

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
PRO-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO, PESQUISA E EXTENSÃO  
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**

**MARIANA DE SOUZA FORTES**

**CONTEÚDO DIGITAL PARA ENSINAGEM DE ANÁLISE E  
INTERPRETAÇÃO DE FALHAS MECÂNICAS**

**Volta Redonda  
2013**

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
PRO-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO, PESQUISA E EXTENSÃO  
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**

**MARIANA DE SOUZA FORTES**

**CONTEÚDO DIGITAL PARA ENSINAGEM DE ANÁLISE E  
INTERPRETAÇÃO DE FALHAS MECÂNICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de mestre em Materiais.

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria Ismênia Sodero Toledo Faria

**Volta Redonda  
2013**

### **FICHA CATALOGRÁFICA**

Bibliotecária: Alice Tacão Wagner - CRB 7/RJ 4316

F738c Fortes, Mariana de Souza.  
Conteúdo digital para ensinagem de análise e interpretação de falhas  
mecânicas. / Mariana de Souza Fortes. – Volta Redonda: UniFOA, 2013.

81 p. : II

Orientadora: Maria Ismênia Sodero Toledo Faria  
Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em  
Materiais, 2013.

1. Design instrucional - dissertação. 2. Análise de falhas. I. Centro  
Universitário de Volta Redonda. II. Título.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por ter me dado saúde e força de vontade para concluir este trabalho.

Aos meus queridos pais Christovam e Elenora por sempre terem me apoiado em tudo que fiz.

Ao meu querido Gustavo, pelo apoio em todas as etapas deste trabalho e compreensão nos momentos de ausência.

A minha orientadora e amiga Profa. Dra. Maria Ismênia Sodero Toledo Faria, pela paciência, estímulo e orientação.

Ao professor Msc. Darwin Motta, pela dedicação e enorme contribuição para elaboração deste trabalho.

Ao professor Dr. Carlos Baptista da Escola de Engenharia de Lorena EEL-USP pela colaboração neste trabalho.

Aos professores Drs. Rosinei Batista e Nelson Tavares Matias pelas orientações e ensinamentos para conclusão deste trabalho.

## RESUMO

O presente projeto consistiu na elaboração de um material instrucional digital para análise e interpretação de falhas mecânicas, realizando a descrição da metodologia utilizada para este tipo de análise e demonstrando qual a influência da estrutura de grãos, processo de nucleação de trinca, histórico térmico e mecânico no aparecimento das mesmas. O objetivo foi transmitir as experiências adquiridas por um profissional que atua na área de caracterização de falhas mecânicas e armazenar todas as informações em um material didático, utilizando recursos de fácil acesso e com uma linguagem adequada ao perfil do público, podendo ser utilizado por alunos de graduação em engenharia e por empresas para treinamento de pessoas, de forma a garantir a transmissão de competências e evitar a centralização das mesmas. A metodologia do trabalho foi dividida em duas etapas principais. A primeira consistiu na elaboração do conteúdo teórico, em que foram definidos os conceitos descritos no trabalho, a escolha dos estudos de casos, os tipos de esforços e de fraturas ocorridos nestes estudos de caso. Os dois estudos de casos abordados no trabalho são de parafusos utilizados na montagem de componentes de veículos automotores, sendo que o primeiro estudo de caso ocorreu em um parafuso de fixação da barra estabilizadora no berço do motor, que apresentou características de fratura dúctil, provocadas por esforço de torção, devido ao mau posicionamento do parafuso e posterior aplicação do torque durante o processo de montagem. O segundo estudo de caso ocorreu em um parafuso de fixação do suporte elástico do motor que foi submetido ao ensaio de resistência e apresentou características de fratura por fadiga. Após definição e análise dos estudos de caso e elaboração do conteúdo do conceito teórico, foi realizada a segunda etapa, que se refere à criação do objeto de aprendizagem. O produto é um material instrucional, em formato de livro digital, em que a interação com o leitor é realizada de forma simples e didática, pois se utiliza de recursos multimidiáticos para promover a transmissão e a popularização do conhecimento.

Palavras-chave: Caracterização microestrutural, Análise de falhas, Design instrucional, Materiais.

## ABSTRACT

The present project consisted of the elaboration of a digital instruction material for analysis and mechanical interpretation defective, accomplishing the description of the methodology used for this type of analysis and demonstrating which the influence of the structure of grains, process of nucleation of clenches, thermal and mechanical description in the appearance of the same. The aim was to transmit the acquired experiences for a professional who acts in the area of mechanical characterization defective and to store all the information in a didactic material, using resources of easy access and with an appropriate language to the profile of the public, being able to be used by pupils of graduation in engineering and companies for training of people, in order to guarantee the transmission of abilities and to avoid the centralization of the same. The methodology of the work was divided in two main stages. First it consisted of the elaboration of the theoretical content, where the described concepts in the work, the choice of the studies of cases, the types of efforts and breakings occurred in these studies of case were defined. The two studies of boarded cases in the work are of screws used in the assembly of components of automachine vehicles, being that the first study of case it occurred in a screw of setting of the stabilizing bar in the cradle of the engine, that presented characteristics of ductile breaking, provoked for torsional effort, due to the bad positioning of the screw and posterior application of the torque during the assembly process. Second the study of case it occurred in a screw of setting of the elastic support of the engine that was submitted to the resistance essay and presented characteristics of breaking for fatigue. After definition and analysis of the studies of case and elaboration of the content of the theoretical concept, were accomplished the second stage, that mentions to the creation of the learning object. The product is an instruction material, in digital book format, where the interaction with the lecturer is accomplished of simple and didactic form, therefore it is used of multimedia resources to promote the transmission and the popularization of the knowledge.

Keywords: Microstructural characterization, Analysis of defective, Instructional design, Material.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVO.....	14
3	MOTIVAÇÃO.....	15
4	METODOLOGIA DA CONSTRUÇÃO DO MATERIAL INSTRUCIONAL.....	16
5	REFERENCIAL TEÓRICO PARA ELABORAÇÃO DO CONTEÚDO DIGITAL...	19
5.1	A importância do conteúdo digital para o processo de aprendizagem.....	19
5.2	Design em situações de ensino-aprendizagem.....	20
5.3	O design instrucional para ensino de engenharia.....	21
5.4	Desafios na produção de um conteúdo instrucional digital para análise de falhas mecânicas em materiais.....	22
6	FUNDAMENTOS E CONCEITOS PARA ANÁLISE DE FRATURA.....	24
6.1	A INFLUÊNCIA DO MODO DE SOLICITAÇÃO.....	25
6.1.1	Tração.....	25
6.1.2	Compressão.....	26
6.1.3	Torção.....	26
6.1.4	Flexão.....	27
6.2	ENSAIO DE TRAÇÃO.....	28
6.3	TENSÕES CÍCLICAS.....	29
6.3.1	Ciclo de tensões alternadas.....	29
6.3.2	Ciclo de tensões repetidas.....	29
6.3.3	Ciclo de tensões aleatórias.....	30
6.4	FRACTOGRAFIA.....	31
6.4.1	Fratura Dúctil.....	31
6.4.2	Fratura Frágil.....	35
6.4.2.1	Ensaio de Impacto.....	38
6.4.3	Fratura Semi Frágil.....	41
6.4.4	Fratura Intergranular.....	41
6.4.5	Fratura por Fadiga.....	43
	Taxa de propagação da trinca durante os estágios.....	45
6.4.5.1	Fadiga Mecânica.....	45
	Fatores que influenciam a fratura por Fadiga Mecânica.....	47

Aparência ou morfologia do dano de uma fratura por Fadiga Mecânica.....	49
Prevenção.....	50
Inspeção e Monitoramento.....	51
6.4.5.2 Fadiga Térmica.....	51
Fatores que influenciam a fratura por Fadiga Térmica.....	51
Aparência ou morfologia do dano.....	52
Prevenção.....	53
Inspeção e Monitoramento.....	54
6.4.5.3 Ensaio de Fadiga.....	54
6.4.5.4 Cuidados na fabricação do corpo de prova.....	55
7 METODOLOGIA PARA INTERPRETAÇÃO DE UMA FALHA.....	56
8 ESTUDO DE CASO.....	60
8.1 Parafuso de fixação do berço do motor.....	60
8.1.1 Introdução.....	60
8.1.2 Objetivo.....	60
8.1.3 Dados da peça.....	60
8.1.4 A análise.....	61
8.1.5 Conclusão do estudo de caso: Parafuso de fixação do berço do motor.....	68
8.2 Parafuso de fixação central do Suporte Elástico do Motor.....	68
8.2.1 Introdução.....	68
8.2.2 Objetivo.....	69
8.2.3 Dados da peça.....	69
8.2.4 A análise.....	69
8.2.5 Conclusão do Estudo de caso: Parafuso de fixação central do Suporte Elástico do Motor.....	77
9 CONCLUSÃO DO TRABALHO.....	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

## ÍNDICES

### LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados do ensaio de tração dos parafusos de fixação do berço do motor, em estado novo.....67

Tabela 2: Resultado da análise micrográfica, realizada no material do parafuso de fixação central do suporte elástico do motor, fraturado durante ensaio de resistência.....76

Tabela 3: Resultado do ensaio de dureza, realizado no material do parafuso de fixação central do suporte elástico do motor, fraturado durante ensaio de resistência.....76

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Descrição das etapas para elaboração do conceito teórico.....	16
Figura 2: Descrição das etapas para elaboração do material digital.....	17
Figura 3: Exemplo dos slides transmitidos para a equipe de design para elaboração do material instrucional. ....	23
Figura 4: Exemplo dos slides transmitidos para a equipe de design para elaboração do material instrucional. ....	26
Figura 5: Influência do modo de sollicitação sobre o aspecto macrográfico das fraturas - Esforço por compressão.....	26
Figura 6: Influência do modo de sollicitação sobre o aspecto macrográfico das fraturas - Esforço por torção.....	27
Figura 7: Influência do modo de sollicitação sobre o aspecto macrográfico das fraturas - Esforço por flexão.....	27
Figura 8: Gráfico do ensaio de tração, curva tensão – deformação.....	28
Figura 9: Desenho esquemático do Ciclo de tensões alternadas.....	29
Figura 10: Desenho esquemático do Ciclo de tensões repetidas.....	30
Figura 11: Desenho esquemático do Ciclo de tensões aleatórias.....	30
Figura 12: Comportamento de um corpo de prova de material dúctil quando submetido a ensaio de tração.....	32
Figura 13: Empescoçamento inicial -início da deformação permanente.....	32
Figura 14: Formação de pequenas cavidades .....	33
Figura 15: Coalescência de cavidades para formar uma trinca.....	33
Figura 16: Propagação da trinca .....	34
Figura 17: Fratura final por cisalhamento segundo um ângulo de 45° em relação à direção de tração.....	34
Figura 18: Microfractografia, por meio de MEV de um material em alumínio.....	34
Figura 19: Microfractografia, por meio de MEV de um material em aço.....	35
Figura 20: Macrofractografia de um aço SAE 1050 com fratura frágil.....	35
Figura 21: Macrofractografia de um aço SAE 1050 com fratura frágil.....	36
Figura 22: Marcas de rio em superfícies de fratura frágil de um material em ferro puro com matriz ferrítica.....	36
Figura 23: Representação esquemática da propagação de clivagem transgranular.....	37

Figura 24: Microfractografia, via MEV e a identificação de facetas de clivagem.....	38
Figura 25: Representação do resultado fornecido pelo ensaio de impacto.....	39
Figura 26: Representação do resultado fornecido pelo ensaio de impacto.....	40
Figura 27: Fratura semi-frágil de um aço SAE 1025, apresentando características intermediárias entre as fraturas dúctil (dimples) e frágil (facetas de clivagem).....	41
Figura 28: Representação esquemática de uma fratura intergranular .....	42
Figura 29: Propagação de trincas nos contornos de grãos - Fratura intergranular de uma aço SAE 1050.....	42
Figura 30: Estágios de propagação de trinca por fadiga .....	43
Figura 31: Estrias de fadiga de um material em liga de alumínio (AlSi7Mg0,3) .....	44
Figura 32: Processo de crescimento da trinca por fadiga .....	45
Figura 33: Superfícies fraturadas de um corpo de prova submetido à fadiga de alto ciclo.....	47
Figura 34: Imagens dos fatores que podem provocar a fratura por fadiga.....	48
Figura 35: Fratura em fadiga mecânica de um alumínio.....	50
Figura 36: Fratura de um eixo com aspecto característico de marcas de catraca ....	50
Figura 37: Fratura em fadiga térmica de um alumínio.....	53
Figura 38: Fluxograma para avaliação de uma análise de falha via Macroscopia em Estereomicroscópio e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). .....	56
Figura 39: Sequência para avaliação da conformidade do material de uma peça falhada. ....	59
Figura 40: Detalhe da região que o parafuso estava sendo fixado no berço quando fraturou.....	61
Figura 41: Parafuso de fixação do berço do motor.....	62
Figura 42: Parafuso fraturado apresentando deformação do tipo torção.....	62
Figura 43: Fotografia por meio do estereomicroscópio da região dos filetes do parafuso.....	63
Figura 44: Fotomicrografias das superfícies de fratura.....	63
Figura 45: Imagens via MEV da superfície fraturada do parafuso de fixação.....	65
Figura 46: Gráfico com resultados do ensaio de Tração, realizado nos parafusos em estado novo.....	67
Figura 47: Detalhe da região central de fixação do parafuso no suporte elástico do motor. ....	70
Figura 48: Parafuso de fixação do suporte elástico do motor.....	70

Figura 49: Superfície fraturada do parafuso de fixação do suporte elástico do motor .....	71
Figura 50: Imagem da superfície fraturada do parafuso de fixação central do suporte elástico.....	72
Figura 51: Imagem via MEV da superfície fraturada do parafuso de fixação.....	73
Figura 52: Detalhe das demais regiões da superfície fraturada do parafuso.....	74
Figura 53: Fotomicrografias do parafuso.....	76

## 1 INTRODUÇÃO

O avanço e popularização do uso de dispositivos digitais para fins educacionais e a utilização de recursos multimidiáticos são utilizados por empresas para promoverem a difusão e a socialização do conhecimento, pois permitem que os envolvidos no processo educacional tenham flexibilidade em relação à utilização do tempo e espaço, com a possibilidade de terem acesso a conteúdos ricos e que permitem um melhor aproveitamento instrucional.

Diante deste cenário, o presente projeto apresenta um material instrucional, que será apresentado no formato de um livro digital, e contará com a interpretação e análise dos tipos de falhas de forma a demonstrar qual a influência da estrutura de grãos, processo de nucleação de trinca, histórico térmico e mecânico no aparecimento das mesmas.

Este projeto vai de encontro às novas propostas de ensino permitindo que o conhecimento, antes apresentado somente por recursos convencionais ou mesmo somente pela prática profissional, possa ser transmitido por meio de um recurso de fácil acesso e com uma linguagem adequada ao perfil de público, que são empresas que atuam na área de laboratório de análise de material metálicos e estudantes de graduação em engenharia.

O documento escrito apresenta todas as informações relacionadas ao processo de elaboração do material instrucional digital, descrevendo inicialmente a metodologia para a construção desse material, Em seguida serão apresentados os conceitos teóricos a respeito do design instrucional, abordando sua importância no processo de aprendizagem e os desafios na produção desse conteúdo instrucional digital, e os conceitos teóricos necessários para a interpretação de uma análise. Por fim, serão apresentados dois estudos de casos, que ilustrarão a sequência de análise proposta.

## **2 OBJETIVO**

O objetivo do presente trabalho foi elaborar um material instrucional para ensinagem de análise e interpretação de falhas mecânica. Busca-se transmitir as experiências adquiridas de um profissional que atua na área de caracterização de falhas mecânicas e armazenar todas as informações em um material didático, utilizando recursos de fácil acesso e com uma linguagem adequada ao perfil do público, podendo ser utilizado por alunos de pós-graduação (lato-sensu, strictu-sensu, especialização) em engenharia e áreas afins, e por empresas para treinamento de pessoas, de forma a garantir a transmissão de competências e evitar a centralização das mesmas.

### **3 MOTIVAÇÃO**

A motivação para elaboração deste material instrucional foi a necessidade de multiplicar o conhecimento em caracterização de falhas mecânicas por meio de microscopia ótica e eletrônica de varredura, e de transmitir a experiência adquirida, armazenando as informações em um material para treinamento de pessoas em empresas.

#### 4 MÉTODOS PARA CONSTRUÇÃO DO MATERIAL INSTRUCIONAL

O conteúdo do material instrucional neste projeto divide-se em duas etapas. A primeira etapa será dividida em duas partes, em que serão apresentados os conceitos teóricos necessários para interpretação de uma análise de falhas dos estudos de caso apresentados neste trabalho (Figura 1).

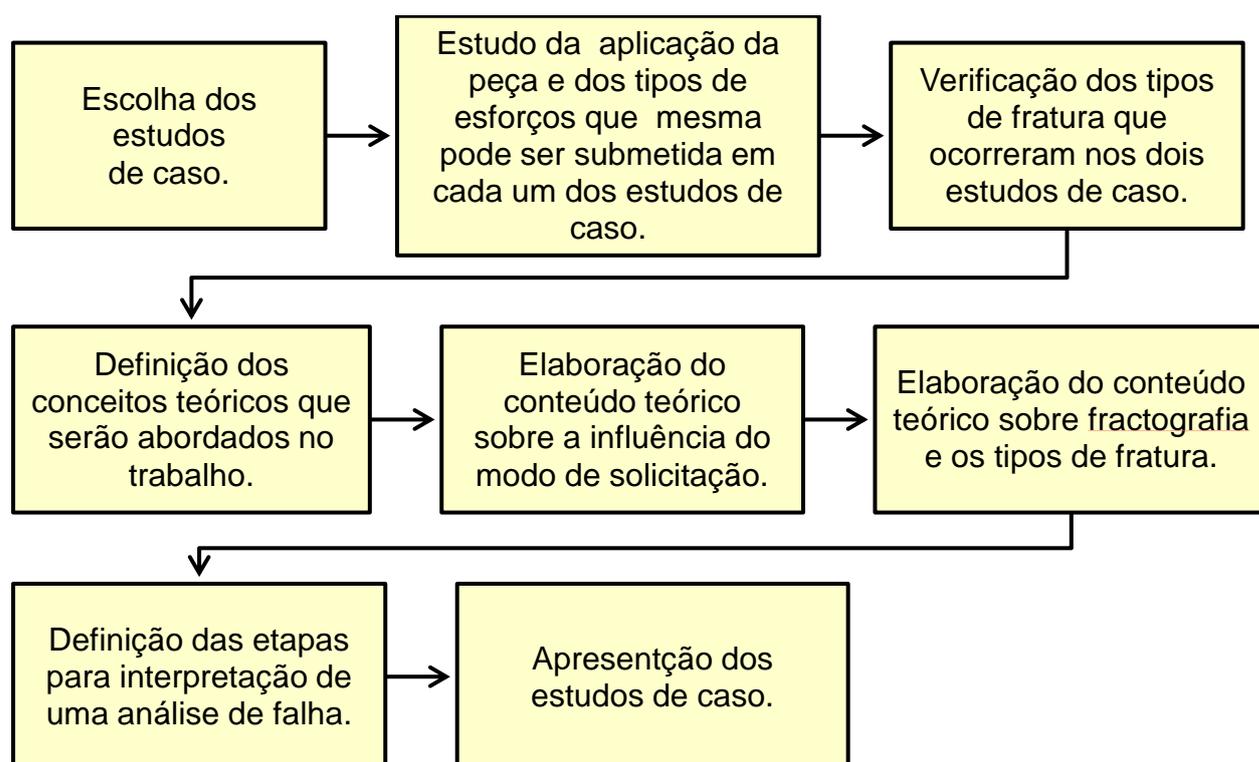


Figura 1: Descrição das etapas para elaboração do conceito teórico  
Fonte: autora (2013)

Na segunda fase será realizado o levantamento e a verificação do material/conteúdo produzido, definindo as estratégias e selecionando as ferramentas para elaboração do material digital, utilizando as tecnologias adequadas (Figura 2).

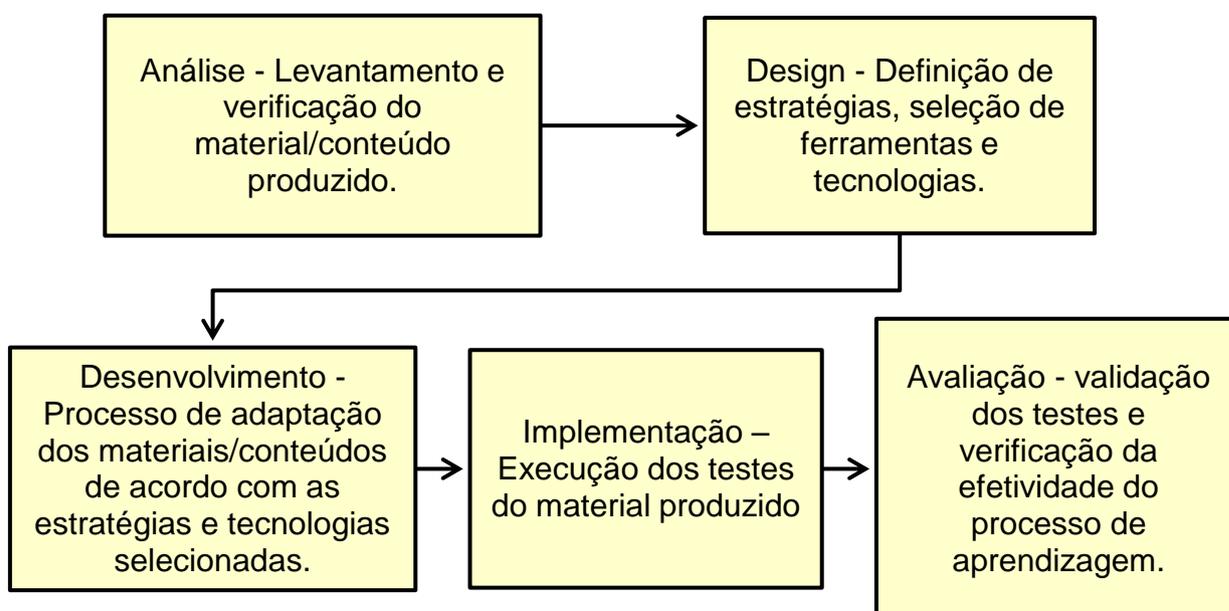


Figura 2: Descrição das etapas para elaboração do material digital  
Fonte: autora (2013)

A escolha da ferramenta a ser utilizada para desenvolvimento e implementação do produto é de extrema importância, pois tratando-se de mercado editorial, cujo setor é responsável por grande parte da produção de livros digitais e outros produtos similares, a ferramenta mais difundida, bem como a mais utilizada é o software InDesign®, de propriedade da empresa Adobe®.

Tal ferramenta é dotada de diversos recursos, os quais permitem ao desenvolvedor a produção de livros tradicionais e também de produtos editoriais com conteúdos multimídiaicos que, no caso, corresponde ao resultado desse trabalho. Outro detalhe que devemos apontar e que contribuiu para a escolha da plataforma Adobe para o desenvolvimento e o suporte final do produto é o fato de que o formato escolhido – o PDF (Portable Document File) interativo – é nativo dos softwares da empresa Adobe, pois foi a mesma que o desenvolveu. Tal característica facilita o processo de produção e elimina a possibilidade de incompatibilidade entre arquivos.

A versatilidade, no que se refere aos tipos de dispositivos que serão utilizados para visualização do conteúdo digital, também foi um fator decisivo para a escolha da plataforma Adobe, pois o formato PDF pode ser visualizado tanto em computadores pessoais (desktops e notebooks), quanto em dispositivos móveis (tablets e smartphones).

## **5 REFERENCIAL TEÓRICO PARA ELABORAÇÃO DO CONTEÚDO DIGITAL**

### **5.1 A importância do conteúdo digital para o processo de aprendizagem**

A utilização de tecnologias aliadas à necessidade de se aprender rapidamente vem transformando os modelos tradicionais de ensino, tornando-se uma ferramenta útil e de enriquecimento do aprendizado. A procura por mecanismos computacionais que permitam evolução desta tecnologia não para de crescer e entre estas tecnologias destacam-se os Objetos de Aprendizagem que são ‘entidades digitais’ que procuram promover a perfeita divulgação e organização da informação.

Tais conteúdos digitais são importantes por permitir que mediadores e aprendizes possam desfrutar de recursos que amenizam a sobrecarga de informação, pois a memória humana possui uma capacidade limitada de processamento. No aprendizado eletrônico, é preciso apoiar o aluno nos processos de seleção, integração, armazenamento e recuperação da informação (FILATRO, 2008).

Nesse sentido, o processo de seleção pode orientar-se por métodos instrucionais que canalizam a atenção do aluno, em que ocorra por meio de imagens e cores que dirigem a atenção para um determinado ponto do conteúdo. Ao se produzir um objeto de aprendizagem, devem-se ressaltar os objetivos, de modo que o aluno possa direcionar sua atenção para os elementos mais importantes (FILATRO, 2008).

Desta forma, o objeto de aprendizagem deve adotar princípios que reduzam a dificuldade ao material, de forma a eliminar informações visuais irrelevantes, que não estão relacionados ao conteúdo e apresentar textos objetivos. Oferecer palavras, imagens e sons em uma apresentação unificada torna a integração entre os canais de processamento mais fácil, pois a memória de trabalho une informações visuais e auditivas, e posteriormente as integra ao conhecimento já armazenado na memória de longo prazo. Desta forma, atividades práticas ativam o processo de integração dos novos conhecimentos aos conhecimentos preexistentes. O objeto de aprendizagem também pode contribuir para a recuperação e a transferência dos conhecimentos armazenados na memória de longo prazo. Para isso, deve oferecer exemplos e atividades práticas que incorporem elementos e situações autênticas dos contextos de uso pós-aprendizagem. Quando a informação é apresentada em duas modalidades sensoriais – visual e auditiva, são ativados dois sistemas de

processamento e a capacidade de memória de trabalho é estendida (FILATRO, 2008).

## 5.2 Design em situações de ensino-aprendizagem

O design em situações de ensino-aprendizagem é uma linha de investigação, sendo inserida preferencialmente no campo acadêmico, e aglutinando trabalhos onde haja participação do designer em projetos voltados para a Educação em qualquer nível – Infantil, Fundamental, Médio, Superior e Avançado – bem como reunindo estudos e pesquisas relacionadas ao ensino de design nos âmbitos extra universitário, técnico, extensão, de graduação e de pós-graduação. Seu princípio básico é potencializar o processo de construção e conhecimento. Nesta perspectiva, cada solução de design representa a busca de equilíbrio entre interesses e necessidades do professor e do aluno, como também das instituições educacionais PORTUGAL (2009).

As diferentes disciplinas de design estão cada vez mais envolvidas em projetos que requerem um conjunto de competências com o intuito de formar designers, não apenas relacionado com a habilidade e capacidade de projetar objetos, mas também por meio da forma de abordar os problemas ou métodos de trabalho que geralmente leva a inovação. Este novo perfil que se forma a partir da experiência de trabalhar em equipes interdisciplinares, com atores tão distintos em conhecimentos, atitudes e cultura, ao mesmo tempo em que amplia o campo de ação do design, requer reflexões sobre as características que o define em diversas culturas em constante mudança PORTUGAL (2013).

Anastasiou (2003, p. 15) aborda o conceito de ensinagem, que visa:

Uma prática social complexa efetivada entre os sujeitos, professor e aluno, englobando tanto a ação de ensinar quanto a de apreender, em um processo contratual, de parceria deliberada e consciente para o enfrentamento na construção do conhecimento escolar. (ANASTASIOU, 2003, p. 15).

Para ampliar o conceito de ensinagem, Anastasiou (2003, p. 15) faz uma diferenciação entre os conceitos de aprender e apreender, para ela aprender significa “tomar conhecimento, reter na memória mediante estudo, receber a informação” e apreender significa “segurar, prender, pegar, assimilar mentalmente, entender, compreender e agarrar”. A autora também enfatiza a necessidade de

mudar a postura de “assistir ou dar aulas” pela ação de “fazer aulas”. Dessa forma, no processo de ensinagem o que se busca é uma construção coletiva do conhecimento ressaltando-se o gosto, o sabor e a vontade que podem ser construídas no processo de ensinar e apreender,

Na ensinagem, o processo de ensinar e apreender exige um clima de trabalho tal que se possa saborear o conhecimento em questão. O sabor é percebido pelos alunos quando o docente ensina determinada área que também saboreia, na lida cotidiana profissional e / ou na pesquisa, e a socializa com seus parceiros na sala de aula. Para isso, o saber inclui um saber o quê, um saber como, um saber por quê e um saber para quê. (ANASTASIOU, 2003, p. 15)

Anastasiou (2003, p. 15) ressalta o gosto e os sabores do conhecimento, no qual desfrutam-se professor e aluno com as suas ‘responsabilidades próprias e específicas’, pois no processo de ensinagem há uma tentativa de superar o velho modelo de ensino pautado na fala do professor, na mera transmissão do conhecimento e busca-se construir um processo de novos significados para o desenvolvimento do ensino e da pesquisa, no qual ressalta-se os sentidos e significados desses processos.

### **5.3 O design instrucional para ensino de engenharia**

Embora a difusão de conteúdos digitais esteja em pleno andamento, é perceptível que o ensino de engenharia, em sua maioria, baseia-se no modelo tradicional, em que o processo instrucional ainda se concentra na utilização de livros, lousas e fala dos professores.

Outra situação a se destacar está relacionada ao fato de que a maioria dos professores atuantes no ensino de engenharia são profissionais bem sucedidos em atuação empresarial ou científica, ou seja, alguns deles não possuem qualquer formação específica para a produção de material instrucional.

Tal situação se repete dentro das indústrias, aonde há o agravamento dessa circunstância por questões relacionadas ao tempo e disponibilidade dos treinadores que, em sua maioria, são profissionais que possuem habilidades didáticas, mas que ainda sim reproduzem o que já obtiveram em suas formações.

Inserir novas metodologias ou tecnologias para o ensino de engenharia ainda é um grande desafio, pois não se trata apenas de adquirir novos equipamentos ou recursos, trata-se de uma mudança na forma como os

engenheiros são formados e preparados para lidar com uma situação de compartilhamento do conhecimento.

#### **5.4 Desafios na produção de um conteúdo instrucional digital para análise de falhas mecânicas em materiais**

O maior desafio para a elaboração do material instrucional torna-se o diálogo entre os pesquisadores que possuem as informações do conteúdo técnico necessário para a análise de falha mecânica e os profissionais que iriam construir o material digital propriamente dito. Desta forma, durante todo o trabalho buscou-se adotar diferentes formas de contato e diálogo para que esta dificuldade fosse superada. A metodologia inicial adotada foi a discussão entre os membros da equipe para a definição de um roteiro que contemplasse todo o conteúdo teórico e prático para a construção do material instrucional. Durante as reuniões foram levantadas as possibilidades de visualização do material, de forma que as informações pudessem ter entendimento e acesso fácil.

A definição do conteúdo e o roteiro para construção do material instrucional passou por várias adequações, a fim de assegurar que as informações ali descritas estivessem de acordo com o objetivo do trabalho, fazendo com que a forma de apresentação do conteúdo teórico estivesse correta e que o material pudesse realmente facilitar a transferência dos conhecimentos. A adequação do conteúdo teórico com a parte de design digital foi construída em várias etapas, pois a maior preocupação era garantir que a ideia de apresentar um material totalmente didático e de fácil entendimento fosse transposta para a parte digital. O conteúdo teórico foi elaborado em rascunho e também em slides, no qual era descrita a maneira que as informações deveriam ser apresentadas, assim como a animação a ser aplicada (Figura 3).

**Compressão:**

Quando o material é submetido a cargas de compressão, as relações entre tensão e deformação são semelhantes àquelas obtidas no ensaio de tração. Até a tensão de escoamento, o material comporta-se elasticamente. Ultrapassado esse valor, ocorre deformação plástica. Com o avanço da deformação, o material endurece (**encruamento**) e ocorre um aumento no diâmetro da seção transversal do corpo de prova.

**Glossário:**  
**Encruamento:** É o aumento na dureza e na resistência de um metal dúctil à medida que ele é submetido a um processo de deformação plástica em uma temperatura abaixo de sua temperatura de recristalização.

Ref. Bibliográfica: A. Garcia; J. A. Spim; C. A. dos Santos, "Ensaio dos Materiais", 2000.

(a)

Em materiais dúcteis as tensões de cisalhamento são sempre responsáveis por deformações importantes, que se traduzem raramente por uma ruptura.

Em materiais frágeis, a ruptura ocorre perpendicularmente à tensão máxima de tração. De fato, qualquer que seja o sentido da fratura (transversal ou uniforme), as rupturas são paralelas ao eixo de sollicitação, e iniciam-se em qualquer ponto da seção.

Ref. Bibliográfica: Annick; I. Pokorny, "Tractographie - Macrographies et Micrographies", Techniques de l'ingénieur - Traitè Matériaux Métalliques.

(b)

**Torção:**

A torção geralmente ocorre em materiais cilíndricos ou que são submetidos a movimentos de rotação.

Em materiais dúcteis, ainda são as tensões de cisalhamento que são a origem de deformações importantes, porém, pouco visíveis. A torção das fibras superficiais é o índice do tipo de sollicitação. As rupturas ocorrem no plano de cisalhamento transversal e apresentam o aspecto de um "turbilhão" no centro da peça (torção pura).

Em materiais frágeis, a ruptura se produz em um plano perpendicular à tensão de tração, que é inclinada a 45° ao eixo de sollicitação. Ela se produz por uma ruptura em formato de hélice, característica neste tipo de sollicitação.

Ref. Bibliográfica: Annick; I. Pokorny, "Tractographie - Macrographies et Micrographies", Techniques de l'ingénieur - Traitè Matériaux Métalliques.

(c)

**Flexão:**

Em peças que sofrem esforço de flexão, encontraremos uma combinação de tração e compressão. No caso de uma flexão de 03 pontos, a face onde é aplicado o esforço, será em compressão e a face oposta em tração. A ruptura sempre se iniciará na face de tração. A face de ruptura será idêntica a uma ruptura dúctil ou frágil em tração.

Ref. Bibliográfica: Annick; I. Pokorny, "Tractographie - Macrographies et Micrographies", Techniques de l'ingénieur - Traitè Matériaux Métalliques.

(d)

Torção (anelo Moriana)

1. Diagrama de um anelo submetido a torção com setas indicando o sentido da rotação.

2. Material DÚCTIL: Diagrama de uma ruptura por torção em um material dúctil, mostrando uma superfície de ruptura helicoidal.

3. Material FRÁGIL: Diagrama de uma ruptura por torção em um material frágil, mostrando uma superfície de ruptura plana perpendicular ao eixo.

(e)

Flexão

1. Diagrama de uma flexão de 3 pontos em uma barra.

2. Material DÚCTIL: Diagrama de uma ruptura por flexão em um material dúctil, mostrando uma superfície de ruptura curva.

3. Material FRÁGIL: Diagrama de uma ruptura por flexão em um material frágil, mostrando uma superfície de ruptura plana perpendicular ao eixo.

Handwritten notes in Portuguese describe the fracture patterns: "Ruptura de tipo frágil (material frágil) com deformação localizada em um ponto da superfície da peça" and "Ruptura de tipo dúctil (material dúctil) com deformação localizada em um ponto da superfície da peça".

(f)

Figura 3: (a), (b), (c), (d), (e) e (f) - Exemplo dos slides transmitidos para a equipe de design para elaboração do material instrucional  
 Fonte: autora (2013)

## 6 FUNDAMENTOS E CONCEITOS PARA ANÁLISE DE FRATURA

Embora mecânicos e metalurgistas, trabalhem com cálculos cada vez mais avançados, ainda é difícil assegurar a perenidade das máquinas projetadas, pois avarias ocorrem, e às vezes podem ocorrer sem característica sistêmica ou repetidamente. Neste caso, a análise das peças degradadas ou rompidas pode explicar essas avarias. Essa análise é denominada fractografia (CALLISTER, 2006).

A fractografia é a arte de observar superfícies danificadas ou rompidas, mais precisamente sua morfologia, com o objetivo de determinar os mecanismos, as regiões de início e principalmente estabelecer a causa da fratura, pois cada dano apresenta uma face característica de fratura. Por meio da observação das particularidades da degradação, como: a posição; a geometria; a trinca e coloração, podemos obter informações sobre as condições nas quais a fratura ocorreu. Desta forma, fractografia é o estudo de todas as degradações, geradas por solicitações de origens diversas: mecânica; química; térmica e biológica (CALLISTER, 2006).

No início do século e durante muitos anos, a fractografia foi utilizada por razões puramente físicas, ficando restrita a um exame macrográfico, com o auxílio lupas. A introdução do Microscópio Eletrônico de Transmissão (MET) e seguidamente do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), permitiu o maior desenvolvimento da fractografia. De fato, o MEV possui dentre as características principais o alto poder de resolução, a elevada capacidade de ampliação e grande profundidade de campo, permitindo assim, a caracterização mais precisa das faces de degradação. Esta observação é denominada microfractografia. Porém, esta técnica não substitui a macrofractografia, ela apenas complementa, pois somente por meio dela, não se podem obter todas as informações sobre a ruptura. A análise macrográfica permite determinar como e em que convém recorrer às técnicas, que seja para levantar uma ambiguidade, uma contradição ou trazer uma informação complementar (CALLISTER, 2006).

## 6.1 A INFLUÊNCIA DO MODO DE SOLICITAÇÃO

A causa para falha na maioria das estruturas geralmente está relacionada a problemas de negligência durante o projeto, a construção ou a operação do componente, no qual procedimentos existentes são suficientes para se evitar a falha, mas não são seguidos por uma ou mais partes envolvidas, devido a erro humano. Fabricação mal feita, materiais inadequados ou abaixo de especificações, erros na análise de tensões e de operação são exemplos de casos em que uma tecnologia apropriada, e a experiência estão disponíveis, mas não são aplicadas. Desta forma, na execução de um novo projeto são necessários vários testes e análises para verificar se a modificação da geometria da peça e/ou a introdução de um novo material para o mesmo componente pode levar a resultados inesperados em relação ao comportamento mecânico quando submetido a esforços (CALLISTER, 2006).

A fratura ocorre quando existe a separação de um corpo em duas ou mais partes em decorrência de uma tensão de natureza estática. A tensão aplicada depende do tipo de esforço que a peça é submetida, e pode ser de tração, compressão, cisalhamento ou torção (CALLISTER, 2006).

### 6.1.1 Tração

Em materiais dúcteis, que são aqueles com elevada capacidade de deformação, as tensões de cisalhamento são responsáveis por deformações plásticas importantes, que se traduzem por alongamento e estricção. A ruptura se inicia no centro e se propaga pela superfície e termina por linhas de cisalhamento inclinadas à  $45^\circ$ . Em materiais frágeis, ou seja, aqueles que possuem fraca capacidade de deformação, a ruptura é rigorosamente perpendicular ao eixo de solicitação em tração. A distribuição de tensões uniformes em qualquer seção pode iniciar a ruptura em qualquer ponto (POKORNY, 2009) (Figura 4).

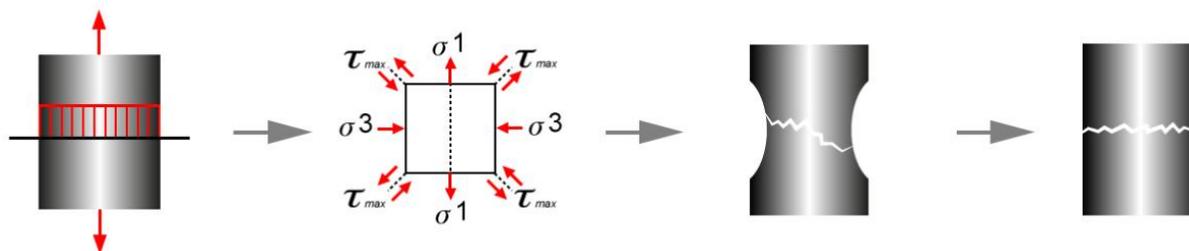


Figura 4: Influência do modo de sollicitação sobre o aspecto macrográfico das fraturas - Esforço por tração  
 Fonte: adaptada de Pokorny (2009)

### 6.1.2 Compressão

Em materiais dúcteis as tensões de cisalhamento são sempre responsáveis por deformações importantes, que se traduzem raramente por uma ruptura. Em materiais frágeis, a fratura ocorre perpendicularmente à tensão máxima de tração. De fato, qualquer que seja o sentido da fratura (transversal ou uniforme), as rupturas são paralelas ao eixo de sollicitação, e iniciam-se em qualquer ponto da seção (POKORNY, 2009) (Figura 5).

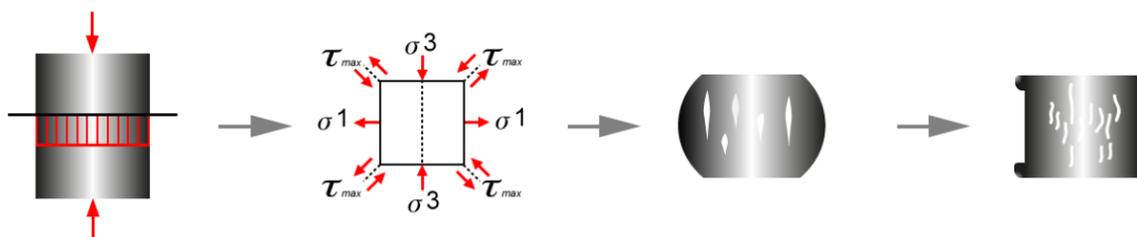


Figura 5: Influência do modo de sollicitação sobre o aspecto macrográfico das fraturas - Esforço por compressão  
 Fonte: adaptada de Pokorny (2009)

### 6.1.3 Torção

Em materiais dúcteis, ainda são as tensões de cisalhamento que são a origem de deformações importantes, porém, pouco visíveis. A torção das fibras superficiais é o indício do tipo de sollicitação. As rupturas ocorrem no plano de cisalhamento transversal e apresentam o aspecto de um “turbilhonamento” no centro da peça, torção pura (POKORNY, 2009) (Figura 6).

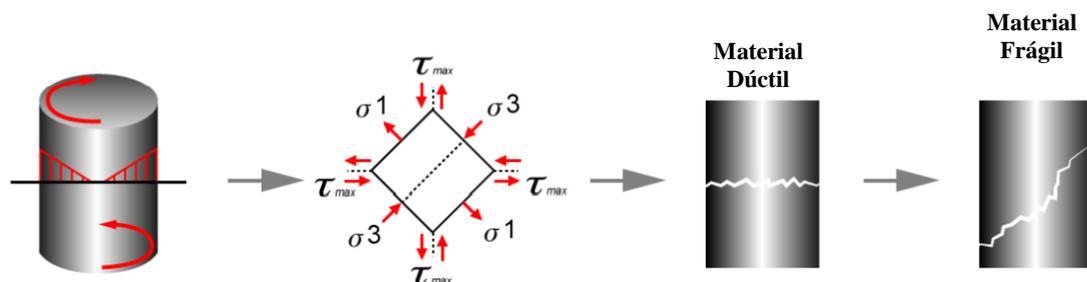


Figura 6: Influência do modo de sollicitação sobre o aspecto macrográfico das fraturas - Esforço por torção

Fonte: adaptada de Pokorny (2009)

#### 6.1.4 Flexão

Em peças que sofrem esforço de flexão, encontraremos uma combinação de tração e compressão. No caso de uma flexão de 03 pontos, a face onde é aplicado o esforço, será em compressão e a face oposta em tração. A ruptura sempre se iniciará na face de tração. A face de ruptura será idêntica a uma ruptura dúctil ou frágil em tração (POKORNY, 2009) (Figura 7).

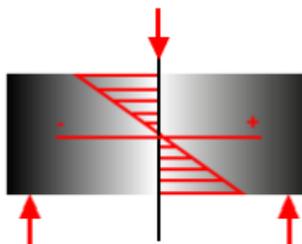
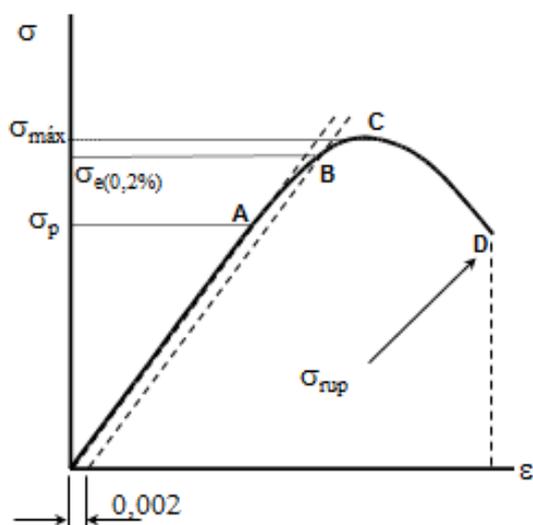


Figura 7: Influência do modo de sollicitação sobre o aspecto macrográfico das fraturas - Esforço por flexão

Fonte: adaptada de Pokorny (2009)

## 6.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração consiste na aplicação de carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova específico até a ruptura. É realizada a medida da variação do comprimento ( $l$ ) como função da carga ( $P$ ). É um ensaio amplamente utilizado na indústria de componentes mecânicos, devido à vantagem de fornecer dados quantitativos das características mecânicas dos materiais. Entre as principais destacam-se: limite de resistência à tração ( $\sigma$ ), limite de escoamento ( $\sigma_e$ ), módulo de elasticidade ( $E$ ), módulo de resiliência ( $U_r$ ), módulo de tenacidade ( $U_t$ ), ductilidade, coeficiente de encruamento ( $n$ ) e coeficiente de resistência ( $k$ ). O ensaio de tração é bastante utilizado como teste para controle das especificações da matéria prima recebida. Os resultados nos ensaios de tração são altamente influenciados pela temperatura, pela velocidade de deformação, pela anisotropia do material, pelo tamanho de grão, pela porcentagem de impurezas, bem como pelas condições ambientais. As tensões podem ser provenientes de carregamentos cíclicos mecânicos e/ou térmicos, e geralmente ocorrem abaixo da tensão de limite de escoamento do material (GARCIA, SPIM, SANTOS, 2000) (Figura 8).



- Limite de proporcionalidade ( $\sigma_p$ ).
- Limite elástico ( $\sigma_e$ ).
- Limite de escoamento ( $\sigma_e(0,2\%)$ ).
- Limite de resistência à tração ( $\sigma_{máx}$ ).
- Tensão de ruptura ( $\sigma_{rup}$ ).

Figura 8: Gráfico do ensaio de tração, curva tensão – deformação  
Fonte: adaptada de Garcia, Spim e Santos (2000)

## 6.3 TENSÕES CÍCLICAS

Um ciclo de tensão corresponde a um conjunto sucessivo de valores de tensão, que se repetem na mesma sequência e no mesmo período de tempo. Existem três modalidades diferentes de variações de tensão, responsáveis por falhas por fadiga, ao longo do tempo (CALLISTER, 2006).

### 6.3.1 Ciclo de tensões alternadas:

Quando a tensão alterna entre uma tensão de tração máxima (+) e uma tensão de compressão máxima (-) de igual magnitude (Figura 9).

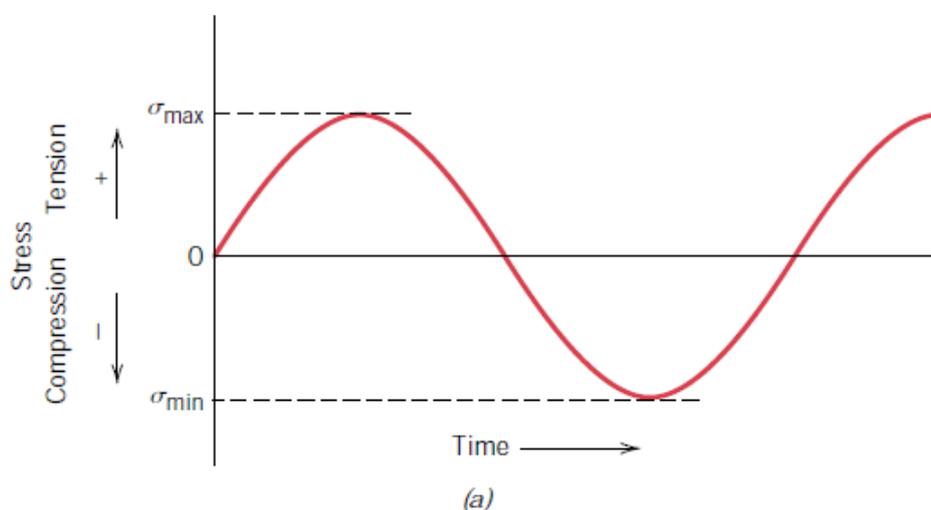


Figura 9: Desenho esquemático do Ciclo de tensões alternadas  
Fonte: adaptada de Callister (2006)

### 6.3.2 Ciclo de tensões repetidas

Quando as tensões máximas e mínimas são assimétricas em relação ao nível zero de tensão (Figura 10).

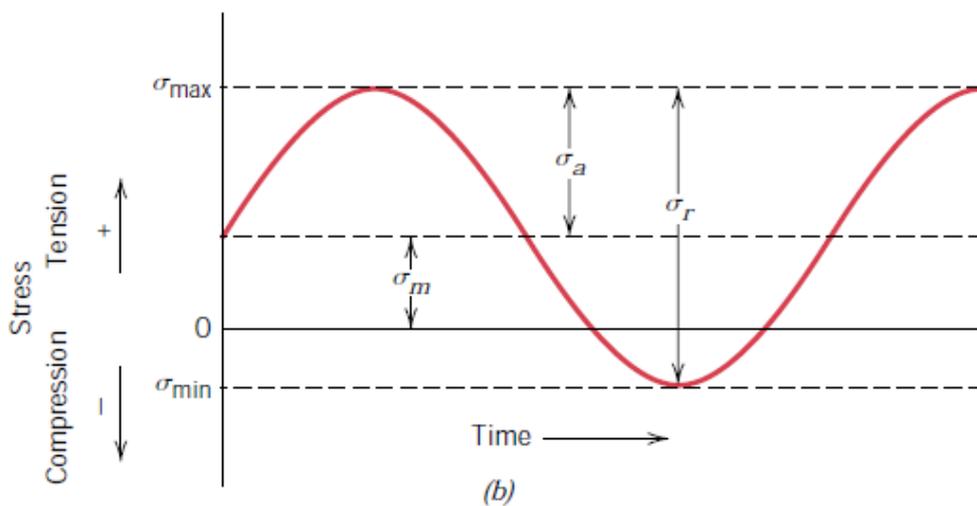


Figura 10: Desenho esquemático do Ciclo de tensões repetidas  
 Fonte: adaptada de Callister (2006)

### 6.3.3 Ciclo de tensões aleatórias

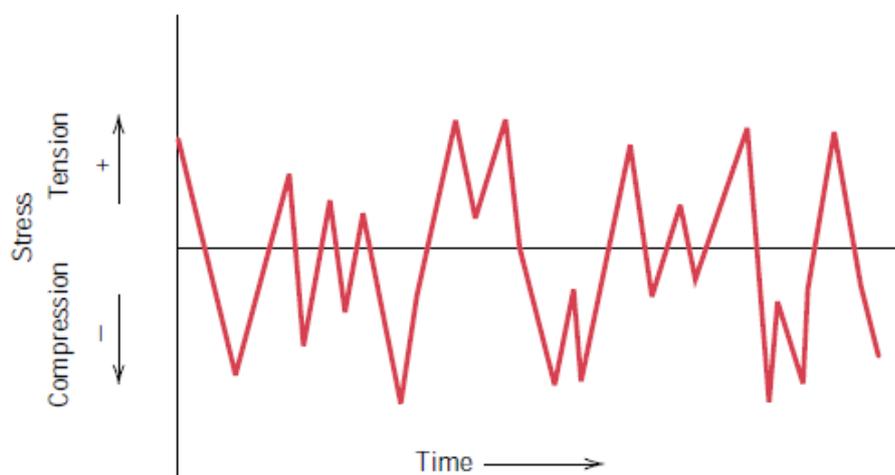


Figura 11: Desenho esquemático do Ciclo de tensões aleatórias  
 Fonte: adaptada de Callister (2006)

## 6.4 FRACTOGRAFIA

A observação macrográfica é realizada por meio de inspeção visual, com ferramentas simples como a olho nu, lupa e lentes binoculares. O objetivo é observar com maior atenção o aspecto geral da peça e da fratura, possibilitando determinar o tipo de fratura (presença ou ausência de deformação ou de estrição, aspecto das superfícies de fratura: brilhante, fosca, lisa ou granular), determinar o modo de sollicitação que a peça foi submetida, localizar a região que iniciou a fratura (por meio da convergência de linhas, presença de defeitos ou oxidação), e orientar os exames e as técnicas de investigação complementares (microscopia eletrônica de varredura, exames metalúrgicos análises micrográficas antes e após ataque químico), com o objetivo de avaliar a sanidade interna e característica microestrutural, ensaios mecânicos e análises químicas. A etapa de análise fractográfica é essencial, pois as técnicas de microfractografia não poderiam ser aplicadas sistematicamente a qualquer estudo de fratura (POKORNY, 2009).

A classificação dos diferentes tipos de ruptura é baseada de acordo com a capacidade de deformação plástica do material (CALLISTER, 2006).

### 6.4.1 Fratura Dúctil

Segundo Godefroid e Cândido (2005, p.57), as superfícies de fratura dúctil possuem características diferentes tanto macroscopicamente quanto microscopicamente. Para o desenvolvimento de uma fratura dúctil, são observados os seguintes estágios:

- formação de uma superfície livre através de uma inclusão ou partícula de segunda fase (Figura 19), ou por decoesão interfacial ou por trincamento de partícula;
- crescimento de vazios ao redor da partícula através de deformação plástica e tensão hidrostática (Figura 18);
- coalescência entre vazios equivalentes.

O tipo mais comum de fratura em tração é do tipo taça e cone, e ocorrem em vários estágios, conforme (Figura 12).

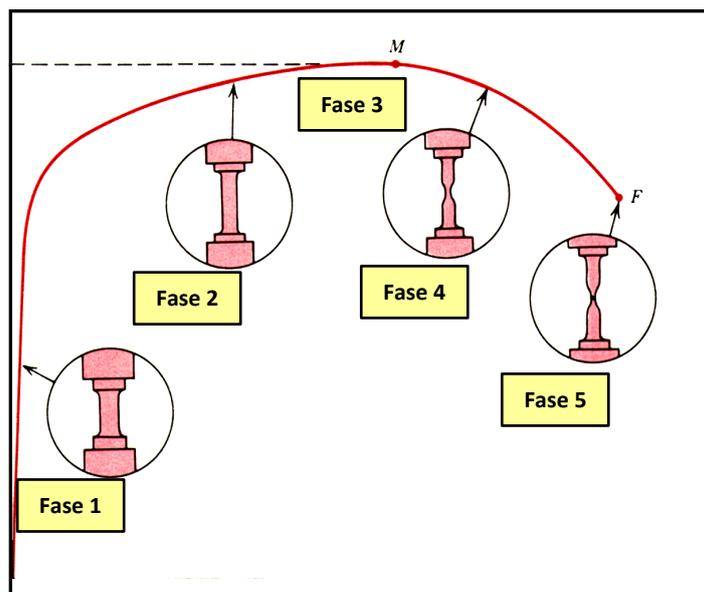


Figura 12: Comportamento de um corpo de prova de material dúctil quando submetido a ensaio de tração  
 Fonte: Callister (2006)

A fase 1 (um) consiste no início do ensaio de tração. Nesta etapa, o material é solicitado por uma força, sofrendo deformação elástica, e depois de retirada dessa força, o material recupera as dimensões originais. Na fase 2 (dois), o material entra na região plástica, que é caracterizada pela presença de deformações permanentes. Toda deformação até esse ponto é uniforme ao longo de toda a região estreita do corpo de prova, (CALLISTER, 2006) (Figura 13).

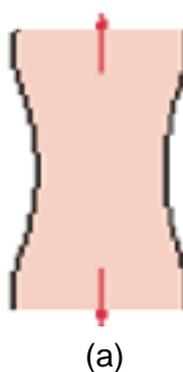


Figura 13: Empescoçamento inicial, ou seja, início da deformação permanente  
 Fonte: Callister (2006)

A fase 3 (três) é o limite de resistência à tração. Essa região é o ponto máximo na curva tensão deformação. É o ponto que corresponde à tensão máxima

que pode ser suportada por uma estrutura sob tração. Se essa tensão for aplicada e mantida, ocorrerá a ruptura, (CALLISTER, 2006) (Figura 14).

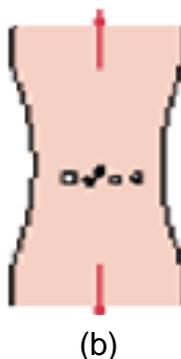


Figura 14: Formação de pequenas cavidades  
Fonte: Callister (2006)

A fase 4 (quatro) é a região subsequente ao limite de resistência à tração, em que um pequeno estrangulamento começa a se formar em algum ponto, e toda deformação subsequente fica confinada nesta região. Esse fenômeno é denominado “empescoçamento” (CALLISTER, 2006) (Figura 15).

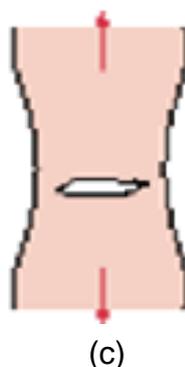
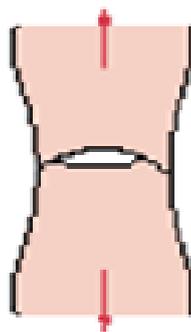


Figura 15: Coalescência de cavidades para formar uma trinca  
Fonte: Callister (2006)

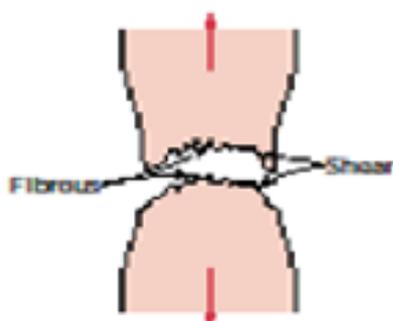
A fase 5 (cinco) é o limite de resistência à fratura, a trinca propaga-se rapidamente ao redor do perímetro externo do pescoço, por meio de deformação cisalhante em um ângulo de aproximadamente  $45^\circ$  em relação ao eixo de tração (esse é o ângulo no qual a tensão de cisalhamento é máxima) até ocorrer a separação do material em duas partes (CALLISTER, 2006) (Figuras 16 e 17).



(d)

Figura 16: Propagação da trinca

Fonte: Callister (2006)



(e)

Figura 17: Fratura final por cisalhamento segundo um ângulo de 45° em relação à direção de tração

Fonte: Callister (2006)

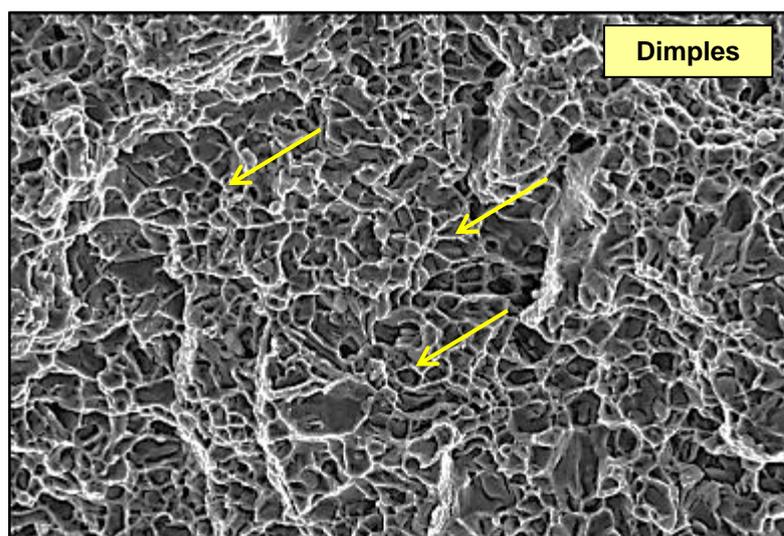


Figura 18: Microfractografia, por meio de MEV de um material em alumínio. As setas indicam a presença de dimples, que são características de fratura dúctil. (Ampliação: 700X)

Fonte: autora (2011)

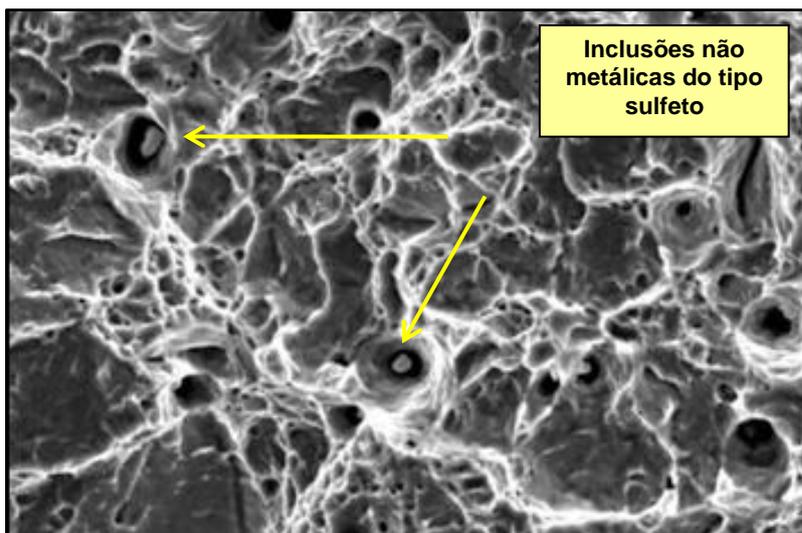


Figura 19: Microfractografia, por meio de MEV de um material em aço. Observa-se a presença de inclusões não metálicas do tipo sulfeto nas microcavidades da superfície de fratura. (Ampliação: 3000X)

Fonte: Autora (2012)

#### 6.4.2 Fratura Frágil

É o tipo de fratura que ocorre sem deformação plástica macroscópica, sob tensões inferiores às correspondentes ao escoamento generalizado, e com velocidade de propagação da trinca bem elevada. Macroscopicamente, a fratura frágil apresenta uma zona radial, que indica início e propagação da trinca, e zonas de cisalhamento à 45° em relação ao eixo da amostra, (GODEFROID, CÂNDIDO, 2005) (Figura 20).



Figura 20: Macrofractografia de um aço SAE 1050 com fratura frágil  
Fonte: Godefroid e Cândido (2005)

De acordo com Godefroid e Cândido (2005, p. 72), ao se observar microscopicamente uma superfície de fratura frágil, observa-se que a mesma ocorre por uma separação direta ao longo dos planos cristalográficos específicos, por uma simples ruptura de ligações atômicas. O aspecto fractográfico é caracterizado pelos seguintes aspectos:

- facetas de clivagem, que são formadas por numerosos platôs, normalmente mostrando um alto grau de perfeição geométrica e refletividade (Figura 21);

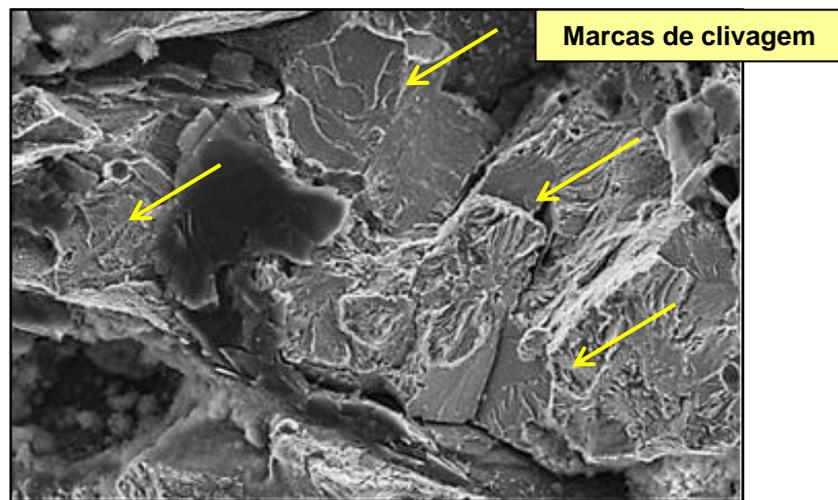


Figura 21: Macrofractografia de um aço SAE 1050 com fratura frágil  
Fonte: Godefroid e Cândido (2005).

- marcas de rio (*riverspatterns*), que são resultantes do crescimento de trincas simultaneamente em dois ou mais planos cristalográficos paralelos, juntando-se e formando-se degraus (Figura 22).

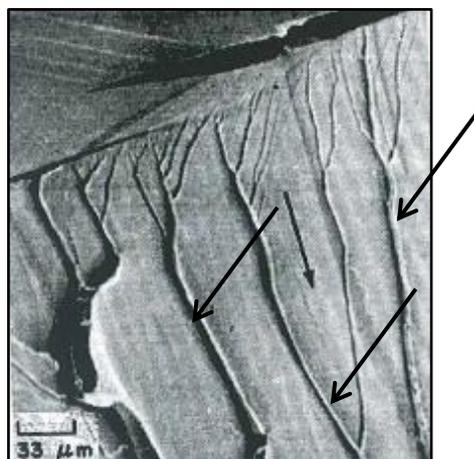


Figura 22: Marcas de rio em superfícies de fratura frágil de um material em ferro puro com matriz ferrítica  
Fonte: Godefroid e Cândido (2005)

- línguas de clivagem (*tongues*), formadas quando a trinca propaga-se, por uma distância relativamente curta, ao longo de um plano principal de clivagem (interface macla-matriz);

- fratura transgranular, é quando a trinca propaga-se pelo interior de cada grão.

A fratura por clivagem pode ser definida como uma rápida propagação de uma trinca ao longo de um plano cristalográfico particular. Clivagem pode ser frágil, mas ela pode ser precedida por uma deformação plástica, que pode ser grande ou não. Os planos de clivagem preferenciais são aqueles com a mais baixa densidade de empacotamento, onde poucas ligações são rompidas e o espaçamento entre planos é relativamente grande. A clivagem ocorre quando a deformação plástica é restringida no material. Metais <sup>1</sup>CFC (Alumínio, Cobre, Ouro, Prata, Chumbo, etc) são usualmente não propensos à ocorrência de clivagem, pois apresentam comportamento dúctil, onde o mecanismo de deslizamento é operante em praticamente todas as temperaturas. Em baixas temperaturas, metais <sup>2</sup>CCC falham, pois existe um número limitado de sistemas de deslizamento. Metais policristalinos com estrutura <sup>3</sup>HC, que apresentam apenas três sistemas de deslizamento por grão, são também propensos à fratura por clivagem (GODEFROID, CÂNDIDO, 2005).

De acordo com Godefroid e Cândido (2005, p. 72), a clivagem desenvolve-se por separação direta ao longo dos planos cristalográficos específicos, por meio de rupturas de ligações atômicas (Figura 23). As facetas de clivagem vistas através de grãos apresentam alta refletividade, que dá à superfície de fratura um aspecto brilhante.

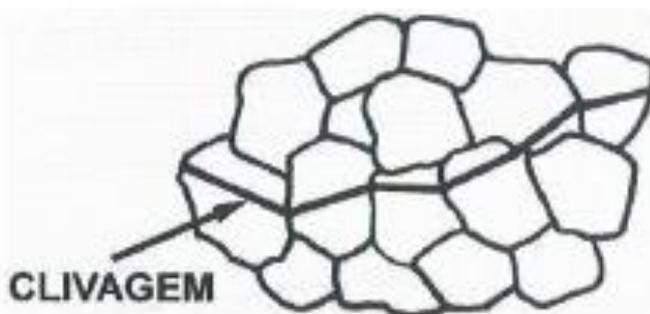


Figura 23: Representação esquemática da propagação de clivagem transgranular  
Fonte: adaptada de Meyers e Chawla (1999)

<sup>1</sup> CFC – Estrutura cristalina cúbica de faces centradas.

<sup>2</sup> CCC – Estrutura cristalina cúbica de corpo centrado.

<sup>3</sup> HC – Estrutura cristalina hexagonal compacta.

A Figura 24 mostra uma microfractografia de uma fratura por clivagem, obtidas pelo MEV, de um aço carbono SAE 1050. A superfície multifacetada é típica de clivagem em um material policristalino, em que cada faceta corresponde a um grão (GODEFROID, CÂNDIDO, 2005).

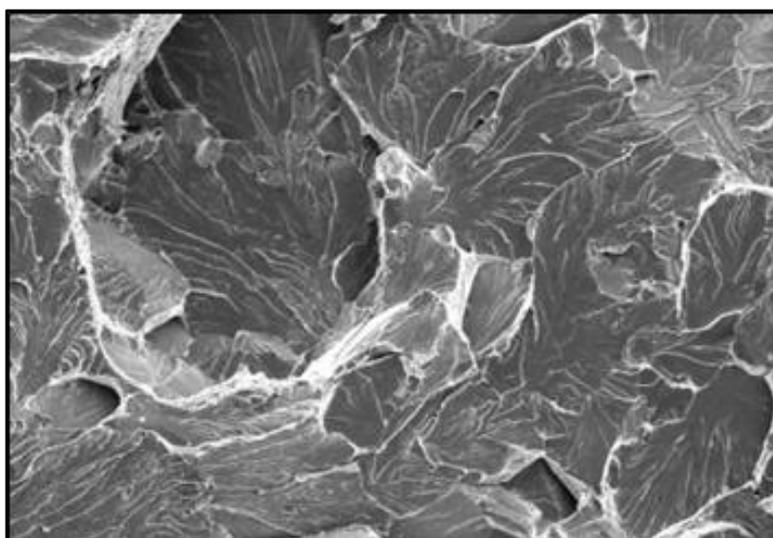


Figura 24: Microfractografia via MEV e a identificação de facetas de clivagem. (Ampliação: 400X)  
Fonte: autora (2013)

Em geral, o degrau de clivagem será paralelo a direção de propagação da trinca e perpendicular ao plano que contem a trinca. Com isto, tem-se a minimização de energia para formação de degrau, em que é criado um mínimo de superfície adicional (GODEFROID, CÂNDIDO, 2005).

#### **6.4.2.1 Ensaio de Impacto**

Segundo Garcia e Spim (2000, p.155-156), três fatores principais contribuem para o surgimento de fratura frágil em materiais que são normalmente dúcteis à temperatura ambiente: (1) existência de um estado triaxial de tensões, (2) baixas temperaturas e (3) taxa ou velocidade de deformação elevada. Esses três fatores não precisam necessariamente atuar ao mesmo tempo para produzir a fratura frágil. Estados triaxiais de tensão que ocorrem em entalhes, juntamente com baixas temperaturas, foram responsáveis por muitas situações de fratura frágil em serviço. Entretanto, como esses efeitos são acentuados sob altas velocidades de aplicação

de carga, diversos tipos de ensaio de impacto passaram a ser usados na determinação de suscetibilidade de materiais à fratura frágil (Figura 25).

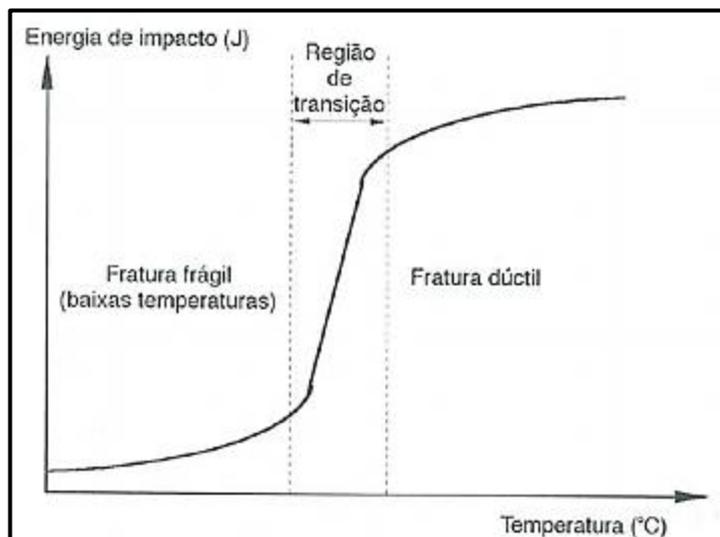


Figura 25: Representação do resultado fornecido pelo ensaio de impacto  
Fonte: Garcia, Spim e Santos (2000).

O ensaio de impacto é um ensaio dinâmico, empregado para a análise de fratura frágil de materiais. O resultado é representado por uma medida de energia absorvida pelo corpo de prova, mas não fornece indicações seguras sobre o comportamento de toda uma estrutura em condições de serviço. Mas permite observar diferença de comportamento entre materiais que não observadas em um ensaio de tração. Os tipos de ensaios de impacto padronizados são Charpy e Izod, e em ambos os ensaios o corpo de prova tem o formato de uma barra de seção transversal quadrada, na qual é usinado um entalhe em forma de V. O equipamento utilizado e os tipos de corpos de prova são representados abaixo (GARCIA, SPIM, SANTOS, 2000) (Figura 26).

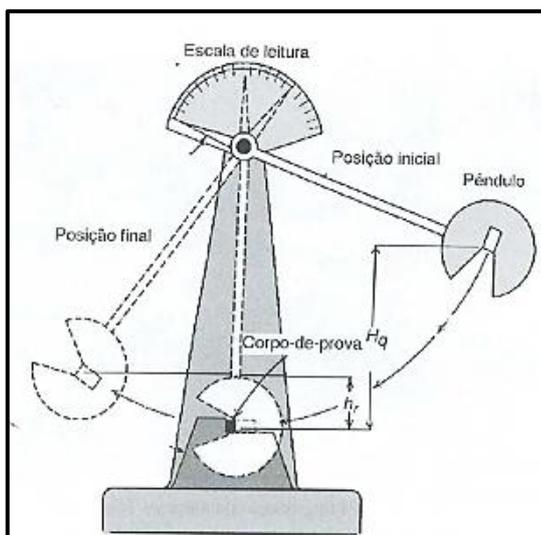


Figura 26: Representação do resultado fornecido pelo ensaio de impacto  
 Fonte: Garcia, Spim e Santos (2000)

A carga é aplicada pelo impacto de um martelo pendular, que é liberado a partir de uma posição padronizada e uma altura fixada ( $H_q$ ). Após o pêndulo ser liberado, sua ponta choca-se com o corpo de prova fraturando-o na região do entalhe, que atua como um concentrador de tensões. O pêndulo continua seu movimento após o choque, até uma altura ( $h_r$ ) menor que a altura de liberação do pêndulo ( $H_q$ ). A energia absorvida no impacto é determinada pela diferença entre  $H_q$  e  $h_r$  ambas medidas na escala do equipamento (GARCIA, SPIM, SANTOS, 2000).

De acordo com Garcia, Spim e Santos (2000, p. 157), as diferenças fundamentais entre os ensaios de Charpy e Izod estão na forma como o corpo de prova é montado (horizontal ou vertical), e na face de entalhe, localizada ou não na região de impacto. Variações como o tamanho e a forma do corpo de prova e a profundidade e configuração do entalhe influenciam os resultados do ensaio. A principal função dos ensaios Charpy e Izod consiste em determinar se um material apresenta ou não uma transição dúctil-frágil com o decréscimo da temperatura e, caso presente, em que faixa de temperaturas ocorre o fenômeno. A transição dúctil-frágil é relacionada com a temperatura pela energia de impacto medida no ensaio. Em temperaturas muito mais elevadas, a energia de impacto é relativamente alta e é compatível com um modo dúctil de fratura. À medida que a temperatura diminui, a energia de impacto cai subitamente ao longo de um intervalo de temperaturas relativamente pequeno, abaixo do qual a energia de impacto apresenta um valor baixo e essencialmente constante, nesse intervalo o modo de fratura é frágil.

### 6.4.3 Fratura Semi Frágil

É o tipo de fratura com características intermediárias entre dúctil e frágil. Macroscopicamente, a fratura semi frágil é caracterizada por apresentar zona radial, zona fibrosa e cisalhante. O aspecto microscópico é caracterizado por ruptura de ligações e mobilidade de discordâncias, e a presença de clivagem numa escala bem pequena e em planos não bem definidos. A fractografia apresenta características intermediárias entre fratura dúctil e frágil (Figura 27). Em materiais semi-frágeis, há uma tendência inicial de ocorrer o mecanismo de deslizamento e posteriormente fratura em planos cristalográficos bem definidos. Isto é, existe certa dificuldade no processo de deformação plástica, onde é iniciado o trincamento do material, por não ser capaz de acomodar deformação plástica localizada, com alívio de tensão (GODEFROID; CÂNDIDO, 2011).

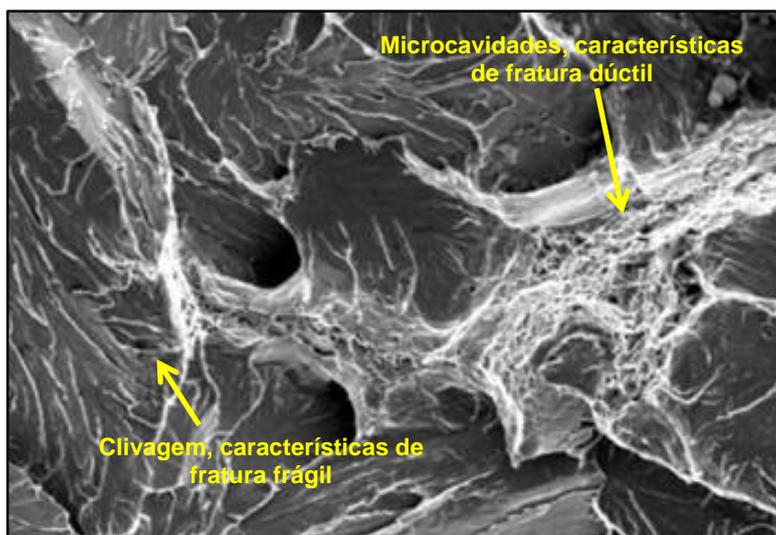


Figura 27: Fratura semi-frágil de um aço SAE 1025, apresentando características intermediárias entre as fraturas dúctil (dimples) e frágil (facetas de clivagem)  
Fonte: autora (2011).

### 6.4.4 Fratura Intergranular

Godefroid e Cândido (2005, p. 88), mencionam que em muitos casos, os metais não falham ao longo dos contornos de grãos. Metais dúcteis geralmente falham por coalescimento de vazios, formados por inclusões e partículas de segunda fase, enquanto que metais frágeis falham tipicamente por clivagem transgranular. No entanto, sob certas circunstâncias, trincas podem se formar e propagar ao longo de contornos de grãos. O trincamento nos contornos de grãos pode ser causado pela

precipitação de uma fase frágil nos contornos de grãos, pelo trincamento induzido pelo meio corrosivo, por corrosão intergranular, pela cavitação em contornos de grãos e trincamento em altas temperaturas. A fratura intergranular é um modo de fratura de baixa energia. A trinca propaga-se nos contornos de grãos, dando à fratura uma aparência de frágil e refletividade em escala macroscópica (Figura 28).

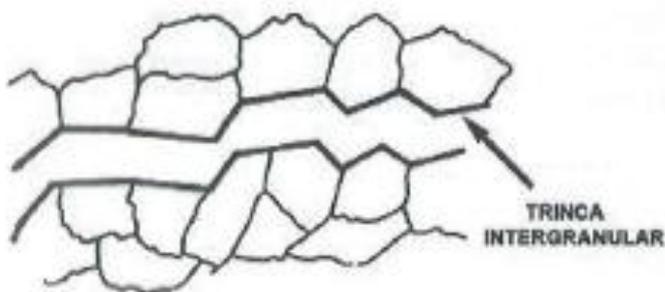


Figura 28: Representação esquemática de uma fratura intergranular  
Fonte: Godefroid e Cândido (2011).

Em escala microscópica, a trinca pode desviar de uma partícula e produzir uma microcavidade localmente (Figura 29). Fraturas intergranulares tendem a ocorrer quando os contornos de grãos são mais frágeis do que a rede cristalina (GODEFROID; CÂNDIDO, 2011).

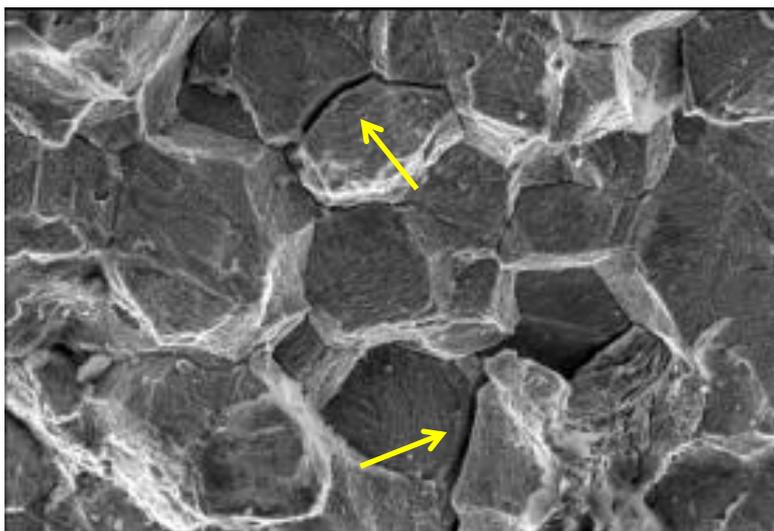


Figura 29: As setas indicam a propagação de trincas nos contornos de grãos - Fratura intergranular de um aço SAE 1050. (Ampliação: 1500X)  
Fonte: autora (2011)

### 6.4.5 Fratura por Fadiga

A fadiga pode ser definida como o processo de alteração estrutural progressivo, localizado e permanente, que ocorre em um material submetido a condições que produzem variações de tensões e deformações em um ou mais pontos do material e que pode culminar em trincas ou fratura completa após um número suficiente de flutuações ou ciclos. A fratura por fadiga pode ser dividida em três estágios (GODEFROID; CÂNDIDO, 2011) (Figura 30).

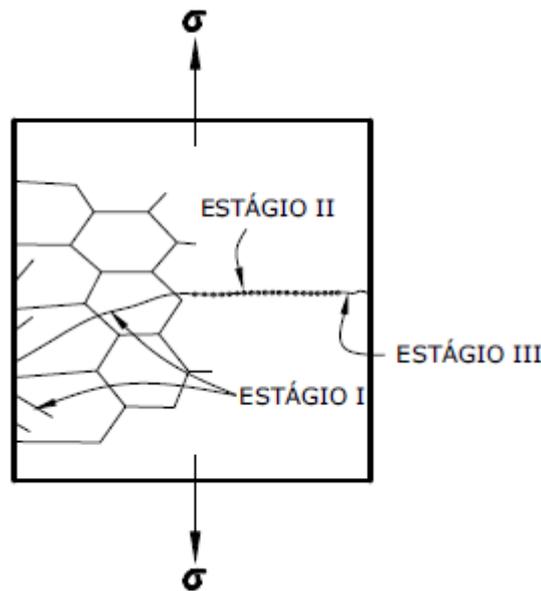


Figura 30: Estágios de propagação de trinca por fadiga  
Fonte: Callister (2006)

- Estágio I: corresponde à nucleação de trincas em discontinuidades já inicialmente presentes no material, ou durante a clivagem, em intrusões ou extrusões, ao longo de inclusões, em contornos de grãos e maclas (DIETER, 1981);
- Estágio II: corresponde ao crescimento da trinca num plano perpendicular à direção da tensão aplicada. Em algumas ligas metálicas a caracterizada por estrias de fadiga (DIETER, 1981);
- Estágio III: corresponde à fratura brusca final, quando a trinca atinge o tamanho crítico para propagação instável (DIETER, 1981).

A taxa de propagação de trinca durante o estágio I é geralmente muito pequena, da ordem de angstroms por ciclo, quando comparada com a taxa de propagação do estágio II, da ordem de microns por ciclo. A superfície de fratura do estágio I não apresenta morfologia característica, em contraste com a fratura do

estágio II, que pode ter características marcantes tais como as estrias de fadiga (Figura 31). As estrias surgem em superfícies de fratura por fadiga de diversos materiais, tais como os metálicos de estruturas CCC, CFC e HC e muitos materiais poliméricos, e se formam perpendicularmente ao avanço da frente da trinca. A distância entre duas estrias está relacionada com a velocidade de propagação da trinca e esta distância varia com a história de carregamento (DIETER, 1981).

As estrias são as evidências mais características da fratura por fadiga, embora elas nem sempre estejam presentes nas superfícies fraturadas, por uma variedade de razões. Uma delas, por exemplo, em metais duros, com dureza superior à <sup>4</sup>50HRC desenvolvem muito pouco ou nenhuma estria pela ausência de ductilidade. Uma vez atingida a tenacidade do material durante o crescimento da trinca, passa-se ao estágio III de propagação de trinca por fadiga (DIETER, 1981).

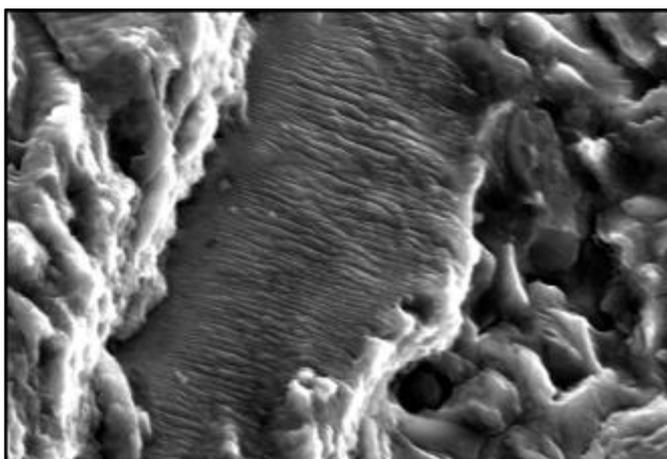


Figura 31: Estrias de fadiga de um material em liga de alumínio (AlSi7Mg0,3) (Ampliação: 4000X)  
Fonte: autora (2010)

Estes estágios são afetados por diferentes variáveis. Por exemplo, a presença de tensões residuais influencia significativamente na nucleação da trinca, mas não na propagação (DIETER, 1981).

---

<sup>4</sup> HRC – Dureza Rockwell do tipo C

### Taxa de propagação da trinca durante os estágios

O estágio de propagação da trinca por fadiga ocorre por um mecanismo de embotamento e afinamento repetitivo da ponta da trinca (Figura 32). No início do carregamento cíclico a ponta da trinca é aguda (Figura 32a). À medida que o esforço de tração é aplicado, o pequeno entalhe duplo na pontada trinca concentra o deslizamento ao longo dos planos que fazem  $45^\circ$  com a superfície da trinca (Figura 32b). Conforme a trinca se alarga para a sua extensão máxima (Figura 32c), ela avança por cisalhamento plástico ao mesmo tempo em que sua ponta se torna rombuda. Quando a carga muda para compressão, as direções de deslizamento na extremidade são invertidas (Figura 32d), as faces da trinca são compactadas e a nova superfície da trinca, criada na tração, é forçada para o plano da trinca (Figura 32e) em que é parcialmente dobrada por flambagem formando uma ponta de trinca novamente aguda (Figura 32f). Assim, a trinca já está pronta para avançar e seguir para o próximo ciclo (MEYERS; CHAWLA, 1999).

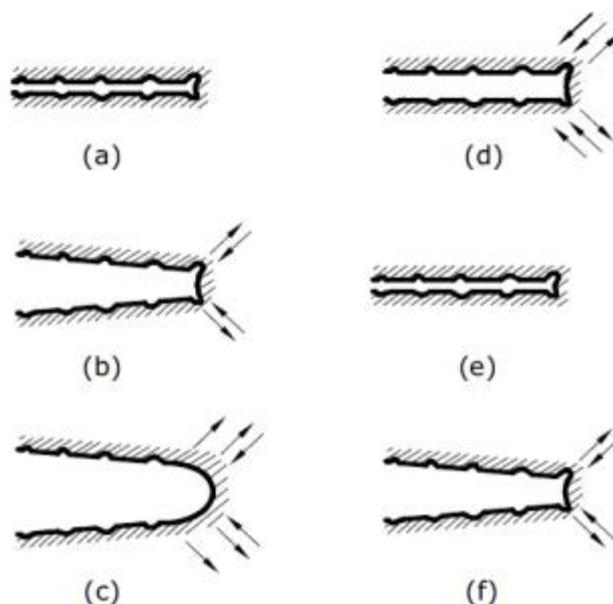


Figura 32: Processo de crescimento da trinca por fadiga  
Fonte: Meyers e Chawla (1999)

#### 6.4.5.1 Fadiga Mecânica

A fadiga mecânica pode ser dividida em fadiga de alto ciclo e fadiga de baixo ciclo. Na primeira etapa, a nucleação consome a maior parte da vida e ocorre sob tensões preponderantemente elásticas e oposto na fadiga de baixo ciclo (PELLICCIONE; MORAES; GALVÃO; MELLO; SILVA, 2012).

- Fadiga de baixo ciclo: controla a deformação. A ruptura ocorre abaixo de  $10^4$  ciclos, com altos níveis de tensão, e a presença de deformação plástica cíclica é acentuada. Existe a possibilidade de determinação do comportamento de um material dúctil. Exemplos: componentes do núcleo de reatores nucleares, componentes de turbinas e outros componentes sujeitos ocasionalmente a sobrecargas (CALLISTER, 2006).

- Fadiga de alto ciclo: é a tensão aplicada na peça. A ruptura ocorre acima de  $10^4$  ciclos, com baixos níveis de tensão, e está relacionada com as propriedades elásticas do material. As deformações empregadas são predominantemente elásticas. Exemplos: componentes de máquinas rotativas, sistemas que sofrem elevadas vibrações (rodas, eixos, rolamentos) (CALLISTER, 2006).

A Figura 33 mostra as superfícies de um corpo de prova, que fraturou quando submetido à fadiga de alto ciclo. Observa-se regiões com características de fratura por fadiga (Figura 33b), regiões de interseção entre fratura dúctil e fratura frágil, devido a presença de microcavidades (*dimples*) e facetas de clivagem (Figura 33c), e regiões com fratura totalmente frágil, devido as facetas de clivagem (Figura 33d).

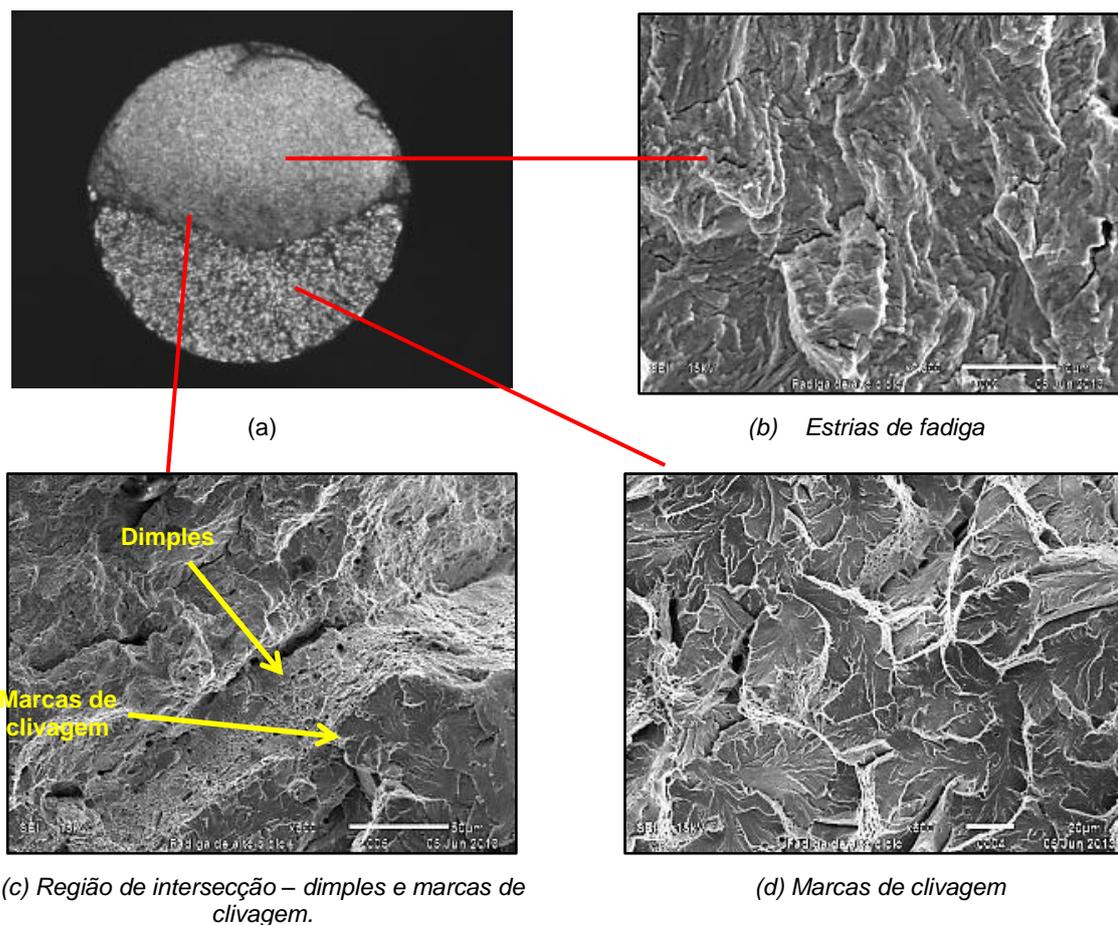


Figura 33: Superfícies fraturadas de um corpo de prova submetido à fadiga de alto ciclo

Fonte: autora (2013)

### Fatores que influenciam a fratura por Fadiga Mecânica

A geometria é um dos fatores predominantes, determinando a resistência à fadiga de um componente, pois as trincas de fadiga normalmente nucleiam em entalhes ou concentradores de tensão na superfície sob carregamento cíclico. Por esta razão, o projeto de um componente é o fator mais importante, determinando a resistência ao trincamento por fadiga. Algumas características superficiais como entalhes mecânicos; rasgos de chaveta em eixos de equipamentos rotativos; juntas soldadas (descontinuidades e/ou desalinhamentos); marcas de ferramentas; raiz de filete de rosca e dano superficial provocado por corrosão podem agir como concentradores de tensão e favorecer a iniciação de trincas por fadiga (Figura 34) (PELLICCIONE; MORAES; GALVÃO; MELLO; SILVA, 2012).

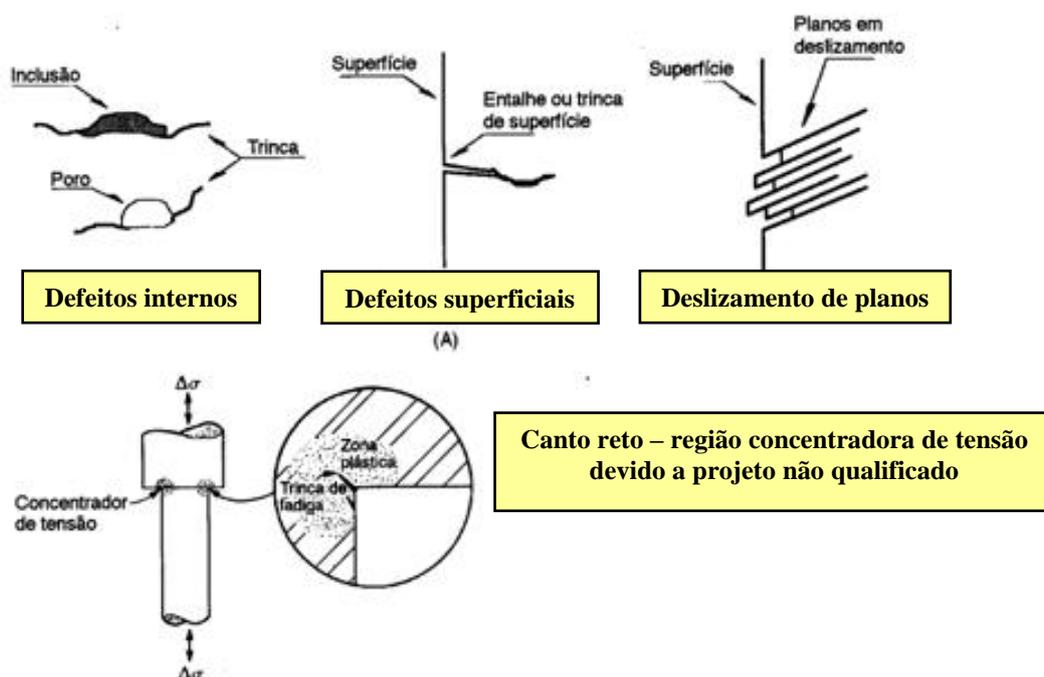


Figura 34: Imagens dos fatores que podem provocar a fratura por fadiga  
 Fonte: Pelliccione; Moraes; Galvão; Mello; Silva, (2012)

Os fatores metalúrgicos e microestruturais também podem determinar a resistência por fadiga de um componente, pois o número de ciclos para a fratura por fadiga diminui com o aumento da amplitude da tensão. É atingido um limite de amplitude de tensão, chamado limite de fadiga, que no caso de materiais como titânio, aços-carbono e aços de baixa liga, tem um valor significativo em relação ao limite de escoamento. Abaixo deste limite, trincas por fadiga não ocorrerão, independente do número de ciclos. As inclusões presentes nos materiais também podem acelerar a nucleação de trincas por fadiga. Em materiais com grande quantidade de inclusões e descontinuidades, podem reduzir a resistência à fadiga.

Medidas que aumentam a tenacidade, como por exemplo, tratamento térmico, redução de tamanho de grão, limpeza do aço, etc, aumentam a resistência à nucleação de trincas por fadiga em concentradores de tensão. Materiais como aços austeníticos e alumínio terão uma vida em fadiga definida como sendo o número de ciclos para falha em uma determinada amplitude de tensão. A amplitude máxima da tensão cíclica é determinada relacionando-se a tensão necessária para causar a fratura com o número desejado de ciclos necessários ao tempo de vida do componente. No caso de fadiga de alto ciclo, isto é tipicamente  $10^6$  a  $10^7$  ciclos.

Equipamentos podem ser afetados devido a ciclos térmicos e carregamento mecânico (PELLICCIONE; MORAES; GALVÃO; MELLO; SILVA, 2012).

- Ciclos térmicos: equipamentos com ciclos diários de operação, como tambores de coque; equipamentos auxiliares que atuam de modo intermitente, como caldeiras auxiliares; conexões de bocais que operam com gradientes significativos de temperatura, como sistemas de lavagem de água (PELLICCIONE; MORAES; GALVÃO; MELLO; SILVA, 2012).

- Carregamento mecânico: equipamentos como eixos rotativos de bombas centrífugas e compressores que tem concentradores de tensão, devido a mudanças de diâmetros e rasgos de chavetas; componentes como tubulações de pequeno diâmetro, podem sofrer vibrações em consequência de equipamento adjacente e/ou vento. Se a frequência atingir a frequência de ressonância própria do componente, a falha por fadiga é praticamente inevitável e, portanto, esta condição deve ser evitada no projeto. Altas variações de pressão em válvulas de controle ou estações de redução de vapor podem causar grandes vibrações nas conexões (PELLICCIONE; MORAES; GALVÃO; MELLO; SILVA, 2012).

### **Aparência ou morfologia do dano de uma fratura por Fadiga Mecânica**

A superfície de fratura por fadiga possui aspecto macroscópico característico chamado marcas de praia. A aparência de ondas ocorre devido à alteração de variáveis do ciclo de tensões (pico de tensão, amplitude, frequência, etc.). Estas marcas, que nunca se cruzam, indicam a posição da trinca em um determinado instante. As trincas continuam se propagando, até atingir o tamanho crítico para sobrecarga frágil ou colapso plástico. Entretanto, as marcas de praia não exclusivas de fadiga, podendo se formar em qualquer propagação descontínua de uma trinca, como trincas provocadas por corrosão sob tensão ou hidrogênio. A indicação exclusiva de fadiga é chamada de estrias, visíveis apenas por microscopia eletrônica de varredura (Figura 35). Fraturas por fadiga frequentemente apresentam múltiplos pontos de nucleação, particularmente sob altas tensões, resultando em aspecto característico, chamado *marcas de catraca*, (Figura 36). Destes pontos de nucleação, se originam marcas de praia que à medida que se propagam podem se

unir, formando uma única frente de propagação (PELLICCIONE; MORAES; GALVÃO; MELLO; SILVA, 2012).

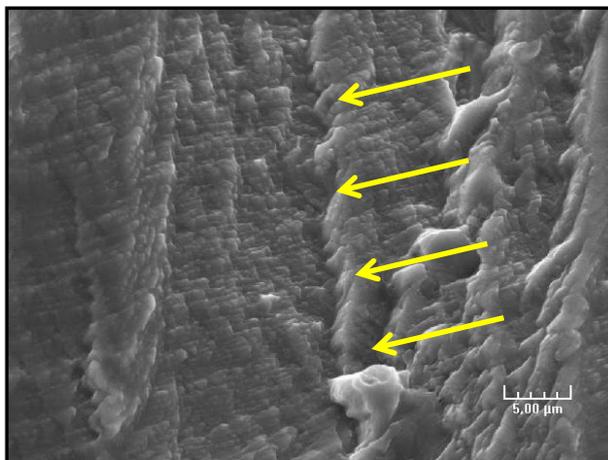


Figura 35: Fratura em fadiga mecânica de um alumínio. Presença de estrias que indicam o sentido de propagação da trinca  
Fonte: autora (2010)



Figura 36: Fratura de um eixo com aspecto característico de marcas de catraca  
Fonte: Godefroid e Cândido (2011)

### Prevenção

Para evitar que ocorra a fadiga mecânica, segundo Pelliccione; Moraes; Galvão; Mello; Silva (2012, p. 08) alguns procedimentos devem ser seguidos:

- elaborar um projeto que minimize a concentração de tensões em componentes que estão em serviço cíclico;

- selecionar um material que possua uma vida em fadiga suficiente para o serviço cíclico previsto;
- eliminar os cantos vivos;
- minimizar as marcas de esmerilhamento e entalhes nas superfícies dos componentes;
- evitar desalinhamento de soldas e minimizar defeitos de soldagem;
- remover rebarbas ou marcas causadas por usinagem.

### **Inspeção e Monitoramento**

De acordo com Pelliccione; Moraes; Galvão; Mello; Silva (2012, p. 08), algumas técnicas são muito importantes na avaliação de componentes, a fim de evitar que ocorra a falha por fadiga.

- as técnicas de <sup>5</sup>END, como líquido penetrante, partículas magnéticas e ultrassom com ondas transversais podem ser usadas para detectar trincas de fadiga;
- inspeção visual de tubulações de pequeno diâmetro para detectar oscilações ou outro movimento cíclico que possa levar ao trincamento;
- monitoração de vibração de equipamentos rotativos para detectar eixos que possam estar desbalanceados.

#### **6.4.5.2 Fadiga Térmica**

A fadiga térmica é o resultado de tensões cíclicas causadas pela variação de temperatura. O dano é na forma de trincamento e pode ocorrer em qualquer lugar de um componente, onde o movimento relativo ou expansão diferencial é restringido. A restrição pode ser externa ou do próprio componente quando existe gradiente de temperatura. Todos os materiais de construção podem ser afetados pela fadiga térmica (PELLICCIONE; MORAES; GALVÃO; MELLO; SILVA, 2012).

#### **Fatores que influenciam a fratura por Fadiga Térmica**

Os principais fatores que podem afetar a fadiga térmica são: a intensidade de variação da temperatura e a frequência (número de ciclos); o tempo para ocorrer

---

<sup>5</sup> END - Ensaio Não Destrutivo.

a falha é função da intensidade das tensões e do número de ciclos. O tempo diminui com o aumento da tensão e aumento do número de ciclos. A fadiga térmica é geralmente de baixo ciclo, podendo falhar com menos de 10.000 ciclos. Partidas e paradas do equipamento aumentam a sustentabilidade à fadiga térmica. Não existe um limite de variação de temperatura, mas se a temperatura exceder 93°C deve-se atentar para a possibilidade de ocorrência ao trincamento. Os fatores críticos que influenciam o mecanismo de fadiga mecânica também atuam na fadiga térmica (PELLICCIONE; MORAES; GALVÃO; MELLO; SILVA, 2012).

Alguns equipamentos podem ser influenciados por fadiga térmica.

- mistura de pontos quentes e fluxos frios, em locais onde o condensado entra em contato com sistema de vapor, tais como superaquecedor ou equipamento controlador de temperatura;
- trincamento por fadiga térmica tem sido o maior problema em costados de tambores de coque. Também pode ocorrer nas saias dos tambores de coque, onde as tensões são promovidas pela variação na temperatura entre tambor e a saia;
- em equipamentos geradores de vapor, os locais mais comuns são as conexões rígidas entre tubos próximos do reauecedor e superaquecedor. Espaçadores deslizantes projetados para acomodar movimentos relativos podem ficar frios e atuar como conexões rígidas, quando travam movimento (emperram). Isto pode ocorrer quando estes espaçadores deslizantes estão impregnados com resíduos;
- em sopradores de fuligem operados a vapor podem ocorrer danos por fadiga térmica se a primeira saída de vapor da conexão do soprador contiver condensado.

O resfriamento rápido do tubo pela água na fase líquida irá promover esta forma de dano. Da mesma forma o uso de água sobre a parede dos tubos pode ter o mesmo efeito (PELLICCIONE; MORAES; GALVÃO; MELLO; SILVA, 2012).

### **Aparência ou morfologia do dano**

Trincamento por fadiga térmica normalmente inicia-se na superfície do componente. As trincas geralmente são largas e frequentemente se encontram preenchidas com óxidos devido à exposição em temperaturas elevadas. Pode ocorrer apenas uma trinca ou mais comumente trincamentos múltiplos.

Muitas vezes é difícil distinguir trincas de fadiga térmica de trincas corrosão-fadiga. Duas características que podem ajudar na distinção são:

- a ponta da trinca de fadiga térmica é aguda, enquanto que a de corrosão-fadiga é rombuda;
- nas faces laterais das trincas de corrosão-fadiga, frequentemente aparecem “bolsões” atribuídos à corrosão durante períodos estacionários da trinca.

A propagação das trincas de fadiga térmica é transversal à direção da tensão. As trincas geralmente apresentam o formato de cunha, são transgranulares e preenchidas com óxidos. Entretanto, o trincamento pode ser axial ou circunferencial, ou ambos, no mesmo local. Em equipamentos de geração de vapor, as trincas geralmente seguem a margem da solda, devido à mudança de espessura que cria tensões mais elevadas. O trincamento geralmente nucleia na extremidade da conexão e, se existir momento fletor como resultado da restrição, desenvolverá trincas circunferenciais no tubo. A água dos sopradores de fuligem podem promover trincamento do tipo “crazy pattern”, ou seja, as trincas são predominantemente circunferenciais e as menores serão axiais. A fadiga térmica também se caracteriza por apresentar estrias de fadiga em sal superfície (PELLICCIONE; MORAES; GALVÃO; MELLO; SILVA, 2012) (Figura 37).

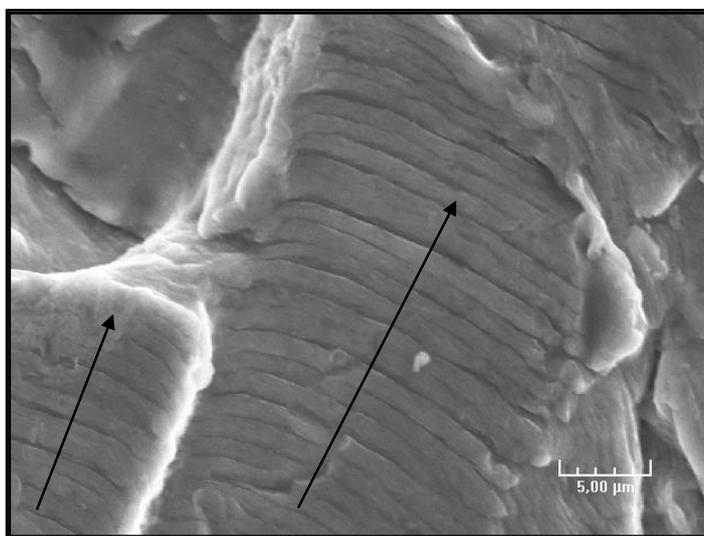


Figura 37: Fratura em fadiga térmica de um alumínio. Presença de estrias que indicam o sentido de propagação da trinca (→)  
Fonte: autora (2010)

### Prevenção

A trinca de fadiga térmica pode ser prevenida por meio do projeto e operação adequados para minimizar as tensões e ciclos térmicos. Porém, alguns métodos de

prevenção dependem da aplicação (PELLICCIONE; MORAES; GALVÃO; MELLO; SILVA, 2012).

- projetos que incorporam a redução de concentradores de tensão, remoção do reforço de solda e adoçamento nas transições;
- controle da taxa de aquecimento e resfriamento durante a partida e parada do equipamento podem diminuir as tensões;
- expansões térmicas diferenciais entre componentes adjacentes de materiais dissimilares deverão ser consideradas;

O projeto deverá incorporar flexibilidade suficiente para acomodar expansão diferencial:

- nos equipamentos de geração de vapor deverão ser instalados espaçadores deslizantes e conexões rígidas deverão ser evitadas;
- os sopradores de fuligem devem possuir sistema de drenagem para prevenir condensado no primeiro ciclo de sopragem.

Em alguns casos, um revestimento pode ser instalado para prevenir que o líquido mais frio entre em contato com paredes mais quentes (PELLICCIONE; MORAES; GALVÃO; MELLO; SILVA, 2012).

### **Inspeção e Monitoramento**

Como a trinca geralmente ocorre na superfície do componente, exame visual, ensaio por partículas magnéticas e por líquidos penetrantes são métodos efetivos de inspeção. Inspeção externa por ultrassom com ondas transversais pode ser usada para inspeção não intrusiva de trincas internas (PELLICCIONE; MORAES; GALVÃO; MELLO; SILVA, 2012).

#### **6.4.5.3 Ensaio de Fadiga**

Assim como ocorre em outras características mecânicas, as propriedades de fadiga dos materiais podem ser determinadas a partir de ensaios de simulação em laboratório, que consiste na aplicação de carga cíclica em corpo de prova apropriado e padronizado. O ensaio de resistência à fadiga é um meio de especificar limites de tensão e de tempo de uso de uma peça ou elemento de máquina, fornecendo dados quantitativos relativos às características de um material ou componente ao suportar, por longos períodos, sem se romper, cargas repetitivas e/ou cíclicas. É utilizado

também para definir aplicações de materiais. O ensaio consiste na aplicação de tensões de tração e compressão ao corpo de prova, sendo o mesmo submetido, simultaneamente, a um dobramento e a uma rotação. Desta forma, é iniciada uma série de ensaios, submetendo o corpo de prova ao ciclo de tensões, sob uma amplitude de tensão relativamente grande, geralmente da ordem de 2/3 do limite de resistência à tração estática, e então o número de ciclos é contado. Este procedimento é repetido com outros corpos de prova, aplicando amplitudes máximas de tensão progressivamente menores (adaptado de GARCIA, SPIM e SANTOS, 2002).

#### **6.4.5.4 Cuidados na fabricação do corpo de prova**

Antes de se iniciar o ensaio de fadiga, alguns cuidados devem ser seguidos na confecção dos corpos de prova, para que o ensaio possa gerar resultados confiáveis. São eles:

- garantir que a ruptura ocorra na seção de teste (área reduzida);
- reduzir os pontos que podem gerar concentração de tensão;
- comprimento mínimo da área de teste deve ter ser de 3x o diâmetro.

## 7 METODOLOGIA PARA INTERPRETAÇÃO DE UMA FALHA

O trabalho tem a finalidade de descrever a sequência de uma análise de falhas, por meio de um material digital, de forma que o mesmo seja simples, didático e que tenha interação com o usuário.

Este trabalho sugere que para realizar análise de falhas, algumas etapas devem ser seguidas para que se tenha a maior quantidade possível de detalhamento sobre material falhado.

No fluxograma (Figura 38), são detalhados os passos para realização de análises macrográfica via estereomicroscópio e do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), da superfície fraturada. Se os resultados obtidos forem conclusivos, a análise é encerrada e o relatório emitido.

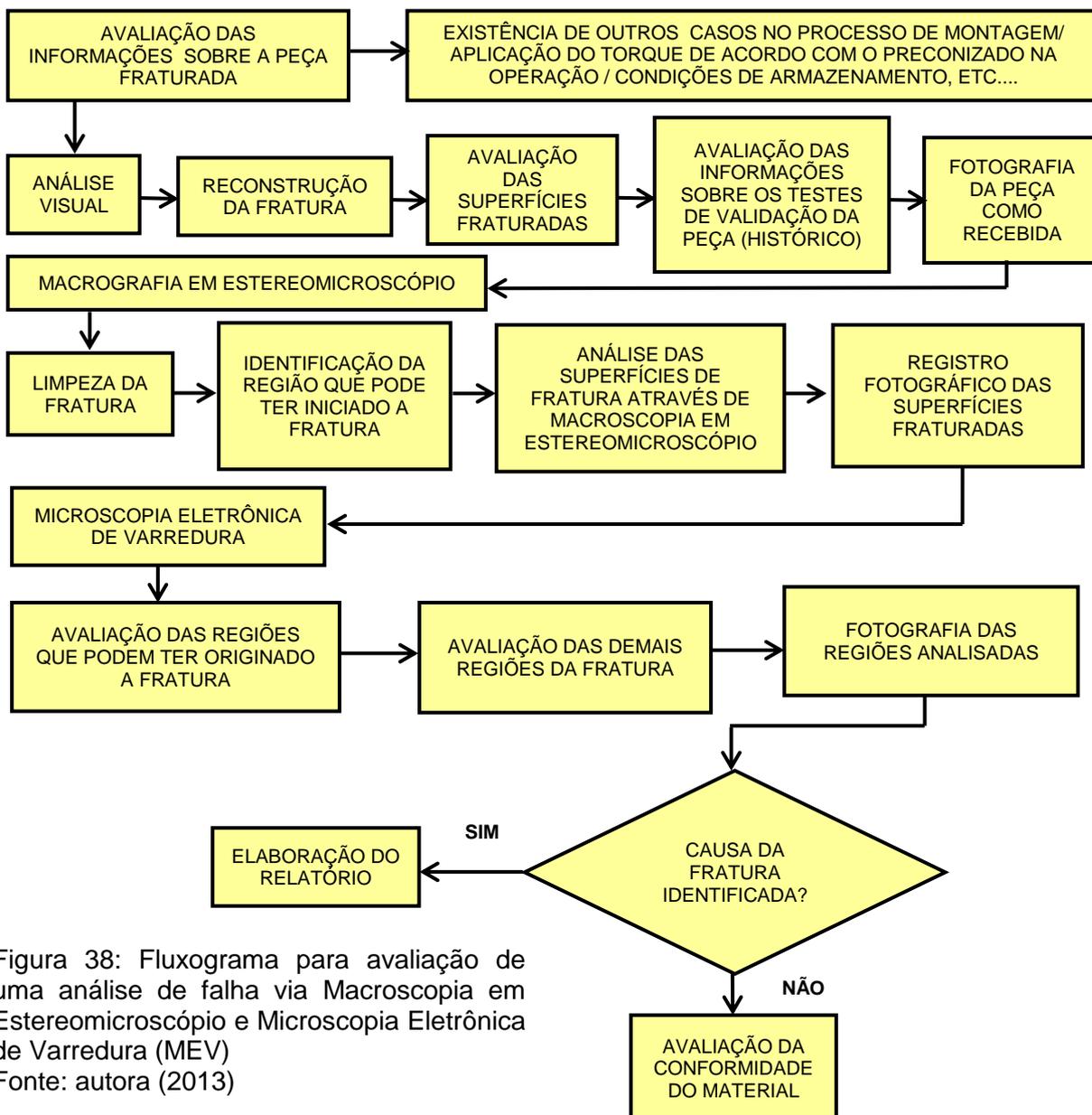


Figura 38: Fluxograma para avaliação de uma análise de falha via Macroscopia em Estereomicroscópio e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)  
Fonte: autora (2013)

Estas etapas mencionadas na Figura 38 se encontram descritas a seguir:

- avaliação das informações sobre a peça fraturada: verificação das informações a respeito da existência de outros casos de fratura no mesmo posto de trabalho, das condições que a peça estava trabalhando no momento da fratura, de como foi detectada que a mesma encontrava-se fraturada, se o local de armazenamento dos parafusos estava isento de umidade ou qualquer outro fator externo que pudesse prejudicar a integridade da peça, e se o torque aplicado estava de acordo com o preconizado na operação.
- análise visual: verificam-se as condições que a peça foi entregue para análise, ou seja, se a mesma apresenta corrosão ou marcas decorrentes de alguma solicitação mecânica. Esta análise é realizada a olho nu.
- reconstrução da fratura: nesta etapa ocorre a avaliação das superfícies fraturadas e verifica-se se as mesmas apresentam aspectos de que foram submetidas a algum tipo de esforço como torção, tração, compressão, etc.
- avaliação das informações sobre os testes de validação da peça (histórico): verificam-se quais testes foram realizados para validação da peça e os resultados obtidos nesta validação.
- fotografia da peça como recebida: identificar as regiões que podem ter importantes na análise.

Após completar as etapas de avaliação das informações da peça fraturada e inspeção visual, inicia-se a análise macrográfica por meio de estereomicroscópio.

- limpeza da fratura: a limpeza da peça tem o objetivo de remover os contaminantes da superfície fraturada, e pode ser realizada apenas com aplicação de álcool e posterior secagem, ou por meio do equipamento ultrassom, no qual se coloca a peça em um Becker com solvente, normalmente utiliza-se álcool ou acetona, por aproximadamente 10 minutos. O tempo vai depender da quantidade de contaminantes presentes na superfície da fratura. Caso a superfície fraturada apresente corrosão e esta prejudicar a avaliação da mesma, podem-se utilizar soluções com reagentes químicos para remoção da camada oxidada. Esta operação consiste em aplicar a solução sobre a peça por alguns segundos e escovar levemente a superfície oxidada com uma escova de cerdas macias. Posteriormente retira-se a solução embaixo d'água.

- análise das superfícies de fratura por meio de macroscopia em estereomicroscópio: nesta etapa realiza-se uma melhor avaliação da superfície fraturada, assim como a presença de trincas próximas à fratura.
- identificação da região que pode ter iniciado a fratura, quando possível: etapa na qual se verifica se a superfície de fratura apresenta microtrincas ou algum tipo de concentrador de tensão que pode ter provocado a fratura.
- registro fotográfico das superfícies fraturadas por meio do microscópio ótico: registram-se todas as informações que podem ser relevantes da superfície fraturada e que podem ser importantes para elaboração do relatório.

Após avaliação em macroscopia em estereomicroscópio, realiza-se análise da superfície fraturada por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), para se obter uma melhor visualização das características da fratura.

- avaliação das regiões que podem ter originado a fratura: realização de uma varredura da superfície fraturada através do MEV, a fim de identificar a região de início da fratura.
- avaliação das demais regiões da fratura: verifica-se a presença de informações que podem indicar que a fratura ocorreu por algum esforço repetitivo ou por esforço brusco que a peça foi submetida, provocando a fratura.
- fotografia das regiões analisadas: é o registro das características da superfície fraturada para posterior inserção no relatório.
- identificação da causa da fratura: esta é a etapa final, no qual se analisa todas as informações sobre a fratura e verificam-se as possíveis causas.
- avaliação da conformidade do material: esta etapa sempre deve ser realizada após análise fractográfica. A conformidade do material pode ser verificada por meio de análise micrográfica, ensaios para verificar as características mecânicas e/ou análise de composição química do material da peça fraturada. Esses ensaios são destrutivos e necessitam da retirada de amostras da peça fraturada para realizá-los. Porém, em alguns casos a superfície fraturada deve ser preservada, impossibilitando a realização destes ensaios.
- elaboração do relatório: o relatório é elaborado após obter todos os resultados das análises realizadas.

Caso não se consiga chegar a alguma conclusão após as etapas do fluxograma acima, é realizada a avaliação da conformidade do material, pois por

meio destas análises pode-se verificar a ocorrência de variáveis no processo do fornecedor.

Estas análises podem ser realizadas nas regiões fraturadas e/ou próximas à fratura, onde faz-se uma comparação dos resultado obtidos com o objetivo de identificar a ocorrência de problemas pontuais que podem ter provocado a fratura.

Após avaliação de todos os resultados é elaborado um relatório.

O fluxo da figura 39 apresenta a descrição das etapas.

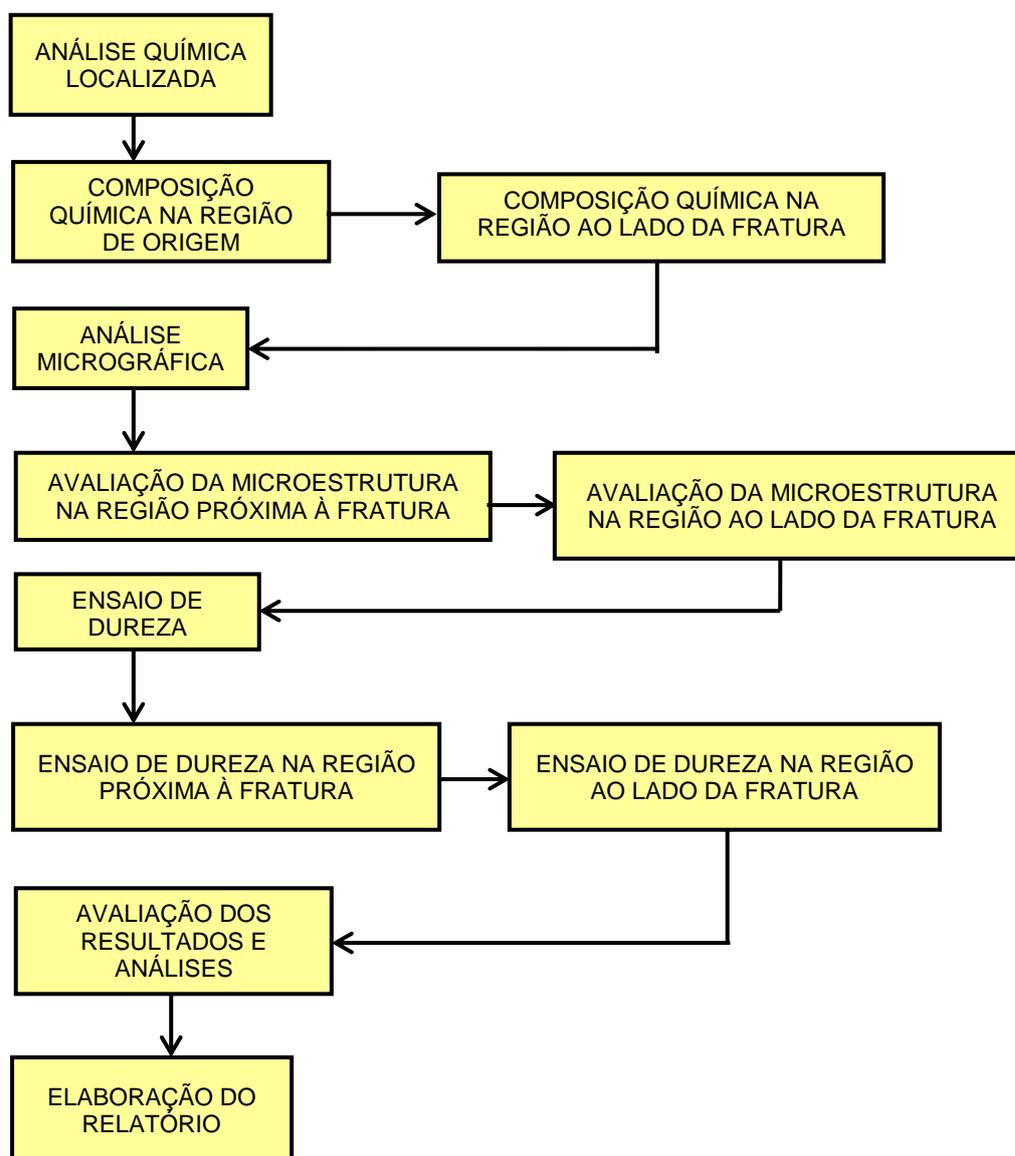


Figura 39: Sequência para avaliação da conformidade do material em uma peça fraturada

Fonte: autora (2013)

## **8 ESTUDO DE CASO**

Para exemplificar a interpretação e análise de uma falha mecânica, serão abordados neste trabalho de pesquisa, dois estudos de casos. As etapas para descrição destes estudos de caso foram baseadas nos fluxogramas descritos nas Figuras 38 e 39.

Os objetos de estudo dos dois casos foram peças de veículo automotor. O primeiro objeto de estudo é um sendo parafuso de fixação do berço do motor e o segundo um parafuso de fixação central e do suporte elástico do motor.

### **8.1 Parafuso de fixação do berço do motor**

#### **8.1.1 Introdução**

Neste primeiro estudo de caso, são apresentadas as etapas realizadas na análise de fratura ocorrida no parafuso de fixação do berço do motor, entregue para análise investigativa. O parafuso fraturou durante o processo de montagem, no momento de aplicação do torque.

O parafuso analisado promove a fixação da barra estabilizadora no berço do motor, sendo que essa barra tem a função de garantir que o berço ficará estático enquanto o veículo estiver em movimento, principalmente em curvas. A falha desse parafuso pode provocar o movimento de flexão da região frontal do veículo no momento de arranque.

#### **8.1.2 Objetivo**

Realizar análise investigativa no parafuso de fixação do berço de um veículo automotor, a fim de verificar a possível causa da fratura ocorrida durante o processo de montagem, no momento da aplicação de torque nominal de 80Nm, com tolerância de 10% (mínimo 72Nm e máximo 88Nm).

#### **8.1.3 Dados da peça**

- Parafuso de fixação do Berço do Motor;
- Equipamento utilizado na Montagem: parafusadeira automática.

#### 8.1.4 A análise

Seguindo as etapas descritas nos fluxogramas (Figuras 38 e 39), a análise foi conduzida da seguinte forma:

- avaliação das informações sobre a peça fraturada no momento que o parafuso foi recebido, todas as informações sobre as condições que o mesmo estava trabalhando foram avaliadas. Verificou-se que a fratura ocorreu durante o processo de montagem, e que o parafuso encontrava-se em condições normais de armazenamento, ou seja, o local que o parafuso estava posicionado na borda de linha era adequado e isento de qualquer fator externo que pudesse prejudicar sua integridade. O torque aplicado foi de 80Nm com tolerância de 10% (mínimo 72Nm e máximo 88Nm) estava de acordo com o preconizado na operação, a ferramenta que realiza o torque não apresentava nenhuma anomalia e os registros de calibração estavam atualizados.

A Figura 40 mostra o berço do motor em que o parafuso é fixado e a região que o parafuso estava sendo fixado quando fraturou.

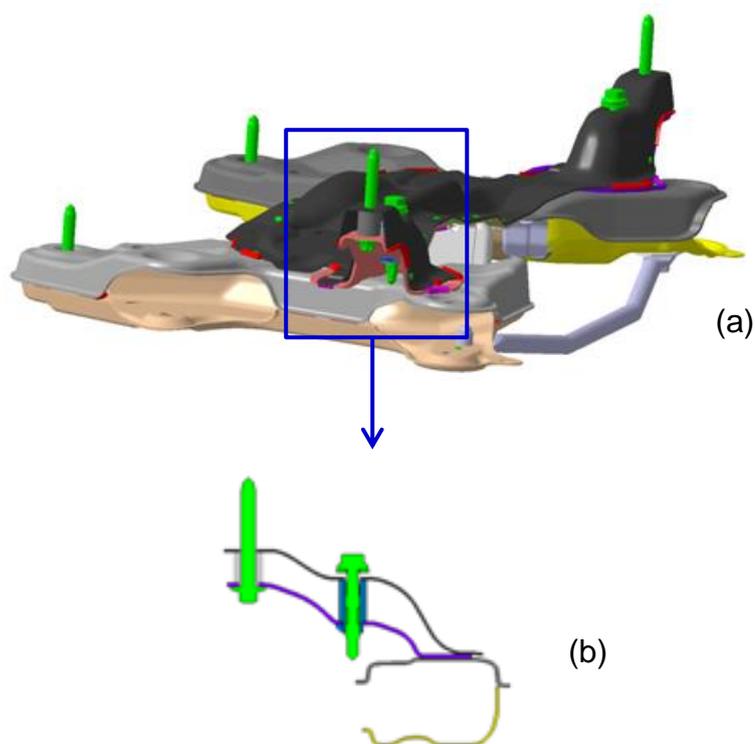


Figura 40: (a) e (b) - Detalhe da região que o parafuso estava sendo fixado no berço quando fraturou  
Fonte: autora (2013)

- análise visual: verificou-se que o parafuso entregue para análise não apresentava oxidação entre os filetes ou marcas de que sofrera algum impacto que pudesse estar relacionado à fratura (Figura 41).

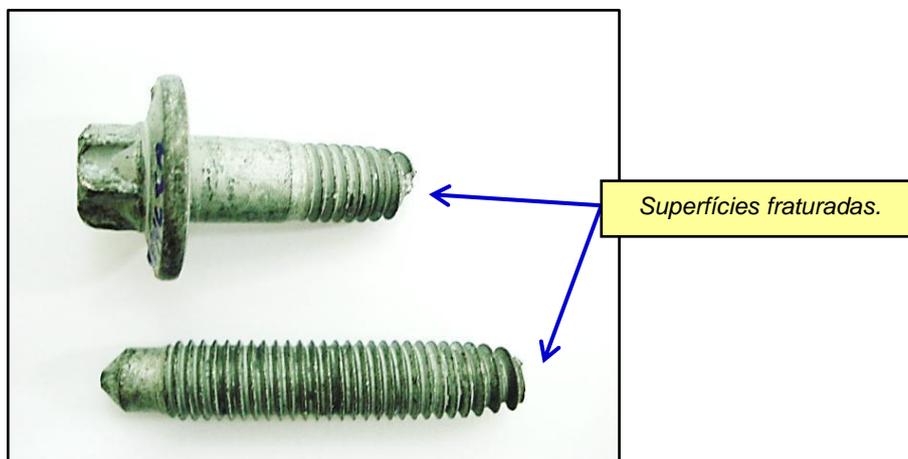


Figure 41: Parafuso de fixação do berço do motor  
Fonte: autora (2010)

- reconstrução da fratura e avaliação das superfícies fraturadas: verificou-se a olho nú que o parafuso apresentava características de deformação plástica, provocada pelo esforço de torção. Na Figura 42 pode-se notar que próxima à fratura, devido ao movimento de torção, ocorreu alteração no espaçamento entre os filetes e redução no diâmetro do parafuso.

- fotografia da peça como recebida: após avaliação das informações sobre o parafuso e análise visual, fotografou-se o parafuso, de forma a evidenciar as regiões com deformação plástica e ausência de oxidação na superfície (Figura 42).

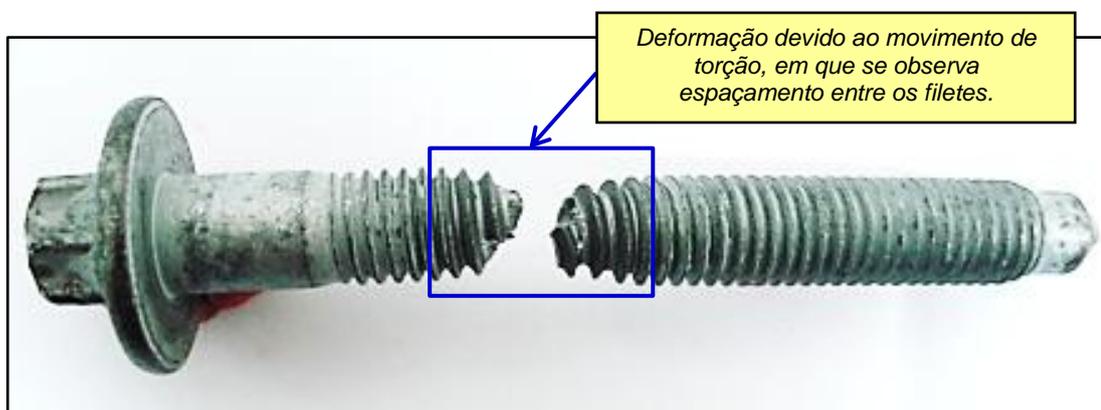


Figure 42: Parafuso fraturado apresentando deformação do tipo torção  
Fonte: autora (2010)

- limpeza da fratura: para análise macrográfica, foi realizada a limpeza do parafuso em ultrassom juntamente com álcool isopropílico por aproximadamente 10 minutos, a fim de remover os contaminantes da superfície fraturada.
- análise das superfícies de fratura por meio de macroscopia em estereomicroscópio: observou-se a presença de trincas entre os filetes, que são decorrentes do esforço de torção. Porém, próxima à região de fratura não foi observada a presença de trincas que pudessem ter relação com a fratura (Figura 43).

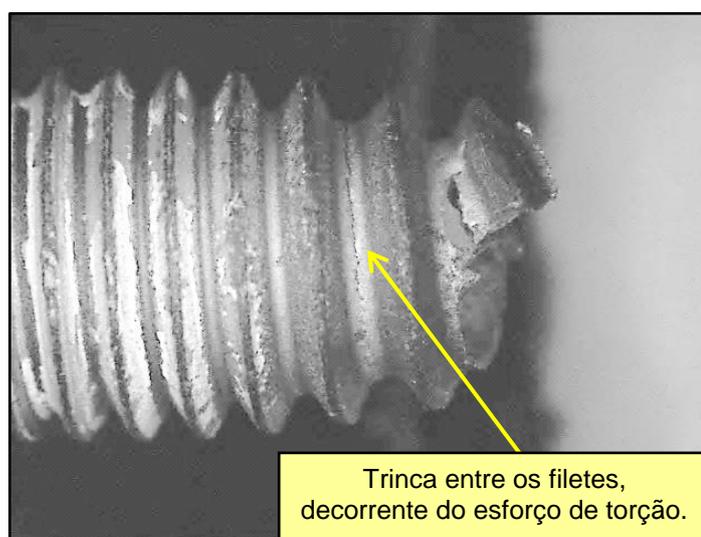


Figure 43: Fotografia por meio do estereomicroscópio da região dos filetes do parafuso. A seta indica a trinca entre os filetes, decorrente do esforço de torção. (Ampliação: 6,25X)  
Fonte: autora (2010)

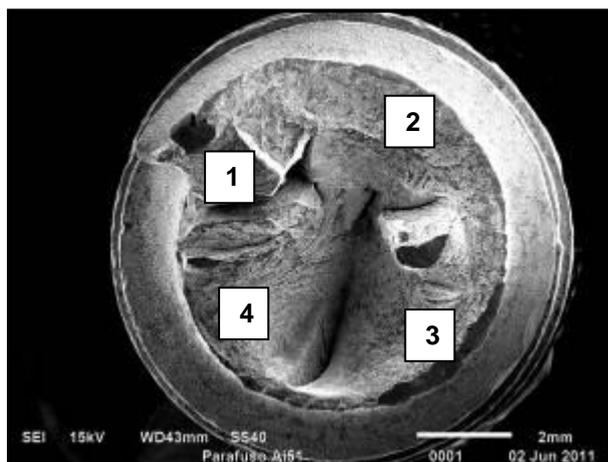
- registro fotográfico das superfícies fraturadas por meio do estereomicroscópio: registro por meio do analisador de imagens da superfície fraturada (Figura 44).



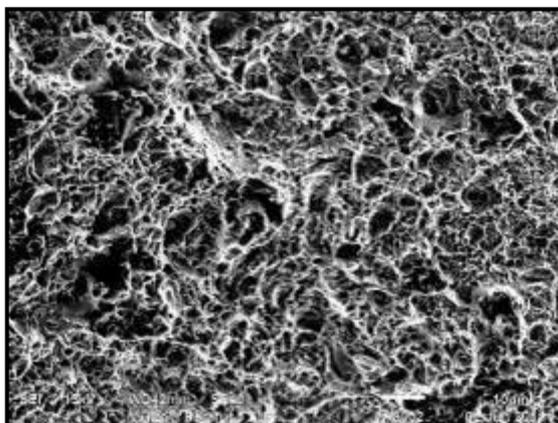
Figura 44: (a) e (b) - Fotomicrografias das superfícies de fratura  
Fonte: autora (2010)

Após observação da superfície fraturada no estereomicroscópio, realizou-se a avaliação por meio do microscópio eletrônico de varredura (MEV), com o objetivo de verificar a morfologia e topografia da fratura.

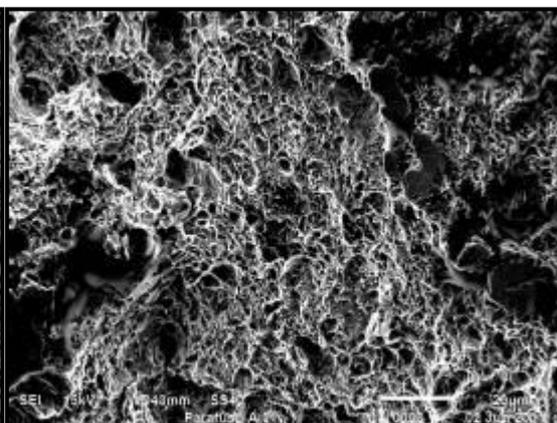
- avaliação das regiões que podem ter originado a fratura: realizou-se uma varredura da superfície fraturada por meio de microscopia eletrônica de varredura, a fim de identificar a região de início da fratura, porém não foram observadas regiões concentradoras de tensão que pudessem ter contribuído para a fratura do parafuso.
- avaliação e fotografia das demais regiões da fratura: a avaliação da superfície fraturada no MEV foi realizada de topo, ou seja, o parafuso foi posicionado de tal forma que somente a fratura estivesse visível. Verificou-se que toda a superfície fraturada apresentava aspectos de fratura dúctil devido a presença de microcavidades (*dimples*), sem influência de concentradores de tensão, descartando a possibilidade da trinca ter ocorrido por esforços cíclicos. As ampliações utilizadas para análise variam de acordo com a região e a característica da fratura, no caso do parafuso as ampliações variaram de 600X à 3000X. A fotografia da superfície fraturada foi realizada em 04 regiões, de forma que fosse evidenciada que toda a superfície possuía características de fratura dúctil (Figura 45).



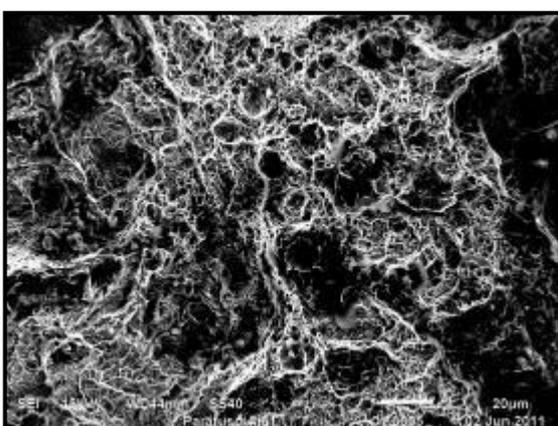
(a) Superfície fraturada do Parafuso de Fixação do Berço do Motor.



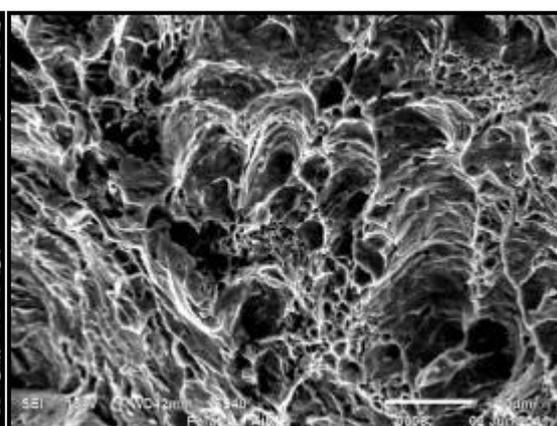
(b) Região 1: Início da fratura, apresentando dimples (microcavidades) provocadas pelo esforço de torção. Ampliação 1000X.



(c) Região 2: Microcavidades (dimples) na superfície fraturada. Ampliação 850X.



(d) Região 3: Microcavidades (dimples) na superfície fraturada. Ampliação 600X.



(e) Região 4: Microcavidades (dimples) na superfície fraturada. Ampliação 3000X.

Figura 45: (a), (b), (c), (d) e (e) - Imagens via MEV da superfície fraturada do parafuso de fixação. Observa-se a presença de microcavidades (dimples) em toda a superfície

Fonte: autora (2010)

Avaliando todas as informações descritas anteriormente, podem-se destacar os principais itens a serem considerados neste estudo de caso.

Quanto ao equipamento:

- torque aplicado de 80Nm com tolerância de 10% (mínimo 72Nm e máximo 88Nm), conforme preconizado na operação;
- a ferramenta que realiza o torque não apresentava nenhuma anomalia;
- os registros de calibração da ferramenta de torque estavam atualizados.

Quanto ao local de armazenamento do parafuso:

- o parafuso encontrava-se em condições normais de armazenamento, ou seja, o local que o parafuso estava posicionado na borda de linha era adequado e isento de qualquer fator externo que pudesse prejudicar sua integridade.

Quanto às imagens da superfície fraturada:

- toda a superfície fraturada apresentava aspectos de fratura dúctil devido a presença de microcavidades (*dimples*), sem influência de concentradores de tensão, descartando a possibilidade da trinca ter ocorrido por esforços cíclicos.

Quanto ao processo de montagem:

- a instrução de trabalho da operação deixa claro que a posição correta do parafuso no berço, antes da aplicação do torque com a ferramenta;
- os aspectos ergonômicos da operação estão adequados, ou seja, a posição do operador não apresenta dificuldades para realizar a atividade de acordo com o preconizado.

É necessária a avaliação do material de forma a verificar se o processo do fornecedor está adequado.

- avaliação da conformidade do material após avaliação das características da fratura, realizou-se análise da conformidade do material por meio do ensaio de tração. O ensaio de tração foi realizado em 05 (cinco) parafusos, todos novos e do mesmo lote do parafuso fraturado (Figura 46). Os resultados obtidos apresentaram valores de limite de escoamento ( $R_{p0,2\%}$ ), limite de resistência máxima ( $R_m$ ) e alongamento ( $A$ ) em conformidade com a especificação do fornecedor, tabela 01. Pelo fato do parafuso ser uma peça que é submetida a esforços de tração, compressão, flexão e torção, o controle das características mecânicas é extremamente importante para seu bom desempenho. Desta forma, os resultados do ensaio de tração estando conforme as especificações já foram conclusivos, não

sendo necessária a realização das análises micrográficas e de composição química para avaliar a conformidade do parafuso.

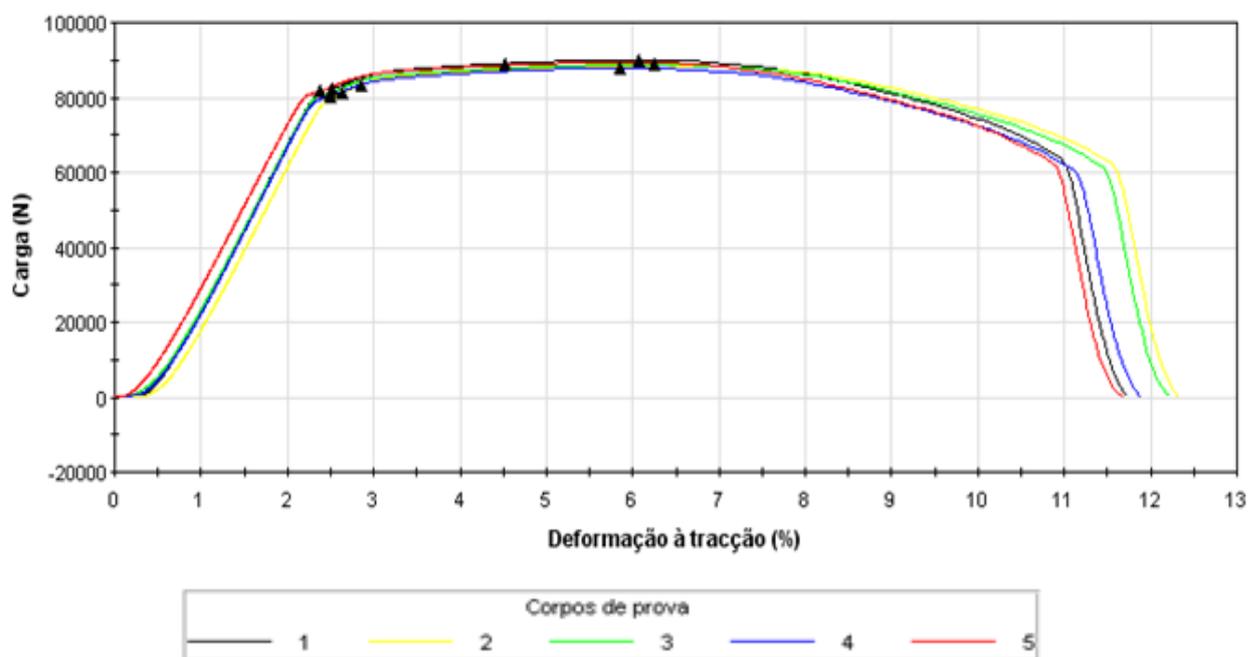


Figura 46: Gráfico com resultados do ensaio de Tração, realizado nos parafusos em estado novo  
Fonte: autora (2010)

Tabela 1: Resultados do ensaio de tração dos parafusos de fixação do berço do motor, em estado novo.

Parafuso	Rp0,2% (Mpa)	Rm (Mpa)	A (%)
1	978	1067	10,4
2	963	1052	10,9
3	965	1053	10,8
4	952	1043	10,5
5	969	1060	10,3
<b>Média</b>	<b>965</b>	<b>1055</b>	<b>10,6</b>
<b>Especificação do material</b>	<b>Mínimo: 900MPa Máximo: 1080MPa</b>	<b>Mínimo: 1000MPa Mínimo: 1200MPa</b>	<b>Mínimo: 9%</b>

Fonte: autora (2010)

- identificação da causa da fratura: a conformidade obtida no ensaio de tração, a ausência de oxidação e marcas de impacto no parafuso, a aplicação de torque de acordo com o preconizado na operação, a ausência de anomalias na ferramenta de torque e nos registros de calibração, e a adequação dos aspectos ergonômicos durante o processo, eliminam a hipótese da causa da fratura estar relacionada a falhas no processo de fabricação do parafuso, ao local de armazenamento do parafuso em borda de linha, a falhas do equipamento e ao aspecto ergonômico inadequado. Em relação à fratura, o aspecto de que sofreu esforço de torção, a presença de microcavidades (*dimples*) em toda a superfície fraturada, indicando que a fratura é do tipo dúctil e a ausência de concentradores de tensão, também eliminam a hipótese da causa da fratura estar relacionada a esforços cíclicos. Desta forma, pode-se concluir que a causa da fratura está relacionada à falha do processo de montagem (não cumprimento da instrução de trabalho corretamente), ou seja, ao mau posicionamento do parafuso no local de fixação do berço e posterior aplicação do torque.

#### **8.1.5 Análise do estudo de caso: parafuso de fixação do berço do motor**

A análise das características mecânicas realizada, tomando como base as etapas de análise propostas do fluxograma apresentado, permite concluir que a fratura ocorreu devido ao não cumprimento da instrução de trabalho corretamente, ou seja, o parafuso foi posicionado no local de fixação do berço de forma incorreta, e posteriormente aplicou-se o torque, provocando um esforço não uniforme sobre o parafuso levando-o à ruptura.

### **8.2 Parafuso de fixação central do Suporte Elástico do Motor**

#### **8.2.1 Introdução**

No segundo estudo de caso foi avaliado o parafuso de fixação central do suporte elástico do motor, em que foi aplicado um torque de 54Nm, e o mesmo foi submetido ao ensaio de resistência. Este ensaio consiste em aplicar ao sistema (Parafuso de fixação central + Suporte elástico + Motor) os esforços de durabilidade por meio do equipamento chamado dinamômetro, que irá simular e aplicar as mesmas condições de resistência (carga) durante uma rodagem dinâmica, ou seja,

uma situação real de utilização de um veículo automotor. O objetivo do ensaio é avaliar o desempenho do sistema e a quantidade de ciclos que a peça pode suportar.

O parafuso de fixação central tem a função de evitar o movimento de torção do suporte elástico, decorrentes dos esforços que ele é submetido durante a rotação dinâmica, e garantir a rigidez de fixação do sistema.

### **8.2.2 Objetivo**

Realizar análise investigativa no parafuso de fixação central do suporte elástico do motor, fraturado durante ensaio de resistência (cerca de 40% do ensaio), após aplicação de torque de 54Nm.

### **8.2.3 Dados da peça**

- Parafuso de fixação central do suporte elástico do motor;
- Equipamento utilizado na Montagem: parafusadeira automática.

### **8.2.4 A análise**

Seguindo as etapas descritas nos fluxogramas (Figuras 38 e 39), a análise foi conduzida da seguinte forma:

- avaliação das informações sobre a peça fraturada: no momento que o parafuso foi recebido, todas as informações sobre o tipo de ensaio que o mesmo estava sendo submetido e o estado que se apresentava o parafuso antes do ensaio, ou seja, a presença de oxidação ou marcas de impacto foi avaliada. Desta forma, verificou-se que a fratura ocorreu durante o ensaio de resistência, após aplicação de torque de 54Nm, e que antes de sua utilização, não foi observada oxidação ou marcas de impacto no parafuso. A ferramenta que realiza o torque não apresentava nenhuma anomalia e os registros de calibração estavam atualizados.

A Figura 47 mostra o suporte elástico do motor e a região que o parafuso estava fixado quando fraturou.

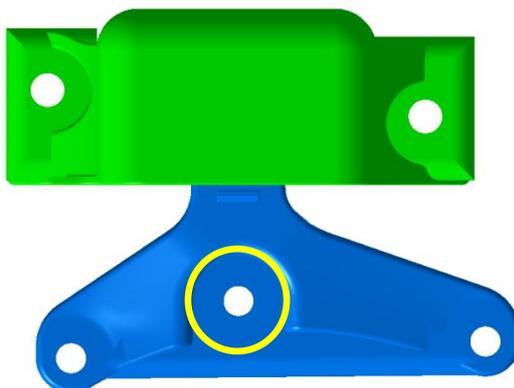


Figura 47: Detalhe da região central de fixação do parafuso no suporte elástico do motor

Fonte: autora (2013)

- análise visual: verificou-se que o parafuso entregue para análise não apresentava oxidação entre os filetes ou marcas de que sofrera algum impacto que pudesse estar relacionado à fratura (Figura 48).

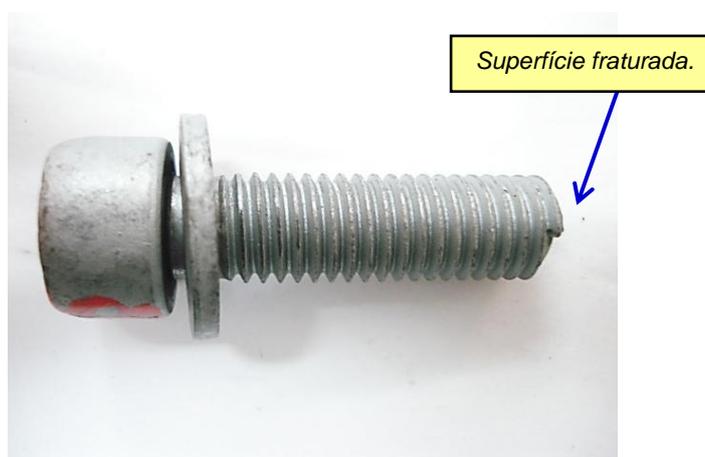


Figure 48: Parafuso de fixação do suporte elástico do motor

Fonte: autora (2013)

- reconstrução da fratura e Avaliação das superfícies fraturadas: verificou-se a olho nú que o parafuso não apresenta deformações plásticas e oxidação nos filetes. Na superfície de fratura, observam-se nitidamente as marcas de praia, que são produzidas em consequência de alterações no ciclo de tensão, e são características de fratura por fadiga.

- fotografia da peça como recebida: após avaliação das informações sobre o parafuso e análise visual, fotografou-se o mesmo, de forma a evidenciar a ausência de deformação plástica e de oxidação, e a presença de marcas de praia (Figura 49).



Figura 49: Parafuso de fixação do suporte elástico do motor. (a) ausência de deformação plástica. (b) marcas de praia<sup>6</sup> na superfície fraturada  
Fonte: autora (2013)

<sup>6</sup> Marcas de praia - São características de fratura por fadiga, produzidas em consequência de alterações no ciclo de tensão.

- análise das superfícies de fratura por meio de macroscopia em estereomicroscópio: não foi observada a presença de trincas e/ou deformações entre os filetes, que pudessem ter relação com a fratura.
- identificação da região que pode ter iniciado a fratura e registro fotográfico da superfície fraturada: A superfície apresenta características de fratura por fadiga e a região de início, pois se observa linhas que indicam o sentido de propagação da fratura e posteriormente as marcas de praia, ocasionadas por alterações no ciclo de tensão (Figura 50).

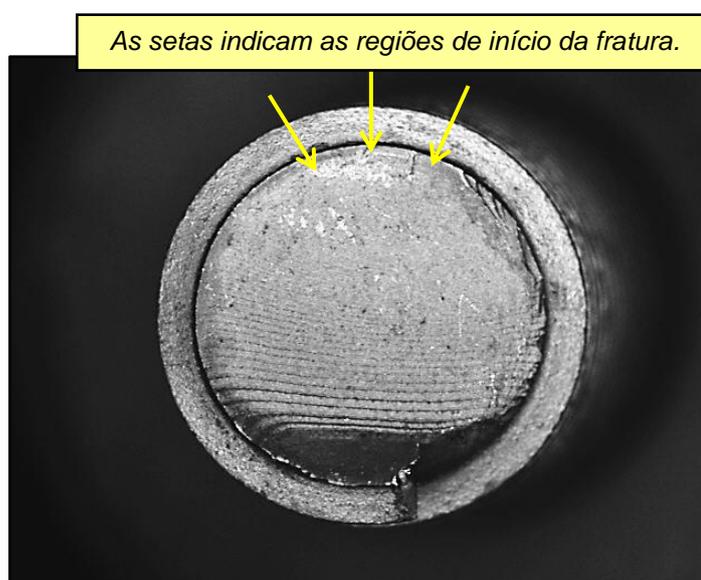
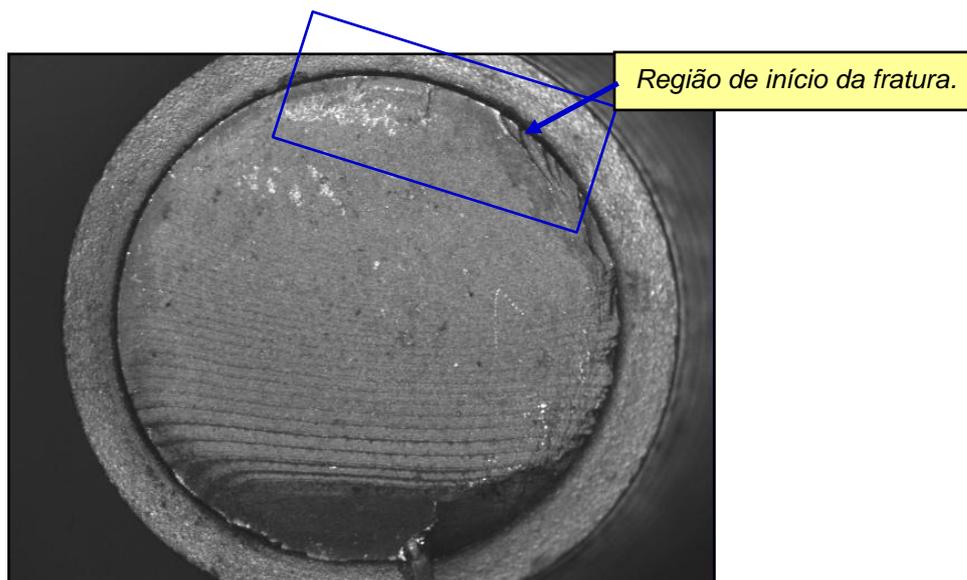


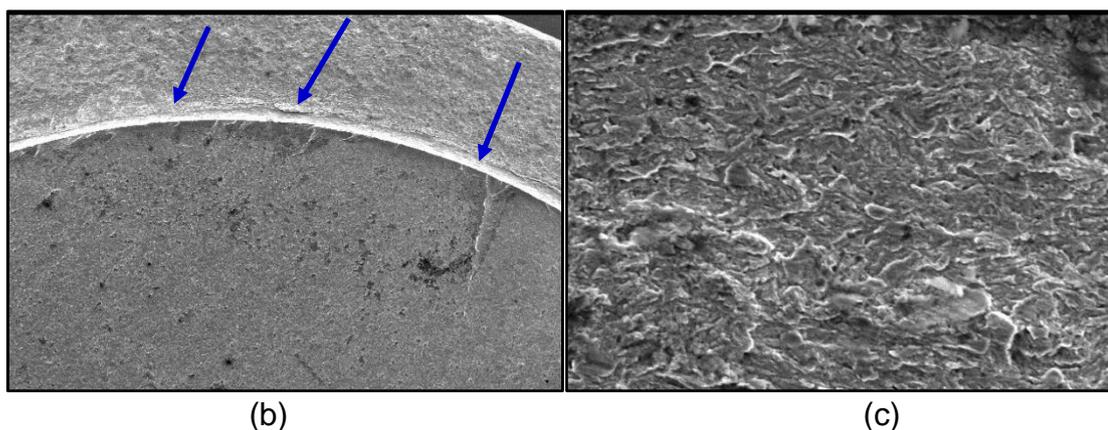
Figura 50: Imagem da superfície fraturada do parafuso de fixação central do suporte elástico. Observam-se as regiões de início e o sentido de propagação da fratura  
Fonte: autora (2013)

Após observação da superfície fraturada no estereomicroscópio, realizou-se a avaliação por meio Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), com o objetivo de caracterizar a fratura.

- avaliação das regiões que podem ter originado a fratura: realizou-se uma varredura da superfície fraturada através de microscopia eletrônica de varredura, a fim de evidenciar as regiões de início da fratura. Observa-se claramente as linhas de início da fratura e o sentido de propagação (Figura 51b). Ampliando a imagem em 3000x, podem-se visualizar estrias de fadiga, que são características quando a fratura ocorre por fadiga (Figura 51c).



(a) Superfície fraturada do Parafuso de fixação. Em destaque a região de início da fratura.



(b)

(c)

Figura 51: (a) Superfície fraturada do Parafuso de fixação. (b) Detalhe da região de início e o sentido de propagação da fratura. (c) Estrias de fadiga, características quando a fratura ocorre por fadiga, observadas na região de início  
 Fonte: autora (2013)

- avaliação e fotografia das demais regiões da fratura: a avaliação da superfície fraturada no MEV foi realizada de topo, ou seja, o parafuso foi posicionado de tal forma que somente a fratura estivesse visível. As estrias de fadiga são observadas na região de início da fratura e as marcas de praia, que são produzidas em consequência de alterações no ciclo de tensões, indicam uma penetração de fadiga em mais de 90% da superfície do parafuso, antes de ocorrer a fratura final. Na região final da fratura apresenta observa-se a presença de microcavidades (*dimples*). A fotografia da superfície fraturada foi realizada na região de início da

fratura e em mais 03 regiões, de forma que fosse registrada a penetração de fadiga em mais de 90% da superfície do parafuso e a presença de microcavidades (*dimples*) na região final da fratura (Figura 52).

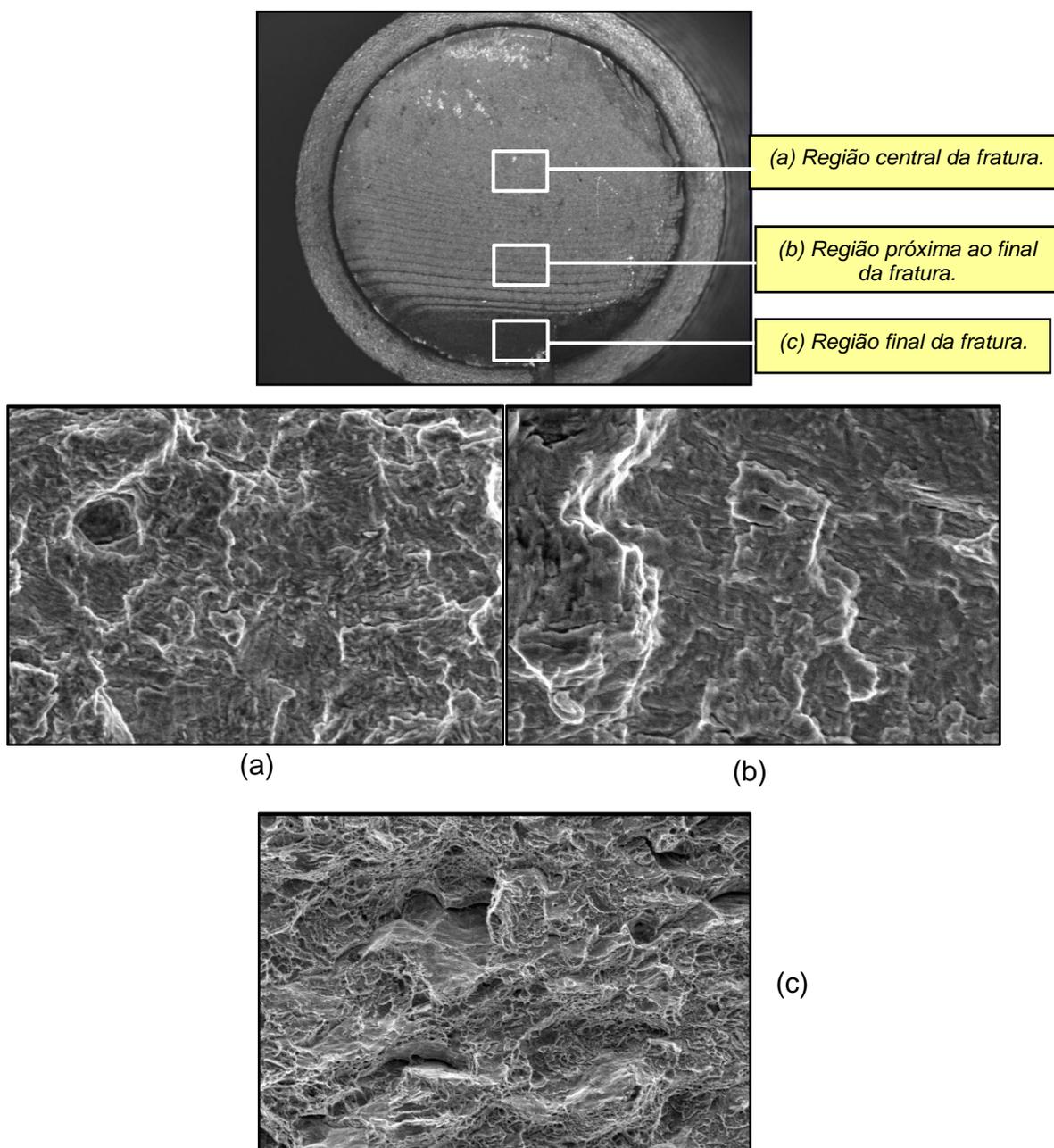


Figura 52: Detalhe das demais regiões da superfície fraturada do parafuso. (a) região central da fratura, apresentando estrias de fadiga. (b) região próxima ao final da fratura, em que ainda observa-se estrias de fadiga. (c) região final, apresentando microcavidades (*dimples*)

Fonte: autora (2013)

Avaliando todas as informações descritas anteriormente, pode-se destacar os principais itens a serem considerados neste estudo de caso.

Quanto ao estado de entrega do parafuso para análise:

- o parafuso não apresentava deformações plásticas e oxidação nos filetes;
- ausência de marcas ou algum impacto que pudesse estar relacionado à fratura.

Quanto as imagens da superfície fraturada:

- presença de estrias de fadiga na região de início da fratura;
- marcas de praia, que são produzidas em consequência de alterações no ciclo de tensões, indicando penetração de fadiga em mais de 90% da superfície do parafuso, antes de ocorrer a fratura final;
- microcavidades (*dimples*) na região final da fratura, indicando que não houve influência de concentradores de tensão.

Quanto à montagem do parafuso e ao torque aplicado para realização do teste de resistência:

- o parafuso foi montado de acordo com a instrução de trabalho da operação, e o torque aplicado foi de 54Nm;
- com o torque de 54Nm, o parafuso fraturou à 40% do ensaio. Logo, o torque de 54Nm é insuficiente para o parafuso resistir aos esforços de durabilidade.

É necessária a avaliação do material de forma a verificar se o processo do fornecedor está adequado.

- avaliação da conformidade do material: após avaliação das características da fratura, realizou-se análise da conformidade do material por meio da avaliação das características metalúrgicas (análise micrográfica) e mecânicas (ensaio de dureza).

A microestrutura do material do parafuso apresenta-se formada por cerca de 90% de martensita e ausência de descarbonetação<sup>7</sup> na superfície (Figura 53). O valor médio do ensaio de dureza apresenta-se em torno de 35,3HRC, estando de acordo com as especificações do fornecedor, tabelas 02 e 03.

---

<sup>7</sup> Descarbonetação - É um defeito que aparece frequentemente nos aços, principalmente nos mais ricos em carbono e consiste na redução acentuada do teor desse elemento nas proximidades da superfície.

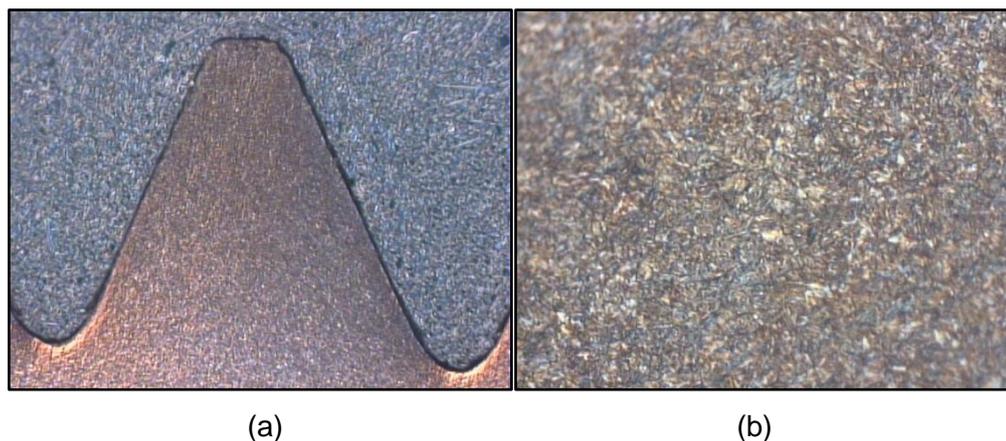


Figura 53: Fotomicrografias do parafuso. (a) observa-se ausência de descarbonetação na superfície dos filetes do parafuso. (b) microestrutura da região central do parafuso, formada por cerca de 90% de martensita  
 Fonte: autora (2013)

Tabela 2: Resultado da análise micrográfica, realizada no material do parafuso de fixação central do suporte elástico do motor, fraturado durante ensaio de resistência

	Resultado	Especificação do material
Parafuso de fixação central do suporte elástico do motor	Microestrutura formada por cerca de 90% de martensita e ausência de descarbonetação na superfície	Microestrutura formada por 90% de martensita e descarbonetação total máxima admissível em torno de 0,015mm

Fonte: autora (2013)

Tabela 3: Resultado do ensaio de dureza, realizado no material do parafuso de fixação central do suporte elástico do motor, fraturado durante ensaio de resistência

	Resultado	Especificação do material
Parafuso de fixação central do suporte elástico do motor	35,5 HRC	Mínimo = 32HRC Máximo = 39HRC

Fonte: autora (2013)

- identificação da causa da fratura: as conformidades obtidas por meio da avaliação das características metalúrgicas (análise micrográfica) e mecânicas (ensaio de dureza), a ausência de deformações plásticas e oxidação nos filetes do parafuso entregue para análise, e a montagem do parafuso de acordo com a instrução de trabalho da operação, eliminam a hipótese da causa da fratura estar relacionada a falhas no processo de fabricação e de montagem, e ao local de armazenamento do parafuso em borda de linha. Em relação à fratura, a visualização das linhas de início e o sentido de propagação da fratura, assim como as marcas de praia e estrias de fadiga, que são produzidas em consequência de alterações no ciclo de tensões e características de fratura por fadiga, presentes em mais de 90% da superfície de fraturada, indicam que a fratura ocorreu devido a esforços excessivos que o parafuso foi submetido, podendo ter sido causada pela aplicação do torque de 54Nm ser insuficiente para resistir aos esforços de durabilidade.

#### **8.2.5 Análise do Estudo de caso: parafuso de fixação central do Suporte Elástico do Motor**

Para realização o ensaio de resistência, que consiste em aplicar ao sistema (Parafuso de fixação central + Suporte elástico + Motor) os esforços de durabilidade por meio do equipamento chamado dinamômetro, que irá simular uma situação real de utilização de um veículo automotor, avaliando o desempenho do sistema e a quantidade de ciclos que a peça pode suportar, foi aplicado um torque de 54Nm no parafuso de fixação central do suporte elástico do motor.

Avaliando as características mecânicas e metalúrgicas, tomando como base as etapas de análise propostas no fluxograma apresentado, pode-se concluir que o torque de 54Nm aplicado ao parafuso de fixação central do suporte elástico do motor foi insuficiente para que o mesmo pudesse resistir aos esforços de durabilidade, ou seja, as condições de resistência (carga) durante a simulação de rodagem de um veículo automotor, e evitasse o movimento de torção do suporte elástico, tendo como resultado a fratura parafuso durante o ensaio.

## 9 CONCLUSÃO DO TRABALHO

O presente trabalho tinha como objetivo apresentar um material instrucional no formato de um livro digital, com conteúdo voltado para a interpretação e análise dos diferentes tipos de falhas mecânicas, de forma a demonstrar qual a influência da estrutura de grãos, processo de nucleação de trinca, histórico térmico e mecânico no aparecimento das mesmas.

Um primeiro ponto que deve ser destacado foi a experiência adquirida pelo proponente do trabalho por realizar um trabalho multidisciplinar. Além do produto final obtido como resultado da presente pesquisa, outra grande contribuição, muito mais difícil de ser quantificada, foi a capacidade de trabalho em equipe e o diálogo entre pesquisadores de diferentes áreas. A adequação do conteúdo teórico com a parte de design digital foi uma etapa de grande dificuldade, que foi vencida com a utilização de uma metodologia comum de trabalho entre os pesquisadores, que buscaram diversas formas durante a elaboração do material digital para garantir que a ideia de apresentar um material com o conteúdo técnico necessário, didático e de fácil entendimento fosse transposta para ao produto final obtido.

Pode-se concluir que o objetivo inicial proposto foi atingido com o livro digital elaborado. O material apresenta as informações teóricas e dois estudos de caso, que auxiliam na ensinagem e interpretação de falhas mecânicas, utilizando recursos multimidiáticos atrativos (animações, vídeos), contando com uma linguagem simples e didática. O produto poderá ser utilizado por diferentes tipos de público, tais como estudantes de engenharia e por empresas para treinamento de pessoas, de forma a garantir a transmissão e socialização do conhecimento.

Pode-se destacar também que a partir da utilização do livro digital produzido, estão sendo executados testes do material produzido e a avaliação da efetividade do processo de aprendizagem poderá ser realizada posteriormente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MEYERS, M.A.; CHAWLA, K.K. "Princípios de metalurgia mecânica". São Paulo: Ed. Edgard Blucher, 1982. 505p.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. "Ensaaios dos Materiais". Rio de Janeiro: Ed. LTC, 2000. 247p.

CALLISTER, William D. Jr. "Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução". The University of Utah, 2006. 688 p.

GODEFROID, L. B.; CÂNDIDO, L. C. "Análise de Falhas". ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005. 422 p.

PELLICCIONE, A. S.; MORAES, M. F.; GALVÃO, J. L. R.; MELLO, L. A. de; SILVA, E. S. "Análise de Falhas em Equipamentos de Processo", 2012. 369 p.

POKORNY, Annick ; POKORNY, Jean. "Fractographie – Macrographies et Micrographies", Techniques de l'Ingénieur - Traité Matériaux Métalliques, 2003.

DIETER, G.E. "Metalurgia mecânica". 2nd ed. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois, 1981. 653p.

FILATRO, A. "Design Instrucional na Prática". São Paulo – Pearson Education do Brasil, 2008. 174p.

PORTUGAL, C. "Design em Situações de Ensino-Aprendizagem. Um diálogo interdisciplinar". Rio de Janeiro – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2009. 206p.

PORTUGAL, C. "Design, Educação e Tecnologia". Rio de Janeiro – Rio Books, 2013. 143p.

ANASTASIOU, C. "Ensinar, aprender, apreender e processos de ensinagem". Joinville, SC – Editora Univille, 2003.

ANASTASIOU, C.; PIMENTA, S. "Do ensinar à ensinagem". São Paulo – Editora Cortez, 2005.