....	84
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	86
REFERÊNCIAS	87
APÊNDICE I – RESULTADOS DE TENACIDADE À FRATURA.....	90
ANEXO I – RESULTADO DE DISTRIBUIÇÃO	91

RESUMO

O presente trabalho apresenta um método baseado nos conceitos da mecânica da fratura linear elástica para a previsão do desempenho em fadiga de materiais compósitos particulados. Este método deriva de uma sequência matemática para a realização das previsões de forma incremental, considerando a pré-existência de defeitos intrínsecos ao material advindos de seus componentes ou processo de fabricação, o que facilita a visualização da propagação dos defeitos. Este método possibilita também a previsão da vida residual em fadiga para componentes que apresentem defeitos já no estágio de propagação e a estimativa da amplitude máxima da tensão aplicada para que o componente apresente uma durabilidade mínima desejada em fadiga. A utilização do método em questão tem como mérito a possibilidade de redução expressiva no tempo dispendido e esforços de desenvolvimento de produtos desenvolvidos sob o conceito de materiais compósitos particulados, colaborando para a redução dos custos de projeto e aumento da competitividade destes produtos. Para viabilizar a aplicação do método proposto é também utilizada uma metodologia baseada em normas internacionais para a determinação da tenacidade à fratura de materiais compósitos particulados empregados como materiais de fricção. Para a demonstração da aplicação do método proposto utilizou-se como exemplo as propriedades de um material compósito aplicado como guarnição de freios a tambor de automóveis de passeio e dados do comportamento em fadiga de materiais compósitos particulados disponíveis na literatura apresentados por Antunes (2002). Os resultados mostram que os valores de tenacidade à fratura medidos para o material de estudo apresentam pouca variação entre si e, por obedecerem aos requisitos da norma adotada e serem compatíveis com os valores desta propriedade disponíveis na literatura para resinas termorrígidas e outros materiais compósitos, podem ser considerados representativos dos valores reais de tenacidade à fratura do material. Da mesma forma, as previsões geradas aplicando-se as equações descritas pelo modelo desenvolvido apresentam tendências similares aos dados encontrados na literatura relacionados a avaliações do comportamento em fadiga de materiais compósitos de matriz termorrígida reforçados com partículas de material inorgânico e, portanto, são considerados válidos.

Palavras-chave: Fadiga. Compósitos particulados. Modelo matemático. Materiais de fricção.

ABSTRACT

The present work shows a method based on the concepts of linear elastic fracture mechanics to predict the fatigue performance of particulate composites materials. This method is derived from a mathematical sequence to perform the predictions incrementally which makes easier the visualization of the flaw propagation, considering the pre-existence of intrinsic defects in material arising from its components or the manufacturing process. This method also enables the prediction of residual fatigue life of components that already have flaws at the propagation stage and the estimation of the maximum amplitude of stress applied to the component to provide a minimum desired fatigue life. The use of this method has the merit of making possible a significant reduction of the development efforts and time spent for develop products designed under the concept of particulate composites, helping to reduce the project cost and increasing the competitiveness of these products. To enable the use of the proposed method, a methodology based on international standards for the determination of fracture toughness, K_{IC} , of particulate composites applied as friction materials is also presented. To demonstrate the proposed method, the properties of a friction material used as drum brake lining for automobiles and data of fatigue behavior of particulate composites available in the literature were used. The results shown that the K_{IC} values measured for the studied material presented a small variation and are compatible with fracture toughness values available in the literature for thermoset resins and other composite materials. Therefore, as the test met the adopted standard requirements, these values can be considered representative of the material true fracture toughness. Similarly, the predictions generated by the application of the developed method equations showed similar trends compared to literature data related to fatigue behavior evaluations of thermoset matrix composites reinforced with inorganic particulate material, therefore, are considered valid.

Key-words: Fatigue. Particulate composites. Mathematical modeling. Friction materials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de sistema de freio hidráulico utilizado em veículos de passeio.....	30
Figura 2 - Representação de sistema de freio a tambor utilizado em automóveis de passeio e utilitários leves.....	31
Figura 3 – Freio S-cam aplicado em veículos pesados.....	32
Figura 4 - Diagrama de forças utilizado para cálculo da distribuição de pressão e torque gerado para sapata primária em freio a tambor .	33
Figura 5 – Representação de sistema de freio a disco.....	35
Figura 6 - Modos de abertura de trincas em sólidos elásticos.....	42
Figura 7 - Representação de trinca central ao longo de toda a espessura em placa plana de dimensões infinitas submetidas a carregamento no modo I.....	43
Figura 8 - Modelo de propagação de trinca sob carregamento cíclico.....	50
Figura 9 - Progressão dos modos de falha em um compósito termofixo reforçado com fibras curtas.....	53
Figura 10 - Representação de uma curva típica da taxa de propagação de trinca em fadiga em função da variação do fator de intensidade de tensão de materiais metálicos.....	56
Figura 11 - Exemplo de curva relacionando a taxa de crescimento da trinca em função da variação do fator de intensidade de tensão para o estágio II da propagação da trinca.....	58
Figura 12 - Exemplo de linearização da curva apresentada na Figura 4.7 para determinação dos parâmetros de Paris, A e m	59
Figura 13 - Amostra com furo central e trincas simétricas de canto.....	61
Figura 14 - Curvas $da/dN-\Delta K$ obtidas experimentalmente para resina PMMA e materiais compósitos de matriz PMMA reforçados com sílica.....	62
Figura 15 – Representação de sistema de dobramento puro para corpo-de-prova com entalhe ou trinca sugerido para a realização dos testes de fadiga.....	63
Figura 16 - Diagrama esquemático da metodologia adotada para o presente trabalho.....	67
Figura 17 - Exemplos de trincas em lonas de freio a tambor indicadas pelas setas.....	69
Figura 18 - Exemplos de trincas em lonas de freio a tambor indicadas pelas setas. Trincas diversas em guarnições após teste de simulação de uso severo em bancada dinamométrica. .	69

Figura 19 - Imagem de microscopia óptica do material selecionado para estudo. As setas indicam partículas de materiais orgânicos utilizados como lubrificantes para controle do atrito. Aumento 10x.....	70
Figura 20 - Imagem de microscopia óptica do material selecionado para estudo. As setas indicam partículas de materiais orgânicos utilizados como lubrificantes para controle do atrito. Aumento 20x.....	71
Figura 21 - Corpo-de-prova para determinação de K_{IC} em flexão a três pontos (ASTM D5045-99). 73	73
Figura 22 - Corpo-de-prova utilizado nos testes para determinação de K_{IC}	73
Figura 23 - Exemplo de entalhe criado para determinação da tenacidade à fratura; imagem obtida utilizando microscópio estereoscópio, aumento 6x.....	74
Figura 24 – Relação entre tensão aplicada e tamanho crítico de trinca para fratura do material estudado.	80
Figura 25 - Diagrama S-N teórico para o material analisado gerado através da integração total do número de ciclos considerando os limites $a_i = 1,0$ mm e a_c conforme Figura 16.	81
Figura 26 - Efeito do tamanho de trinca inicial no número total de ciclos até a falha.	82
Figura 27 - Previsão de tensão máxima aplicada vs tamanho inicial de trinca para tempo de propagação da trinca equivalentes a 10^4 , 10^5 e 10^6 ciclos.	82

LISTA DE TABELAS

Tabela.1 - Propriedades físicas das principais fibras utilizadas para fabricação de materiais compósitos	26
Tabela 2 - Resultados de tenacidade à fratura de diversos materiais.	44
Tabela 3 - Características químicas e físicas dos materiais.....	60
Tabela 4 - Propriedades mecânicas dos materiais.	60
Tabela 5 - Resultados dos Parâmetros de Paris referentes ao trabalho de Antunes et al. e suas respectivas médias aritméticas.	62
Tabela 6 - Composição do material estudado.....	71
Tabela 7 - Propriedades físicas do material estudado.....	72
Tabela 8 - Resultado de tenacidade à fratura para o material estudado. Média aritmética e desvio padrão dos trinta corpos-de-prova testados.....	79

LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta K = K_{m\acute{a}x} - K_{m\acute{i}n}$ = variação do fator de intensidade de tensão;

$^{\circ}\text{C}$ = grau Celsius;

μm = micrometro;

a = comprimento da trinca;

A = parâmetros de Paris para descrever a curva de fadiga de materiais no diagrama $da/dN \times \Delta K$;

a_0 = comprimento inicial da trinca presente em um determinado material como resultado das características intrínsecas do próprio material ou de seu processo de fabricação;

a_c = comprimento crítico da trinca;

a_{i+1} = comprimento da trinca no instante “ i ” mais ΔN ciclos de fadiga

a_i = comprimento da trinca no instante “ i ” antes de um ciclo de tensão em fadiga;

a_M = comprimento médio da trinca para cada ciclo de fadiga;

B = espessura de corpo-de-prova para ensaio de tenacidade à fratura

b_1 = parâmetro dimensional de freio a tambor;

b_2 = parâmetro dimensional de freio a tambor;

b_3 = parâmetro dimensional de freio a tambor;

c = largura de corpo-de-prova para ensaio de tenacidade à fratura;

cm = centímetro;

da = variação infinitesimal do comprimento da trinca em fadiga;

dN = variação infinitesimal do número de ciclos de fadiga;

E_c = módulo de Young em compressão;

E_f = módulo de Young em flexão;

F_a = força de acionamento;

F_d = força de *drag* ou força de araste;

F_n = força normal;

GPa = gigapascal;

h = parâmetro dimensional de freio a tambor;

HRR = dureza Rockwell escala R;

K = fator de intensidade de tensão;

K_C = fator de intensidade de tensão crítico;

kg = quilograma;

K_I = fator de intensidade de tensão para o modo I de carregamento;

K_{IC} = tenacidade à fratura; fator de intensidade de tensão crítico para o modo I de carregamento;

$K_{máx}$ = fator de intensidade de tensão máximo;

$K_{mín}$ = fator de intensidade de tensão mínimo;

LEFM = linear elastic fracture mechanics ou mecânica da fratura linear elástica;

m = metro;

M = momento fletor;

m = parâmetros de Paris para descrever a curva de fadiga de materiais no diagrama da/dN x ΔK ;

mm = milímetro;

MPa = megapascal;

N = número de ciclos em fadiga;

NBR = borracha nitrilo-butadieno;

N_f = número total de ciclos de fadiga até o momento da falha do componente;

Pa = Pascal;

P_c = propriedade genérica de um compósito;

P_i = propriedade genérica do componente i de um compósito;

r = parâmetro dimensional de freio a tambor;

SBR = borracha estireno-butadieno;

SMC = Sheet Moulding Compounds;

SN = diagrama relacionando a tensão aplicada (*stress*) e o número de ciclos até a falha para um componente submetido à fadiga;

t = espessura;

W = largura;

Y = fator de forma para cálculo do fator de intensidade de tensão;

Y_c = fator de forma para cálculo do fator de intensidade de tensão de material compósito particulado;

α = parâmetro dimensional de freio a tambor;

Δa = incremento provocado pelo ciclo de tensão em fadiga aplicado;

ΔN = variação do número de ciclos em fadiga;

ΔN_{i+1} = variação do número de ciclos de fadiga no instante “ i ” mais a variação Δa no comprimento da trinca;

ΔN_{if} = variação do número de ciclos em fadiga necessária para aumentar em Δa o comprimento da trinca partindo de um comprimento inicial a_i para uma carga aplicada $\Delta \sigma$;

$\Delta \sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ = variação da tensão aplicada;

v_i = fração volumétrica do componente i de um compósito;

π = número PI [3,1415...];

σ = tensão;

σ_{app} = tensão aplicada;

$\sigma_{c, máx.}$ = resistência máxima em compressão;

$\sigma_{f, máx.}$ = resistência máxima em flexão;

σ_{max} = tensão máxima;

σ_{min} = tensão mínima;

1 INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, a expansão dos negócios internacionais e a abertura dos mercados tem acarretado uma crescente necessidade de melhoria da qualidade e otimização dos custos dos produtos industriais para garantir a competitividade e sustentabilidade das organizações produtoras.

A indústria automobilística é um dos segmentos industriais mais importantes da economia mundial e reflete intensamente as imposições do fenômeno da globalização. Além do design, aspectos de qualidade, conforto, confiabilidade, eficiência energética e o impacto ambiental provocado pelos veículos são fundamentais para assegurar o bom desempenho das empresas fabricantes.

Por outro lado, a crescente frota de veículos automotores em uso e a constante demanda por produtos de menor preço obrigam os designers e engenheiros a desenvolver ferramentas de projeto mais eficientes e eficazes, que possam prever as respostas dos componentes dos veículos perante as mais variadas condições de uso, garantindo custos reduzidos de projeto, fabricação e manutenção sem o comprometimento da confiabilidade do produto e a segurança dos usuários finais, além de colaborar para o desenvolvimento de produtos mais adequados sob o ponto de vista ecológico.

Fundamental na manutenção do controle do movimento e consequente garantia da segurança dos condutores e passageiros, o sistema de freios dos automóveis não foge ao contexto geral e integra o cenário de constante solicitação por aumento de eficiência e qualidade com a exigência da manutenção de custos de fabricação e comercialização competitivos. Portanto, os projetistas de componentes dos sistemas de freios automotivos são constantemente desafiados a desenvolver produtos mais eficientes em períodos mais curtos de tempo. Neste contexto, a disponibilidade de ferramentas que auxiliem na previsão do desempenho dos componentes projetados, reduzindo a demanda por testes em protótipos ou na configuração final, pode representar uma grande vantagem competitiva para indústria.

Desempenhando uma função primordial no sistema de freio, as guarnições, lonas e pastilhas de freio, são desenvolvidas e aperfeiçoadas basicamente nos centros de desenvolvimento especializados mantidos pelas grandes empresas produtoras e são raros os trabalhos relacionados a estes produtos conduzidos por centros de pesquisa e desenvolvimento independentes. Desta forma, a bibliografia relacionada ao tema “materiais de fricção” é

escassa e a maior parte do conhecimento gerado fica restrita ao domínio das empresas produtoras destes materiais como forma de proteção de seus diferenciais competitivos. De fato, este é um cenário típico da indústria automobilística, desenvolvido ao longo do último século criado pela constante solicitação de aperfeiçoamento dos produtos e motivado pela alta complexidade associada ao desenvolvimento de materiais compósitos para aplicação como materiais de fricção capazes de atender aos variados requisitos de projeto (NICHOLSON, 1995).

O presente trabalho trata do desenvolvimento de um método para previsão do comportamento de materiais compósitos particulados quanto ao efeito da aplicação de esforços cíclicos. Como demonstração da aplicabilidade do método são utilizadas as propriedades de um material de fricção para guarnições de freios de automóveis que são tipicamente acionados consecutivas vezes por períodos reduzidos de tempo. Este método tem por objetivo prever o comportamento de materiais compósitos particulados, colaborando para o aperfeiçoamento do processo de desenvolvimento de novos materiais, reduzindo o tempo e investimento gastos em testes físicos realizados em protótipos.

Devido à complexidade dos requisitos técnicos e econômicos associados à aplicação em veículos automotores, a grande maioria dos materiais de fricção são desenvolvidos seguindo o conceito de materiais compósitos particulados. Estes materiais contam frequentemente com mais de quinze matérias-primas em sua composição, empregados na forma de pós, grânulos ou fibras, dentre as quais se destacam óxidos metálicos, silicatos, grafites, coques, metais, sulfetos e as fibras orgânicas e inorgânicas. A matriz destes compósitos é quase invariavelmente formada por resinas termorrígidas, com grande destaque para as resinas fenólicas puras ou modificadas, mas também podem ser utilizadas resinas epóxi, resinas naturais ou a incorporação de elastômeros como artifício para a formação de matrizes com características físicas ou de processamento específicas (NICHOLSON, 1995; CASARIL, 2009).

Em uso, os materiais de fricção precisam atender requisitos relacionados à eficiência de frenagem, durabilidade, ruído e vibrações, resistência mecânica e térmica, observando-se ainda que a amplitude térmica associada à aplicação dinâmica dos freios é extremamente alta e as características do material devem apresentar as menores variações possíveis em temperaturas que podem oscilar de valores negativos até valores da ordem de 1000°C em casos extremos como em veículos de competição ou veículos de carga que trafegam em regiões montanhosas. Esta miscelânea de requisitos, associada à complexidade

dos fenômenos tribológicos e à necessidade de manutenção de custos adequadamente baixos, caracteriza a singularidade do desenvolvimento de materiais de fricção e parcialmente justifica a escassez de modelos teóricos e metodologias de projeto disponíveis. Portanto, os projetistas de materiais de fricção são altamente dependentes da experiência adquirida através de processos cíclicos de tentativa e erro cuja produtividade e custo são fortemente contestáveis.

Dentre as diversas propriedades avaliadas em materiais de fricção, as propriedades mecânicas de resistência à fratura e módulo de elasticidade destacam-se pela grande influência exercida sobre os demais requisitos do produto. Todavia, apenas avaliações estáticas das propriedades mecânicas tem se tornado insuficiente para garantir o desempenho adequado das guarnições de freio que são submetidas a esforços cíclicos ao longo de toda sua vida útil.

Diversas estratégias utilizadas no desenvolvimento de materiais de fricção para garantir o atendimento aos requisitos de projetos citados nos parágrafos anteriores que resultam no bom desempenho do de sistemas de freio, como a redução da rigidez do compósito, resultam na redução da resistência mecânica dos materiais. Em geral, avaliações estáticas de resistência à compressão e flexão são facilmente realizáveis e podem ser comparados diretamente com os esforços aplicados pelos freios sobre as guarnições para se determinar se o compósito é capaz de atender às solicitações estáticas da aplicação. Entretanto, não existe uma metodologia de domínio público para avaliar se as guarnições suportam os esforços cíclicos aos quais são submetidos e quais são os limites aceitáveis de tensões impostas ou defeitos intrínsecos do produto para que não ocorra a falha por fadiga.

Uma vasta literatura (PARIS e ERDOGAN, 1963; PARIS, GOMEZ e ANDERSON, 1961; SHUKLA, 2005; LEE et al., 2005) sobre o comportamento em fadiga de materiais metálicos está disponível e também uma variedade de estudos relacionados a materiais compósitos reforçados com fibras longas podem ser encontrados na literatura. Porém, os estudos relacionados ao comportamento em fadiga de materiais compósitos particulados são bastante escassos e, em geral, abordam compósitos com poucas fases de reforço, na maioria dos casos apenas um tipo de fibra, com grande destaque para a fibra de vidro, ou com uma carga mineral como sílica ou carbonato de cálcio. Por estes motivos, identificou-se a necessidade de desenvolvimento de uma metodologia para avaliação do comportamento em fadiga de materiais compósitos particulados aplicados como materiais de

fricção que, conforme citado anteriormente, contém em geral mais de uma dezena de componentes.

A partir das teorias desenvolvidas por Wöhler (1860) e Paris (1961, 1963) relacionadas ao comportamento em fadiga de materiais metálicos, baseados nos conceitos da mecânica da fratura linear elástica, foi desenvolvida uma sequência matemática para a determinação do comportamento de materiais de fricção submetidos a fadiga. A metodologia adotará uma abordagem incremental que pode ser aplicada para a previsão da vida em fadiga do compósito considerando a presença de defeitos intrínsecos ao processo de fabricação, a vida residual do componente caso seja constatada a presença de um defeito durante o uso e o nível de tensão máxima admissível para que o componente atinja uma durabilidade projetada.

Para viabilizar a aplicação da metodologia proposta, foi necessária a adaptação de métodos propostos pela norma internacional ASTM D5045-99 para a determinação da tenacidade à fratura, K_{IC} , para materiais compósitos particulados. Esta propriedade é fundamental para a aplicação dos conceitos estabelecidos para os estudos relacionados à fadiga.

Para a verificação da validade da metodologia proposta foram utilizadas as propriedades de um material de fricção aplicado como guarnição de freios a tambor de veículos de passeio que apresenta iniciação e propagação de trincas por fadiga sob condições extremas de aplicação correspondentes a alta carga do veículo e velocidades de escorregamento elevadas entre material de atrito e tambor de freio, além de dados relacionados ao comportamento em fadiga de materiais compósitos particulados disponíveis na literatura (ANTUNES et al., 2002).

Com o método desenvolvido espera-se disponibilizar uma ferramenta eficaz para a previsão do comportamento em fadiga de materiais de fricção, capaz de auxiliar na redução do tempo e custos associados ao desenvolvimento deste tipo de material e também de garantir a correta avaliação da vida residual em fadiga de guarnições de freio, conferindo maior segurança nas avaliações e proporcionando condições para melhoria da competitividade da indústria nacional de materiais de fricção.

2 PROBLEMA DE PESQUISA

A avaliação da propagação de trincas em compósitos particulados é o tema central abordado neste trabalho. A carência de métodos de avaliação do desempenho em fadiga para materiais compósitos particulados de domínio público constitui o principal motivador para o desenvolvimento da pesquisa realizada.

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem por objetivo disponibilizar um método de avaliação do desempenho de compósitos particulados submetidos a esforços cíclicos de forma a proporcionar ferramentas para a previsão da vida em fadiga e para a análise de falhas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O objetivo do presente trabalho está centrado no desenvolvimento de um método para a previsão do comportamento de materiais compósitos particulados aplicados como guarnições de freios automotivos, materiais de fricção, sob a ótica da mecânica da fratura linear elástica e das teorias de Paris (1961, 1963) relacionadas à propagação de trincas de componentes mecânicos submetidos à fadiga.

Pretende-se introduzir uma abordagem matemática incremental para estudar as relações entre a tenacidade à fratura de materiais de fricção, tensões aplicadas e as características de propagação de trincas de forma a antever situações que possam comprometer o componente de freio avaliado.

Desta forma, o presente estudo pretende definir uma ferramenta capaz de estabelecer:

- O tamanho máximo aceitável de um defeito ou trinca presente na guarnição de freio para prevenir a falha do componente em serviço;
- A taxa de crescimento do tamanho de defeito e o número de ciclos até a falha para um componente submetido à aplicação de esforços cíclicos com magnitude conhecida e cujas dimensões do defeito inicial sejam previamente determinadas;
- A vida residual de um componente em que tenha sido identificada a presença de uma trinca cujas dimensões possam ser mensuradas, ou seja, o número de ciclos necessários para que o defeito observado alcance o tamanho crítico que inviabiliza a continuidade de utilização do componente de freio devido ao risco iminente de falha;

A adoção da abordagem incremental, ou seja, capaz de prever a dimensão e evolução de um defeito para cada ciclo ou número pré-determinado de ciclos de tensão aplicada, tem por objetivo facilitar a visualização da evolução da trinca para todos os casos citados acima e não apenas para as condições críticas que determinam o fim de vida do componente.

O domínio das características e a possibilidade de previsão do desempenho em fadiga de materiais compósitos aplicados como guarnições de freio permite ao designer e ao engenheiro de produto aperfeiçoar a seleção de matérias-primas e as condições de processamento para a produção de guarnições de freio que ofereçam garantia de segurança e a melhor relação custo-benefício para o fabricante, a montadora e o usuário final.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

O constante aperfeiçoamento das tecnologias modernas vem gerando condições de solicitações bastante complexas dos componentes de engenharia, exigindo que os materiais utilizados na fabricação destes componentes atendam a conjuntos de solicitações que muitas vezes não é atendido plenamente por um único material monolítico, seja uma liga metálica, uma cerâmica ou um polímero. Para casos deste gênero, o desenvolvimento de materiais capazes de unir as vantagens de dois ou mais materiais, denominados materiais compósitos, é uma solução naturalmente coerente.

A definição de material compósito permanece passível de discussão, porém, conforme Callister Jr. (2001):

pode-se dizer de forma geral que compósitos são materiais multifásicos, formados pela combinação artificial e macroscópica de dois ou mais materiais, que apresentam proporções significativas das propriedades de cada constituinte, originando uma combinação de propriedades superior às de seus constituintes isoladamente.

O conceito de combinar as propriedades de dois ou mais materiais não pode ser considerado uma ideia recente, pois além da existência na natureza de diversos materiais com construção similar aos compósitos modernos, como a madeira e ossos de animais, registros da utilização de compósitos fabricados pelo homem datam de tempos tão remotos quanto 1800 a.C., quando tijolos de barro reforçados com palha já eram utilizados para a construção de moradias. Os egípcios utilizavam folhas de madeiras coladas entre si para obter estruturas de maior resistência. O concreto reforçado com vergalhões de aço, estrutura há tempos utilizada em larga escala na construção civil, também segue os conceitos de materiais compósitos, onde os vergalhões de aço incrementam a resistência à tração e o próprio concreto garante a resistência à compressão (AL-QURESHI, 1988; CALLISTER JR., 2001).

Nas últimas décadas, principalmente devido ao crescimento das indústrias aeroespacial, subaquática e de transporte, o desenvolvimento de materiais compósitos ganhou grande importância tanto no aspecto científico e tecnológico como econômico. Por exemplo, a busca por materiais estruturais de baixa densidade com elevada resistência mecânica e

química é uma constante para os engenheiros dos setores aeroespacial e automobilístico por razões óbvias de possibilidade do aumento da carga útil e da eficiência energética dos veículos.

O crescimento da aplicação de materiais compósitos também é resultado do aperfeiçoamento dos processos de produção e da cadeia de fornecimento de insumos, principalmente de materiais fibrosos e particulados produzidos ou processados artificialmente.

Quanto à aplicação, as principais vantagens dos compósitos estão relacionadas ao aspecto multifuncional para a satisfação de diversas exigências de projeto simultaneamente. Segundo Silvestre Filho (2001), estas vantagens podem ser resumidas como as possibilidades de: economia significativa de peso em estruturas, frequentemente variando entre 25% e 50% em relação aos materiais metálicos; atendimento a requisito de alta rigidez à torção exigida por vários veículos, principalmente aviões; obtenção de alta resistência à corrosão; apresentar qualidades quanto ao comportamento em fadiga e em relação à fratura; grande tolerância ao impacto; flexibilidade de seleção e alterações no *design* estético do produto com baixos investimentos; obtenção de material com baixa expansão térmica dependendo das escolhas de material da matriz e do tipo das fibras e orientação empregada a estas; manufatura e montagem simplificadas devido à interação entre os componentes, reduzindo as uniões e dispositivos de união.

Aliado às vantagens citadas, as alternativas de otimização de propriedades e custos através de diferentes combinações de matérias-primas com especificações variadas e composição do material em si, materiais compósitos podem fornecer o diferencial competitivo necessário para compensar os custos de fabricação, geralmente maiores que de materiais convencionais, principalmente para aplicações de alta tecnologia e valor agregado como, por exemplo, para os setores aeronáutico e aeroespacial (CASARIL, 2009).

3.1.1 Materiais Compósitos Reforçados com Fibras

A principal função das fibras em materiais compósitos é suportar carga na direção de reforço, ou seja, na direção de alinhamento das fibras, fornecendo, basicamente, resistência e rigidez do compósito (AL-QURESHI, 1988).

O termo fibra foi sugerido pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*) para designar materiais de formato alongado cuja razão entre o comprimento mínimo e a máxima seção transversal (razão de aspecto) seja no mínimo de 10:1, a área da seção transversal máxima seja de $5,1 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ e a seção transversal mínima seja de $2,54 \times 10^{-4} \text{ m}$. O termo filamento refere-se à uma única fibra contínua, enquanto uma fibra retangular com relação largura-espessura de ao menos 4:1 é denominada “fita” ou “tira” (AL-QURESHI, 1988).

O objetivo da utilização de fibras, principalmente fibras longas, em compósitos é que este formato é inerentemente muito mais resistente e rígido que seu correspondente formato não-fibroso para o mesmo material. Portanto, a adição de componentes no formato fibroso desempenha um papel importante no controle da resistência de compósitos estruturais (AL-QURESHI, 1988).

Em geral, fibras não são utilizadas diretamente em aplicações de engenharia devido à sua diminuta área de seção transversal, mas são embutidas em uma matriz ou resina formando uma lâmina de compósito fibroso. O propósito da resina é unir as fibras, transferir carga às fibras e protegê-las contra a influência do ambiente e contra danos no manuseio. A resina usualmente apresenta menor densidade, resistência e rigidez que as fibras (AL-QURESHI, 1988).

Diversos tipos de fibras, orgânicas e inorgânicas, são utilizadas na fabricação de materiais compósitos, entretanto, destacam-se como as mais utilizadas comercialmente as fibras de vidro, fibras de aramida (Kevlar™; Twaron™) e as fibras de carbono. A fibra de vidro do tipo “E” é uma das mais utilizadas comercialmente para propósitos de reforço, principalmente devido à boa relação custo/benefício. Fibras de vidro do tipo “S” são fibras de alta resistência cuja aplicação é restrita à indústria aeroespacial em função do alto custo. A fibra de aramida foi desenvolvida pela Du Pont visando aplicações balísticas, sobretudo para coletes à prova de balas, e é uma fibra polimérica sintética que oferece altos valores de rigidez, resistência à tração e resistência ao impacto. A fibra de carbono tem características

bastante especiais, apresentando elevadas resistência e rigidez em comparação às outras fibras e também em relação a materiais metálicos, além da alta condutividade térmica, e podem dar origem a materiais compósitos com elevadas resistência e rigidez específicas, o que podem ser muito útil para diversos componentes de engenharia (AL-QURESHI, 1988).

As fibras de vidro tipo “E” e “S” diferem entre si basicamente pela composição química que acarreta em características físicas significativamente diferentes. A Tabela 1 apresenta valores de propriedades físicas de algumas fibras que são destaque em aplicações de engenharia e bastante relevantes para a fabricação de materiais compósitos.

Tabela.1 - Propriedades físicas das principais fibras utilizadas para fabricação de materiais compósitos

Tipo de Fibra	Densidade (kg/m ³)	Módulo de Elasticidade em Tração (GPa)	Resistência Máxima à Tração (MPa)
Vidro – E	2,58	72,3	3445
Vidro – S	2,46	86,9	4890
Aramida (Kevlar 49)	1,44	131	3600-4100
Carbono (alto módulo)	1,81	400	3450
Carbono (alta resistência)	1,78	230	3800-4200

Fonte: Al-Qureshi (1988) e Callister Jr.(2001).

A fabricação de laminados utilizando fibras contínuas é a forma mais eficiente de extrair o potencial máximo de resistência mecânica de um material compósito, possibilitando inclusive, projetar o componente com o alinhamento desejado das fibras para a obtenção de anisotropia que favoreça o carregamento do compósito na direção correta em relação às especificações de projeto. Esta concepção garante o melhor desempenho possível do compósito e é bastante aplicada em setores da indústria onde a relação resistência/peso das estruturas precisa ser maximizada, como é o caso das indústrias automobilística, náutica, aeronáutica e aeroespacial.

Apesar da grande vantagem da aplicação de fibras contínuas em termos de resistência e rigidez dos compósitos, em alguns casos existem limitações para a aplicação deste tipo de fibra e fibras descontínuas precisam ser aplicadas, em geral devido a restrições de processos de fabricação ou custo. Com base nos conceitos da micromecânica de materiais compósitos, as fibras descontínuas, também chamadas popularmente de “fibras picadas”, oferecem um menor potencial de reforço estrutural quando comparadas às fibras contínuas.

Para compósitos reforçados com fibras picadas a carga é aplicada diretamente sobre a matriz do material compósito e transferida por deformação através da adesão interfacial para as fibras. Neste caso, a resistência do compósito é função direta do comprimento das fibras (AL-QURESHI, 1988; CASARIL, 2004:2009; CALLISTER JR., 2001).

Materiais compósitos aplicados como materiais de fricção para aplicações automotivas, foco do presente trabalho, como regra utilizam fibras picadas desde a introdução das fibras de asbestos ao setor no início do século XX. Com o passar dos anos e o desenvolvimento de novos materiais de fricção, fibras de vidro, de aramida, de acrílico, de aço, de materiais cerâmicos entre outros, passaram a ser utilizadas, todas no formato de fibras picadas (NICHOLSON, 1995).

Analisando o processo de fabricação de materiais de atrito, que além das fibras, utilizam diversas outras matérias-primas (a maioria particuladas), a homogeneização da composição é um fator de grande relevância e geralmente realizado em equipamentos que não tem a capacidade de trabalhar com fibras longas. O processo de moldagem ou compactação dos materiais de fricção é usualmente realizado sob pressão em cavidades aquecidas e também não oferece alternativas para que as vantagens da utilização de fibras contínuas possam ser aproveitadas. Portanto, as condições de processamento de materiais de fricção restringem a utilização de fibras à variedade de fibras picadas, que embora proporcionem menor reforço estrutural, oferecem melhor relação custo/benefício. Salienta-se também, que a resistência mecânica é apenas um dos diversos requisitos que precisam ser atendidos no projeto de materiais de fricção e muitas vezes não é um dos requisitos mais importantes a serem considerados.

3.1.2 Materiais Compósitos Particulados

São consideradas matérias-primas particuladas aquelas cujas dimensões não atendam os requisitos mínimos de razão de aspecto e de seção transversal para serem consideradas fibras, conforme descrito no item 3.1.1.

Para materiais compósitos, as características de reforço mecânico fornecida são fortemente dependentes das características geométricas de seus constituintes, exceto para a

matriz. As fibras oferecem maior potencial de reforço que as partículas que por sua vez, influenciam de forma mais expressiva a rigidez do compósito que sua resistência.

Todavia, componentes particulados podem ser utilizados com sucesso na otimização de propriedades de natureza diferente da mecânica, por exemplo, propriedades térmicas, elétricas e tribológicas, características importantes para a processabilidade do compósito como a usinabilidade, e características funcionais como dureza superficial e capacidade de amortecimento de vibrações. Algumas destas propriedades têm função primordial no desempenho de materiais de fricção, principalmente as relacionadas a atrito, desgaste e vibrações.

3.2 SISTEMAS DE FREIOS

Entre os diversos sistemas que compõem um veículo automotor o sistema de freios merece grande destaque pela importância vital que desempenha na garantia da segurança no controle do movimento. As funções primordiais do sistema de freios são desacelerar o veículo, manter sua velocidade constante e mantê-lo parado sempre que necessário. Acrescido ao exposto é importante lembrar que este sistema pode afetar diretamente a dirigibilidade do veículo e o conforto dos ocupantes.

É fundamental lembrar que o contato entre o veículo e o solo se dá através das forças geradas pelos pneumáticos. Qualquer força necessária para frenagem, aceleração ou mudança de direção é gerada pela pequena área de contato entre os pneumáticos e a superfície da rodovia, portanto, apenas forças de menor ou igual magnitude ao produto da força normal e do coeficiente de atrito entre pneu e solo podem ser transmitidas para o veículo. Desta forma, mesmo um sistema de freios ideal não pode transmitir mais tração que o fornecido pelos pneus e rodovia. O sistema de freios é altamente exigido e precisa funcionar adequadamente nas mais diversas condições ambientais, de contato pneu-solo e de exigência do veículo (carregamento e velocidade) (LIMPERT, 1999).

A despeito da disponibilidade tecnológica de sistemas de freio que atuam sem contato, através de forças geradas por princípios eletromagnéticos, a maioria absoluta dos veículos automotores rodoviários utiliza unicamente sistemas de freio com base no princípio da fricção. Nestes sistemas, a frenagem ocorre através do contato entre o material

de fricção, fixo à estrutura do veículo por meio de um sistema de atuação, e o rotor, que gira junto com a roda. Um sistema de atuação hidráulico ou pneumático é acionado quando o condutor pressiona o pedal de freio, gerando uma força que faz com que o material de fricção seja pressionado contra o rotor. O atrito entre material de fricção e rotor gera um torque contrário ao movimento do veículo, as energias cinética e potencial do veículo são transformadas em calor que é dissipado pelo sistema de freios para o ambiente, fazendo com que o veículo reduza sua velocidade (LIMPERT, 1999; GILLESPIE, 1992).

Há décadas dois tipos de sistemas de freio dominam o mercado de veículos automotores rodoviários, são denominados conforme a descrição dos componentes que atuam junto às rodas e de fato promovem a frenagem, o material de fricção e o rotor, e diferem grandemente entre si pela própria construção. São o sistema disco/pastilha e o sistema tambor/lona, ou simplesmente freios a disco e freios a tambor. Estas duas construções de freios serão discutidas nos itens seguintes.

A parte do sistema de freio que não está localizada junto às rodas do veículo, mas é responsável por gerar e transmitir a energia utilizada para prover o esforço de frenagem, também é dividida em dois tipos, sistemas hidráulicos e sistemas pneumáticos. No presente trabalho não serão detalhados o funcionamento, vantagens e desvantagens dos sistemas hidráulico e pneumático visto que o foco está nas propriedades do material de atrito, não importando como são geradas as forças aplicadas sobre ele, mas sim suas magnitudes e direções de aplicação.

Como ilustração, a Figura 1 apresenta esquematicamente o sistema de freio hidráulico utilizado para veículos de passeio.

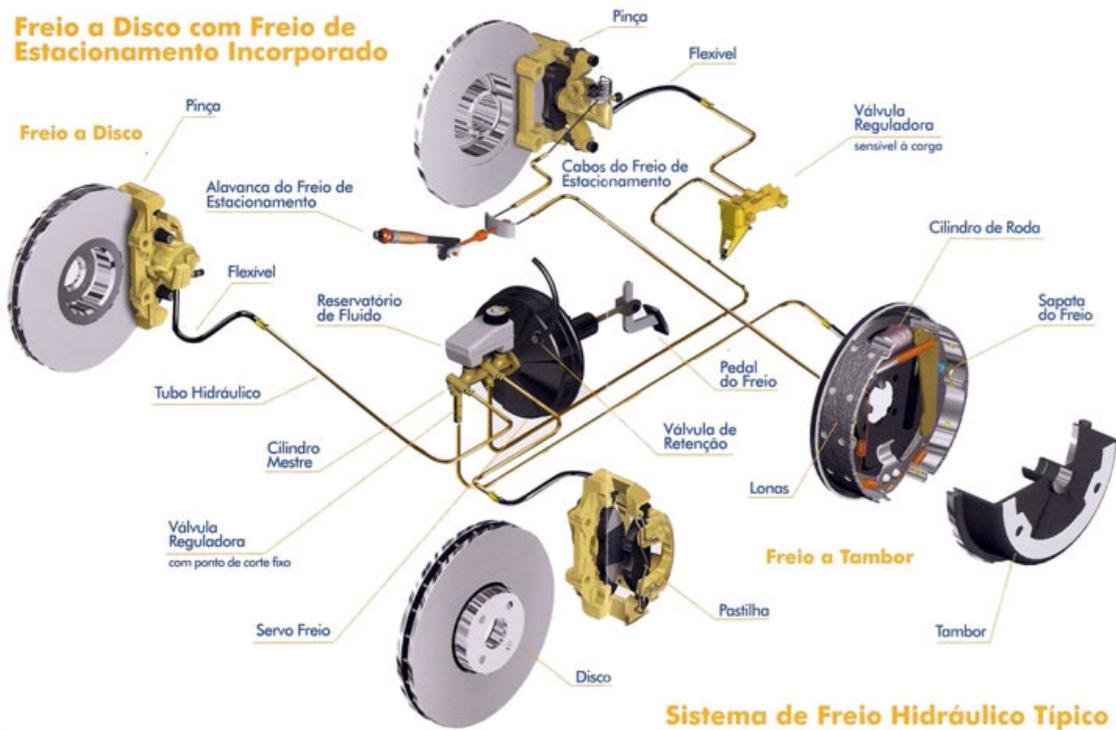


Figura 1 - Representação de sistema de freio hidráulico utilizado em veículos de passeio.
Fonte: CENTRO... (2011).

Obs.: O lado esquerdo do veículo (abaixo) representa sistema típico com freio a disco dianteiro e freio à tambor traseiro; o lado direito do veículo (acima) representa sistema com freio a disco dianteiro e freio a disco traseiro com freio de estacionamento

3.2.1 Freios a Tambor

Sistemas de freios a tambor são sistemas que utilizam a aplicação de esforço radial através de patins de freio, também chamados de sapatas de freio, contra a superfície interna do rotor (tambor) para gerar o esforço de frenagem.

As sapatas de freio são formadas por uma estrutura metálica, geralmente com seção transversal em forma de “T”, revestida com a guarnição de freio, comumente denominada lona de freio. Portanto, a lona de freio é o componente que efetivamente entra em contato com o tambor e é responsável por gerar e transmitir o torque de frenagem através das sapatas para a estrutura do veículo.

Os freios a tambor podem ser subdivididos de acordo com a disposição das sapatas em primária-secundária (*leading-trailing*), duas primárias (*two leading*) ou freios duo servo. Podem ainda ser divididos de acordo com a forma de ancoragem das sapatas em

suporte paralelo, suporte inclinado ou sapatas pivotadas. Os sistemas de atuação das sapatas de freio podem ser agrupados em cilindro de roda hidráulico, cunha, came, fuso e atuação mecânica (LIMPERT, 1999). No presente trabalho não serão detalhadas cada uma das subdivisões dos freios a tambor tendo em vista que o foco do trabalho está direcionado para o desempenho mecânico das lonas de freio.

Para veículos leves e utilitários de pequeno porte, nos quais os freios a tambor são aplicados nos freios traseiros, a construção mais popular utiliza a disposição de sapatas primária-secundária com suporte paralelo e atuação por cilindro de roda hidráulico. Uma representação deste tipo de sistema é apresentada na Figura 2.

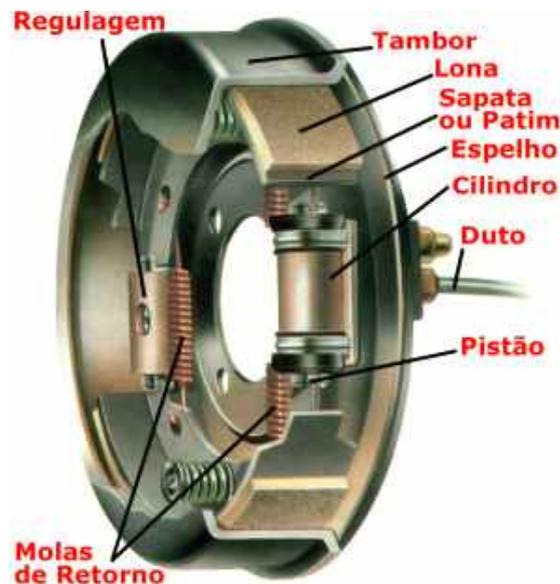


Figura 2 - Representação de sistema de freio a tambor utilizado em automóveis de passeio e utilitários leves. Fonte: Dias (2010).

Veículos comerciais médios e pesados, cujo sistema de freio é usualmente pneumático, utilizam predominantemente a configuração de sapatas primária-secundária com suporte pivotado e atuação por came. O freio a tambor de maior aplicação em veículos comerciais no Brasil e América latina, seguindo as tendências dos Estados Unidos, é o freio *S-cam*, assim chamado devido ao formato do came aplicado na atuação das sapatas de freio. A Figura 3 apresenta um freio *S-cam* aplicado em veículos pesados (LIMPERT, 1999).

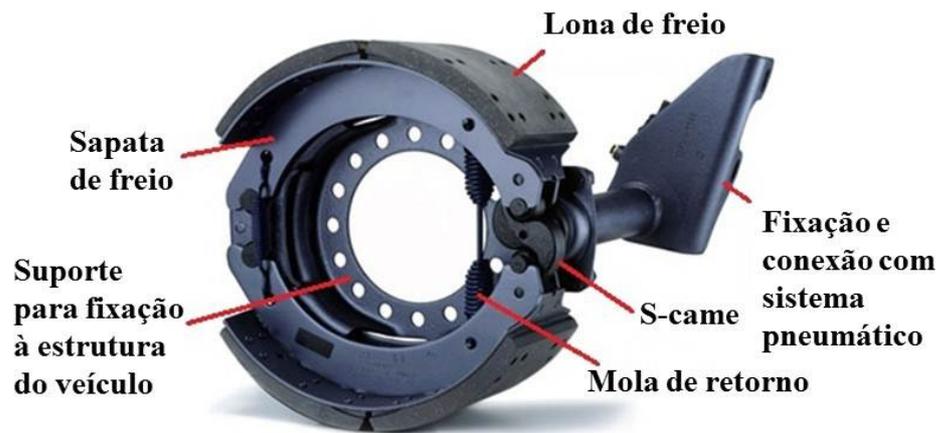


Figura 3 – Freio S-cam aplicado em veículos pesados.
Fonte: MERITOR (2011).

A variação do torque de frenagem em freios a tambor não segue uma relação linear e sim exponencial e a predominância da configuração de sapatas primária-secundária dá-se em função da resposta de torque para alterações do coeficiente de atrito entre lona de freio e tambor ser menos pronunciada nesta do que nas demais configurações (LIMPERT, 1999).

Por ser uma tecnologia bastante difundida e madura, os freios a tambor apresentam custo de fabricação e manutenção bastante acessíveis se comparados aos freios a disco, garantindo sua manutenção no mercado, principalmente em veículos comerciais, mas ainda com grande força nos eixos traseiros de veículos leves.

Os freios a tambor são altamente sensíveis à temperatura, pois não apenas o coeficiente de atrito lona/tambor pode ser afetado como também o aumento do diâmetro do tambor devido à dilatação pode prejudicar o desempenho do freio. Com a dilatação do tambor o curso de acionamento do pistão do cilindro de roda é aumentado e conseqüentemente o curso do pedal de freio aumenta. O contato entre lona de freio e tambor também pode ser prejudicado devido ao aumento do diâmetro do tambor, comprometendo a distribuição de pressão, o que resulta em picos de pressão e aumentos de temperatura localizados e por conseqüência maior flutuação no torque de frenagem. Em princípio, para qualquer sistema de freio a tambor, a temperatura máxima deve ficar em torno de 400°C para manter um desempenho adequado (LIMPERT, 1999; BLAU, 2009).

Para o projeto de freios a tambor, assume-se as sapatas e o tambor como sólidos rígidos e a lona de freio como um sólido perfeitamente elástico, obedecendo à Lei de Hooke, ou seja, a deformação da lona de freio é proporcional à tensão induzida pela carga

aplicada. Esta convenção é utilizada para os cálculos do torque gerado pelo freio e do chamado “fator de freio” e também para a determinação da distribuição da pressão sobre a lona de freio (LIMPERT, 1999). A Figura 4 apresenta uma ilustração do diagrama de forças utilizado nos cálculos citados para a sapata primária, a mais crítica do sistema.

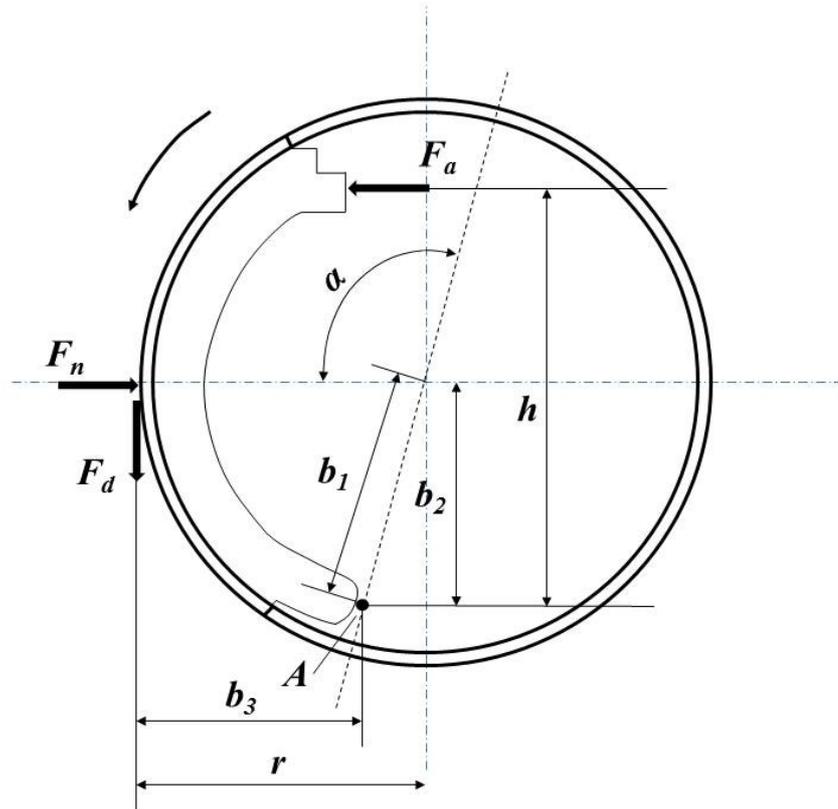


Figura 4 - Diagrama de forças utilizado para cálculo da distribuição de pressão e torque gerado para sapata primária em freio a tambor .
Fonte: Limpert (1999).

Na Figura 4 a força de acionamento é indicada por F_a , e as forças resultantes da ação de frenagem são uma força normal à superfície da lona, F_n , e uma força tangencial à superfície da lona que é denominada de força de *drag*, F_d , ou força de arraste, e é a responsável pela desaceleração gerada pelo freio.

3.2.2 Freios a Disco

Os sistemas de freio a disco adquiriram grande importância a partir da década de 1970 quando os automóveis passaram a atingir maiores velocidades. Desde então, os freios a disco são predominantes no mercado de veículos leves, sendo aplicados aos freios dianteiros como unanimidade e ganhando grande espaço dos freios a tambor nos eixos traseiros (NICHOLSON, 1995).

Para veículos pesados ainda são pouco aplicados, principalmente devido ao alto custo associado, mas já ganham destaque em veículos comerciais leves e médios e para veículos pesados em alguns mercados que primam pela segurança, especialmente na Europa.

A Figura 5 apresenta um exemplo de sistema de freio a disco que é composto basicamente de um rotor (o disco propriamente dito) que é fixado ao cubo de roda de forma a acompanhar a rotação do conjunto roda/pneu, uma estrutura rigidamente acoplada à suspensão do veículo, denominada pinça de freio ou *caliper*, que abriga um ou mais cilindros de roda que, quando acionados, comprimem os elementos de fricção, chamados pastilhas de freio, contra o disco (MATOZO, 2006).

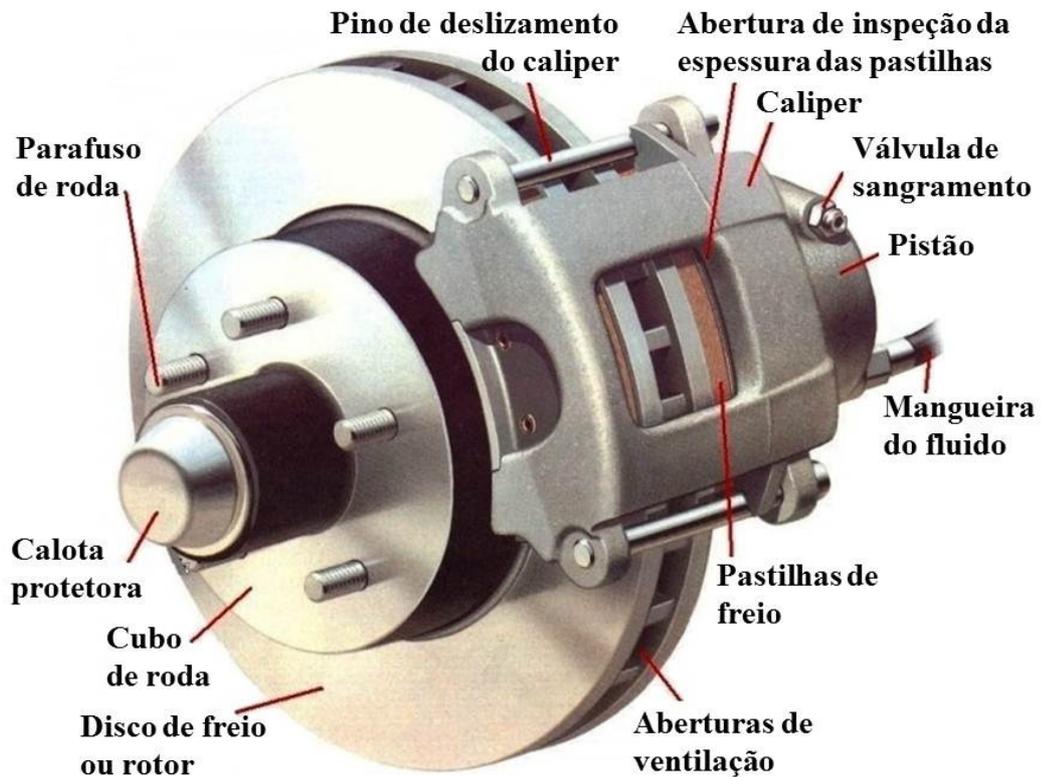


Figura 5 – Representação de sistema de freio a disco.
Fonte: OTO (2011).

Os discos de freio são usualmente fabricados em ferro fundido, podendo ser produzidos em outros materiais como aço, compósitos SiC fibra de alumínio, compósitos SiC-fibra de carbono ou compósitos carbono-carbono para aplicações especiais.

As pastilhas de freio são constituídas basicamente por três elementos, a plaqueta metálica, responsável pelo suporte estrutural do material de fricção, o material de fricção em si, que entra em contato direto com o rotor para gerar os esforços de frenagem, e uma camada intermediária denominada material de fundo que pode ou não estar presente e tem a função de melhorar a interação entre plaqueta metálica e material de fricção além de funções relacionadas ao conforto pelo amortecimento de vibrações e ruídos (MATOZO, 2006).

As principais vantagens dos freios a disco estão relacionadas à maior eficiência de frenagem e dissipação térmica, associadas ao menor peso quando comparado aos freios a tambor. Os freios a disco oferecem uma relação linear entre o coeficiente de atrito e o torque de frenagem gerado, o que confere maior estabilidade de frenagem. O efeito da temperatura também é menos pronunciado para freios a disco já que os efeitos da dilatação térmica são

menores no sentido de atuação do sistema. Este fato é importante tendo em vista que são atingidas temperaturas na casa de 500°C na interface disco/pastilha de freio em operação normal podendo chegar a 1000°C de temperatura de pico em condições extremas, particularmente para veículos pesados.

3.3 MATERIAIS DE FRICÇÃO

Material de fricção é a denominação dada ao componente do sistema de freio que, juntamente com o rotor, é responsável por transformar a energia cinética do veículo em calor via fricção e dissipar o calor ao meio, possibilitando a desaceleração e consequentemente o controle do movimento do veículo em questão.

Visto como um componente do sistema de freios e do veículo, outros requisitos e funções estão associados ao material de fricção, como a manutenção da estabilidade de atrito para proporcionar maior segurança e confiabilidade, alta durabilidade em função dos custos associados, resistência à corrosão para garantir a viabilidade de aplicação em condições adversas e a baixa propensão à geração de ruídos e vibrações para proporcionar maior conforto ao usuário do veículo. Do lado do fabricante, a relação entre custo e desempenho relacionado a todos os requisitos já citados, também é um requisito de grande relevância (NICHOLSON, 1995; LIMPET, 1999; CASARIL, 2009; MATOZO, 2006).

Diferentes tipos de materiais podem ser utilizados como materiais de fricção, desde materiais naturais como madeira ou couro, passando por ligas metálicas fundidas (sapatas de freio de ferro fundido para trens de carga) ou sinterizadas (pastilhas de freio de motocicletas e pastilhas de freio de trens de alta velocidade) ou os materiais compósitos com base em resinas termofixas aplicadas na grande maioria dos veículos de transporte terrestre de carga e passeio chegando a materiais altamente avançados como os compósitos carbono/carbono (aplicados em grande aeronaves e veículos de competição como carros da Fórmula 1) ou compósitos de matriz cerâmica (aplicados em veículos esportivos de alta performance). A classe dos materiais compósitos de matriz orgânica termofixa é o foco do presente trabalho.

De acordo com Nicholson (1995), a invenção do material de fricção como concebido atualmente, sob o conceito de materiais compósitos, é atribuída ao inglês Herbert

Frood no ano de 1897, antes disso os veículos e máquinas eram parados utilizando-se materiais naturais como madeira ou couro. Frood desenvolveu um material baseado em cintas de algodão ou pelos de animais embebidas em betume. Esta primeira solução em material de atrito foi utilizada não apenas em carroças, mas também nos primeiros automóveis. Devido à limitação de temperaturas de aplicação, em 1908, Frood substituiu as fibras naturais por tecidos de asbestos que se tornaram a base dos materiais de fricção.

No princípio da década de 1920 foram introduzidos os materiais de fricção moldados à base de asbestos. Desde então, fibras curtas de asbestos foram largamente utilizadas como a base dos materiais de fricção até a década de 1990, com especial destaque para aplicações como lonas de freio para sistemas lona/tambor de veículos pesados devido ao baixo custo e ótimo compromisso entre as propriedades tribológicas, térmicas e mecânicas. Entretanto, com a comprovação dos riscos à saúde das fibras de asbestos – asbestose – fortes movimentos para a proibição da utilização desta matéria-prima foram iniciados na Europa na década de 1980. Atualmente este tipo de fibra tem seu uso restrito a países cuja proibição ainda não está claramente consolidada na legislação, como é o caso da Índia e países da América do Sul, incluindo casos no Brasil e Colômbia (NICHOLSON, 1995; CASARIL, 2009).

Na década de 1950 surgiram nos Estados Unidos os materiais de fricção “metálicos”, compostos basicamente por um grande percentual de fibras e partículas metálicas, com o aço em destaque, em matriz de resina. Estes materiais são a origem dos chamados “semi-metálicos” ou “*semi-metallic*” que são compostos basicamente por fibras de aço, grafites e partículas de preenchimento e se tornaram bastante populares a partir da década de 1970 para freios a disco (NICHOLSON, 1995).

A consolidação dos materiais isentos de asbestos, usualmente denominados “asbestos-free” e o constante aperfeiçoamento da indústria automobilística têm exigido melhorias constantes dos materiais de atrito com o uso de matérias-primas mais sofisticadas para suprir as funções anteriormente atendidas pelas fibras de asbestos e o aumento dos requisitos de desempenho e conforto. Para materiais aplicados a sistemas pastilha/disco, embora muitas vezes questionada, adota-se uma classificação em quatro grupos de materiais de fricção de acordo com as matérias-primas utilizadas em sua composição: *semi-metallic*, *low-met*, *NAO* e *ceramic* (NICHOLSON, 1995; MATOZO, 2006; CASARIL, 2009).

Os materiais denominados *semi-metallic* são compostos por grande quantidade de fibras ou partículas metálicas, principalmente aço, usualmente mais de 30% em peso

podendo ultrapassar os 50% em peso destes componentes. *Low-met* são materiais que também utilizam matérias-primas metálicas ferrosas em sua composição, porém, quantidades menores que 15% em peso que somadas aos demais componentes metálicos podem chegar até 30% em peso no total. A denominação NAO é utilizada para abreviar a classificação “*non-asbestos organic*” que define os materiais livres de asbestos e que não utilizam matérias-primas ferrosas em sua composição, podendo, todavia, fazer uso de materiais metálicos não ferrosos como o cobre ou o latão. Os materiais de fricção designados por *ceramic* não fazem uso de quaisquer matérias-primas metálicas, sendo estas substituídas por fibras inorgânicas (fibras cerâmicas ou de rochas, fibras de vidro, entre outras) ou fibras poliméricas (aramida, acrílica, etc.) e outros componentes particulados não metálicos. Cada uma destas classes de materiais de fricção apresentam vantagens e desvantagens, porém, além das diferenças tecnológicas e de desempenho, as classificações foram originadas pelo grande impacto que os argumentos de *marketing* associados a estas diferenças podem proporcionar.

Usualmente, para materiais de fricção aplicados a sistemas de freio lona/tambor, em especial aos aplicados para veículos pesados, a divisão dos materiais de atrito fica restrita aos materiais *asbestos-free* e aqueles que ainda utilizam asbestos.

3.3.1 Matérias-Primas e Funcionalidades

Os materiais de fricção aplicados na grande maioria dos freios destinados ao mercado automotivos são desenvolvidos sob o conceito de materiais compósitos, usualmente contendo entre 10 e 20 matérias-primas das três grandes classes da Ciência dos Materiais: cerâmicos, metais e polímeros. A união destes diferentes materiais busca reunir as melhores características de cada matéria-prima com o objetivo de se atingir o melhor compromisso para o atendimento dos diversos requisitos impostos pelo mercado.

Na concepção de materiais de fricção, as matérias-primas são tradicionalmente separadas em cinco grandes grupos de acordo com suas funcionalidades: ligantes, atritantes, lubrificantes, fibras e cargas. Frequentemente matérias-primas assumem características associadas a mais de um dos grupos citados gerando certa ambiguidade na definição da função assumida na composição do material de fricção (NICHOLSON, 1995; MENETRIER, 2006; CASARIL, 2009).

3.3.1.1 Ligantes

Como o próprio nome sugere, os ligantes têm a função de manter agregados todos os demais componentes do material de fricção, ou seja, formam a matriz do compósito. Devido à elevada resistência térmica em conjunto às boas propriedades mecânicas, as resinas fenólicas são amplamente utilizadas como ligantes para materiais de fricção.

Visando a obtenção de materiais de menor rigidez, que teriam como benefício uma capacidade maior de se moldar ao rotor, modificações podem ser feitas às resinas fenólicas. As principais modificações utilizadas são a adição de óleo de caju, óleos minerais, elastômeros ou silicone na estrutura da resina durante o processo de fabricação desta. Outra alternativa para flexibilizar a matriz é associar elastômeros mecanicamente à uma resina fenólica sem modificação durante o processo de fabricação do compósito, formando uma blenda. Os principais elastômeros utilizados são as borrachas estireno-butadieno (SBR – styrene-butadiene rubber) e butadieno-acrilonitrila (NBR – acrylonitrile—butadiene rubber).

3.3.1.2 Atritantes

Atritantes são materiais cuja função primordial é elevar o coeficiente de atrito do material de fricção. Materiais cerâmicos de alta dureza e fragilidade são reconhecidos como os principais componentes deste grupo de matérias-primas. Óxidos de alumínio, óxido de cromo, silicato de zircônio e silicato de cromo são exemplos de materiais comumente utilizados visando o aumento do coeficiente de atrito.

3.3.1.3 Lubrificantes

Com o objetivo de adequar e estabilizar o coeficiente de atrito dos materiais de fricção, além de favorecer mecanismos tribológicos que beneficiem a redução do desgaste, são utilizadas matérias-primas de baixa dureza, os lubrificantes.

Em geral, materiais que apresentam estrutura lamelar são utilizados como lubrificantes, como por exemplo, grafites e sulfetos metálicos. Outros materiais como coques e talcos também podem ser utilizados com a função de lubrificantes.

É comum a utilização de mais de um tipo de lubrificante dando origem a um “sistema de lubrificação” que exerce um papel fundamental no desempenho do material de fricção em relação ao controle do coeficiente de atrito, do desgaste e da propensão à ocorrência de ruídos de freio.

3.3.1.4 Fibras

Fibras são empregadas nos materiais de fricção para promover um incremento da resistência mecânica e atuam também na modificação da rigidez do compósito. As fibras utilizadas, geralmente fibras picadas com comprimento de poucos milímetros, podem ser orgânicas ou inorgânicas e exercer influência também sobre as características tribológicas e a processabilidade do material.

Para materiais destinados a sistemas de freio pastilha/disco destaca-se a aplicação de fibras aramida e fibras metálicas, principalmente fibras de aço, cobre e latão. Já para aplicação em materiais destinados a sistemas de freio lona/tambor, além das citadas anteriormente, a fibra de vidro do tipo E, produzida em feixes de algumas centenas de filamentos, é bastante utilizada, sobretudo para aplicações em veículos comerciais pesados.

Outras fibras podem ser utilizadas conforme objetivos e requisitos específicos de cada aplicação, por exemplo, a utilização de fibras cerâmicas ou basálticas quando um incremento do nível de atrito é positivo ou a opção pela fibra de carbono para aplicações mais nobres que exijam elevada taxa de dissipação térmica.

3.3.1.5 Cargas

São chamadas de cargas as matérias-primas que exercem efeito menos pronunciado no desempenho dos materiais de atrito quando comparadas às outras classes de materiais, portanto, pode-se dizer que sua função principal é de preenchimento. Geralmente são aplicadas em quantidades expressivas (superiores a 20% em volume), logo, costuma-se optar por materiais de dureza intermediária e boa resistência térmica e mecânica.

Os materiais mais comuns aplicados como cargas são o sulfato de bário, carbonato de cálcio e o caulim. Entretanto, cargas orgânicas como o pó de caju (por vezes também denominado pó de fricção) e elastômeros granulados também são utilizados visando reduzir a rigidez do compósito. Os elastômeros mais comuns que encontram aplicação em materiais de fricção são as borrachas SBR e NBR além do resíduo reciclado de pneus.

3.4 FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO – K

Uma das principais abordagens para descrever o processo de fratura de materiais sólidos por parâmetros macroscópicos está relacionada à aplicação do conceito do fator de intensidade de tensão, que é uma ferramenta da mecânica da fratura linear elástica (*Linear-Elastic Fracture Mechanics - LEFM*).

Analisando o campo de tensões elásticas atuantes nas proximidades da ponta de uma trinca em um sólido, todos os sistemas de tensões podem ser divididos em três tipos básicos associados ao modo local dos deslocamentos da superfície da trinca, conforme apresentado na Figura 6. Devido à predominância prática do modo I, as teorias e equações relacionadas ao campo de tensões elásticas nas proximidades da ponta de trincas, inclusive as definições adotadas para o estabelecimento do conceito de fator de intensidade de tensão, estão relacionadas a este modo de carregamento.

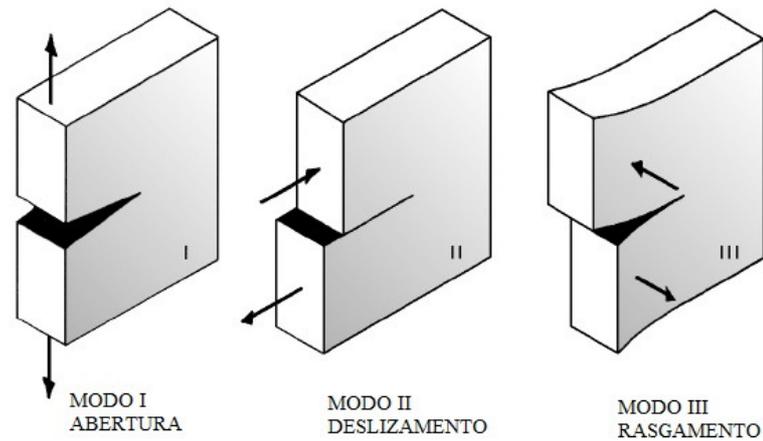


Figura 6 - Modos de abertura de trincas em sólidos elásticos.
 Fonte: Rösler, Harders e Baker (2007).

Os conceitos da mecânica da fratura linear elástica que descrevem as relações quantitativas utilizadas para a determinação dos parâmetros de fratura em materiais sólidos, incluindo o fator de intensidade de tensão, foram inicialmente introduzidos pelos estudos de A. A. Griffith que têm como base o balanço energético necessário ao se introduzir uma trinca a uma placa de um material elástico submetida à tensão externa. Ou seja, o balanço energético entre a redução da energia potencial (relacionada ao alívio das tensões elásticas acumuladas e o trabalho realizado pelo movimento das cargas externas) e o aumento da energia superficial resultante da presença da trinca. Da mesma forma, uma trinca pré-existente em um material elástico somente aumenta suas dimensões se a energia superficial adicional correspondente for fornecida pelo sistema. Esta “energia superficial” é originada pela configuração de não-equilíbrio dos átomos da superfície de qualquer sólido (ASHBY, 2005).

O fator de intensidade de tensão, indicado pela letra K , corresponde a uma quantidade que caracteriza o estado de tensão na região da ponta de uma trinca idealmente aguda para um material isotrópico e elástico linear e serve como medida da severidade desta trinca.

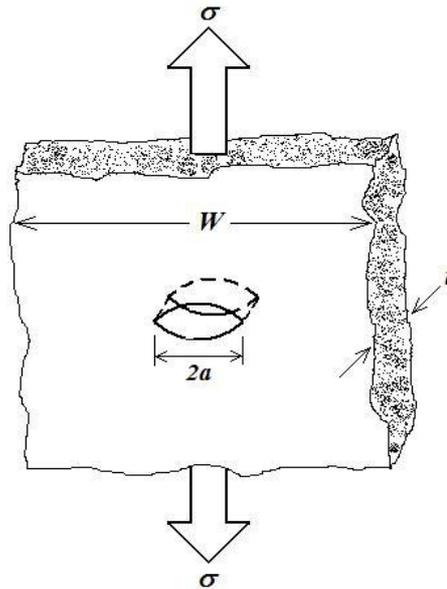


Figura 7 - Representação de trinca central ao longo de toda a espessura em placa plana de dimensões infinitas submetidas a carregamento no modo I.

Considerando uma placa de material elástico contendo uma trinca central em toda sua espessura t , cuja largura W , seja infinitamente maior que o comprimento da trinca $2a$, submetida a uma tensão externa σ , conforme representado pela Figura 7, o fator de intensidade de tensão está relacionado com a tensão aplicada e o comprimento da trinca através da Equação 1.

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (1)$$

Onde Y é um fator de forma, dependente da geometria do corpo, forma do defeito presente e da configuração do carregamento em relação ao modo de abertura da trinca. O fator Y pode ser estimado ou calculado através de normas como a ASTM D5045-99 ou de dados disponíveis em diversas referências voltadas para conceitos da mecânica da fratura (VERMA, 2004; LEE e YEE, 2000; LAHAM, 1999). Particularmente, o trabalho de Laham (1999) apresenta grande variedade de formatos de componentes, trincas e direções de carregamento e seus respectivos fatores de intensidade de tensão.

Pode-se observar através da Equação 1 que o fator de intensidade de tensão é proporcional ao comprimento da trinca (a) presente no material, desta forma, para um componente contendo um determinado tipo de defeito submetido a um carregamento de magnitude constante, quanto maior for o tamanho do defeito presente maior será a magnitude

do fator K. Quando a trinca atinge um tamanho crítico (a_c) o fator de intensidade de tensão é elevado a um valor crítico denominado K_C , o qual corresponde ao limite de resistência do material, é atingido ocasionando a falha catastrófica do componente.

Quando o referido componente é solicitado no modo I de carregamento, este fator crítico de intensidade de tensão é denominado “tenacidade à fratura” do material, representado por K_{IC} (Equação 2) e corresponde à propriedade que caracteriza o limite de resistência real deste material. A tenacidade à fratura é então uma propriedade dependente da composição e do processo de fabricação do material.

$$K_{IC} = Y\sigma\sqrt{\pi a_c} \quad (2)$$

A Tabela 2 apresenta faixas típicas de tenacidade à fratura no estado plano de deformação, K_{IC} , para diversos materiais.

Tabela 2 - Resultados de tenacidade à fratura de diversos materiais.

Material	Tenacidade à Fratura, K_{IC} [MPa.m^{1/2}]
Resina Fenólica	0,79 – 1,21
Poliésteres	1,09 – 1,70
Acrílico (PMMA)	0,70 – 1,60
Borracha Natural (NR)	0,15 – 0,25
Poliestireno (PS)	0,70 – 1,10
Vidro soda-cal	0,70 – 1,30
Concreto	0,80 – 2,40
Ferro Fundido	29 – 44
Aço Baixo Carbono	49 – 54
Ligas de Alumínio	76 - 235
Plástico Reforçado com Fibra de Vidro	0,40 – 0,55
Plástico Reforçado com Fibra de Carbono	1,28 – 2,60

Fonte: Ashby (2005).

As principais sociedades normatizadoras (ASTM e ISO) dispõem de normas internacionais para a determinação da tenacidade à fratura para diferentes classes de materiais.

No caso de materiais plásticos destaca-se a norma ASTM D5045-99 *Standard Test Methods for Plane Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials*. Todavia, apesar de estabelecer diferentes métodos para a determinação de K_{IC} (geralmente em tração ou flexão a três pontos) todas as normas dedicadas à este objetivo estabelecem os requisitos necessários para que as condições adequadas de tensão e deformação sejam atingidas, restringindo assim o dimensional dos corpos-de-prova de forma a garantir que o estado de deformação plana seja obtido.

3.5 FADIGA

Fadiga é um tipo de falha à qual estão sujeitas as estruturas ou componentes mecânicos submetidos a carregamentos dinâmicos e flutuantes. Sob estas circunstâncias é possível que a falha ocorra em níveis de tensão consideravelmente inferiores à tensão de escoamento ou de resistência máxima em carregamento estático. O termo “fadiga” é usado porque este tipo de falha normalmente ocorre após um longo período de exposição a ciclos de tensão ou deformação (CALLISTER JR., 2001).

O fenômeno da fadiga é de grande importância para a engenharia tendo em vista a estimativa de que cerca de 90% das falhas de materiais metálicos estejam relacionadas à fadiga (CALLISTER JR., 2001). Materiais poliméricos e cerâmicos (exceto vidro) também estão sujeitos a este tipo de falha, apesar dos mecanismos envolvidos diferirem daqueles dos metais (CALLISTER JR., 2001; RÖSLER, HARDERS e BAKER, 2007).

A falha por fadiga é de natureza frágil, visto que mesmo em metais reconhecidamente dúcteis costuma-se observar muito pouca, ou nenhuma, deformação plástica associada à fratura. O processo ocorre pela iniciação e propagação de trincas e normalmente a superfície da fratura é perpendicular à direção da tensão de tração aplicada (CALLISTER JR., 2001).

Embora os primeiros estudos relacionados à fadiga datem de mais de 150 anos (WÖHLER, 1860), a previsão da vida em fadiga ainda é um processo bastante empírico. Antigamente, as curvas tensão versus número de ciclos (curvas SN) eram determinadas experimentalmente e sua utilização vinculada à natureza empírica mantida mesmo após o surgimento das primeiras regras e equações aplicadas para a determinação do “limite à

fadiga” ou relacionando vários outros efeitos à curva SN, como a tensão média, rugosidade superficial, presença de entalhes ou dimensão da peça. Estas relações empíricas foram estabelecidas basicamente pela necessidade em se ter regras de engenharia, ainda usadas atualmente, que garantissem a segurança ao projetar elementos sujeitos à fadiga, ou seja, visando a vida infinita em fadiga (PUGNO et al., 2006).

Com o surgimento da mecânica da fratura uma tarefa mais ambiciosa foi realizada: prever, ou ao menos compreender a propagação das trincas no processo de fadiga. Claramente se percebeu que a “velocidade” de propagação da trinca no processo de fadiga não é constante no tempo, geralmente, o avanço da trinca aumenta para amplitudes crescentes das tensões aplicadas e quanto maior for o tamanho da trinca. Porém, foi através dos trabalhos pioneiros de Paris, Gomez e Anderson (1961, 1963), os quais sugeriram a utilização do fator de intensidade de tensão de Irwin (ou mais precisamente sua variação ΔK) para caracterizar a taxa do avanço da trinca por ciclo, da/dN , que muitos dados puderam ser agrupado em uma mesma “lei” no diagrama $da/dN-\Delta K$. Desde então muitos trabalhos têm sido realizados com o intuito de compreender melhor a lei de Paris e suas exceções, porém, ainda se está distante de um conhecimento completo (PUGNO et al., 2006).

A Lei de Paris será abordada em mais detalhes na seção 3.5.3.

Mesmo após o estabelecimento da lei de Paris como uma importante ferramenta para o projeto de componentes submetidos a esforços de fadiga, muitas das abordagens empíricas “pré-Paris” continuam sendo utilizadas, particularmente em casos onde os componentes precisam suportar longos períodos em fadiga, a chamada condição de *fadiga de alto ciclo*, para a qual uma abordagem de “tolerância à trinca” é muito difícil de ser implementada, visto que as trincas crescem muito lentamente e não são detectadas em grande parte da vida do componente. Mesmo com a disponibilidade de modelos avançados, informações de bancos de dados de materiais e grande capacidade de recursos computacionais, ainda nos dias de hoje é muito difícil obter uma curva SN completa a partir da integração das leis de propagação de trincas, principalmente devido aos vários regimes que desviam do regime padrão da lei de Paris, em especial relacionado à propagação de trincas de pequenas dimensões (PUGNO et al., 2006).

A necessidade de desenvolvimento de ferramentas efetivas para as previsões de vida em fadiga impulsionou o surgimento da Mecânica da Fratura Linear Elástica (*LEFM*) e da Lei de Paris para fadiga, proporcionando uma grande evolução na especificação de componentes sujeitos a esforços cíclicos. Todavia, estes conceitos assumem a premissa de que

o material sujeito à fadiga apresenta comportamento elástico linear para os níveis de tensões aos quais é submetido, ou seja, obedece à Lei de Hooke, o que pode não ser verdadeiro para materiais poliméricos, por exemplo. Nos casos em que a Lei de Hooke não é aplicável, usa-se a mecânica da fratura elasto-plástica para descrever os fenômenos relacionados a propagação de defeitos.

Para materiais poliméricos, principalmente termoplásticos, o comportamento viscoelástico e a deformação plástica podem levar a mecanismos de iniciação e propagação de trincas diferentes daqueles observados para metais, dificultando a aplicação da lei de Paris como ferramenta para a previsão da vida em fadiga. Entretanto, quando são considerados polímeros termorrígidos, como a resina fenol-formaldeído utilizada como aglomerante para materiais de fricção, os princípios da *LEFM* podem ser considerados válidos (RÖSLER, HARDERS e BAKER, 2007; PERES, 2009).

Para materiais compósitos, os fenômenos de iniciação e propagação de falhas são altamente dependentes das propriedades da matriz e das características dos componentes de reforço, fibras e partículas. Para compósitos de matriz polimérica termorrígida, pode-se considerar adequada a abordagem através da Lei de Paris para a previsão da vida residual em fadiga ao assumir a presença de uma falha inicial conhecida. Diversas hipóteses podem ser consideradas para assumir a presença de uma falha inicial, desde a presença de defeitos de fabricação como vazios ou inclusões e até mesmo admitir que fibras ou partículas de reforço assumem o papel de uma trinca ao perderem a adesão interfacial com a matriz (HARRIS, 2003; ANTUNES et al., 2002; LIU e YANG, 2000).

Ao investigar materiais compósitos particulados de matriz termorrígida, foco do presente trabalho, os mecanismos de nucleação e propagação de trincas podem ser complexos de se analisar, a trinca pode se propagar pelas interfaces entre diferentes componentes ou através dos constituintes. Entretanto, ponderadas as devidas particularidades de cada compósito, os mecanismos relacionados à região da ponta da trinca podem ser considerados similares aos mecanismos dos materiais metálicos (BROBERG, 1999; ANTUNES et al., 2002; LIU e YANG, 2000).

3.5.1 Falha por Fadiga em Materiais Metálicos

As teorias de falha por fadiga baseiam-se em sua grande maioria nos mecanismos de falha de materiais metálicos, portanto, uma breve revisão destes mecanismos é fundamental para uma melhor compreensão das seções seguintes.

A vida de um componente metálico submetido a condições de fadiga pode ser dividida em três diferentes estágios: iniciação da trinca, propagação sob carregamento cíclico e fratura catastrófica final.

3.5.1.1 Iniciação da Trinca (Estágio I)

Na maioria dos casos, a fratura por fadiga inicia pela nucleação de uma trinca em uma região altamente tensionada do componente, seja pelo efeito de uma sobrecarga temporária ou pela presença de concentradores de tensão como inclusões, porosidade, entalhes ou defeitos superficiais provenientes do processamento, como por exemplo, marcas de usinagem (CALLISTER JR., 2001; RÖSLER, HARDERS e BAKER, 2007).

Mesmo para materiais metálicos supostamente livres de defeitos de fabricação, defeitos superficiais podem se formar quando estes componentes são submetidos a esforços cíclicos com tensões aplicadas menores que a tensão de escoamento do material. Nesta condição ocorre o movimento de discordâncias que se acumulam na superfície do material formando pequenos “degraus” (aumento da rugosidade), dando condições à formação de trincas. Trincas formadas por este processo se propagam nos planos cristalográficos de deslizamento, preferencialmente nos grãos com planos orientados a 45° do sentido de aplicação da tensão principal. Este estágio de propagação da trinca de fadiga é chamado de *estágio de propagação I* e o crescimento da trinca é lento. Quando esta trinca atinge um contorno de grão precisa encontrar um plano de deslizamento favorável no grão vizinho e, na maioria dos casos, a velocidade de propagação diminui ou mesmo cessa. Apenas algumas trincas geradas por este processo encontram condições favoráveis para continuar crescendo até atingirem níveis de tensão na ponta da trinca altos o suficiente para reorientar a trinca perpendicularmente à tensão máxima aplicada (modo I) e se tornar uma macrotrinca,

passando para o *estágio de propagação II*, que será discutido na próxima seção, dominando a sequência do processo de fadiga. A transição do estágio I para o estágio II da propagação da trinca geralmente ocorre para trincas de comprimento entre 0,05 mm e 2,0 mm (RÖSLER, HARDERS e BAKER, 2007).

A iniciação de trincas utiliza um longo período de tempo em materiais com bom acabamento superficial sob carregamento abaixo do limite de escoamento, visto que o movimento de discordâncias é muito lento nestes casos, portanto, grande parte da vida do componente é gasto neste estágio. Este argumento é válido apenas para trincas iniciadas na superfície, se as trincas iniciarem em defeitos internos ou defeitos superficiais pré-existentes a vida em fadiga pode ser reduzida substancialmente (RÖSLER, HARDERS e BAKER, 2007).

Defeitos microscópicos não têm efeito muito significativo no tempo total de vida do componente se a amplitude de tensão aplicada é grande e o número de ciclos até a falha é pequeno (normalmente menor que 10^4 ciclos). Neste caso, trincas superficiais são formadas mais rapidamente pelo movimento de discordâncias (RÖSLER, HARDERS e BAKER, 2007).

3.5.1.2 Propagação da Trinca (Estágio II)

Após atingir um determinado tamanho, a trinca se orienta perpendicularmente ao sentido de aplicação da tensão principal, ou seja, passa para o carregamento no modo I (Figura 8 (a)). Como consequência da concentração de tensão, uma zona plástica se forma nas vizinhanças da ponta da trinca (Figura 8 (b) e (c)) provocando uma pequena abertura da trinca e, conseqüentemente, uma pequena propagação da trinca. Reduzindo a tensão aplicada, a deformação elástica no volume do material é removida e a trinca se fecha, entretanto, a trinca cresceu devido à deformação plástica sofrida resultando em uma tensão residual compressiva. Estas tensões causam uma deformação plástica oposta, fazendo com que a trinca se feche, mesmo na ponta (Figura 8 (d)). Portanto, para cada ciclo de tensão aplicado a trinca sofre um incremento que geralmente é da ordem da dimensão de um grão do material ou menor. Isto explica porque a superfície de fraturas por fadiga apresentam estrias (RÖSLER, HARDERS e BAKER, 2007).

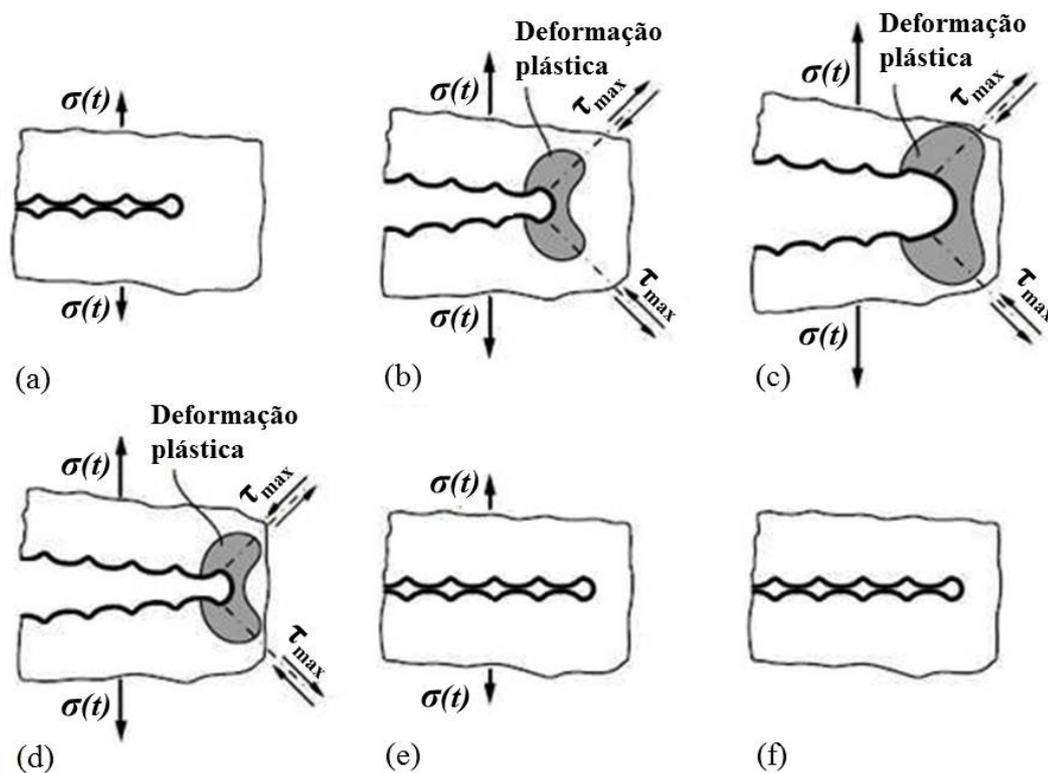


Figura 8 - Modelo de propagação de trinca sob carregamento cíclico.
Fonte: Rösler, Harders e Baker (2007).

Obs.: Durante o carregamento ((b) e (c)) a região próxima à ponta da trinca escoou. A trinca propaga estavelmente, atenuando a angularidade da ponta. Com o descarregamento (d) a trinca alongada é comprimida. Devido à deformação, as superfícies da trinca se tocam antes da tensão externa ser zerada (e). Após o completo descarregamento, uma tensão residual é mantida comprimindo a trinca (f).

Devido à tensão residual compressiva, existe um limite mínimo de tensão que precisa ser superado para que a trinca siga propagando. Se este limite não é atingido pela tensão externa aplicada não há propagação, porém, se a amplitude da tensão aplicada supera o limite citado, haverá um incremento da trinca para cada ciclo subsequente (RÖSLER, HARDERS e BAKER, 2007).

3.5.1.3 Fratura Catastrófica (Estágio III)

A fratura catastrófica ocorre quando a trinca cresce até um tamanho no qual o fator de concentração de tensão atinge o valor da tenacidade à fratura (K_{IC}) do material, então

a trinca se propaga instavelmente através de toda a espessura do componente (RÖSLER, HARDERS e BAKER, 2007).

3.5.2 Falha por Fadiga em Materiais Compósitos

Os estudos do fenômeno de fadiga em materiais compósitos são focados com grande destaque em materiais utilizados para aplicações estruturais, constituídos por laminados de fibras longas. Com o surgimento dos compósitos modernos, a percepção dos mecanismos de falha e fadiga dos engenheiros, sempre muito ligada aos materiais metálicos, homogêneos e isotrópicos, induziu à utilização dos mesmos procedimentos de testes e interpretação de resultados adotados para os metais.

Considerando o exposto, o limite de resistência à fadiga para metais é diretamente proporcional à sua rigidez, portanto, para materiais reforçados com fibras longas, cuja anisotropia é projetada para que o carregamento seja aplicado na direção das fibras que são muito rígidas, a resistência à fadiga seria muito alta. Por exemplo, nos primórdios da era dos compósitos reforçados com fibras de carbono, cuja resistência à tração e rigidez é extremamente elevada na direção das fibras, afirmava-se que estes materiais não eram susceptíveis à falha por fadiga (HARRIS, 2003).

Entretanto, avanços nos conhecimentos dos mecanismos de falha de materiais compósitos com fibras longas demonstraram que a falha de um determinado componente não ocorre pelo surgimento e propagação de uma única trinca como nos materiais metálicos, mas sim pelo acúmulo de diversos danos, como a perda de adesão interfacial entre matriz e fibra, rompimento de fibras, trincas na matriz, entre outros. A predominância de um ou outro mecanismo de falha pode ser fortemente afetada pelas características do material e das condições de teste ou aplicação (HARRIS, 2003).

Os mecanismos de fratura e fadiga para materiais compósitos com fibras curtas passaram a ser objeto de pesquisas a partir da década de 1970 quando a aplicação destes materiais na forma de componentes moldados em folhas ou *SMC* (*Sheet Moulding Compounds*) ganhou bastante espaço na indústria automotiva para a fabricação de painéis, para-choques e outros componentes. Devido à boa relação entre custo, propriedades mecânicas e acabamento, a maioria dos *SMC* utilizados ainda hoje é de compostos de resina

poliéster reforçados com fibras de vidro-E contendo algum tipo de carga mineral, geralmente carbonato de cálcio (HARRIS, 2003). Portanto, estes materiais correspondem ao foco principal dos estudos relacionados aos fenômenos de fratura e fadiga desta classe de compósitos.

Em geral, as fibras de reforço de compósitos que utilizam fibras curtas correspondem a feixes de fibra de vidro-E com comprimento entre 15 e 50 mm, formados pela união de centenas de filamentos, cada um com diâmetro da ordem de 10 a 20 μm . Após a moldagem, os feixes de fibras podem ser considerados como apresentando formato aproximadamente elíptico, distribuídos aleatoriamente no plano com tendência a ter o maior eixo perpendicular à direção da espessura. Desta forma, a distribuição planar do reforço viola a condição de isotropia transversal, antecipando a dependência das propriedades elásticas nos planos contendo a direção da espessura (HARRIS, 2003).

Segundo Harris (2003) os materiais compósitos reforçados com fibras curtas apresentam comportamento linear para curvas típicas tensão/deformação apenas para níveis baixos de tensão e para níveis elevados tendem a sofrer desvios da linearidade que são dependentes da composição e processamento do material. Para carregamentos e descarregamentos cíclicos estes materiais apresentam histerese, na qual a tensão máxima é mantida praticamente inalterada durante os primeiros ciclos, entretanto, um pequeno percentual de deformação permanente é observado a cada descarregamento. Para ciclos consecutivos também é observada uma redução do módulo de elasticidade, indicando que algum evento de falha ocorreu.

Microscopicamente, o desenvolvimento da falha em compósitos reforçados com fibras curtas ocorre preferencialmente na interface fibra/matriz por um mecanismo denominado de *pull-out* que pode ser dividido em três etapas, conforme Figura 3.9. A primeira etapa de dano ocorre a cerca de 30-50% da tensão de resistência à tração do compósito e coincide aproximadamente com o intervalo em que o material desvia do comportamento linear no diagrama tensão/deformação. Nesta etapa ocorre a perda de adesão na interface fibra/matriz para os feixes de fibra orientados perpendicularmente à direção de carregamento (áreas em cinza na Figura 9(a)) (HARRIS, 2003).

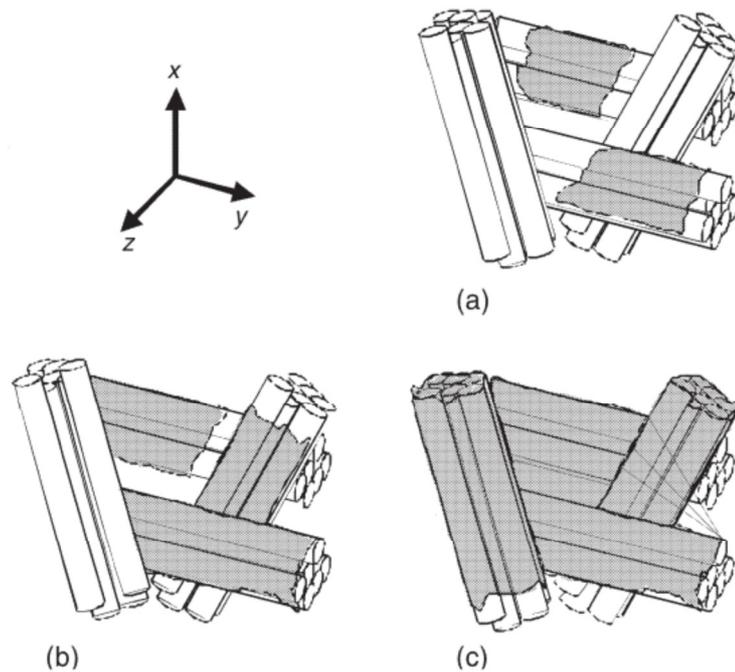


Figura 9 - Progressão dos modos de falha em um compósito termofixo reforçado com fibras curtas.
 Fonte: Harris (2003).

Obs.: Direção de carregamento: x . Áreas em cinza: superfície da fratura.

Após o início, com o aumento da carga aplicada, a falha se propaga ao longo dos feixes em que surgiu até alcançar outros feixes de fibras orientados a ângulos menores em relação à direção de carregamento e iniciar o descolamento na periferia destes também (Figura 9(b)). Além de provocar o princípio da propagação das trincas iniciais, o aumento da tensão aplicada também causa novos inícios de descolamentos em outros feixes de fibra em todo o volume do material (HARRIS, 2003).

A maioria dos eventos de perda de adesão fibra/resina inicia ente 30% e 70% da tensão máxima do material e os danos tendem a estabilizar acima destes níveis. Neste ponto, as trincas orientadas preferencialmente no sentido transversal à carga aplicada crescem através das áreas ricas em resina e podem se unir a trincas próximas. Quando estas trincas cruzam um feixe de fibras orientado a pequenos ângulos em relação à direção de carregamento, ocorre o *pull-out* dos feixes como um todo sem a quebra das fibras (Figura 9(c)). Esta observação indica que todas as fibras em um feixe se comportam como se fossem uma fibra única. Conseqüentemente, para a análise de falha de compósitos reforçados com fibras curtas, o conceito usual de “razão de aspecto das fibras” (razão do comprimento da fibra por seu diâmetro) deve ser substituído pela “razão de aspecto do feixe” que é usualmente de 50 a 100 vezes menor (HARRIS, 2003).

Segundo Harris (2003) em geral, a presença de cargas de preenchimento não altera a sequência de falha descrita previamente. Todavia, para compósitos com baixa quantidade de fibras (de 15% a 20% em volume), o que normalmente acarreta um aumento da quantidade de cargas, a iniciação das trincas pode ocorrer em regiões da matriz ricas em partículas destas cargas de preenchimento. A deformação até a falha para compósitos particulados decresce com o aumento da quantidade de cargas e, quando a deformação até a falha do composto resina-carga torna-se menor que a deformação crítica para a perda de adesão fibra/matriz, a iniciação das trincas ocorrerá nas interfaces carga/matriz (HARRIS, 2003).

Para materiais de fricção, que são compósitos particulados reforçados com fibras curtas, o mecanismo descrito para compósitos reforçados com fibras curtas deve ser levado em consideração e especial atenção deve ser dada à observação feita para materiais com baixo percentual volumétrico de fibras.

Estudos citados em Harris (2003), relacionados a compósitos de matriz poliéster reforçados com fibra de vidro-E, indicam que os danos por perda de adesão interfacial fibra/matriz em fadiga aumentam rapidamente nos primeiros estágios da vida em fadiga, em seguida um estado característico de danos é atingido e a taxa de descolamento volta a crescer novamente próximo ao final da vida do componente. As trincas na matriz crescem com o aumento do número de ciclos segundo uma função quadrática até a fratura final sem indícios de fraturas significativas das fibras. Também é citado por Harris (2003) que há uma dependência do tamanho médio de trinca e da densidade de trincas na fratura com a tensão máxima, σ_{max} , aplicada em fadiga. Quando σ_{max} é aumentada a densidade de trincas aumenta enquanto o tamanho médio das trincas diminui. Este fenômeno é atribuído ao fato de um alto valor de tensão aplicada induzir mais facilmente o surgimento de novas trincas, entretanto, como a vida em fadiga é menor, as trincas têm menos tempo para aumentar seu tamanho.

A análise microestrutural dos corpos-de-prova dos trabalhos citados em Harris, 2003, revelou a presença de trincas com direções altamente dependentes da direção de carregamento. Observou-se que a orientação das microtrincas foi notadamente afetada pela quantidade localizada de fibras, para regiões ricas em fibras, com estas posicionadas paralelamente à direção de carregamento, pequenas trincas normais ao carregamento se desenvolveram na resina e tiveram seu crescimento impedido pelas fibras. Para regiões ricas em matriz, foram observadas trincas longas perpendiculares à direção de carregamento. Já

para feixes de fibra de vidro com ângulo relativamente grande em relação à direção de carregamento foram observadas trincas na interface fibra/matriz.

3.5.3 Lei de Paris para Fadiga

A lei de Paris tem como base a mecânica da fratura linear elástica e aplica-se para os casos em que é adotada uma abordagem de tolerância à falha, ou seja, quando um componente apresenta uma trinca mensurável cuja taxa de propagação é determinada pelo estágio II da vida em fadiga conforme definido na seção 3.4.1.2 e representado na Figura 10. Portanto, aplica-se a trincas que possam ser mensuradas com o auxílio de técnicas não destrutivas para componentes em uso, ou na análise de falhas através das informações que podem ser obtidas pela análise da superfície de fratura de componentes que falharam em fadiga. Na prática é de grande utilidade para a previsão da vida “residual” em fadiga de componentes e como instrumento para análise de falhas, ou seja, na definição de quanto tempo um componente que apresente uma trinca identificada pode seguir em serviço sem que haja risco de ocorrer a falha.

O mérito da Lei de Paris está vinculado a capacidade de se relacionar o avanço “ da ” da trinca em fadiga por intervalos de ciclos “ dN ”, em função da amplitude do fator intensidade de tensão ΔK , conforme definido pela Equação 3.

$$\frac{da}{dN} = A (\Delta K)^m \quad (3)$$

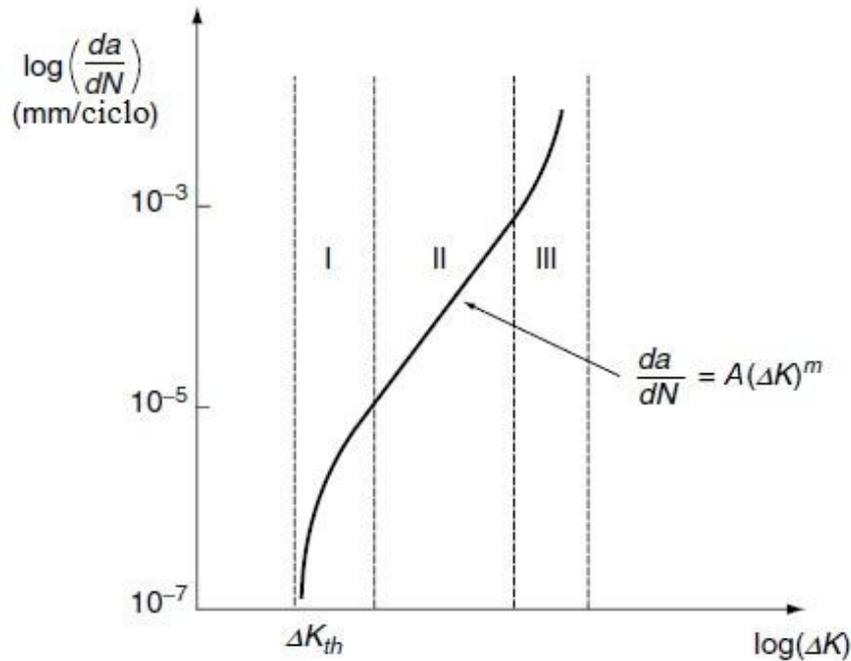


Figura 10 - Representação de uma curva típica da taxa de propagação de trinca em fadiga em função da variação do fator de intensidade de tensão de materiais metálicos.

A aplicação da Lei de Paris de forma efetiva fica limitada à porção linear da curva de propagação de trinca em fadiga, ou seja, ao estágio II do processo de fadiga conforme indicado na Figura 10 e já discutido anteriormente neste capítulo. No estágio I, a propagação das trincas é muito lenta, diversas trincas podem estar sendo nucleadas simultaneamente em vários pontos do material e estas são muito difíceis de quantificar. Para o estágio III, a propagação da trinca é muito rápida e não há condições seguras de serviço caso um defeito tenha atingido este estágio de propagação. Portanto, como nos estágios I e III não há necessariamente uma trinca predominante ou uma correlação fixa entre a propagação da trinca e a variação do fator de intensidade de tensões, a Lei de Paris não é adequada para descrever o processo de fadiga nestes estágios (CALLISTER JR., 2001; RÖSLER, HARDERS e BAKER, 2007).

3.5.3.1 Testes de Fadiga e Determinação dos parâmetros de Paris m e A

De forma geral, recomenda-se para fins práticos que os testes de fadiga sejam realizados com os componentes no formato final e sob as condições de carregamento às quais

são submetidos na aplicação, todavia, estas condições nem sempre podem ser atendidas e testes em condições padronizadas precisam ser adotados.

Normas internacionais estão disponíveis para a realização de testes de fadiga para diversos materiais e condições de análise, por exemplo, as normas ASTM E647, ISO 13003 e ASTM E466 dentre outras. Para compósitos particulados aplicados como materiais de fricção, as normas ISO 13003-2003 *Fibre-reinforced plastics – Determination of fatigue properties under cyclic loading conditions* e ASTM E647-99 *Fibre-reinforced Plastics – Determination of Fatigue Properties under Cyclic Loading Conditions* podem ser indicadas como adequadas para as avaliações necessárias.

A aplicação mais comum dos testes de fadiga está relacionada ao levantamento de curvas que relacionam a tensão máxima ou tensão média aplicada ao número de ciclos suportado pelo componente até a falha, as curvas S-N (*Stress – Number of Cycles*), que usualmente são utilizados diretamente para o projeto de componentes quando se deseja prever apenas o número total de ciclos que pode ser atingido para um determinado nível de carregamento ou qual o nível máximo de tensão que pode ser aplicado para alcançar um determinado número de ciclos. Todavia, esta abordagem não fornece subsídios para análise de componentes que já apresentem defeitos mensuráveis quando se deseja saber a vida residual em fadiga.

Visando a previsão da vida residual em fadiga em uma abordagem de tolerância à falha para casos de componentes que apresentem um defeito prévio, o acompanhamento da evolução do comprimento deste defeito ao longo dos ciclos de fadiga origina um gráfico que segue a Lei de Paris (Equação 3). Para os estágios I e III da propagação da trinca existe uma grande dificuldade no monitoramento do comprimento da trinca, entretanto, para o estágio II, onde efetivamente se aplica a Lei de Paris, o monitoramento do comprimento da trinca pode ser realizado de forma eficaz.

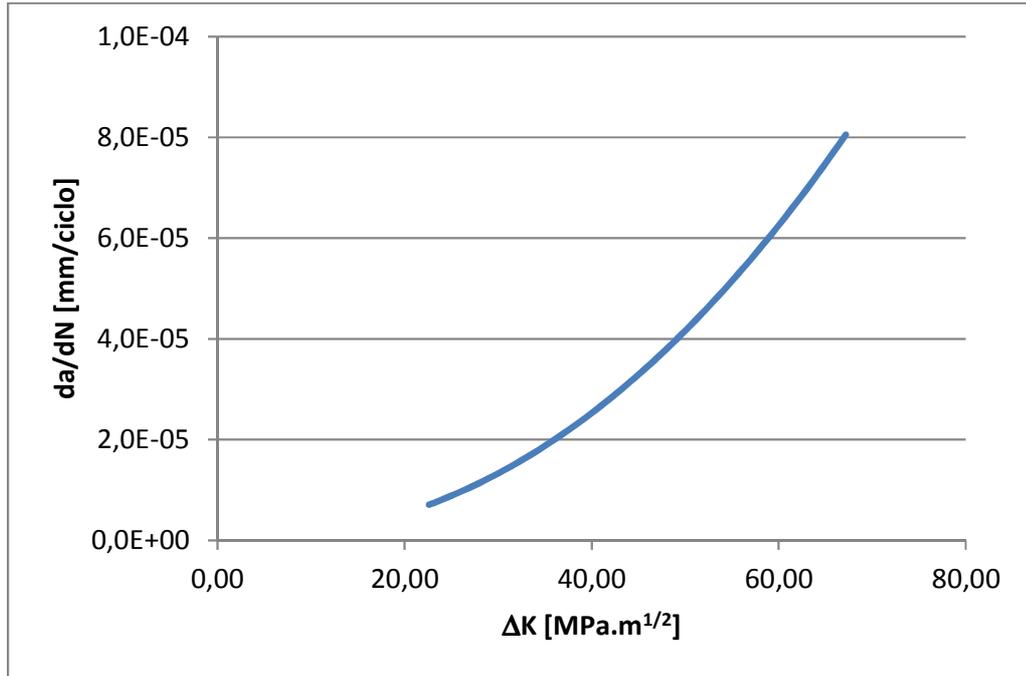


Figura 11 - Exemplo de curva relacionando a taxa de crescimento da trinca em função da variação do fator de intensidade de tensão para o estágio II da propagação da trinca.

Obs.: Os dados utilizados na geração da curva são fictícios e correspondem à idealização de resultados para testes de fadiga de materiais metálicos.

Como resultado do acompanhamento da taxa de propagação de uma trinca, restrita ao estágio II, em função da variação do fator de intensidade de tensão, uma curva exponencial similar à apresentada na Figura 11 é obtida. Esta curva segue a Equação 3. Para a determinação dos coeficientes A e m , usualmente a curva é linearizada através da aplicação de escalas logarítmicas aos dois eixos e os coeficientes obtidos por regressão linear.

Um exemplo da aplicação de escalas logarítmicas à curva da Figura 12 é apresentado na Figura 12 já incluindo o ajuste de curva por regressão linear. Neste caso, o coeficiente m corresponde ao valor 2,2375 e o coeficiente A à potência $10^{-8,1826}$, ou seja, $6,57 \times 10^{-9}$.

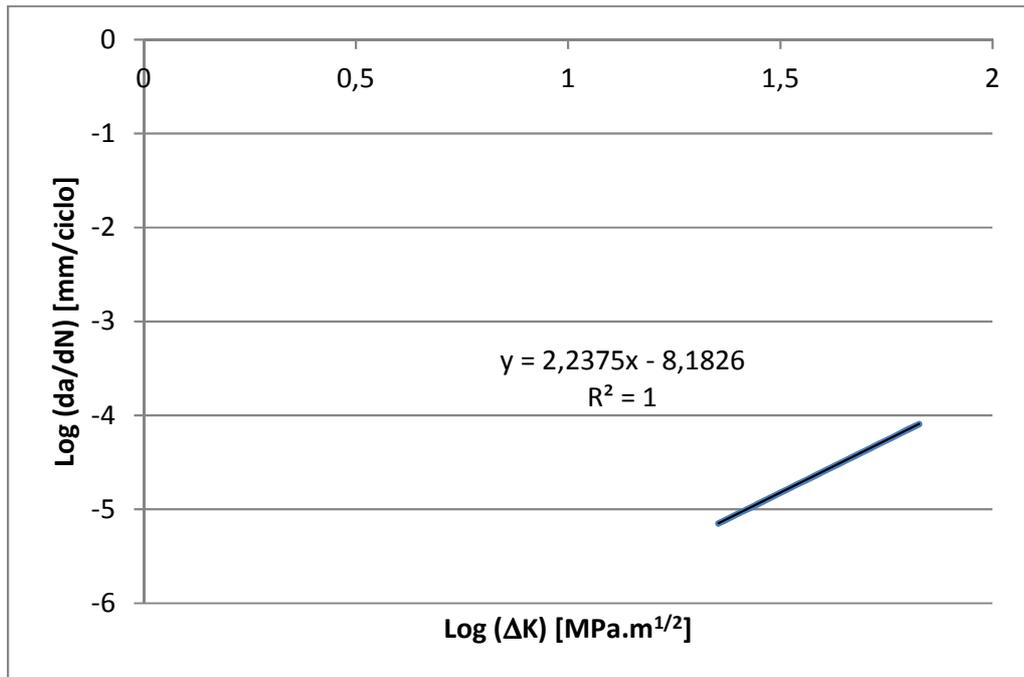


Figura 12 - Exemplo de linearização da curva apresentada na Figura 11 para determinação dos parâmetros de Paris, A e m .

A determinação dos parâmetros A e m é essencial para que seja possível utilizar a Lei de Paris para as previsões da vida em fadiga de componentes submetidos a esforços cíclicos, seja para a determinação do tempo de vida sob uma determinada tensão aplicada, ou para a determinação da variação da tensão aplicada no caso do componente ter falhado após um determinado número de ciclos de tensão.

3.5.3.2 Exemplo da determinação dos parâmetros de Paris m e A para materiais compósitos particulados

Um bom exemplo da determinação dos parâmetros de Paris para materiais compósitos particulados é o trabalho de Antunes et al. (2002) que estudaram o comportamento em fadiga de três compósitos formados por uma matriz de polimetilmetacrilato (PMMA) reforçada com partículas de sílica (SiO_2) utilizados como substitutos de materiais cerâmicos para aplicações domésticas como pias, mobílias e utensílios de cozinhas e banheiros.

Os três compósitos avaliados por Antunes et al. (2002) diferem entre si na fração volumétrica e no tamanho das partículas de reforço e, como consequência, quanto às propriedades físicas e mecânicas. As características químicas e físicas dos materiais utilizados por Antunes são apresentadas na Tabela 3 enquanto as propriedades mecânicas na Tabela 4.

Tabela 3 - Características químicas e físicas dos materiais.

Material (nome comercial)	Componentes e fração volumétrica (%vol)		Tamanho de partícula (μm)	Densidade (g/cm^3)
	PMMA	SiO ₂		
Asterite	56	44	10	1,69
Amatis	52	48	350	1,74
Ultra-Quartz	36	64	590	1,92

Fonte: Antunes et al. (2002).

Tabela 4 - Propriedades mecânicas dos materiais.

Material	Resistência à Tração (MPa) ^a	Módulo de Young, E (MPa) ^b	Coefficiente de Poisson, ν (-) ^b	Tenacidade à Fratura, K_{IC} ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) ^c
Asterite	65	8875	0,24	1,52
Amatis	38	8056	0,26	2,43
Ultra-Quartz	22	13449	0,22	1,90

Fonte: Antunes et al. (2002).

^a Obtido de acordo com ASTM D638. Teste padrão para propriedades a tração de plásticos.

^b Determinado por extensometria, testando uma amostra de seção transversal retangular com quatro strain gauges colados nas direções longitudinal e transversal.

^c Obtido de acordo com European Group on Fracture task group on polymers and composites. Norma da mecânica da fratura linear elastic para determinação de K_C e G_C para plásticos. Protocolo de teste para norma K_C/G_C , maio 1988.

Os corpos-de-prova utilizados no trabalho de Antunes et al. (2002) correspondem à geometria apresentada na Figura 13 e foram submetidos a testes de fadiga em tração-compressão com amplitude constante seguindo uma forma de onda senoidal com frequência de 30 a 40 Hz. Foram utilizadas duas razões entre as tensões de compressão e tração (R), uma com valor de -0,75 e outra com valor igual a 0 para gerar as curvas S-N. Os

testes de propagação de trinca em fadiga foram conduzidos utilizando os mesmos tipos de corpos de prova, seguindo a norma ASTM E647-00.

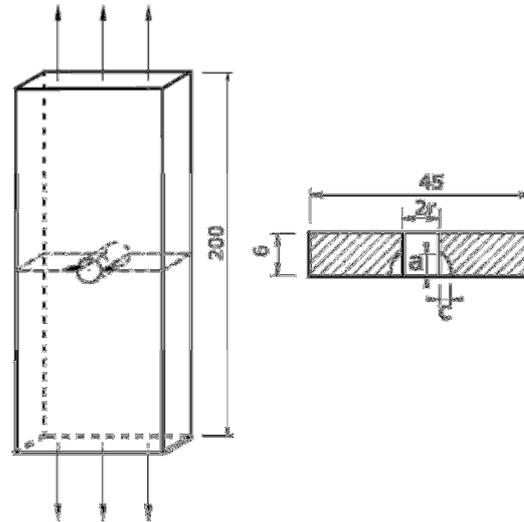


Figura 13 - Amostra com furo central e trincas simétricas de canto.
Fonte: Antunes et al. (2002)

Os resultados das constantes de Paris A e m do referido trabalho são provenientes de avaliações experimentais que resultaram nas curvas da Figura 14 e seus valores são apresentados na Tabela 5 juntamente com as respectivas médias aritméticas.

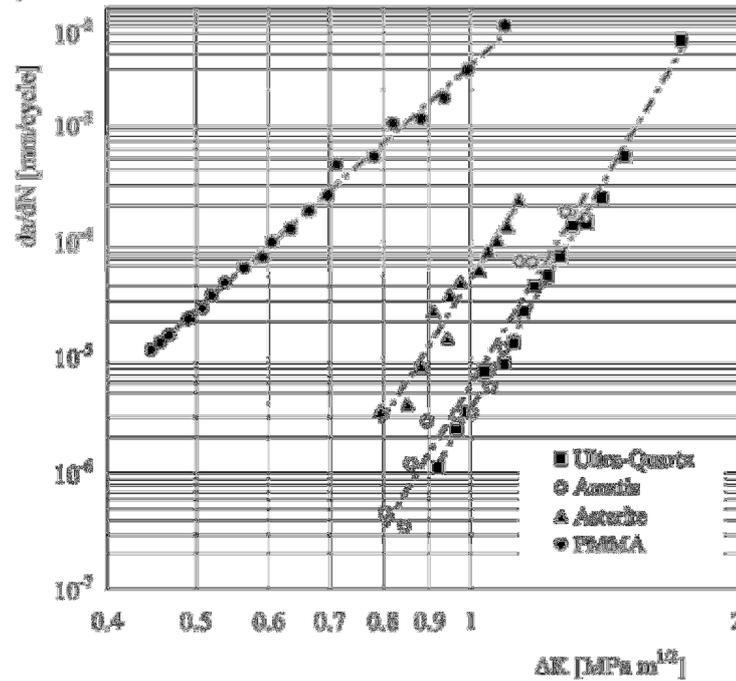


Figura 14 - Curvas da/dN-ΔK obtidas experimentalmente para resina PMMA e materiais compósitos de matriz PMMA reforçados com sílica.

Fonte: Antunes et al. (2002).

Tabela 5 - Resultados dos Parâmetros de Paris referentes ao trabalho de Antunes et al. e suas respectivas médias aritméticas.

<i>Material</i>	<i>m</i>	<i>A</i>
Asterite	12,47	4,830 x 10 ⁻⁵
Amatis	12,91	5,938 x 10 ⁻⁶
Ultra-Quartz	11,53	3,736 x 10 ⁻⁶
<i>Média</i>	<i>12,30</i>	<i>1,914 x 10⁻⁵</i>

Fonte: Antunes et al. (2002).

Os dados apresentados na Tabela 5 foram utilizados pelos autores do trabalho citado para a previsão da vida em fadiga dos três compósitos analisados através da aplicação da Lei de Paris e adaptações desta.

4 MODELO MATEMÁTICO

Para o presente trabalho sugere-se a realização de testes de fadiga em flexão a três pontos para caracterização do material que se desejar avaliar, o que resulta em um sistema de dobramento puro como o representado pela Figura 15. A sugestão da configuração em três pontos está associada à definição desta metodologia nas normas ISO 13003, ASTM E647 e ASTM E466.

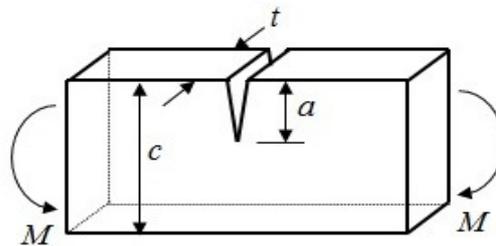


Figura 15 – Representação de sistema de dobramento puro para corpo-de-prova com entalhe ou trinca sugerido para a realização dos testes de fadiga.

Fonte: Ashby (2005).

A determinação do fator geométrico Y , referente à Equação 1, é fundamental para a sequência da metodologia proposta. Portanto, este fator será substituído por um fator denominado Y_c calculado conforme descrito por Verma (2004) e Lee e Yee (2000) cujos trabalhos estão relacionados à determinação da tenacidade à fratura para compósitos particulados. A Equação 4 dada a seguir, apresenta a definição de Y_c conforme os autores citados.

$$Y_c = 1,93 - 3,07 \left(\frac{a}{c}\right) + 14,53 \left(\frac{a}{c}\right)^2 - 25,11 \left(\frac{a}{c}\right)^3 + 25,8 \left(\frac{a}{c}\right)^4 \quad (4)$$

Onde a representa o comprimento da trinca artificialmente introduzida e c é a largura do corpo-de-prova utilizado nos testes de fadiga em flexão a três pontos, cujo carregamento resultante está representado pela Figura 15.

Considerando um componente submetido a esforços de fadiga com ciclos de carregamento de intensidade constante ($\Delta\sigma$), para $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ sendo σ_{max} e σ_{min} ,

respectivamente, as tensões máxima e mínima aplicadas durante o ciclo de fadiga, a Equação 1 pode ser representada pela Equação 5 apresentada a seguir.

$$\Delta K_I = Y_c \Delta \sigma \sqrt{\pi a_M} \quad (5)$$

$$\Delta K_I = Y_c \Delta \sigma \sqrt{\pi(a_i + \Delta a/2)} \quad (6)$$

Onde a_M representa o comprimento médio da trinca para cada ciclo de fadiga, ou seja, $a_M = a_i + \Delta a/2$, sendo a_i o comprimento da trinca no instante “ i ” antes do referido ciclo de tensão e Δa o incremento provocado pelo ciclo aplicado. Desta forma, pode-se representar a Equação 5 na forma da Equação 6.

Em geral, ao conhecer o ciclo de tensão aplicado a um determinado componente e o tamanho crítico de trinca para o material, a determinação da vida em fadiga é o fator de principal interesse para projeto e prevenção de falhas catastróficas. Através da manipulação matemática das Equações 3 e 5 é possível estabelecer uma relação entre o número de ciclos (ΔN), a tensão de fadiga aplicada ($\Delta \sigma$) e o comprimento da trinca (a_M) através da Equação 7.

$$dN = \frac{da}{A(Y_c \Delta \sigma \sqrt{\pi a_M})^m} \quad (7)$$

A integração da Equação 7 resulta na seguinte equação.

$$\int_0^{N_i} dN = \int_{a_i}^{a_i + \Delta a/2} \frac{da}{A(Y_c \Delta \sigma \sqrt{\pi a_M})^m} \quad (8)$$

Adotando uma abordagem de tolerância à falha, há interesse na predição do comprimento da trinca em diferentes estágios da vida em fadiga do componente, portanto, é plausível a adoção da abordagem incremental aplicada à Equação 6. Desta forma, possibilita-se que a Equação 8 seja reescrita na forma da Equação 9 que estabelece o número de ciclos

necessários (ΔN_i) para aumentar em Δa o comprimento da trinca partindo de um comprimento inicial a_i para uma carga aplicada $\Delta\sigma$, ou seja, a posição instantânea “ i ” da ponta da trinca.

$$N_{if} = \frac{1}{A (Y_c \Delta\sigma \sqrt{\pi})^m} \cdot \left[\frac{(a_i + \Delta a)^{1-m/2} - a_i^{1-m/2}}{1-m/2} \right] \quad (9)$$

As Equações 8 e 9 definem uma curva que representa o histórico da propagação da trinca do início ao final da vida em fadiga. A apresentação da evolução da trinca em fadiga pode ser realizada através de tabelas ou na forma gráfica que fornece uma visualização mais clara e objetiva.

Evidentemente, o número total de ciclos até a falha (N_f) do componente pode ser obtido pela área abaixo da curva gerada através da Equação 8, ou modificando esta equação para a integração total representada pela Equação 10.

$$N_f = \frac{1}{A \pi^{m/2} (\Delta\sigma)^m} \cdot \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{Y_c^m a^{m/2}} \quad (10)$$

O limite inferior da integração na Equação 10, a_0 , corresponde ao comprimento inicial da trinca presente e está relacionado com características intrínsecas do material e processo de fabricação, podendo ser assumido como a dimensão de um vazio ou inclusão posicionado convenientemente em relação à direção de carregamento, ou como o menor defeito mensurável. Já o limite superior da integração, a_c , refere-se ao comprimento crítico da trinca para o material em questão e é definido como o tamanho da trinca para o qual, com o nível máximo da tensão externa aplicada, o fator de intensidade de tensão K_I , atinge o valor crítico de tenacidade à fratura, K_{IC} , do material e ocorre a propagação instável da trinca e falha catastrófica do componente.

Aplicando os limites de integração a_0 e a_c à Equação 10 obtém-se a Equação 11 que fornece, portanto, a previsão da vida total em fadiga para um componente cuja tenacidade à fratura, tamanho de defeito inicial e características do ciclo de fadiga são conhecidos.

$$N_f = \frac{1}{A\pi^{m/2}(\Delta\sigma)^m Y_c^m} \cdot \left[\frac{a_c^{1-m/2} - a_0^{1-m/2}}{1-m/2} \right] \quad (11)$$

Com uma visão voltada para a análise de falhas, por muitas vezes ocorrem falhas sem que suas causas tenham sido corretamente previstas. Para casos de componentes submetidos a condições de fadiga, eventualmente os níveis de tensão aplicados podem não corresponder aos parâmetros determinados em projeto resultando na falha do componente em condições diferentes das esperadas quando relacionadas ao tempo de vida.

Para casos em que os parâmetros de Paris são conhecidos, estando o comprimento inicial e o tamanho crítico de defeito determinados e dispondo do número de ciclos ao qual o componente sob fadiga foi submetido até falhar, informações que em muitos casos podem ser obtidas através da análise da superfície de fratura do componente, pode-se determinar a variação da tensão à qual este componente foi submetido através da Equação 12.

$$\Delta\sigma = \left[\frac{1}{A \pi^{m/2} N_f Y_c^m} \cdot \left(\frac{a_c}{a_c^{m/2}} - \frac{a_0}{a_0^{m/2}} \right) \right]^{1/m} \quad (12)$$

A Equação 12 também pode ser utilizada para a determinação do limite admissível de variação da tensão aplicada para que o componente submetido à fadiga atenda a um número desejado de ciclos (assumido como N_f) seja atingido sem a ocorrência de falha.

Conforme citado anteriormente, as considerações adotadas para as Equações 9, 10, 11 e 12 são aplicáveis a materiais isotrópicos e originalmente desenvolvidas para determinação de parâmetros de componentes metálicos submetidos à fadiga, entretanto, podem ser aplicadas a materiais compósitos particulados, considerados quase isotrópicos, ao trabalhar em seu regime de deformação elástica.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do presente trabalho adotou-se uma metodologia conforme esquematizado no diagrama da Figura 16.

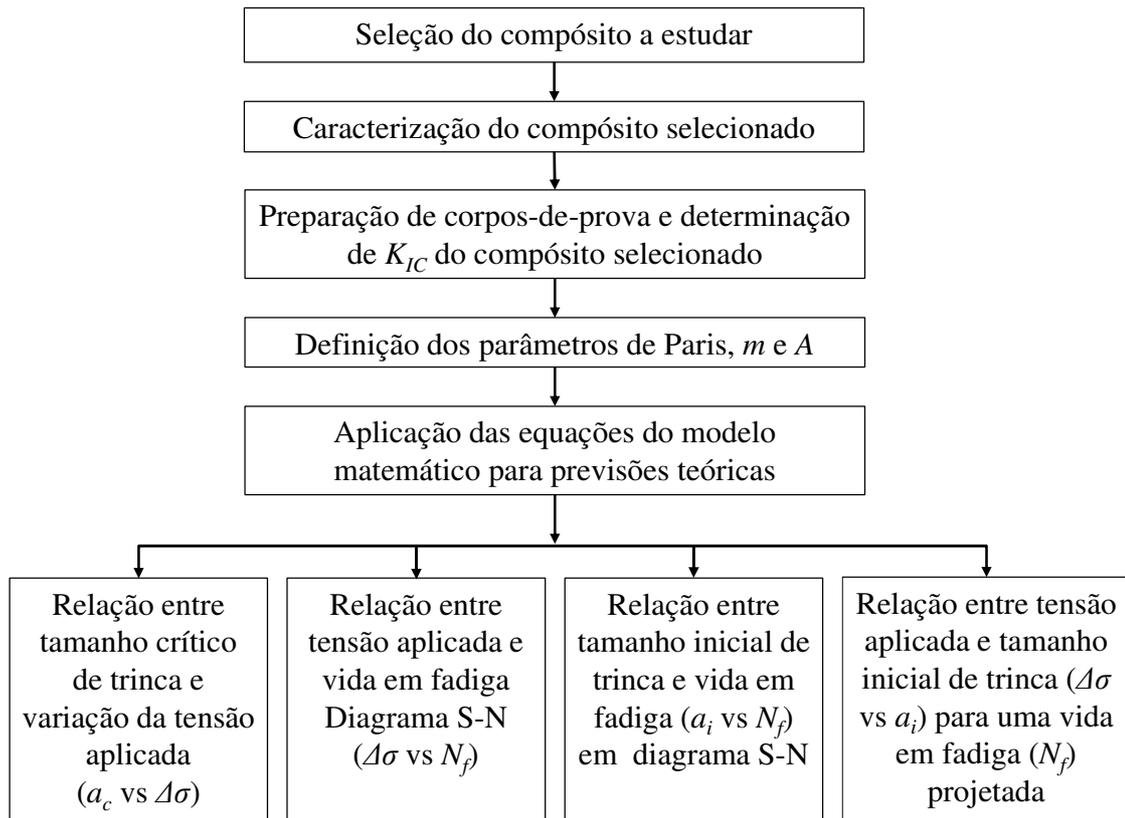


Figura 16 - Diagrama esquemático da metodologia adotada para o presente trabalho.
Fonte: do Autor (2012).

Seguindo as etapas representadas pelo diagrama da Figura 16 são apresentadas a seguir as atividades desenvolvidas no presente trabalho.

5.1 SELEÇÃO DO COMPÓSITO A ESTUDAR

O material selecionado para os estudos do presente trabalho corresponde a um compósito particulado de matriz orgânica utilizado como guarnição de freios a tambor para aplicação em veículos leves, ou seja, automóveis e utilitários de pequeno porte com peso bruto total inferior a 3500 kg.

Conforme citado no capítulo 3, os materiais de fricção são, em sua maioria, compósitos cuja matriz é formada por uma resina termorrígida, com destaque para a resina fenol-formaldeído, e uma série de elementos de carga ou reforço. Estes materiais apresentam comportamento frágil, ou seja, com capacidade de deformação restrita.

A motivação para seleção deste compósito em específico como objeto de trabalho deu-se em função da identificação pelo fabricante da ocorrência de trincas em situações em que este material é aplicado a esforços cíclicos e de grande magnitude de tensão. As Figuras 17 e 18 trazem exemplos de trincas em guarnições de freio produzidas com o material citado após serem submetidas a condições extremas de uso em teste veicular e em bancada dinamométrica. Testes desta natureza submetem o material a um grande número de ciclos de tensão sob as condições limite de carregamento e velocidade dos veículos com o objetivo de avaliar de forma acelerada o desgaste e a resistência do material na aplicação final. Como consequência do grande número de ciclos de carga aplicados e da alta sollicitação mecânica, fissuras podem ser iniciadas e se propagar até comprometer a integridade estrutural do componente.



Figura 17 - Exemplos de trincas em lonas de freio a tambor indicadas pelas setas.
Fonte: Fras-le (2012). Cortesia.

Obs.: Trinca na região central da guarnição montada em freio de automóvel submetido a avaliação de desgaste acelerado em veículo sob condições extremas de carregamento e velocidade.

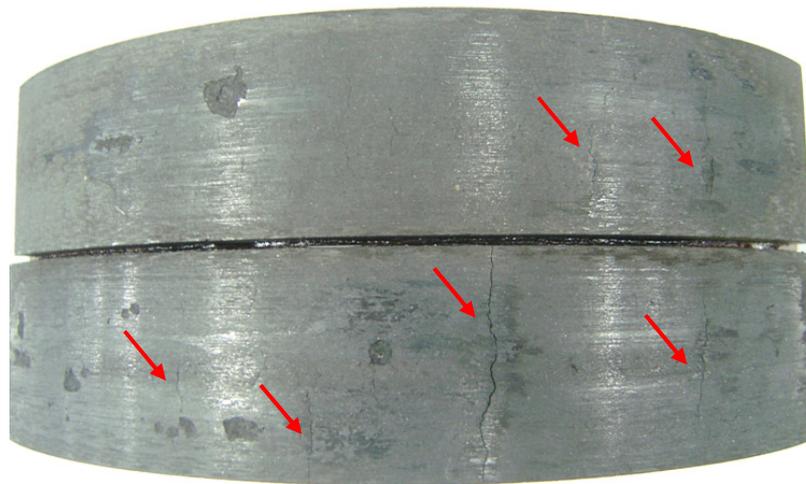


Figura 18 - Exemplos de trincas em lonas de freio a tambor indicadas pelas setas. Trincas diversas em guarnições após teste de simulação de uso severo em bancada dinamométrica.
Fonte: Fras-le (2012). Cortesia..

Para situações como estas, há um grande interesse por parte da indústria no desenvolvimento de modelos teóricos que possam prever o comportamento dos materiais compósitos em fadiga, reduzindo os altos custos envolvidos nos testes de componentes em sua configuração final.

5.2 MATERIAIS E CARACTERIZAÇÃO

A concepção de formulação e fabricação do material selecionado para os estudos resulta em um material compósito cuja fase contínua, ou matriz, é formada por uma blenda bastante homogênea composta por resina fenol-formaldeído e borracha SBR (estireno-butadieno). Também devido às características de processamento, as fibras inorgânicas adicionadas à composição são severamente danificadas e perdem a razão de aspecto que às caracteriza como fibras, passando a ser tratadas como partículas após o processamento. As Figuras 19 e 20 apresentam imagens típicas do material de fricção selecionado para estudo obtida através de um microscópio óptico estéreo marca Wild Modelo M7A com câmera CCD Roper Scientific Photometrics acoplada a um microcomputador.

Analisando as Figura 19 e 20 percebe-se a presença de partículas escuras indicadas pelas setas, estas partículas correspondem a materiais orgânicos, coque de petróleo e grafite, utilizados como lubrificantes para controle do atrito das guarnições. Observa-se também que o material apresenta boa homogeneidade e ausência de vazios.

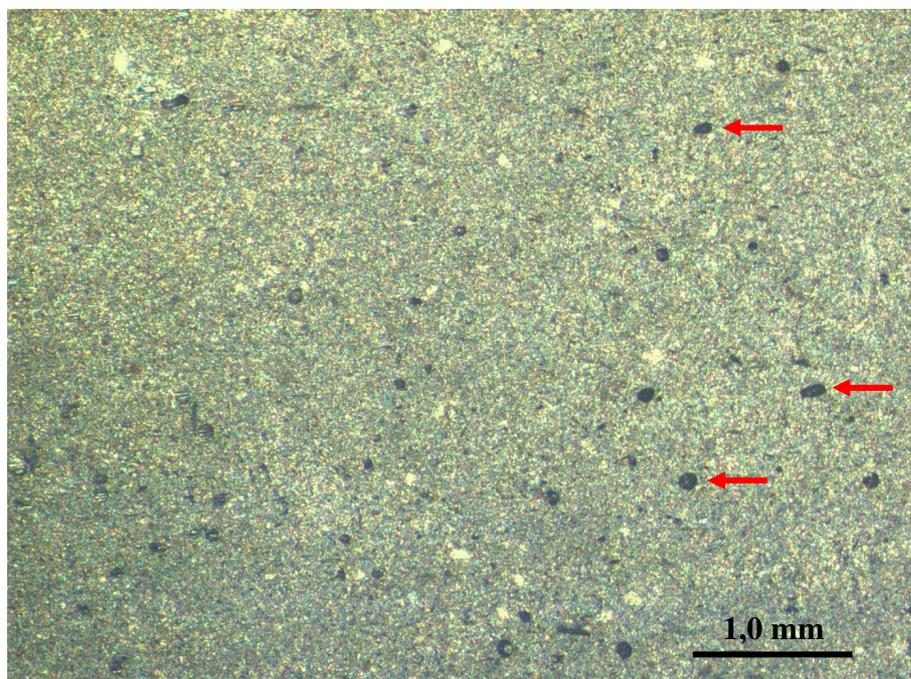


Figura 19 - Imagem de microscopia óptica do material selecionado para estudo. As setas indicam partículas de materiais orgânicos utilizados como lubrificantes para controle do atrito. Aumento 10x.
Fonte: do Autor (2012).

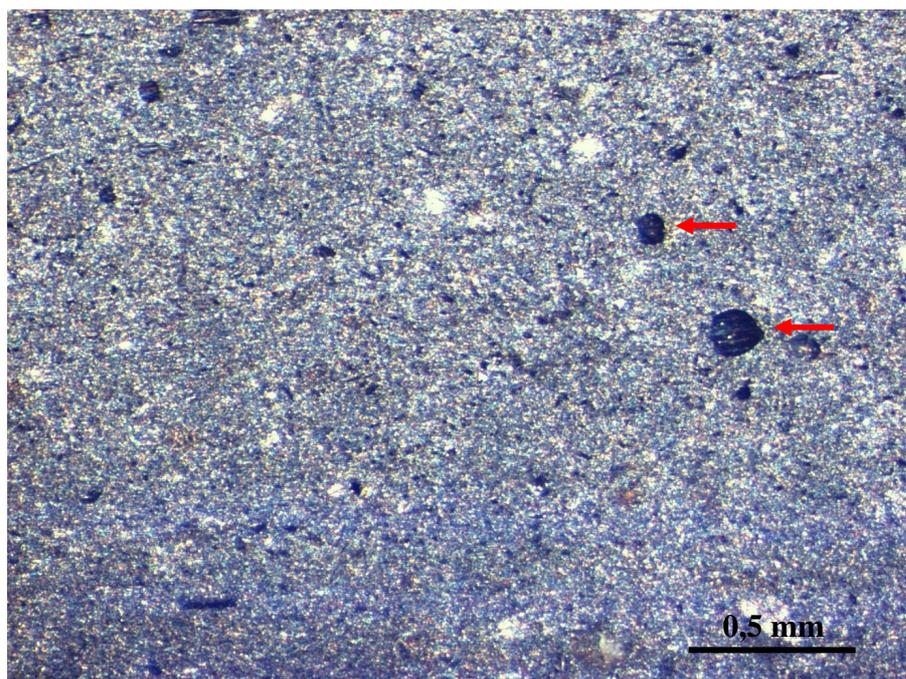


Figura 20 - Imagem de microscopia óptica do material selecionado para estudo. As setas indicam partículas de materiais orgânicos utilizados como lubrificantes para controle do atrito. Aumento 20x.

Fonte: do Autor (2012).

A Tabela 6 apresenta a composição em percentual volumétrico do material, dividida por classes de matérias-primas.

Tabela 6 - Composição do material estudado.

<i>Componente</i>	<i>Ligantes^a</i>		<i>Atriantes</i>	<i>Lubrificantes</i>	<i>Fibras^b</i>	<i>Cargas^c</i>
	<i>Resina</i>	<i>Borracha</i>				
% Volumétrico	14,5	24,3	0,3	13,9	5,6	41,4

Fonte: Fras-le (2012). Cortesia.

^a Os ligantes são resina fenol-formaldeído e borracha SBR;

^b As fibras utilizadas são materiais inorgânicos frágeis e são trituradas durante o processamento do compósito assumindo características de partículas;

^c Todas as cargas aplicadas são materiais inorgânicos particulados correspondendo a carbonatos, silicatos e sulfatos.

Percebe-se que a fração volumétrica total ocupada pelas partículas no compósito é de 61,2%, sendo de 13,9% a fração volumétrica de partículas orgânicas, correspondendo ao percentual de lubrificantes, e 47,3% a fração ocupada por partículas inorgânicas.

A Tabela 7 apresenta os resultados da caracterização de propriedades físicas do material estudado. Dentre as propriedades apresentadas, a densidade foi obtida através do método de Arquimedes utilizando uma balança marca Ohaus modelo EP6102 com precisão de 0,01 g, a dureza Rockwell foi determinada utilizando um durômetro marca Mitutoyo modelo HR500 e as propriedades mecânicas em flexão e compressão foram determinadas utilizando uma máquina de ensaios universal da marca Instron, modelo 5569 com capacidade máxima de carga de 50 kN e os dispositivos adequados.

Tabela 7 - Propriedades físicas do material estudado.

<i>Propriedade</i>	<i>Valor Médio</i>	<i>Desvio padrão</i>
Densidade ^a	2,02 g/cm ³	0,01 g/cm ³
Dureza Rockwell R ^b	77 HRR	1,5 HRR
Resistência à Flexão, σ_f , máx. ^c	29,1 MPa	1,7 MPa
Módulo de Elasticidade em Flexão, E_f ^c	1934 MPa	61 MPa
Resistência à Compressão, σ_c , máx. ^d	48 MPa	2,8 MPa
Módulo de Elasticidade em Compressão, E_c ^d	458 MPa	21 MPa

Fonte: do Autor (2012).

^a Obtido conforme NBR 5544 – Guarnições da embreagem e do freio – Determinação da densidade relativa, Ago/1998;

^b Obtido conforme ISO 2039-2 – Plastics – Determination of Hardness - Part 2: Rockwell hardness, 1987;

^c Obtido conforme a ASTM D 792-92 – Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials;

^d Obtido conforme a ASTM D 695-02a – Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics;

Apesar de não explicitado no presente trabalho, o valor teórico da densidade do material estudado, calculado a partir da Lei das Misturas¹ considerando fator de compactação igual a 1, corresponde ao exato valor medido para esta propriedade. Portanto, para todas as análises conduzidas considera-se inexistente a presença de vazios.

¹ $P_c = \sum P_i v_i$, onde P_c é a propriedade do compósito, P_i e v_i são a propriedade e a fração volumétrica, respectivamente, de cada um dos componentes que formam o compósito (AL-QURESHI, 1988; CASARIL, 2010).

5.3 DETERMINAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA - K_{IC}

A determinação da tenacidade à fratura de materiais é um processo que exige considerável cuidado, desde a preparação e validação do dimensional dos corpos-de-prova para garantir a permanência do regime de deformação plana até a execução dos ensaios e tratamento dos dados. Para o presente trabalho, o procedimento aplicado segue a norma ASTM D5045-99 *Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials* utilizando a configuração de flexão a três pontos.

Foram avaliados trinta corpos-de-prova, obtidos a partir de placas planas de 400 x 200 x 18 mm produzidas por prensagem uniaxial seguida de tratamento térmico para consolidação da cura da resina fenólica e alívio de tensões, exatamente conforme o processo aplicado na fabricação de guarnições de freio a tambor. As placas foram cortadas e usinadas utilizando ferramentas diamantadas e o acabamento final foi realizado em equipamento de usinagem com controle numérico computadorizado para garantir a precisão dimensional e paralelismo necessários.

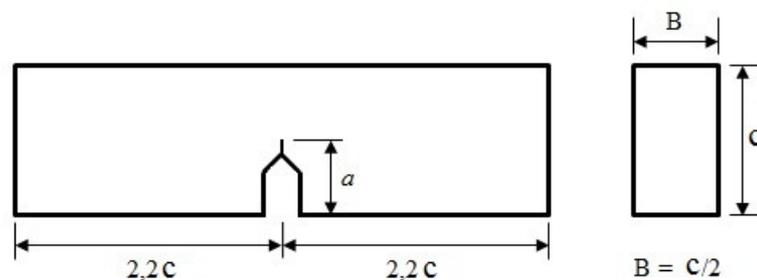


Figura 21 - Corpo-de-prova para determinação de K_{IC} em flexão a três pontos (ASTM D5045-99).
Fonte: do Autor (2012).



Figura 22 - Corpo-de-prova utilizado nos testes para determinação de K_{IC} .
Fonte: do Autor (2012).

As recomendações da norma ASTM D5045 quanto às proporções geométricas dos corpos-de-prova foram seguidas e validadas. A Figura 21 representa o corpo-de-prova para determinação de K_{IC} conforme a norma citada e a Figura 22 apresenta uma imagem de um dos corpos-de-prova já identificado para a realização do teste. Com o intuito de manter as dimensões mais próximas quanto possível do usual para guarnições de freios a tambor, a medida da espessura, B , do corpo-de-prova foi mantida próxima aos valores de espessura utilizados na prática para guarnições de freios de automóveis leves. Os valores nominais de B e c utilizados foram 7,0 mm e 14,0 mm, respectivamente. A norma estabelece uma restrição quanto ao comprimento final da trinca gerada, a , que deve ficar ente $0,45c$ e $0,55c$, e esta restrição também foi respeitada.

O entalhe central foi produzido em duas etapas, inicialmente um corte foi realizado com o auxílio de um disco diamantado de 0,3 mm de espessura e equipamento apropriado (cortadeira metalográfica Isomet 1000), em seguida a dimensão final do entalhe foi definida pela fricção de uma lâmina de barbear no fundo do corte inicial, proporcionando entalhes agudos, como exemplificado pela Figura 5.8 que é a imagem do entalhe final de um dos corpos-de-prova testados. O comprimento total do entalhe foi determinado com o auxílio de um microscópio óptico estéreo marca Wild Modelo M7A com câmera CCD Roper Scientific Photometrics acoplada a um microcomputador e software de análise de imagens.

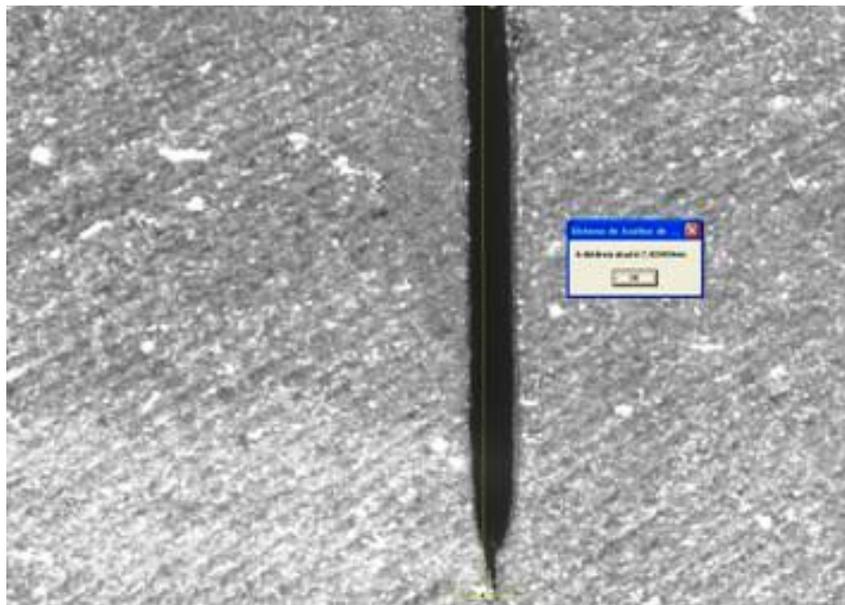


Figura 23 - Exemplo de entalhe criado para determinação da tenacidade à fratura; imagem obtida utilizando microscópio estereoscópio, aumento 6x.

Fonte: do Autor (2012).

Para a realização dos testes foi utilizada uma máquina de ensaios universal da marca Instron, modelo 5569 com capacidade máxima de carga de 50 kN, equipada com controle eletrônico de carga e deslocamento, além do dispositivo adequado para o teste de flexão a três pontos conforme indicações da norma regente.

O valor da tensão de escoamento utilizado para os cálculos de validação das dimensões do corpo-de-prova e corresponde a $0,7 \sigma_{c, \text{máx.}}$, onde $\sigma_{c, \text{máx.}}$ é a resistência máxima em compressão obtida conforme ASTM D695-02a. Este procedimento está de acordo com recomendação da norma base utilizada para casos em que testes para determinação de resistência à tração não podem ser realizados em função de restrições impostas pelas características do material.

5.4 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PARIS A e m

Para que o desenvolvimento matemático apresentado no capítulo 4 possa ser utilizado é essencial que os parâmetros de Paris, A e m , do material em análise sejam determinados para as condições de interesse. Portanto, a realização de testes experimentais de fadiga é requerida. Contudo, entende-se que a realização de um conjunto adequado de experimentos de fadiga para a validação da metodologia descrita neste trabalho exige um tempo de trabalho experimental e tratamento de dados bastante longo.

Desta forma, optou-se por utilizar a média dos parâmetros de Paris apresentados na literatura por Antunes et al. (2002) (Tabela 5) para demonstrar que a abordagem sugerida pode ser adotada para a previsão do comportamento em fadiga de materiais compósitos particulados.

Os três materiais estudados por Antunes et. al. (2002) apresentam grande semelhança com os compósitos particulados utilizados como guarnição de freios, principalmente em relação à estrutura, características físicas como densidade e resistência mecânica e em especial quanto à tenacidade à fratura dos aglomerantes (PMMA e resina fenólica), como pode ser verificado comparando as Tabelas 3 e 4 com as Tabelas 6 e 7.

Tendo em vista o objetivo de apresentar um método capaz de auxiliar nas previsões do comportamento em fadiga de materiais compósitos particulados, acredita-se que

a utilização dos dados relacionados à fadiga, mais especificamente os parâmetros de Paris, disponíveis na literatura não invalida a proposta do presente trabalho.

5.5 MÉTODO APLICADO E MODELO MATEMÁTICO

A proposta do presente trabalho é apresentar previsões realizadas com base na mecânica da fratura, considerando a presença de uma trinca pré-existente (a_0), para estimar o tamanho de trinca para o qual ocorre a falha do corpo de prova (a_c), o número de ciclos necessários para aumentar a trinca inicial até a fratura e a evolução dimensional da trinca.

Para a definição do tamanho inicial da trinca, que é intrínseco ao material e processo de fabricação, optou-se por utilizar como referência o tamanho de partícula correspondente ao diâmetro a 50%, obtido por análise de distribuição granulométrica a laser, da matéria-prima particulada de maior tamanho de partícula que constitui o compósito que corresponde a 1,0 mm. O resultado da distribuição de tamanho de partícula foi realizado utilizando-se um equipamento da marca Cilas, modelo 1180, por via seca, e está apresentado no Anexo I.

A opção pela utilização do diâmetro a 50% e não do maior diâmetro presente tem como objetivo compensar parte do efeito de redução do tamanho das partículas provocado pelo processo de homogeneização das matérias-primas constituintes do compósito. A matéria-prima em questão é um mineral alumino-silicato da família das argilas micáceas de estrutura lamelar, possui partículas significativamente maiores que os demais materiais presentes no compósito e grande potencial para atuar como nucleador de defeitos.

Com a definição do tamanho da trinca inicial calculou-se o fator geométrico Y_c através da Equação 4. A partir destas definições, com a aplicação da Equação 5, faz-se a previsão do comprimento da trinca no momento da fratura do componente através do conceito de tenacidade à fratura (Equação 2). Ou seja, é estabelecida a relação entre o tamanho crítico de trinca e a tensão aplicada ao material (a_c vs $\Delta\sigma$).

Ao iniciar a avaliação voltada para as previsões de vida em fadiga, a partir da determinação do tamanho crítico de trinca torna-se possível a determinação do número total de ciclos de fadiga necessários para levar o material à falha (N_f) através da aplicação da Equação 11. Ao proceder esta análise em função da tensão máxima aplicada durante o ciclo

de fadiga cria-se o diagrama S-N teórico ($\Delta\sigma$ vs N_f) do material ou componente que foi expresso em função da tensão máxima aplicada (σ_{max}) ao invés da variação da tensão por ter se considerado a tensão mínima igual a zero ($\sigma_{min} = 0$) como ocorre nas guarnições de sistemas de freio a tambor.

Adotando a abordagem incremental apresentada no Capítulo 4 foi prevista a evolução da trinca ao longo dos ciclos de fadiga. Para isso, inicialmente determinou-se a variação do fator de intensidade de tensão do compósito, ΔK_I , conforme a Equação 13 que é derivada diretamente da Equação 2.

$$\Delta K_I = Y_c \cdot \Delta\sigma \cdot \sqrt{\pi a_i} \quad (13)$$

Neste ponto, o valor máximo de K_I , representado por $(K_I)_{max}$, foi comparado ao valor da tenacidade à fratura do material analisado. Se $(K_I)_{max}$ é igual ou maior que a tenacidade à fratura do material a análise era encerrada, pois isto representa que ocorre a falha do material para o carregamento considerado.

Não ocorrendo a falha do material, prosseguiu-se com a análise calculando o incremento da trinca Δa fazendo uso das constantes de Paris, através do rearranjo da Equação 7, representado pela Equação 14, e tomadas as devidas considerações sobre a variação do fator de intensidade de tensão ΔK_I e o comprimento médio da trinca expresso pelas Equações 5 e 6.

$$\Delta a = A(Y_c \cdot \Delta\sigma \cdot \sqrt{\pi a_M})^m \cdot \Delta N \quad (14)$$

O valor considerado para ΔN foi, sempre que possível, igual a 1 ou o menor múltiplo possível de 10 para viabilizar os cálculos totais em um universo de até 10.000 iterações. O estabelecimento de ΔN como o menor valor possível colabora para a redução do erro introduzido por se considerar que ΔK_I é constante durante o avanço da trinca.

Em seguida, calculou-se o novo comprimento da trinca atualizando o número de ciclos de fadiga como expresso pelas Equações 15 e 16, respectivamente.

$$a_{i+1} = a_i + \Delta a \quad (15)$$

$$N_{i+1} = N_i + \Delta N \quad (16)$$

O novo comprimento da trinca foi então considerado para o próximo passo da integração incremental e o processo repetido até que a tenacidade à fratura do material seja atingida, neste ponto, foi registrado o tamanho da trinca corresponde ao comprimento crítico (a_c) e o respectivo número de ciclos de fadiga ao total de ciclos até a ocorrência da falha (N_f).

Como resultado deste procedimento foi possível estabelecer a relação entre tensão aplicada e vida em fadiga, expressa como número total de ciclos até a falha para diferentes valores de a_i . Ou seja, foi possível gerar diagramas S-N para diferentes comprimentos iniciais de trinca através do método de integração incremental, o que corresponde a relacionar o comprimento inicial de trinca com a vida em fadiga (a_i vs N_f).

Também foram estabelecidas através da abordagem incremental as relações entre tensão máxima aplicada nos ciclos de fadiga (σ_{max}) e o tamanho inicial de trinca (a_i) para provocar a falha do material no total de 10^4 , 10^5 e 10^6 ciclos, novamente tendo considerado a tensão mínima aplicada nos ciclos de fadiga igual a zero ($\sigma_{min} = 0$). Estes números totais de ciclos foram selecionados porque correspondem à variação do tempo de vida considerado em projeto para o desenvolvimento de guarnições para freios a tambor de veículos leves.

Salienta-se que as aplicações dos freios automotivos não seguem um formato bem definido como usualmente aplicado em testes de fadiga, mas sim ciclos aleatórios em que apenas as aplicações que resultam em um nível mínimo de tensão são responsáveis pelo incremento de trincas. Desta forma, estima-se que para atingir um número de 10^5 ciclos de tensão significativa a guarnição seja utilizada por vários anos quando considerado o uso em veículos de passeio.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A presente seção é dedicada à apresentação dos resultados relacionados à determinação da tenacidade à fratura do material estudado e à previsão dos resultados de testes de fadiga.

6.1 TENACIDADE À FRATURA – K_{IC}

O resultado de tenacidade à fratura obtido conforme a norma ASTM D5045-99 para a configuração de flexão a três pontos e seu respectivo desvio padrão são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultado de tenacidade à fratura para o material estudado. Média aritmética e desvio padrão dos trinta corpos-de-prova testados.

Tenacidade à Fratura, K_{IC}	Valor [MPa.m ^{1/2}]
Média	0,88
Desvio Padrão	0,06

Fonte: do Autor (2012).

A tabela completa com os resultados de tenacidade à fratura dos trinta corpos-de-prova é apresentada no Apêndice I.

Analisando o resultado obtido para a tenacidade à fratura do material estudado comparado aos valores disponíveis na literatura (ASHBY, 2005; CALLISTER JR., 2001) de diversos outros materiais, verifica-se que o valor medido apresenta boa correlação com os dados bibliográficos, especialmente ao comparar com a propriedade da resina fenólica, utilizada como ligante para materiais de fricção.

O fato do resultado medido para a tenacidade à fratura do material de fricção analisado corresponder a um valor muito próximo à média dos valores desta propriedade para resinas fenólicas sugere que, apesar da grande fração volumétrica de materiais particulados e

da presença de um elastômero na formação da matriz, a resina fenólica ainda é dominante quanto a magnitude da tenacidade à fratura para o material analisado.

6.2 RESULTADOS DA PREVISÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO EM FADIGA PARA O MATERIAL DE FRICÇÃO ANALISADO

A Figura 24 apresenta a relação entre o tamanho crítico de trinca e a tensão aplicada em fadiga para o material estudado.

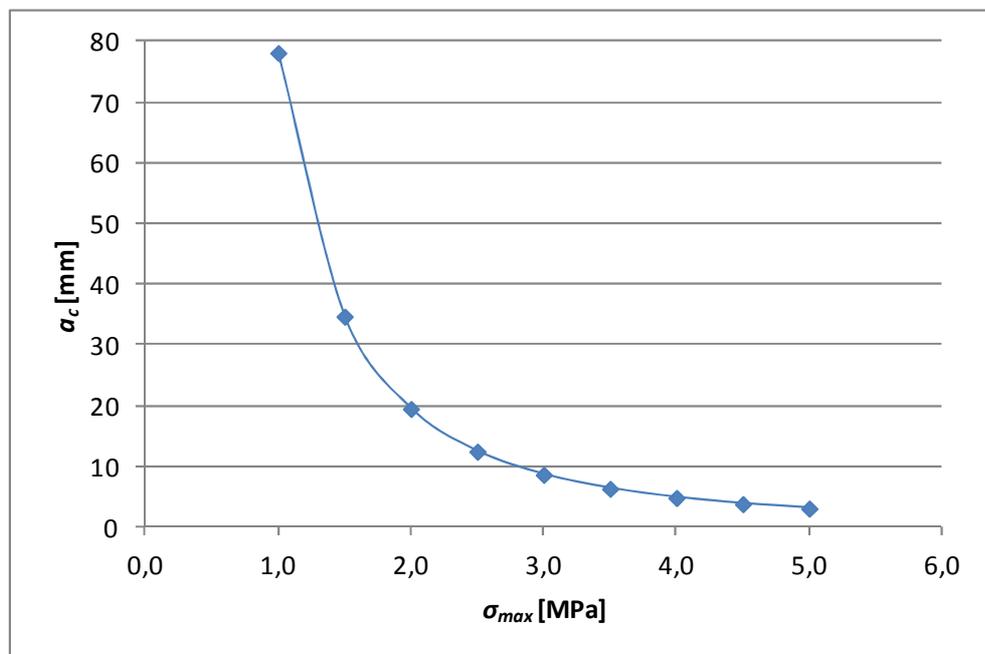


Figura 24 – Relação entre tensão aplicada e tamanho crítico de trinca para fratura do material estudado. Fonte: do Autor (2012).

A Figura 25 apresenta a relação entre tensão máxima aplicada em fadiga e o número total de ciclos suportado, ou seja, o diagrama S-N teórico, gerado através da integração total representada pela Equação 11 considerando-se os limites de integração $a_0 = 1,0$ mm e a_c conforme relação da Figura 1.

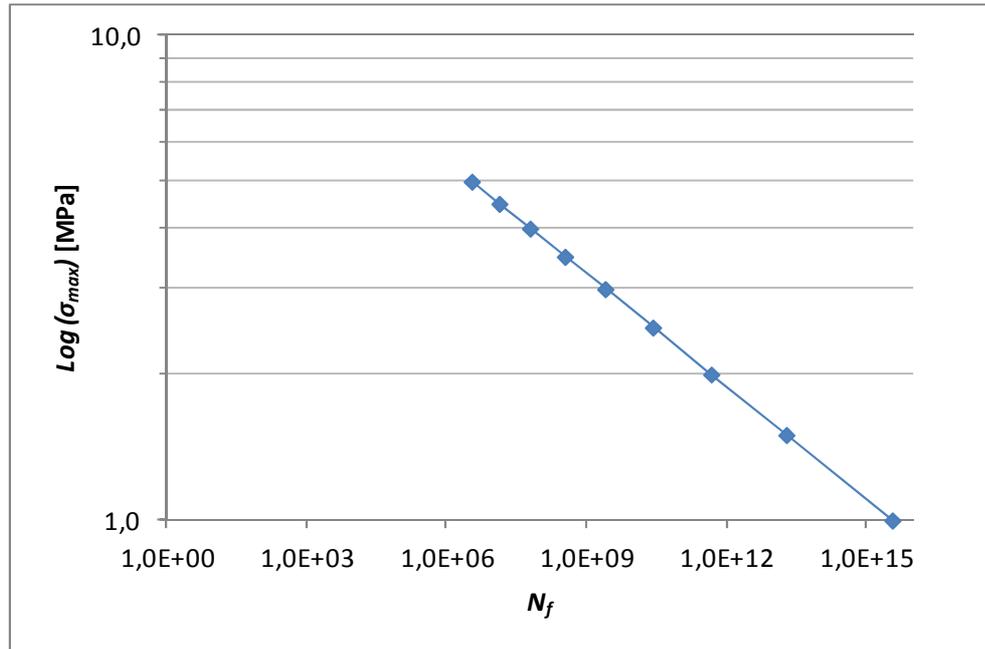


Figura 25 - Diagrama S-N teórico para o material analisado gerado através da integração total do número de ciclos considerando os limites $a_i = 1,0$ mm e a_c conforme Figura 16.

Fonte: do Autor (2012).

A Figura 26, gerada através do método de integração incremental, representa a relação entre tensão aplicada e vida em fadiga, expressa como número total de ciclos até a falha, para os diferentes comprimentos iniciais de trinca indicados. Esta figura é, portanto, equivalente à Figura 25, porém, gerada por outro método de integração e de contar com a previsão para diferentes tamanhos da trinca inicial.

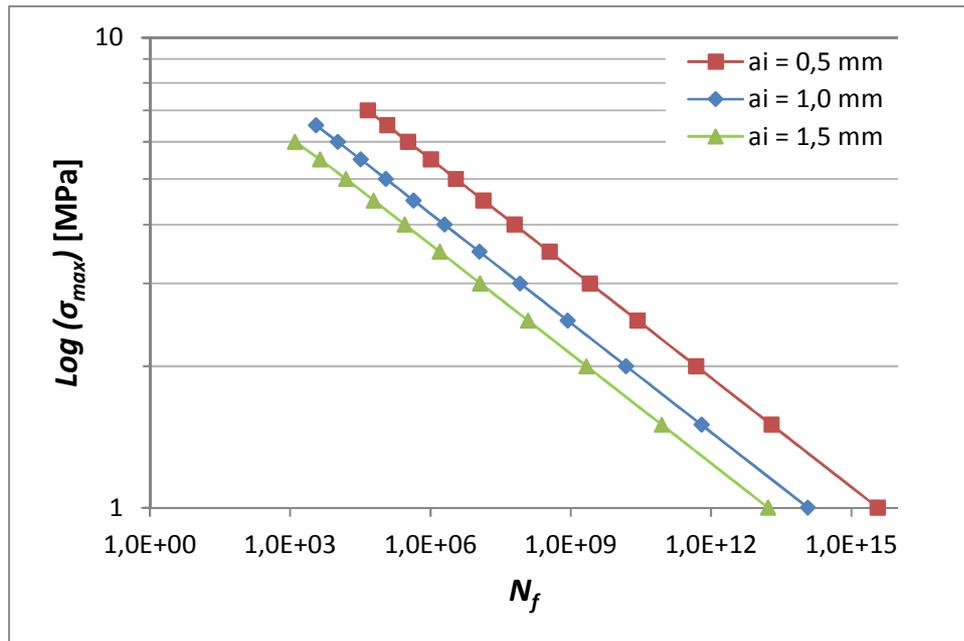


Figura 26 - Efeito do tamanho de trinca inicial no número total de ciclos até a falha.
Fonte: do Autor (2012).

A Figura 27 também foi gerada através da abordagem de integração incremental e apresenta as relações entre tensão máxima aplicada nos ciclos de fadiga e o tamanho inicial de trinca para provocar a falha do material para a vida total em fadiga (N_f) indicada.

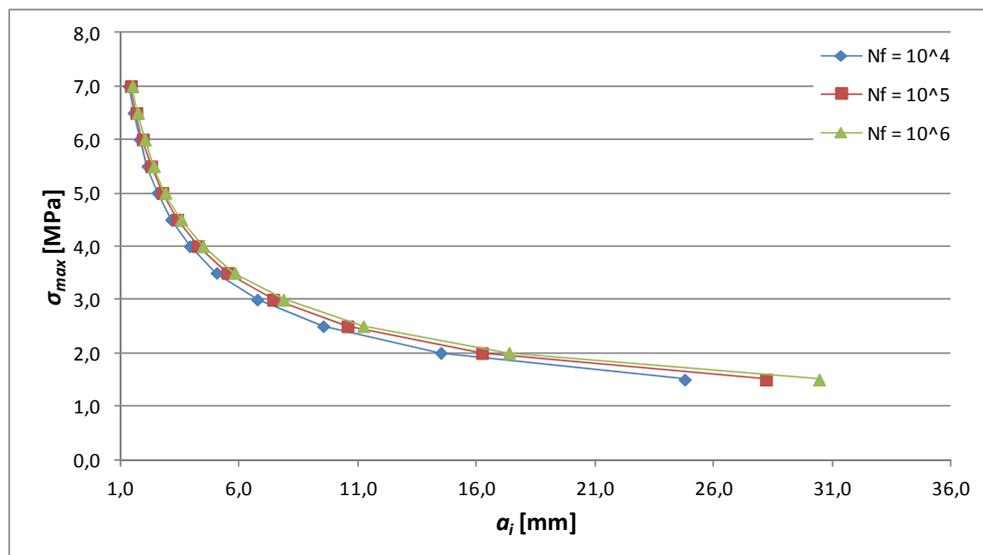


Figura 27 - Previsão de tensão máxima aplicada vs tamanho inicial de trinca para tempo de propagação da trinca equivalentes a 10^4 , 10^5 e 10^6 ciclos.
Fonte: do Autor (2012).

Com a apresentação destes resultados, considera-se que os quatro itens finais apresentados no diagrama da Figura 15, que representam os objetivos específicos do presente trabalho, foram alcançados.

7 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi desenvolvida uma sequência matemática apresentada no Capítulo 4 baseada nos conceitos da mecânica da fratura linear elástica através da abordagem de tolerância à falha para a determinação da vida de materiais compósitos particulados aplicados como materiais de fricção, considerando a presença de defeitos intrínsecos ao material e seu processo de fabricação e a exposição a esforços cíclicos típica da aplicação em freios automotivos. Também foi aplicado um método descrito na norma internacional ASTM D5045-99 para a determinação da tenacidade à fratura, K_{IC} , para a classe de material estudada, propriedade fundamental para o desenvolvimento do trabalho como um todo.

Os desenvolvimentos foram projetados para que as análises sejam conduzidas de forma incremental, conforme exposto no Capítulo 4 e detalhado na seção 5.5, técnica que facilita a visualização do desenvolvimento e propagação do defeito até o valor crítico em que ocorre a falha do componente. Possibilita também, uma previsão prática da vida residual de um componente no qual seja constatada a presença de uma trinca já em estágio de propagação, e ainda, uma estimativa da tensão máxima aplicada ao componente para que uma trinca se desenvolvesse até uma dimensão constatada após ser submetido um número de ciclos conhecido. Portanto, a abordagem incremental facilita a previsão de vida do componente submetido a esforços cíclicos, fornecendo subsídios diretos para que o engenheiro de produto possa otimizar produto e processo de fabricação de forma a reduzir custos de montagem e manutenção, garantindo o atendimento aos requisitos de projeto, a satisfação e segurança dos usuários de veículos automotores.

Neste trabalho, a parte experimental para a determinação dos valores de tenacidade à fratura de materiais de fricção foi realizada conforme estabelecido pela norma ASTM D5045-99 resultando no valor de $K_{IC} = 0,88 \text{ MPa.m}^{1/2}$. Cabe salientar que não houve grande discrepância entre os valores obtidos quando comparados entre si e quando comparados a valores disponíveis em literatura (ASHBY, 2005; CALLISTER JR., 2001) para materiais da mesma classe e materiais similares aos utilizados como aglomerantes para compósitos aplicados como materiais de fricção, o que significa que os valores obtidos podem ser considerados valores reais da propriedade. Este fato é extremamente importante porque o valor de K_{IC} é utilizado diretamente na análise

incremental para a previsão da vida do material que será considerada significativamente representativa.

O material utilizado como objeto de estudo para o presente trabalho foi selecionado por representar uma classe de materiais de fricção aplicada para freios a tambor que apresentam níveis de porosidade bastante baixos, podendo ser considerada nula, conforme pode ser verificado pelas imagens apresentadas. Este fato torna mais consistente a proposição de se relacionar o tamanho inicial de trinca, a_0 , ao tamanho das partículas do componente com maior tamanho de partículas do compósito. Como dados auxiliares também foi apresentada a caracterização do material estudado quanto às propriedades de resistência à compressão, resistência à flexão, densidade e dureza Rockwell R conforme normas internacionalmente reconhecidas.

Para a demonstração do método proposto, o fato de ter se utilizado valores das constantes de Paris, m e A , disponíveis na literatura em virtude da impossibilidade de obtenção experimental destas constantes para o material em estudo não compromete a validade da metodologia. Os valores utilizados para as constantes correspondem a valores obtidos para materiais da mesma classe, compósitos particulados com matriz de resina termorrígida, e certamente não destoam em grande magnitude dos valores que seriam obtidos experimentalmente para o material foco do estudo.

O método desenvolvido no presente trabalho tem como objetivo auxiliar na previsão do desempenho em fadiga de materiais compósitos particulados de forma a garantir a qualidade do produto e otimizar os custos com testes durante as fases de desenvolvimento e validação. Como foi demonstrado na seção de resultados, é possível utilizar o método de integração incremental descrito para a previsão das relações entre tensão aplicada e vida em fadiga, bem como para projetar materiais que atendam a um requisito mínimo de durabilidade em fadiga correlacionando a tensão cíclica aplicada e o tamanho de defeito intrínseco do material.

Entende-se que aplicação de tal método pode efetivamente colaborar para o aumento da competitividade e garantia da qualidade dos produtos nacionais, fatores fundamentais para a sustentabilidade da indústria brasileira, em especial para as indústrias ligadas ao setor automotivo que enfrentam atualmente um cenário internacional de grande competitividade e risco.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao longo do desenvolvimento e com a análise dos resultados do presente trabalho surgiram diversos temas que podem ser sugeridos para trabalhos futuros e são listados a seguir:

- Incorporar à metodologia desenvolvida no presente trabalho os efeitos provocados pela temperatura, seja pela variação da tenacidade à fratura com a temperatura ou pela introdução de tensões térmicas relacionadas à diferença de coeficientes de expansão térmica do material de fricção e do patim metálico ao qual este é fixado;
- Investigar o erro associado ao se assumir para as previsões que a tensão externa máxima aplicada sobre o material de fricção é constante (ciclo de carregamento em formato senoidal ou quadrado) em relação ao perfil variável que de fato ocorre na aplicação de freios automotivos;
- Investigar a influência de porosidade e conseqüentemente a aplicabilidade e eventual necessidade de adaptação da metodologia proposta à materiais com percentual de porosidade significativos;
- Investigar a influência de fibras de reforço nos mecanismos de propagação de trincas para materiais de fricção;
- Investigar as características de adesão entre a resina formadora da matriz e as partículas das cargas utilizadas no compósito analisado, possíveis métodos de tenacificação pelo aumento da adesão e seus efeitos no desempenho em fadiga.

REFERÊNCIAS

AL-QURESHI, H.A.; **Composite Materials: Fabrication and Analysis**. 3. ed. Instituto Tecnológico de Aeronáutica – Brasil, 1988.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E647-00: Fatigue Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. West Conshohocken, 2000.

_____. **ASTM E466-07**: Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests on metallic Materials. West Conshohocken, 2007.

_____. **ASTM D5045-99**: Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials. West Conshohocken, 2007.

ANTUNES, F. V. et al. **Fatigue Life Predictions in Polymer Particle Composites**. International Journal of Fatigue, 2002, vol. 24, p. 1095-1105.

ASHBY, M. F. **Materials Selection in mechanical Design**. 3.ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.

BLAU, P. J. **Friction Science and Technology**: from concepts to applications. 2.ed. Boca Raton: CRC Press, 2009.

BROBERG, K. B. **Cracks and Fracture**. San Diego: Academic Press, 1999.

CALLISTER Jr, W. D. **Fundamentals of Materials Science and Engineering**. 5.ed. New York, John Willey & Sons, 2001.

CASARIL, A. **Modelagem Matemática e Avaliação Experimental do Módulo de Elasticidade de Materiais Compósitos Particulados de Matriz Fenólica para Uso como Material de Fricção**. Porto Alegre, 2009. 67 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais, UFRGS.

CASARIL, A. **Análise Micromecânica dos Compósitos com Fibras Curtas e Partículas**. Florianópolis, 2004. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

CASARIL, A. et al. **Micromechanical Analysis of Composites with Short Fibers and Particles**. Key Engineering materials, v. 348-9, 2007.

CENTRO AUTOMOTIVO CAXAMBU. Manutenção do sistema de freios. 2011. Disponível em: <<http://centroautomotivocaxambu.blogspot.com/2011/04/manutencao-sistema-de-freios.html>>. Acesso em: 24 out. 2011.

DIAS, A.L. **Por que os freios a tambor ainda estão entre nós?** Disponível em: <http://www.jalopnik.com.br/conteudo/por-que-os-freios-a-tambor-ainda-estao-entre-nos>> Acesso em: 15 out. 2010.

GILLESPIE, T.D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. 1.ed. Society of Automotive Engineers International Publications – EUA, 1992.

HARRIS, B. **Fatigue in Composites: Science and Technology of Fatigue Response of Fibre-Reinforced Plastics**. 1. ed. Boca Raton – Florida: CRC Press, 2003.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13003:** Fibre-reinforced Plastics – Determination of Fatigue Properties under Cyclic Loading Conditions. Switzerland, 2003.

NONDESTRUCTIVE TESTING RESOURCE CENTER. **Introduction to materials and processes**. Disponível em: <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Mechanical/Fatigue.htm>> Acesso em: 06 dez. 2011.

KNOPS, M. **Analysis of Failure in Fiber Polymer Laminates**. 1.ed. New York: Springer, 2008.

LAHAM, S. Al. **Stress Intensity Factor and Limit Load Handbook**. British Energy Generation Ltd, 1999. Disponível em: http://www.eurofitnet.org/sintap_BRITISH_ENERGY_sif-ll_final.pdf> Acesso em 02 dez. 2011.

LEE, J; YEE, A. F. **Micro-Mechanical Deformation Mechanisms in the Fracture of Hybrid-Particulate Composites Based on Glass Beads, Rubber and Epoxies**. Polymer Engineering and Science Journal, 2000, vol. 40, n. 12, p. 2457-2470.

LEE, Y.L. et al. **Fatigue Testing and Analysis: Theory and Practice**. 1 ed. Heidelberg: Elsevier, 2005.

LIMPERT, R. **Brake Design and Safety**. 2.ed. Society of Automotive Engineers International Publications – EUA, 1999.

LIU, C. T.; YANG, J. N. ; **Determination of Equivalent Initial Flaw Size in a Particulate Composite Material**. 8.ed. ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability, 2000.

MALLICK, P. K. **Fiber Reinforced Composites: Materials, manufacturing and Design**. 3.ed. CRC Press, 2008.

MATOZO, L.T. **Análise de Materiais de Fundo de Alto Amortecimento e Seus Efeitos em Pastilhas de Freio**. 2006. 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

MENETRIER, A. R. **Estudos de Controle da Composição e Processo para Controle da Compressibilidade**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2006.

MERITOR. 2011. Disponível em: <www.meritor.com>. Acesso em: 28 out. 2011.

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

OTO. Autos.com. **Optimize the function of the Car Disk Brake**. 2011. Disponível em: <<http://www.otoautos.com/optimize-the-function-of-the-car-disc-brake/>>. Acesso em 14 out. 2011.

PARIS, P.; ERDOGAN, F. **A critical Analysis of Crack Propagation Laws**. J. Basic Eng. Tran. ASME, 1963, p. 528-534.

PARIS, P.; GOMEZ, M.; ANDERSON, W.; **A Rational Analytic Theory of Fatigue**. Trends Eng., 1961, vol. 13, p. 9-14.

PERES, F. M. **Métodos de Mecânica da Fratura Aplicados a Polietileno de Alta Densidade Destinado à Extrusão de Tubos**. 2009. 170 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

PUGNO, N. et al. **A generalized Paris' law for fatigue crack growth**. Journal of The Mechanics and Physics of Solids, 2006, n. 54, p. 1333-1349.

RÖSLER, J.; HARDERS, H.; BÄKER, M. **Mechanical Behaviour of Engineering Materials**. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2007.

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. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

SHUKLA, A. **Practical Fracture Mechanics in Design**. 2.ed. New York: Marcel Dekker, 2005.

VERMA, A. P. **Effective Fracture Toughness of Particle Composites**. Journal of the institution of Engineers (India), Part MM: Metallurgy and Materials Science Division, 2004, vol. 85, p. 59-64.

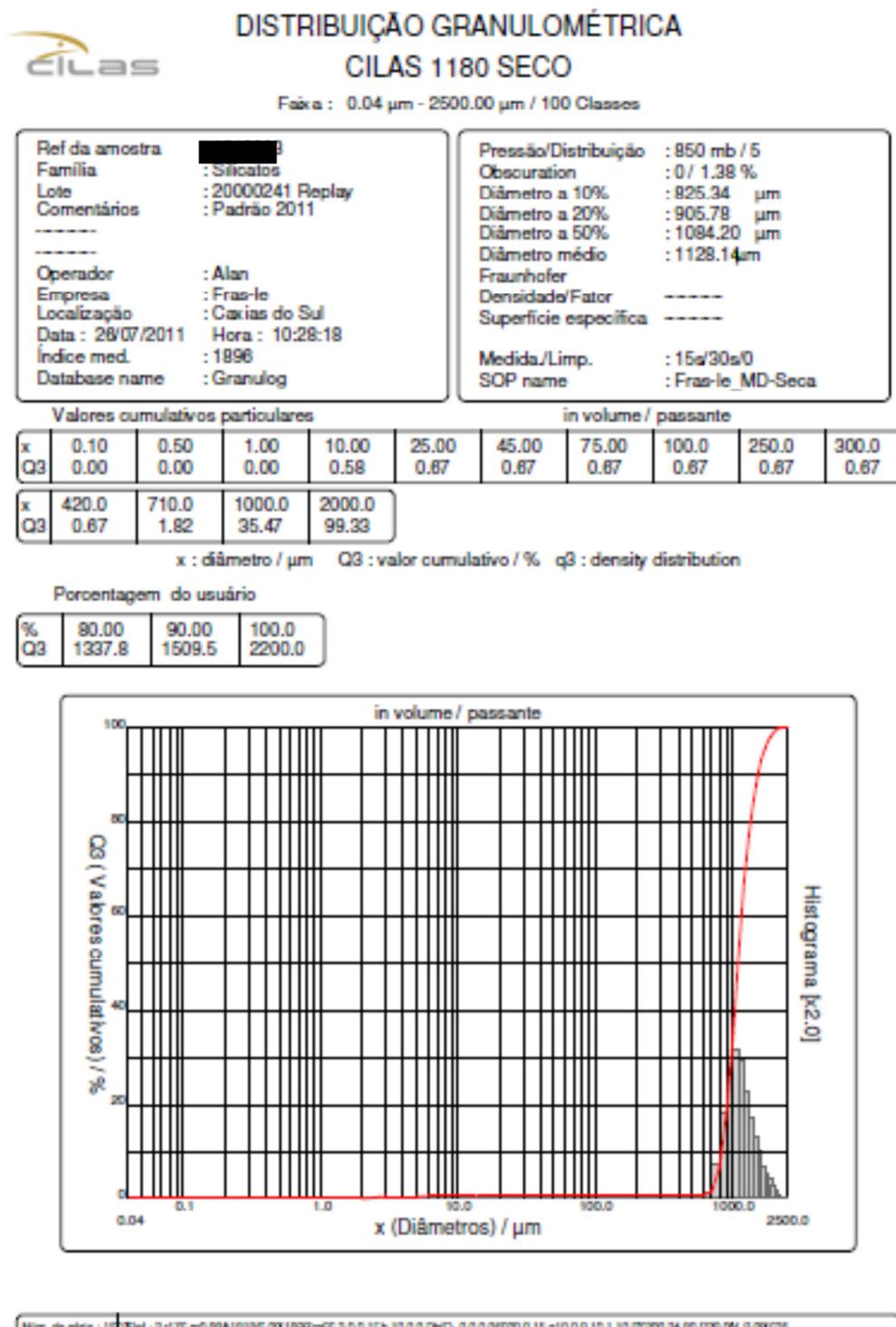
WÖHLER, A. **Versuche Über Die Festyikeit Eisenbahnwagenuchsen**. Z. Bauwesen 10, 1860.

APÊNDICE I – RESULTADOS DE TENACIDADE À FRATURA

A tabela a seguir apresenta os resultados de K_{IC} para os trinta corpos-de-prova testados.

Corpo de Prova	f(x)	KQ		KIC	
1	11,309	880682	PaVm	0,881	MPavm
2	10,784	880607	PaVm	0,881	MPavm
3	11,365	842005	PaVm	0,842	MPavm
4	11,111	923116	PaVm	0,923	MPavm
5	10,892	917227	PaVm	0,917	MPavm
6	11,249	871371	PaVm	0,871	MPavm
7	11,565	896766	PaVm	0,897	MPavm
8	11,377	892313	PaVm	0,892	MPavm
9	11,212	870687	PaVm	0,871	MPavm
10	10,876	855142	PaVm	0,855	MPavm
11	11,062	779496	PaVm	0,779	MPavm
12	11,355	814181	PaVm	0,814	MPavm
13	11,237	819524	PaVm	0,820	MPavm
14	11,441	865833	PaVm	0,866	MPavm
15	11,094	831083	PaVm	0,831	MPavm
16	10,780	828068	PaVm	0,828	MPavm
17	11,740	751511	PaVm	0,752	MPavm
18	11,382	848948	PaVm	0,849	MPavm
19	11,305	941784	PaVm	0,942	MPavm
20	10,966	854796	PaVm	0,855	MPavm
21	10,722	883258	PaVm	0,883	MPavm
22	10,904	872386	PaVm	0,872	MPavm
23	10,878	920160	PaVm	0,920	MPavm
24	11,408	994495	PaVm	0,994	MPavm
25	11,198	931571	PaVm	0,932	MPavm
26	10,917	917882	PaVm	0,918	MPavm
27	10,824	883336	PaVm	0,883	MPavm
28	11,260	926686	PaVm	0,927	MPavm
29	9,469	920067	PaVm	0,920	MPavm
30	11,392	1005567	PaVm	1,006	MPavm

ANEXO I – RESULTADO DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA A LASER DO MATERIAL UTILIZADO PARA A DETERMINAÇÃO DO TAMANHO INICIAL DE TRINCA



Cortesia: Fras-le S.A.

