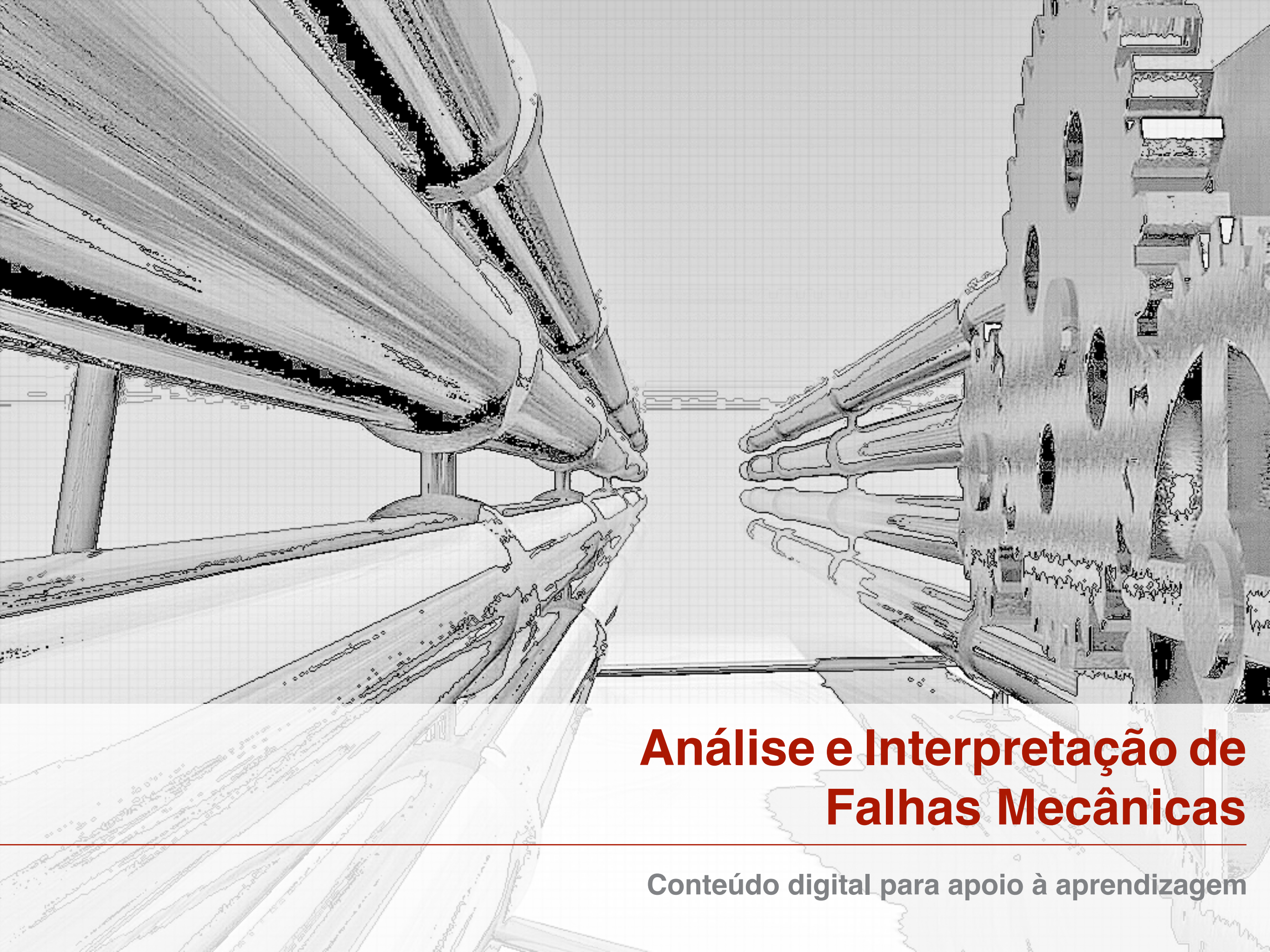




Análise e Interpretação de Falhas Mecânicas

Conteúdo digital para apoio à aprendizagem

Apresentação

O presente projeto apresenta um material instrucional digital, que contará com a interpretação e análise de cada 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.

A motivação para elaboração deste material instrucional foi o fato da autora trabalhar a 10 (dez) anos com caracterização de falhas mecânicas, e a necessidade de transmitir a experiência adquirida e armazenar estas informações em um material para treinamento de pessoas em empresas.

Podemos dividir o conteúdo do material instrucional em duas partes principais. A primeira etapa será dividida em duas partes, onde serão apresentados os conceitos teóricos necessários para interpretação de uma análise de falhas, como: Informações básicas sobre a fratura, influência do modo de sollicitação e tipos de fraturas, Na segunda parte serão apresentados casos práticos, utilizando o conteúdo teórico para descrever a sequência de interpretação de uma falha, seguindo um fluxograma proposta para interpretação de uma falha mecânica.

Sumário

Referencial teórico

Informações básicas sobre fratura
A influência do modo de sollicitação
Ensaio de Tração
Tensões cíclicas
Fractografia

Etapas para interpretação de uma falha

Análise microestrutural
Avaliação da conformidade do material

Etapas para interpretação de uma falha

Fixação do berço do motor
Fixação central do Suporte Elástico do Motor

Informações básicas sobre fratura

[Voltar ao sumário](#)

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, e 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; a 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; biológica; etc... [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 que 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].

A influência do modo de solicitação

[Voltar ao sumário](#)

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 [CALLISTER, 2006].

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].



A influência do modo de solitação: Tração

[Voltar ao sumário](#)

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°. Em materiais frágeis, ou seja, aqueles que possuem fraca capacidade de deformação, a ruptura é rigorosamente perpendicular ao eixo de solitação em tração. A distribuição de tensões uniformes em qualquer seção pode iniciar a ruptura em qualquer ponto, Figura 1 [ANNICK; POKORNY, 2009].

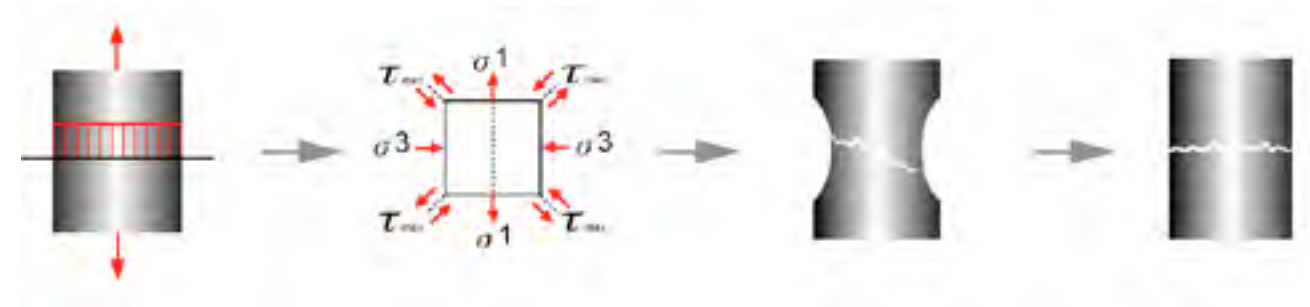


Figura 1 - Influência do modo de solitação sobre o aspecto macrográfico das fraturas - Esforço por tração [ANNICK; POKORNY, 2009].

A influência do modo de solitação: 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 solitação, e iniciam-se em qualquer ponto da seção, Figura 2 [ANNICK; POKORNY, 2009].

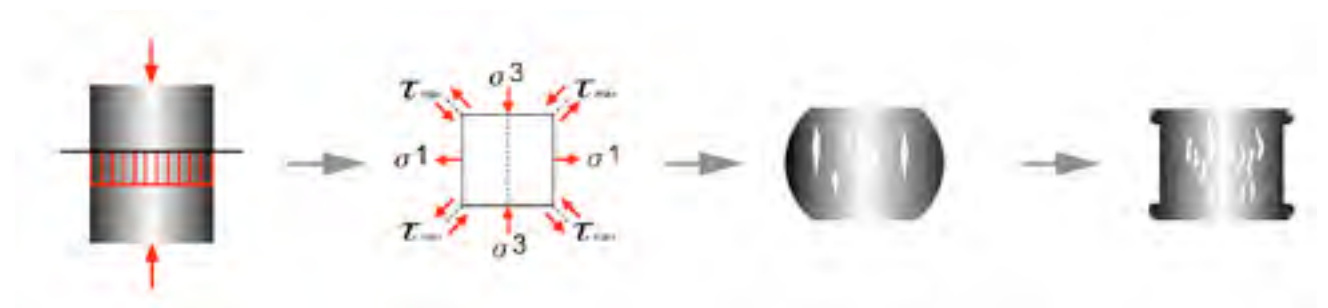


Figura 2 - Influência do modo de solitação sobre o aspecto macrográfico das fraturas - Esforço por compressão [ANNICK; POKORNY, 2009].

A influência do modo de sollicitação: 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), Figura 3 [ANNICK; POKORNY, 2009].

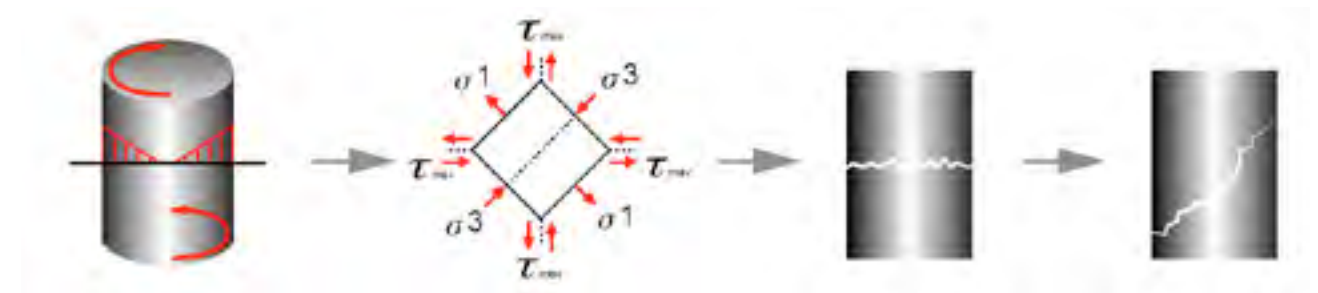


Figura 3: Influência do modo de sollicitação sobre o aspecto macrográfico das fraturas - Esforço por torção [ANNICK; POKORNY, 2009].

A influência do modo de solicitação: **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, Figura 4 [ANNICK; POKORNY, 2009].

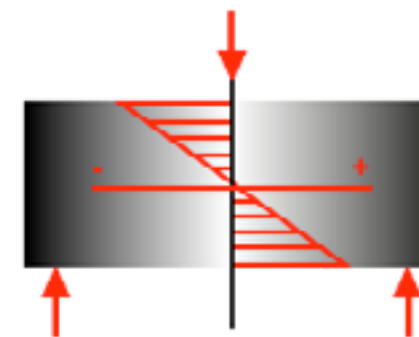
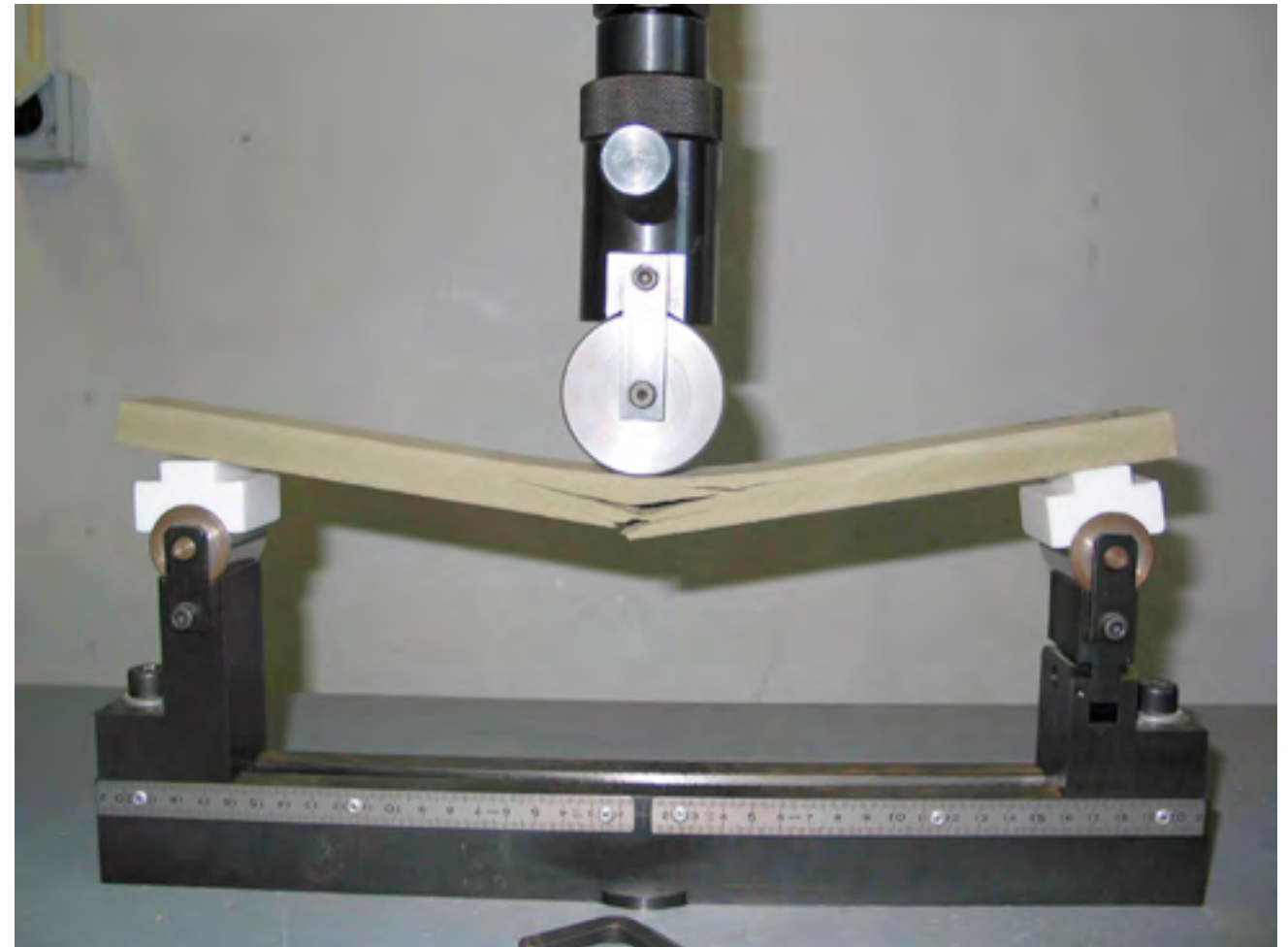


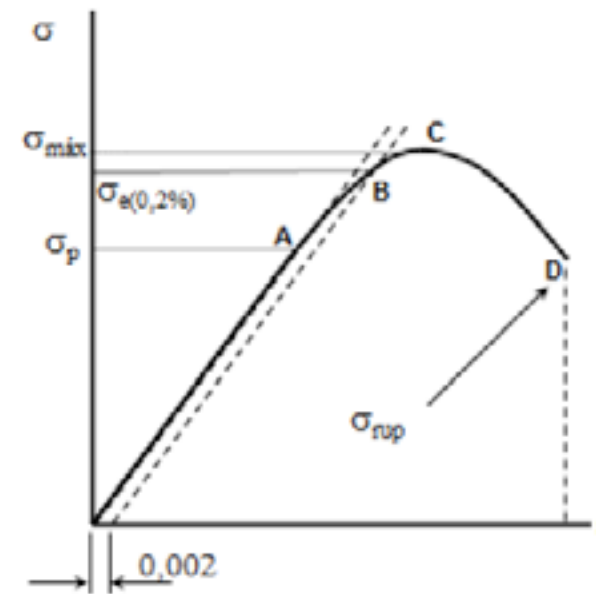
Figura 4: Influência do modo de solicitação sobre o aspecto macrográfico das fraturas - Esforço por flexão [ANNICK; POKORNY, 2009].

Ensaio de Tração

[Voltar ao sumário](#)

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 (σ_u), limite de escoamento (σ_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 [GARCIA, SPIM, 2000].

As tensões podem ser provenientes de carregamentos cíclicos mecânicos e/ou térmicos, e geralmente ocorrem abaixo da tensão de limite de escoamento do material, Figura 5.



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

Figura 5: Influência do modo de sollicitação sobre o aspecto macrográfico das fraturas - Esforço por flexão [ANNICK; POKORNY, 2009].

Tensões cíclicas

[Voltar ao sumário](#)

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].

Ciclo de tensões alternadas

Quando a tensão alterna entre uma tensão de tração máxima (+) e uma tensão de compressão máxima (-) de igual magnitude, Figura 6.

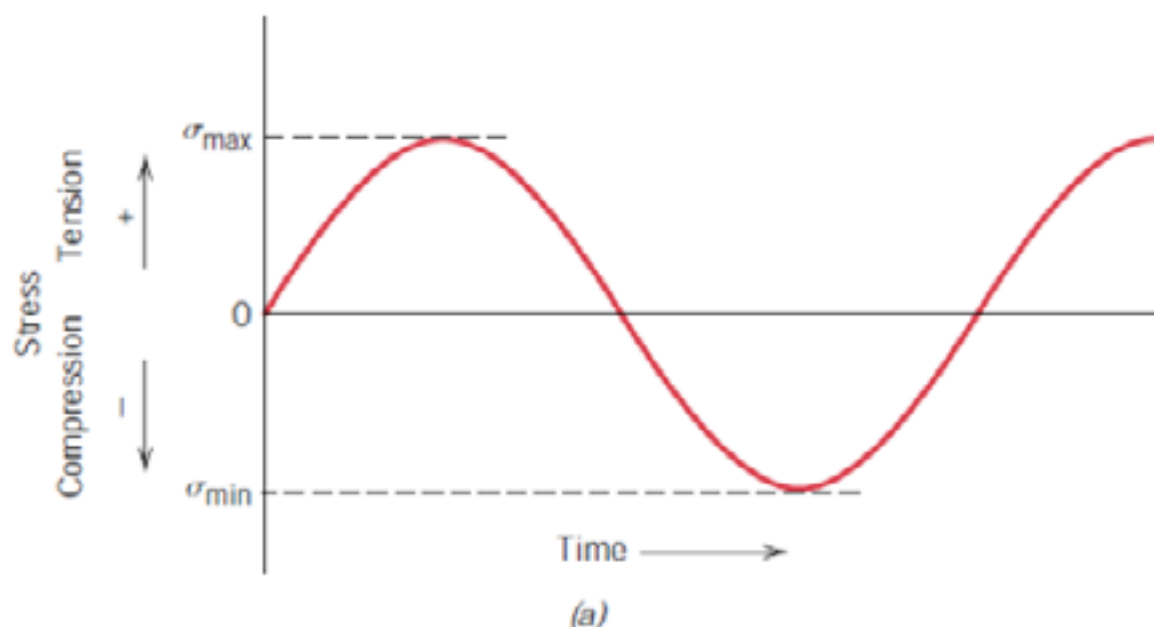


Figura 6: Desenho esquemático do Ciclo de tensões alternadas [CALLISTER, 2006].

Ciclo de tensões repetidas

Quando as tensões máximas e mínimas são assimétricas em relação ao nível zero de tensão, Figura 7.

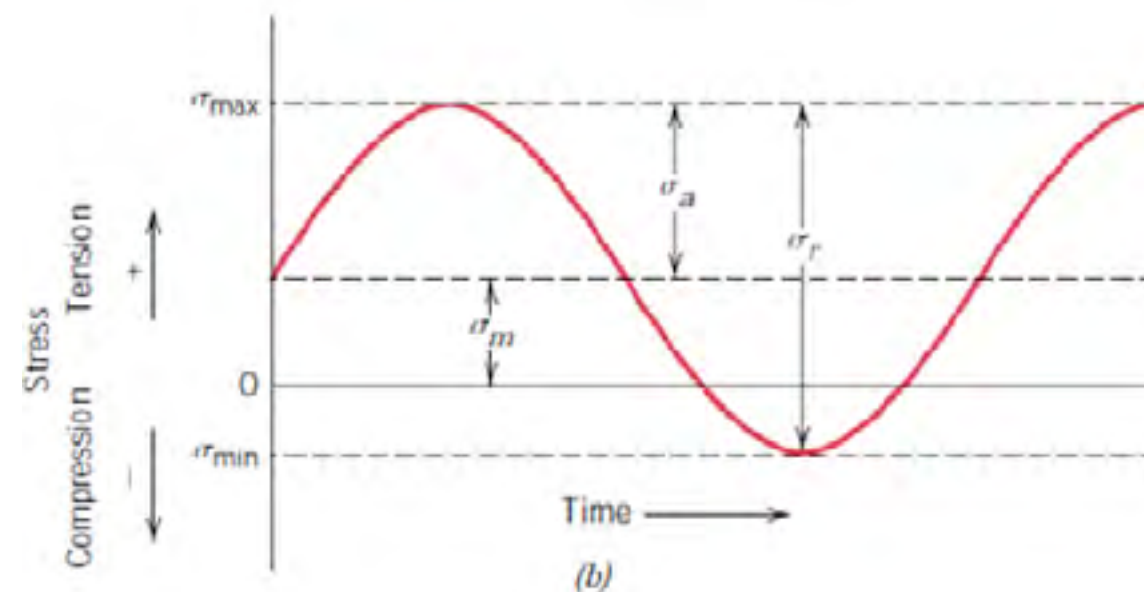


Figura 7: Desenho esquemático do Ciclo de tensões repetidas [CALLISTER, 2006].

Ciclo de tensões aleatórias

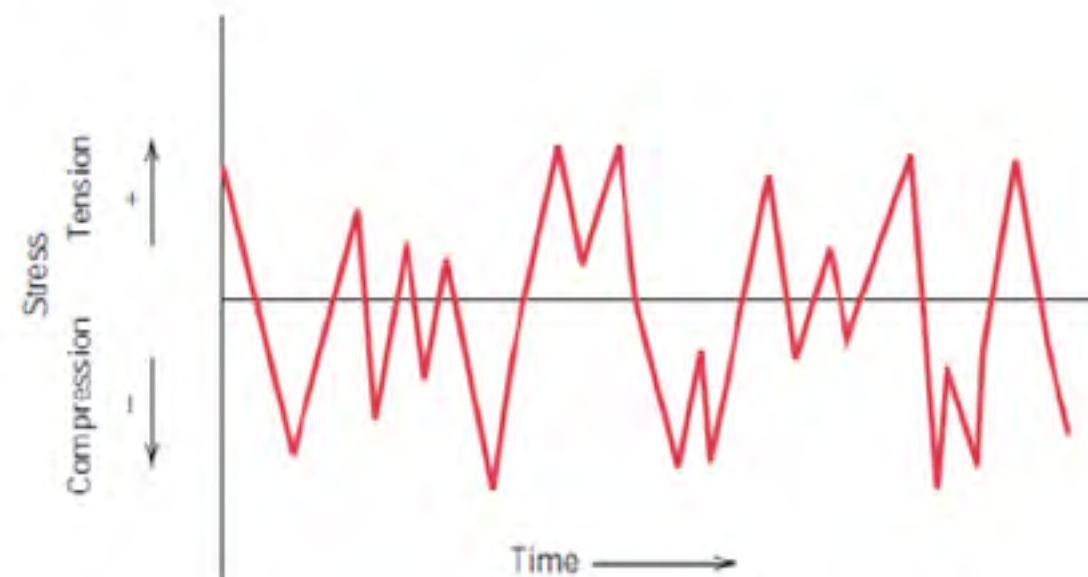


Figura 8: Desenho esquemático do Ciclo de tensões aleatórias [CALLISTER, 2006].

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, análises químicas, etc.) [ANNICK; POKORNY, 2009].

A etapa de análise fractográfica é essencial, pois as técnicas de microfractografia não poderiam ser aplicadas sistematicamente a qualquer estudo de fratura [ANNICK; POKORNY, 2009].

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

Fractografia

1. Fratura Dúctil

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 10, ou por decoesão interfacial ou por trincamento de partícula;
- Crescimento de vazios ao redor da partícula através de deformação plástica e tensão hidrostática, Figura 11;
- 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, [CALLISTER, 2006].



Figura 9: Comportamento de um corpo de prova de material dúctil quando submetido a ensaio de tração [CALLISTER, 2006].

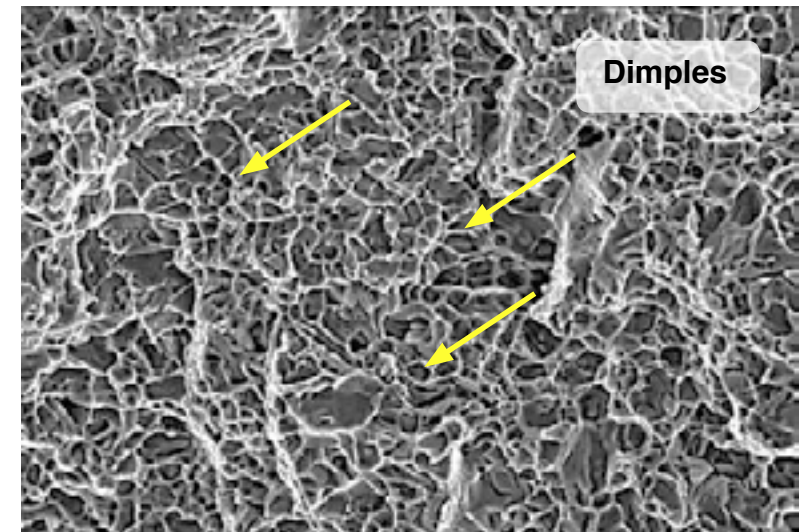


Figura 10: Microfractografia, por meio de MEV de um material em alumínio. As setas indicam a presença de dimples, que são características de fratura dúctil. (Ampliação: 700X). Fonte: Autora (2011).

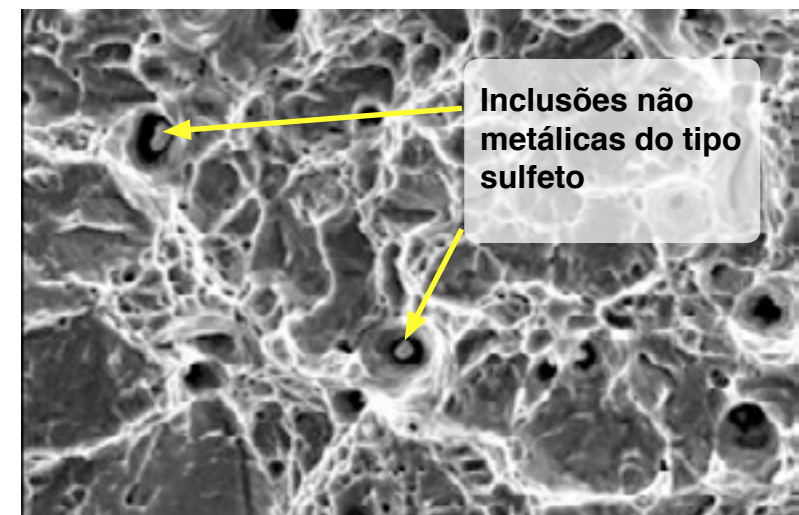


Figura 11: Microfractografia, por meio de MEV de um material em aço. Observa-se a presença de inclusões não metálicas do tipo sulfeto nas microcavidades da superfície de fratura. (Ampliação: 3000X). Fonte: Autora (2012).

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 [GODEFROID, CÂNDIDO, 2011].

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, Figura 12 [GODEFROID, CÂNDIDO, 2011].

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 [GODEFROID, CÂNDIDO, 2011].

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 [GODEFROID, CÂNDIDO, 2011].

O aspecto fractográfico é caracterizado pelos seguintes aspectos:

- Facetas de clivagem, que são formadas por numerosos platôs, normalmente mostrando um alto de perfeição geométrica e refletividade, Figura 13;



Figura 12: Macrofractografia de um aço SAE 1050 com fratura frágil [GODEFROID, CÂNDIDO, 2011].

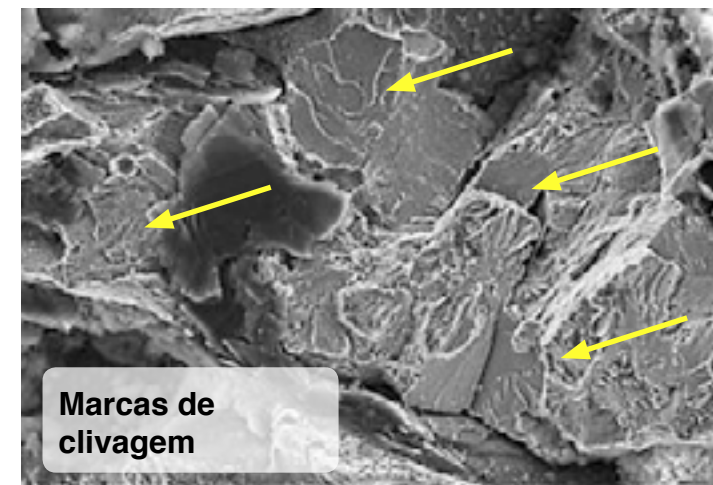


Figura 13: Macrofractografia de um aço SAE 1050 com fratura frágil [GODEFROID, CÂNDIDO, 2011].

Fractografia

- Marcas de rio (rivers patterns), que são resultantes do crescimentos de trincas simultaneamente em dois ou mais planos cristalográficos paralelos, juntando-se e formando-se degraus, Figura 14.

- 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 [GODEFROID, CÂNDIDO, 2011].

A clivagem ocorre quando a deformação plástica é restringida no material. Metais CFC (Al, Cu, Au, Ag, Pb, 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 CCC falham, pois existe um número limitado de sistemas de deslizamento. Metais policristalinos com estrutura HC, que apresentam apenas três sistemas de deslizamento por grão, são também propensos à fratura por clivagem [GODEFROID, CÂNDIDO, 2011].

A clivagem desenvolve-se por separação direta ao longo dos planos cristalográficos específicos, através de rupturas de ligações atômicas, Figura 15. As facetas de clivagem vistas através de grãos apresentam alta refletividade, que dá à superfície de fratura um aspecto brilhante [GODEFROID, CÂNDIDO, 2011].



Figura 14: Marcas de rio em superfícies de fratura frágil de um material em ferro puro com matriz ferrítica [GODEFROID, CÂNDIDO, 2011].

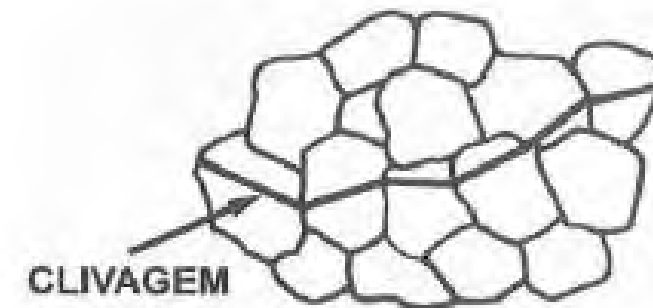


Figura 15 - Representação esquemática da propagação de clivagem transgranular. Fonte: adaptada de MEYERS; CHAWLA, (1999).

Fractografia

A Figura 16 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, 2011].

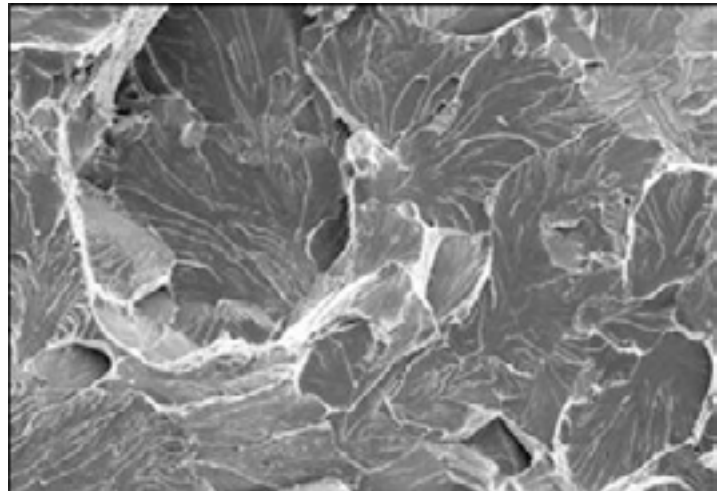


Figura 16: Microfractografia, via MEV e a identificação de facetas de clivagem. (Ampliação: 400X). Fonte: Autora (2013)

Em geral, o degrau de clivagem será paralelo a direção de propagação da trinca e perpendicular ao plano que contém 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, 2011].

2.1 Ensaio de impacto

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 17 [GARCIA, SPIM, 2000].

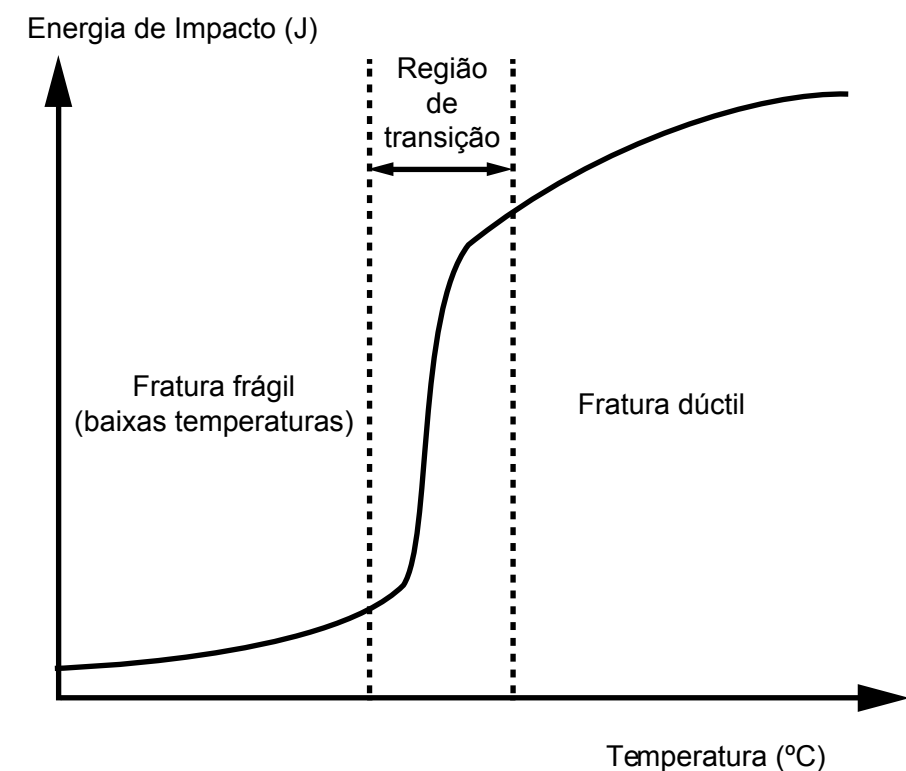


Figura 17: Representação do resultado fornecido pelo ensaio de impacto [GARCIA, SPIM, 2000].

Fractografia

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 na Figura 18 [GARCIA, SPIM, 2000].

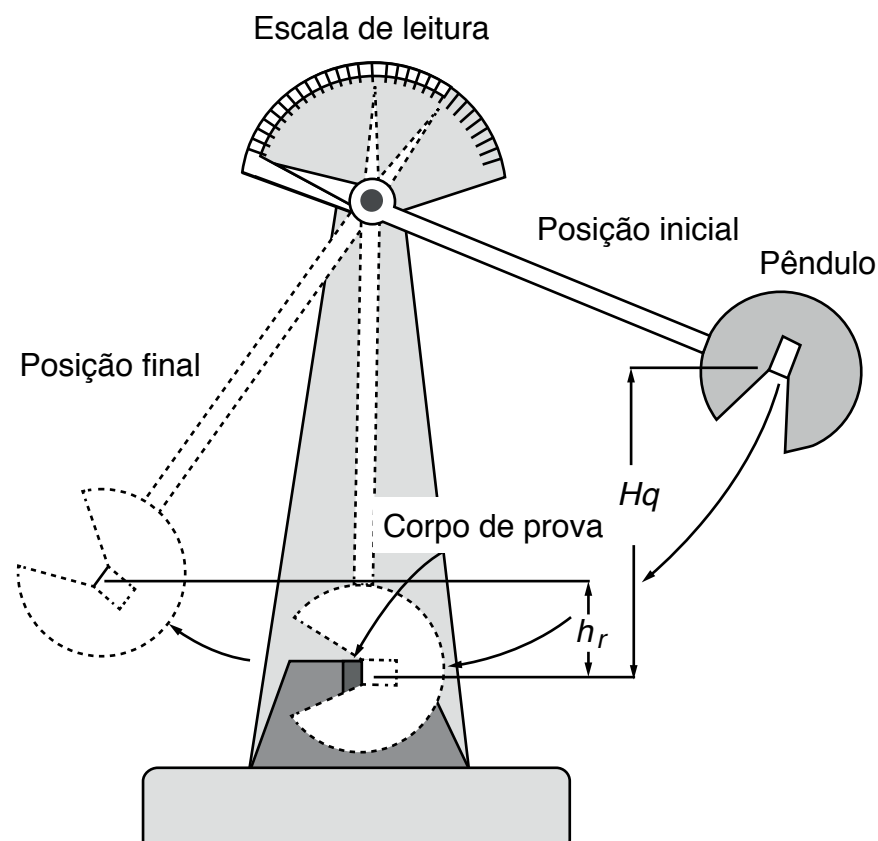
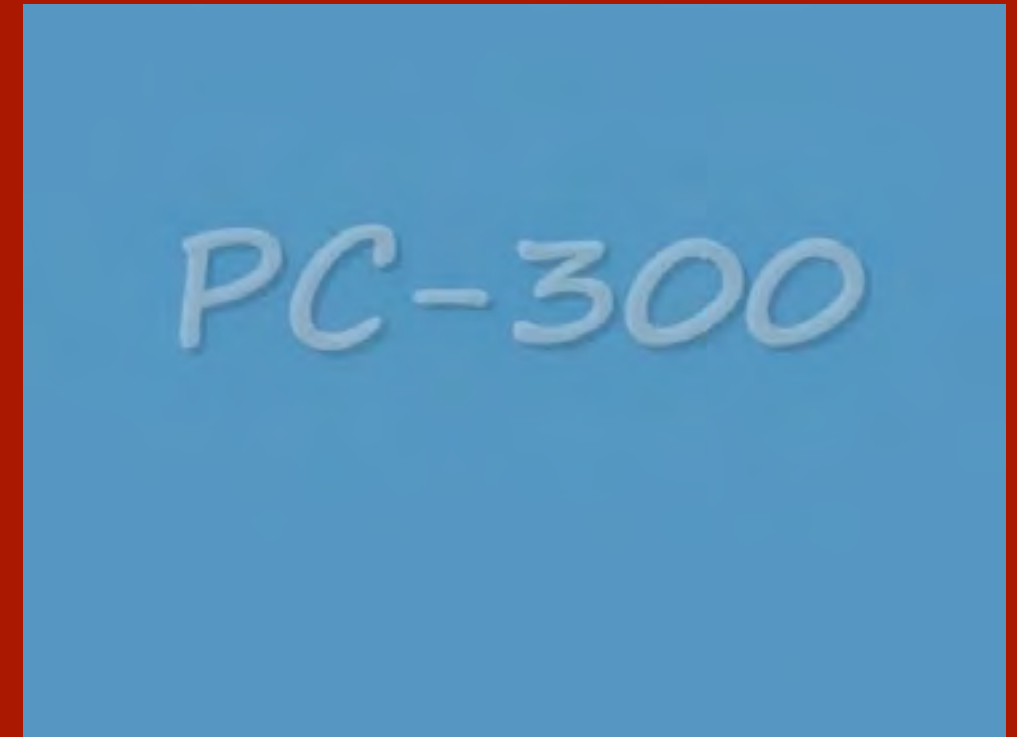


Figura 17: Representação do resultado fornecido pelo ensaio de impacto [GARCIA, SPIM, 2000].

Vídeo: Ensaio de Impacto. Fonte: Youtube



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, 2000]

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 [GARCIA, SPIM, 2000].

Fractografia

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. [GARCIA, SPIM, 2000].



Figura 18: Corpo de prova [X].

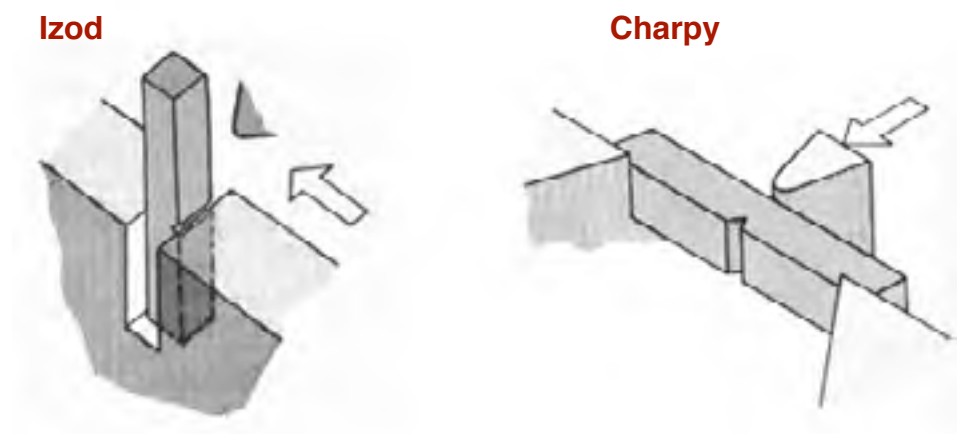


Figura 19: Corpo de prova [X].

Fractografia

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 [GODEFROID; CÂNDIDO, 2011]. A fractografia apresenta características intermediárias entre fratura dúctil e frágil, Figura 20 [GODEFROID; CÂNDIDO, 2011].

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 uma 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].

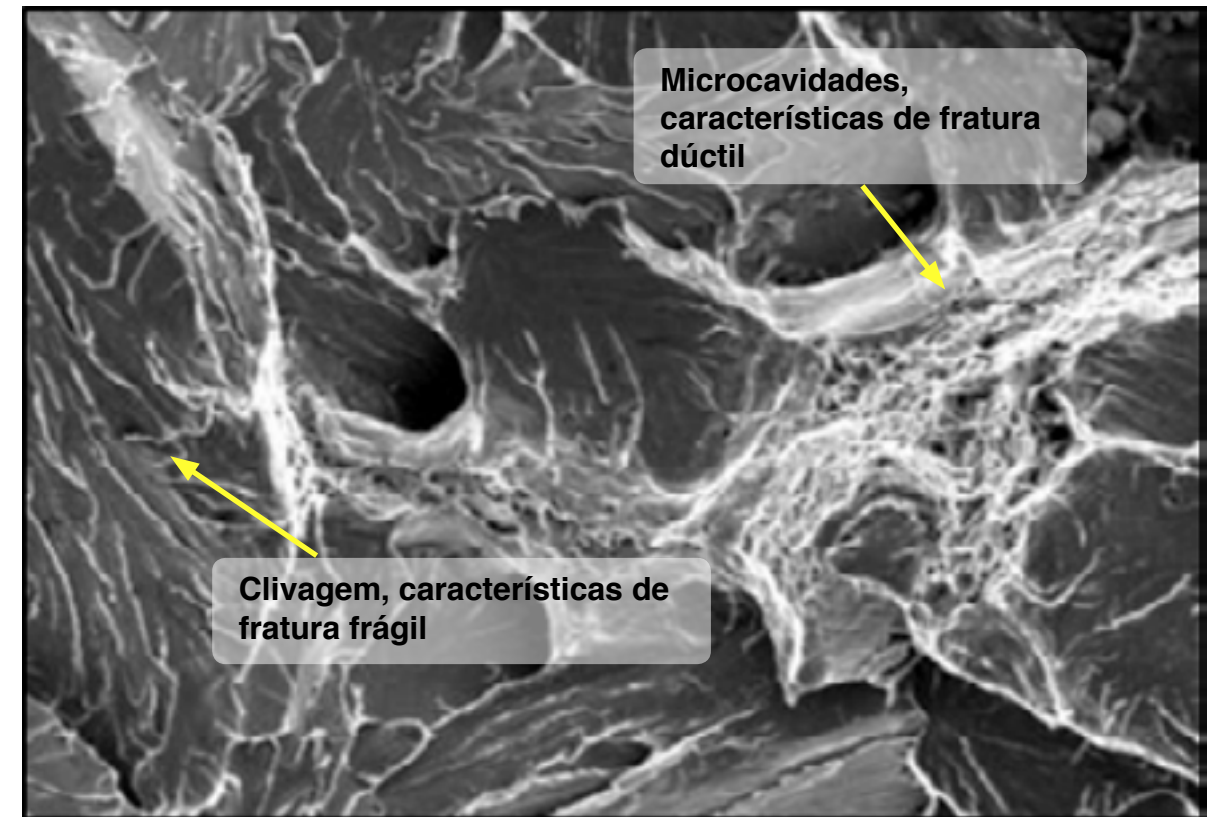


Figura 20: Fratura semi-frágil de um aço SAE 1025, apresentando características intermediárias entre as fraturas dúctil (dimples) e frágil (facetas de clivagem). Fonte: Autora (2011).

Fractografia

4. Fratura Intergranular

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 [GODEFROID; CÂNDIDO, 2011].

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 [GODEFROID; CÂNDIDO, 2011].

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 21 [GODEFROID; CÂNDIDO, 2011].

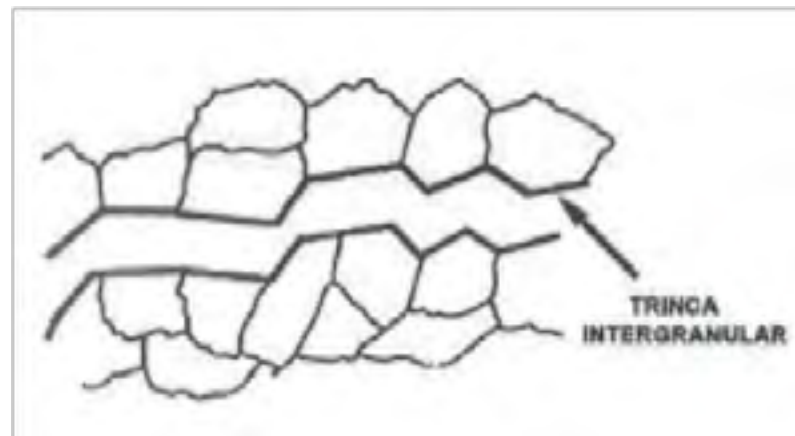


Figura 20: Representação esquemática de uma fratura intergranular [GODEFROID; CÂNDIDO, 2011].

Em escala microscópica, a trinca pode desviar de uma partícula e produzir uma microcavidade localmente, Figura 21 [GODEFROID; CÂNDIDO, 2011].

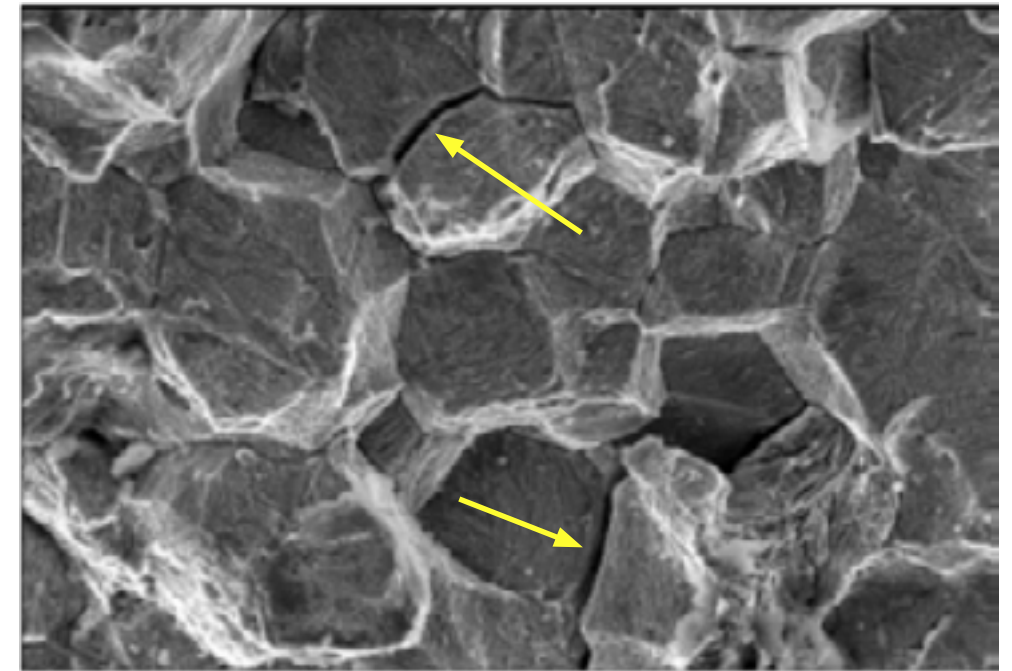


Figura 21: As setas indicam a propagação de trincas nos contornos de grãos - Fratura intergranular de uma aço SAE 1050. (Ampliação: 1500X). Fonte: Autora (2011).

Fraturas intergranulares tendem a ocorrer quando os contornos de grãos são mais frágeis do que a rede cristalina [GODEFROID; CÂNDIDO, 2011].

Fractografia

4. 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 [GODEFROID; CÂNDIDO, 2011].

A fratura por fadiga pode ser dividida em três estágios, conforme ilustrado na Figura 22.

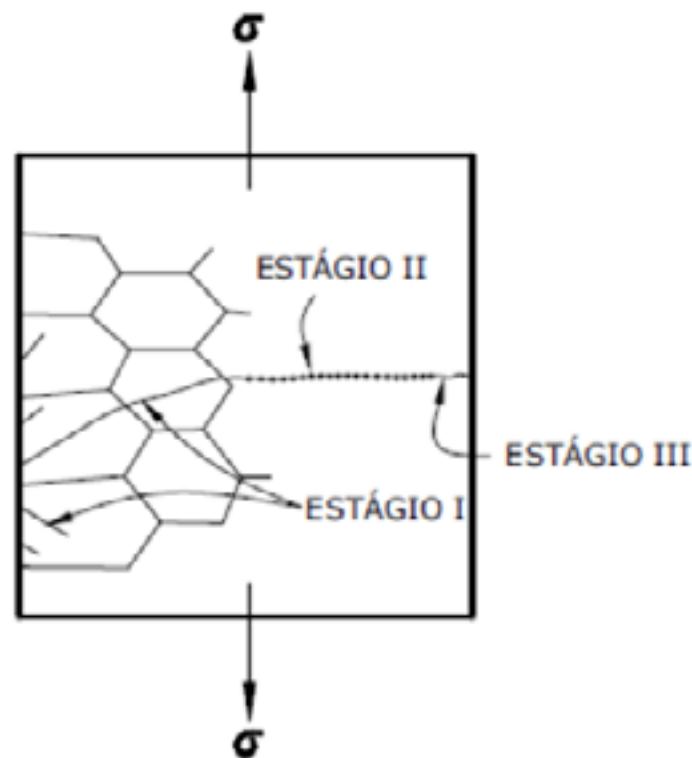


Figura 22: Estágios de propagação de trinca por fadiga [CALLISTER, 2006].

- Estágio I: corresponde à nucleação de trincas em descontinuidades 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 característica é a presença de estrias de fadiga [DIETER, 1981];

- Estágio III: corresponde à fratura brusca final, quando a trinca atinge o tamanho crítico para propagação instável [DIETER, 1981].

Segundo 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 23).

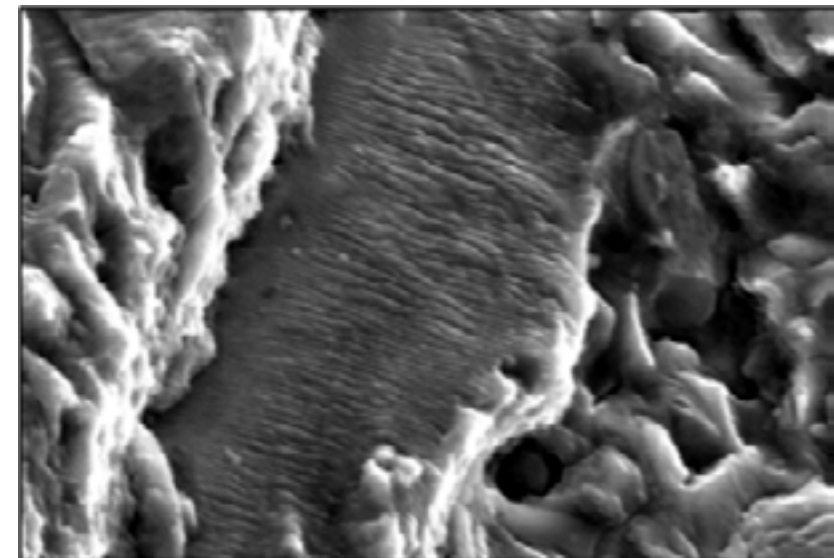


Figura 23: Estrias de fadiga de um material em liga de alumínio (AlSi7Mg0,3) (Ampliação: 4000X). Fonte: Autora (2010).

Fractografia

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 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].

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].

4.1 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, conforme seqüência mostrada na Figura 24. No início do carregamento cíclico a ponta da trinca é aguda (Figura 24a). 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° com a superfície da trinca (Figura 24b). Conforme a trinca se alarga para a sua extensão máxima (Figura 24c), 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 33d), as faces da trinca são compactadas e a nova superfície da trinca, criada na tração, é forçada para o plano da trinca (Figura 24e) em que é parcialmente dobrada por flambagem formando uma ponta de trinca novamente aguda (Figura 24f). Assim, a trinca já está pronta para avançar e seguir para o próximo ciclo [MEYERS; CHAWLA, 1999].

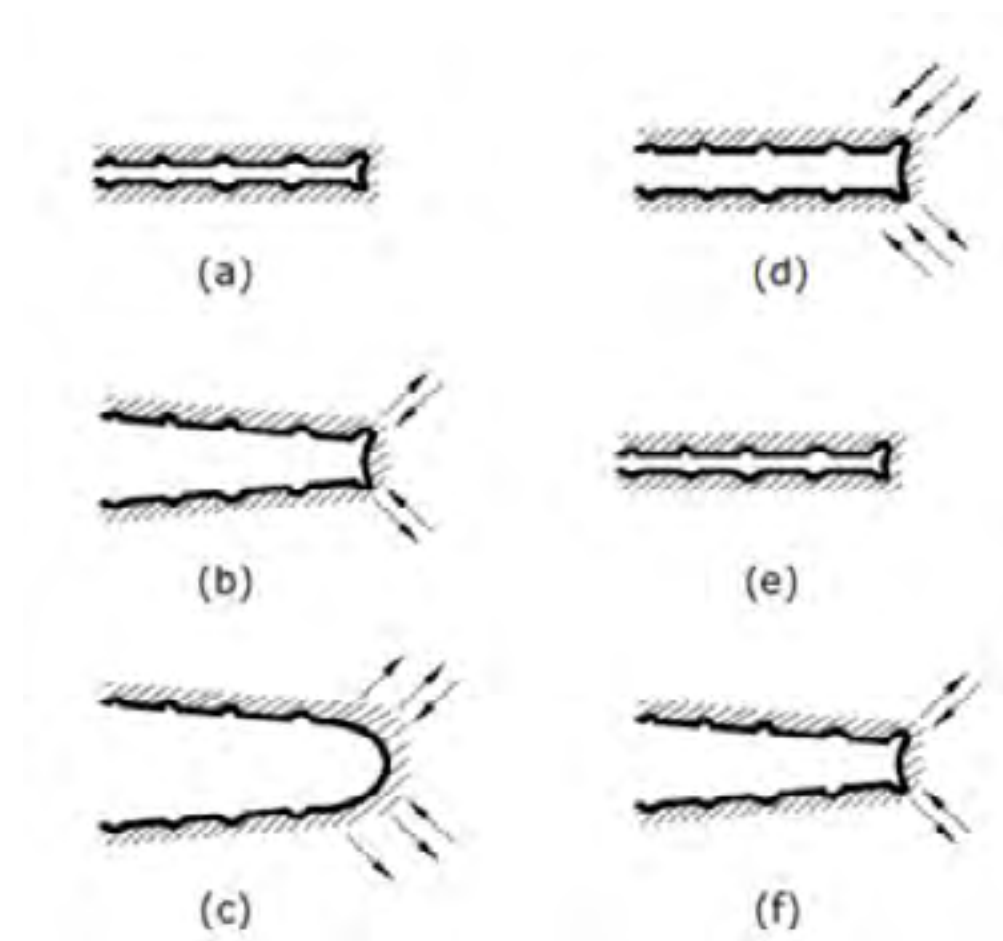


Figura 24: Processo de crescimento da trinca por fadiga [MEYERS; CHAWLA, 1999].

Fractografia

4.2 Fadiga Mecânica

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 [GODEFROID; CÂNDIDO, 2011].

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; de MELLO; da SILVA, 2012].

- Fadiga de baixo ciclo: controla a deformação. A ruptura ocorre abaixo de 10⁴ 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 10⁴ 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 25a 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 25b), regiões de interseção entre fratura dúctil e fratura frágil, devido a presença de microcavidades (dimples) e facetas de clivagem (Figura 25c), e regiões com fratura totalmente frágil, devido as facetas de clivagem (Figura 25d).

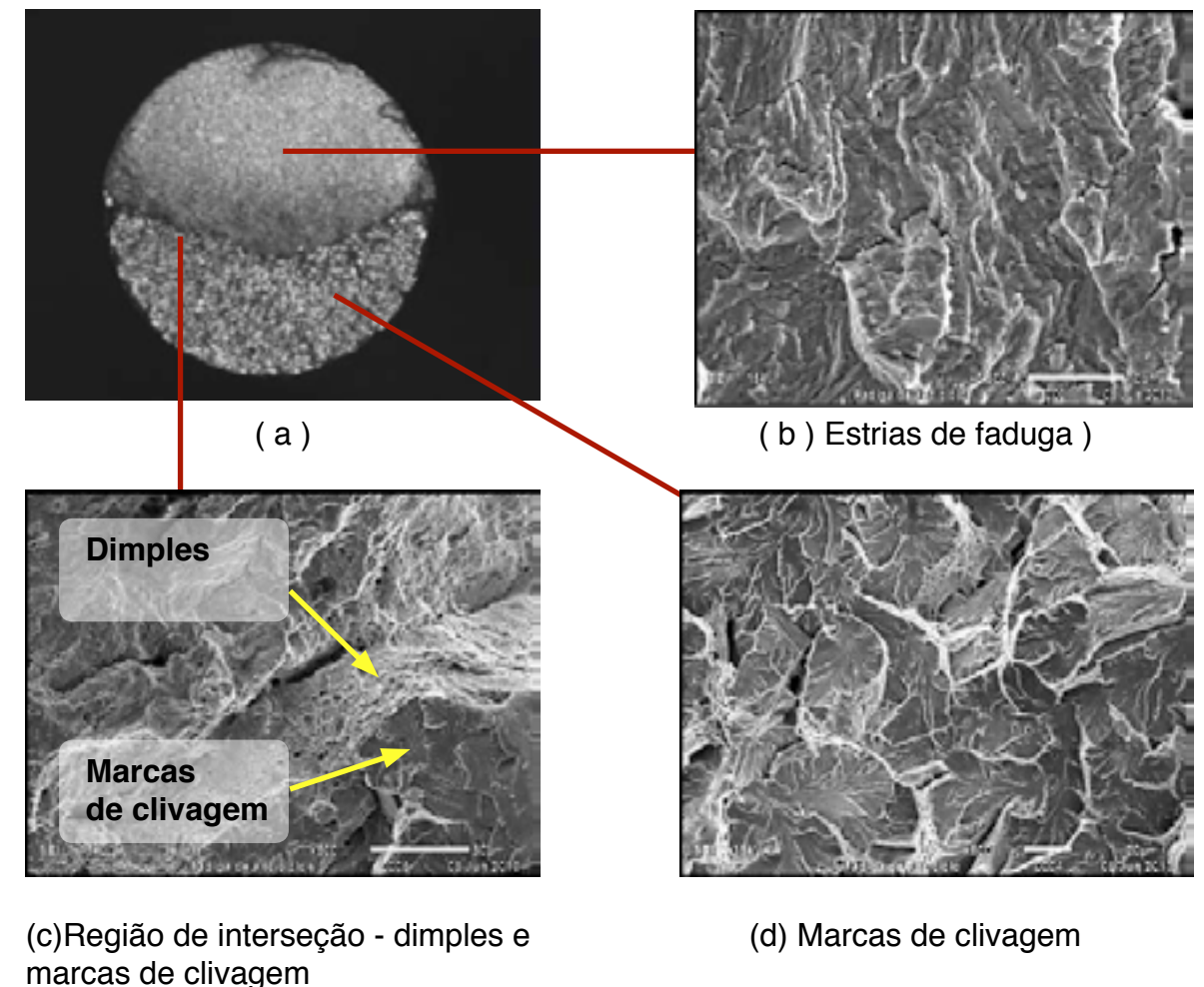


Figura 25: Superfícies fraturadas de um corpo de prova submetido à fadiga de alto ciclo. Fonte: Autora (2013).

Fractografia

4.2.1 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 26) [PELLICCIONE; MORAES; GALVÃO; de MELLO; da SILVA, 2012].

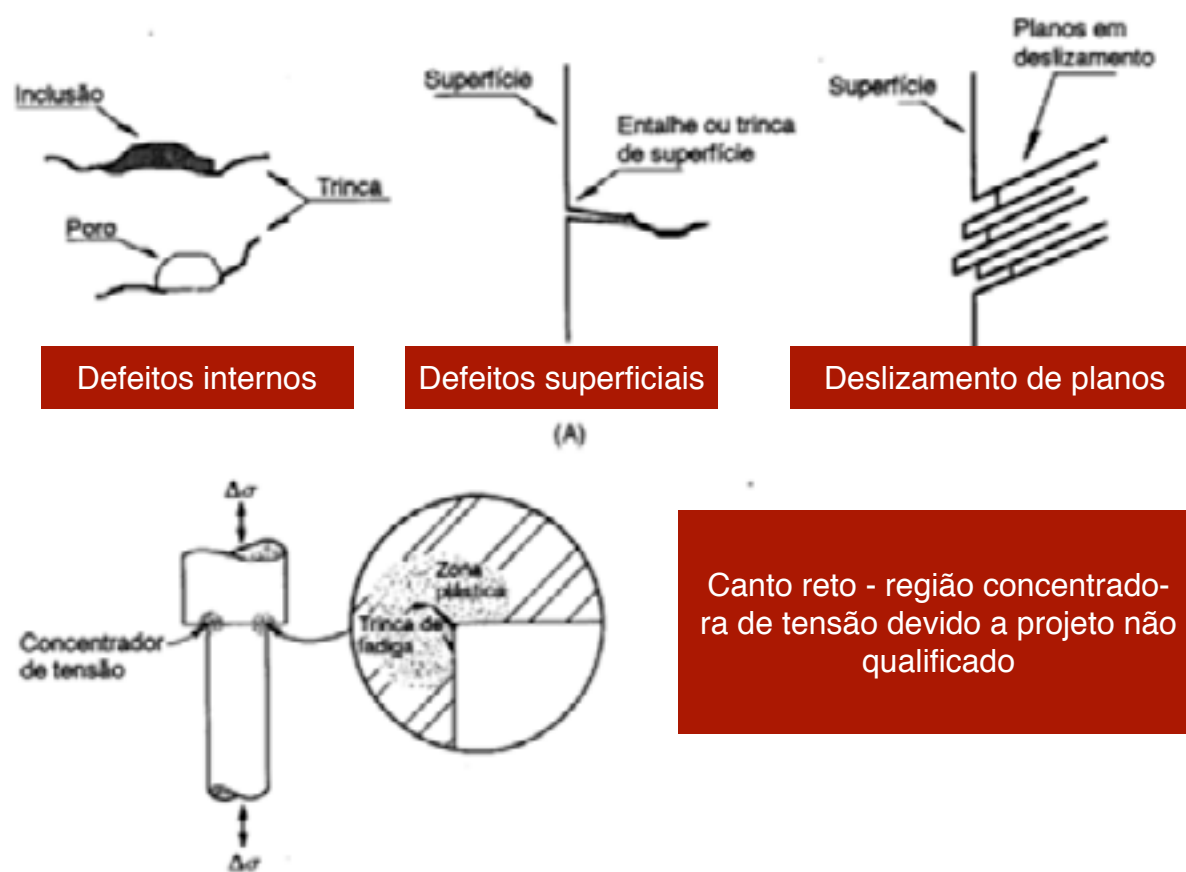


Figura 26: Imagens dos fatores que podem provocar a fratura por fadiga [PELLICCIONE; MORAES; GALVÃO; de MELLO; da SILVA, 2012].

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 [PELLICCIONE; MORAES; GALVÃO; de MELLO; da SILVA, 2012].

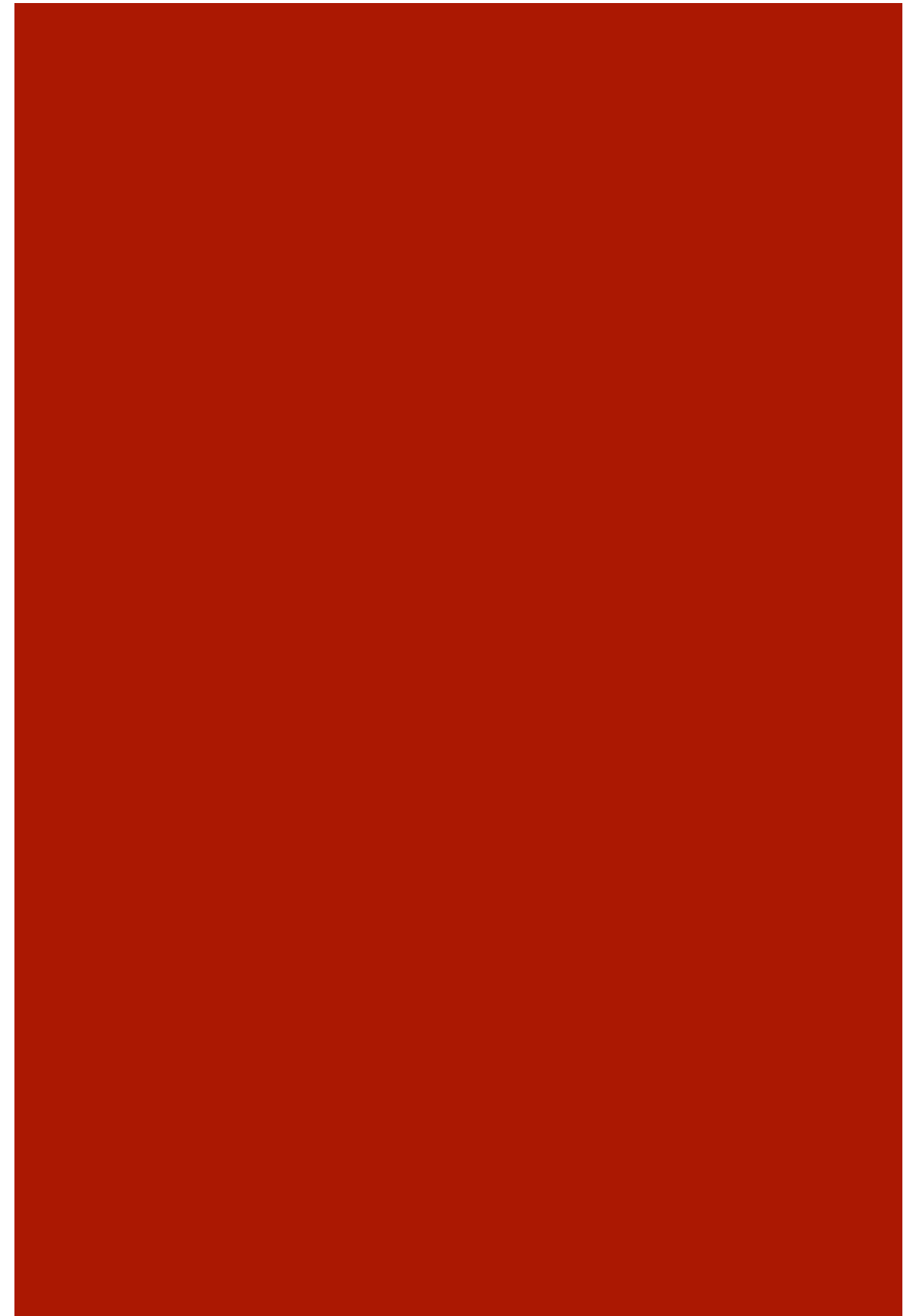
Materiais como aços austeníticos e alumínio terão uma vida em fadiga definida como sendo o número de ciclos para falha em uma determinada amplitude de tensão [PELLICCIONE; MORAES; GALVÃO; de MELLO; da SILVA, 2012].

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 106 a 107 ciclos. Equipamentos podem ser afetados devido a ciclos térmicos e carregamento mecânico [PELLICCIONE; MORAES; GALVÃO; de MELLO; da 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; de MELLO; da SILVA, 2012].

Fractografia

- 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; de MELLO; da SILVA, 2012].



Fractografia

4.2.2 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 [PELLICCIONE; MORAES; GALVÃO; de MELLO; da SILVA, 2012].

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, conforme mostra a Figura 27 [PELLICCIONE; MORAES; GALVÃO; de MELLO; da SILVA, 2012].

Fraturas por fadiga frequentemente apresentam múltiplos pontos de nucleação, particularmente sob altas tensões, resultando em aspecto característico, chamado marcas de catraca, (Figura 28). 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; de MELLO; da SILVA, 2012]. MELLO; da SILVA, 2012].

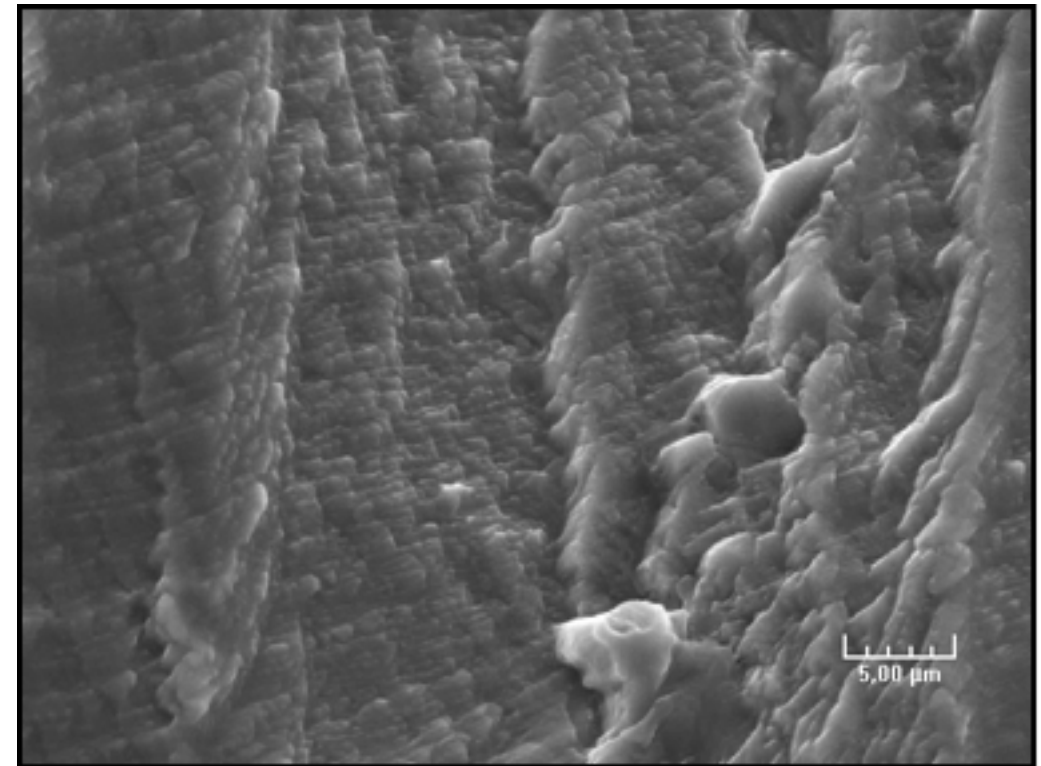


Figura 27: Fratura em fadiga mecânica de um alumínio. Presença de estrias que indicam o sentido de propagação da trinca. Fonte: Autora 2010.



Figura 28: Fratura de um eixo com aspecto característico de marcas de catraca [GODEFROID; CÂNDIDO, 2011].

Fractografia

4.2.3 Prevenção

Para evitar que ocorra a fadiga mecânica, alguns procedimentos devem ser seguidos: [PELLICCIONE; MORAES; GALVÃO; de MELLO; da SILVA, 2012].

- 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.

4.2.4 Inspeção e Monitoramento

Algumas técnicas são muito importantes na avaliação de componentes, a fim de evitar que ocorra a falha por fadiga [PELLICCIONE; MORAES; GALVÃO; de MELLO; da SILVA, 2012].

- As técnicas de END's (Ensaio Não Destrutivo), 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.

Fractografia

4.3 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 [PELLICCIONE; MORAES; GALVÃO; de MELLO; da SILVA, 2012].

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; de MELLO; da SILVA, 2012].

4.3.1 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 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 [PELLICCIONE; MORAES; GALVÃO; de MELLO; da SILVA, 2012].

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; de MELLO; da 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 reaquecedor 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; de MELLO; da SILVA, 2012].

4.3.2 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 [PELLICCIONE; MORAES; GALVÃO; de MELLO; da SILVA, 2012].

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 [PELLICCIONE; MORAES; GALVÃO; de MELLO; da SILVA, 2012].

Fractografia

A água dos sopradores de fuligem podem promover trincamento do tipo “crazypattern”, ou seja, as trincas são predominantemente circunferenciais e as menores serão axiais [PELLICCIONE; MORAES; GALVÃO; de MELLO; da SILVA, 2012].

A fadiga térmica também se caracteriza por apresentar estrias de fadiga em sal superfície, (Figura 29).

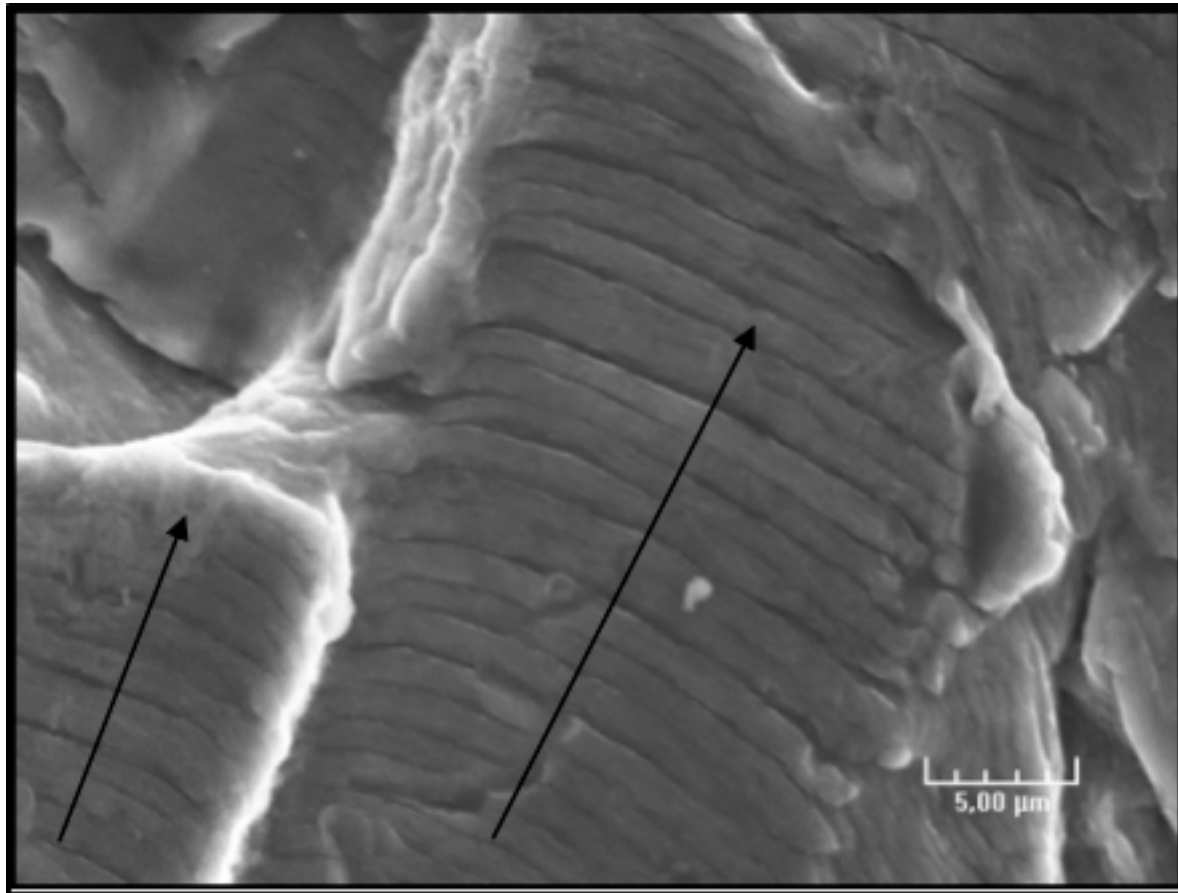


Figura 29: Fratura em fadiga térmica de um alumínio. Presença de estrias que indicam o sentido de propagação da trinca (->). Fonte: Autora (2010).

4.3.3 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; de MELLO; da 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; de MELLO; da SILVA, 2012].

4.3.4 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 [PELLICCIONE; MORAES; GALVÃO; de MELLO; da SILVA, 2012].

Inspeção externa por ultrassom com ondas transversais pode ser usada para inspeção não intrusiva de trincas internas [PELLICCIONE; MORAES; GALVÃO; de MELLO; da SILVA, 2012].

Fractografia

4.4 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 [GARCIA; SPIM, 2002].

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 [GARCIA; SPIM, 2002].

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, veja esquema na Figura 30. Este procedimento é repetido com outros corpos de prova, aplicando amplitudes máximas de tensão progressivamente menores [GARCIA; SPIM, 2002].

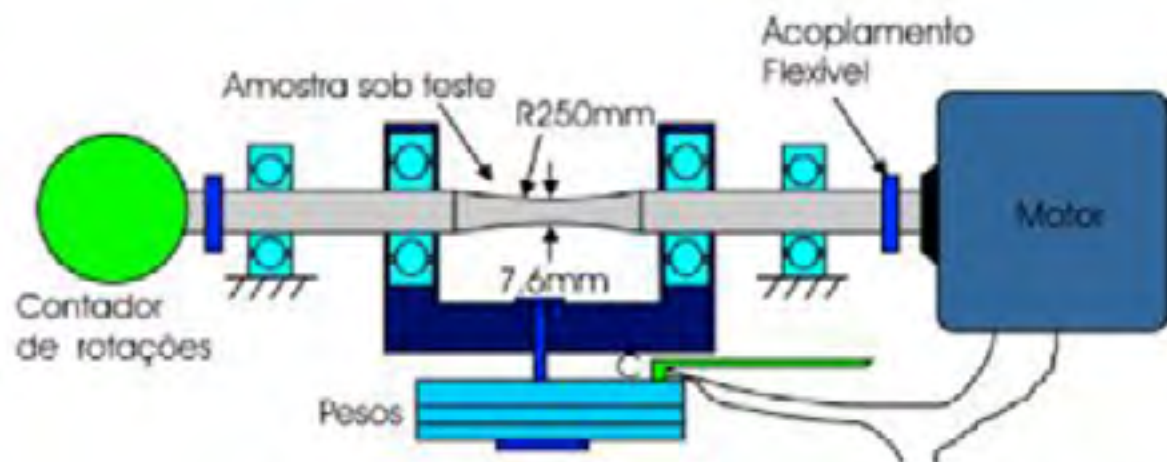


Figura 30: Esquema do equipamento para testes de fadiga, para ensaios giratórios com dobramento.

4.5 Cuidados na fabricação de um corpo de prova

Para que o ensaio possa gerar resultados confiáveis, antes de se iniciar o ensaio de fadiga, deve seguir alguns cuidados na confecção dos corpos de prova:

- garantir que a ruptura ocorra na seção de teste (área reduzida);
- minimizar os pontos de concentração de tensão;
- área de teste deve ter um comprimento mínimo de $3 \times \varnothing D$.

Etapas de uma análise de falha

[Voltar ao sumário](#)

Para realizar uma análise de falhas, devem-se seguir algumas etapas para que se tenha a maior quantidade possível de informações sobre o material falhado.

No fluxograma ao lado, são detalhados os passos para realização de análises macrográfica e micrográfica, através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), da superfície fraturada. Se os resultados obtidos após as análises macrográfica e através do MEV forem conclusivos, a análise é encerrada e o relatório emitido.



Fluxograma para avaliação de uma análise de falha, através de Macroscopia e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Etapas de uma análise de falha

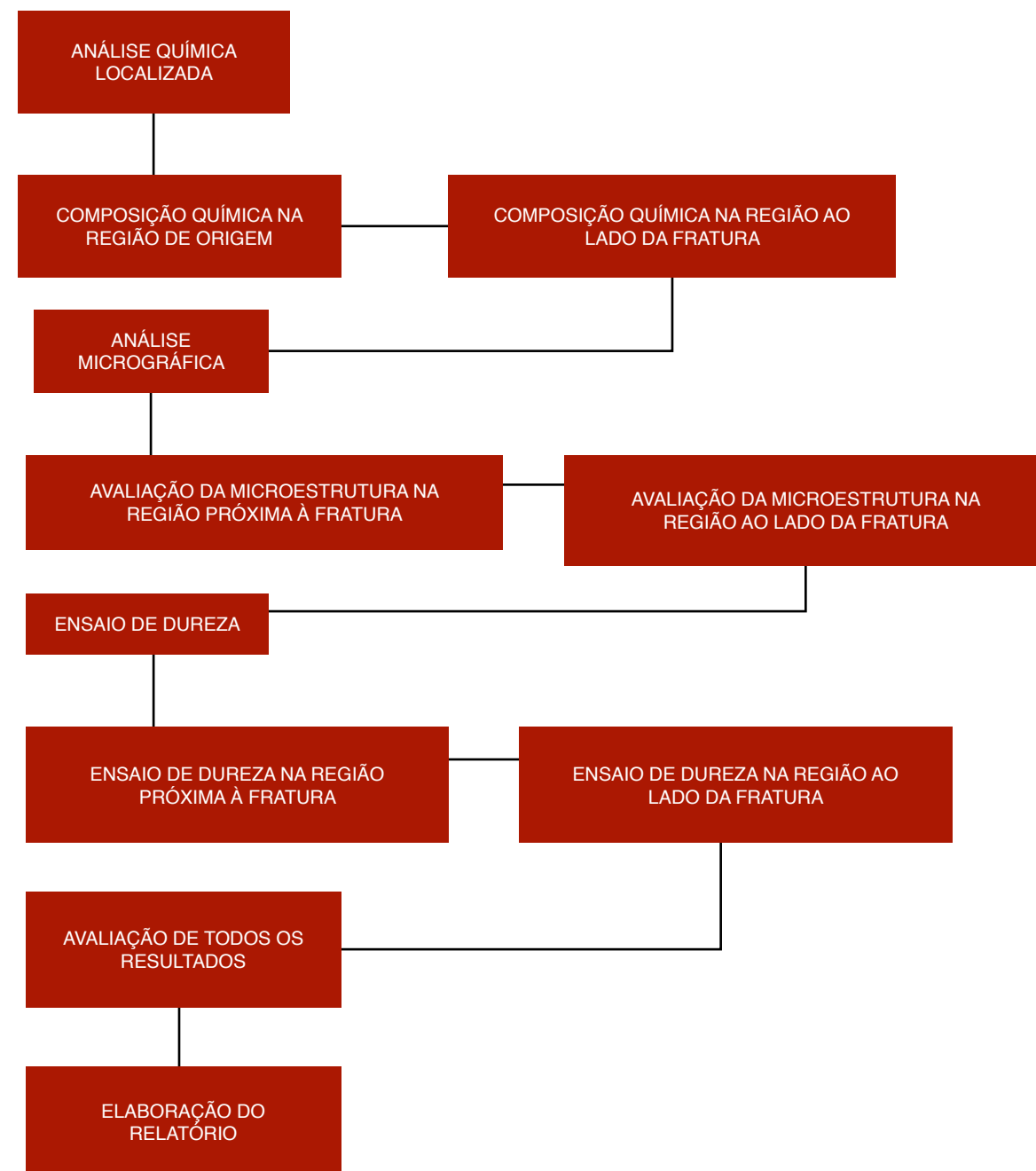
[Voltar ao sumário](#)

Caso não se consiga chegar a alguma conclusão após as etapas do fluxograma anterior, 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 resultados 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.

Seguem as descrições das etapas.



Fluxograma para avaliação da conformidade do material de uma peça falhada.

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 serão baseadas nos fluxogramas descritos anteriormente. 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.

Parafuso de fixação do berço do motor

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.

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).

Dados da peça

- Parafuso de fixação do Berço do Motor;
- Equipamento utilizado na Montagem: Parafusadeira – Modelo: ECA115 – Georges Renault

Análise

Seguindo as etapas descritas nos fluxogramas, 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.

As Figuras 31 e 32 mostram o berço do motor em que o parafuso é fixado e a região que o parafuso estava sendo fixado quando fraturou.

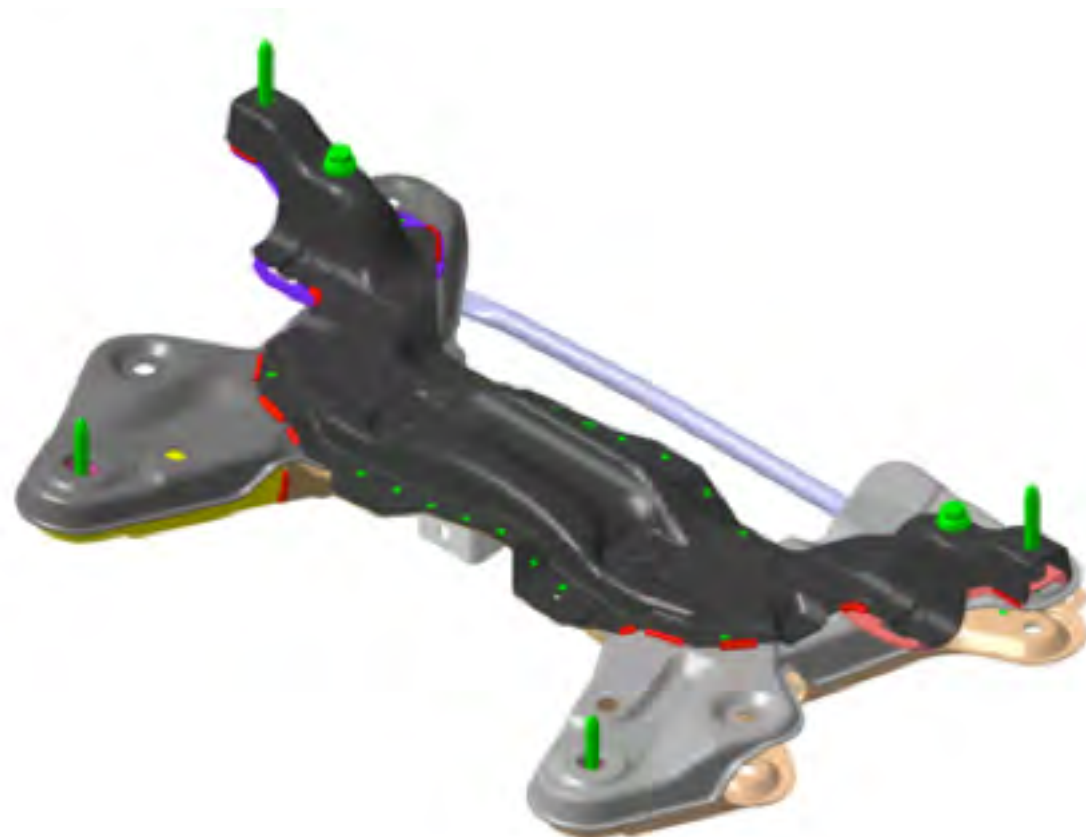


Figura 31: Imagem do berço do motor em que o parafuso é fixado. Fonte: Autora (2013).

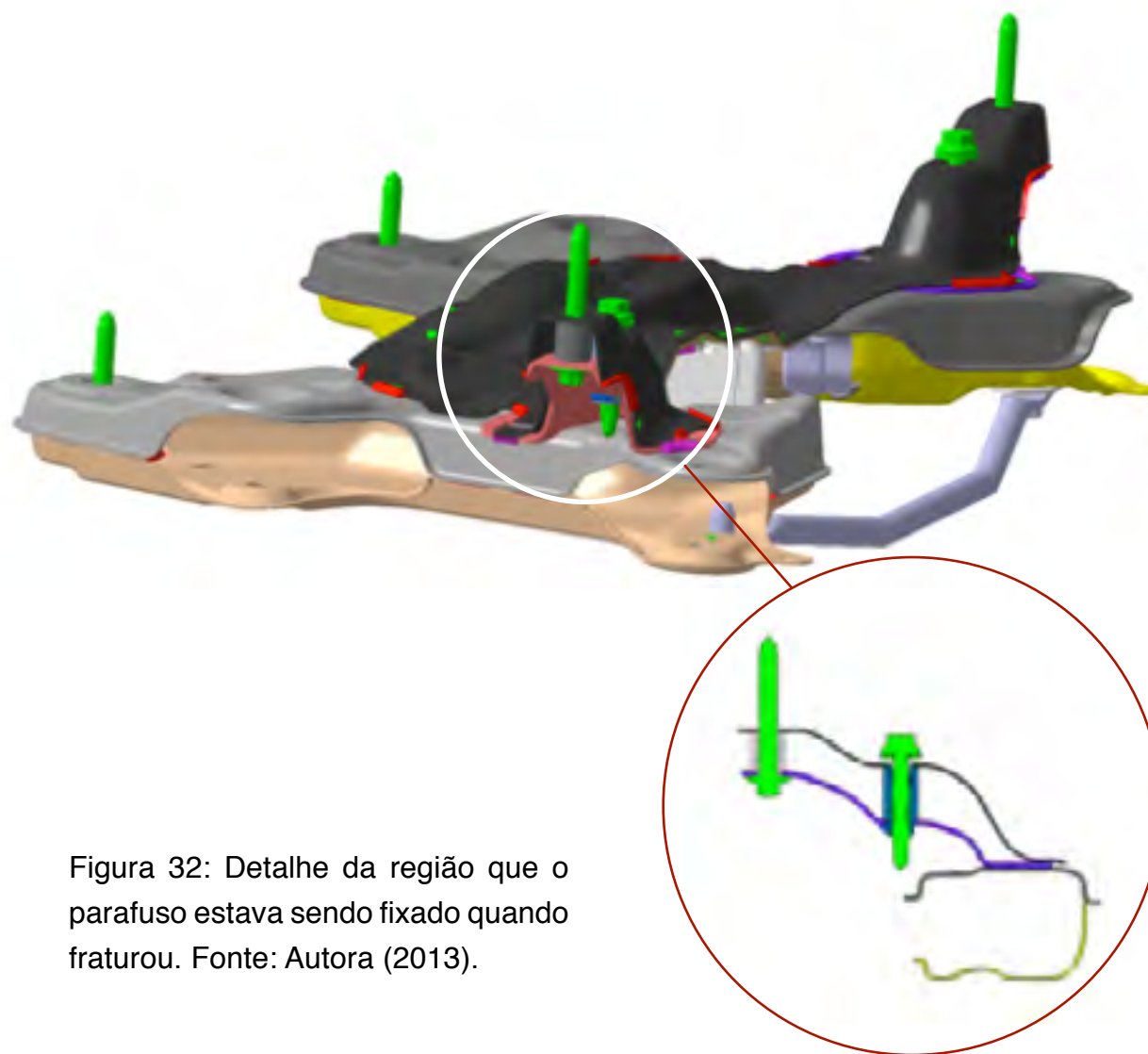


Figura 32: Detalhe da região que o parafuso estava sendo fixado quando fraturou. Fonte: Autora (2013).

Estudo de caso - Parafuso de fixação do berço do motor

- 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 33.

- 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 34 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 34.

- 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.

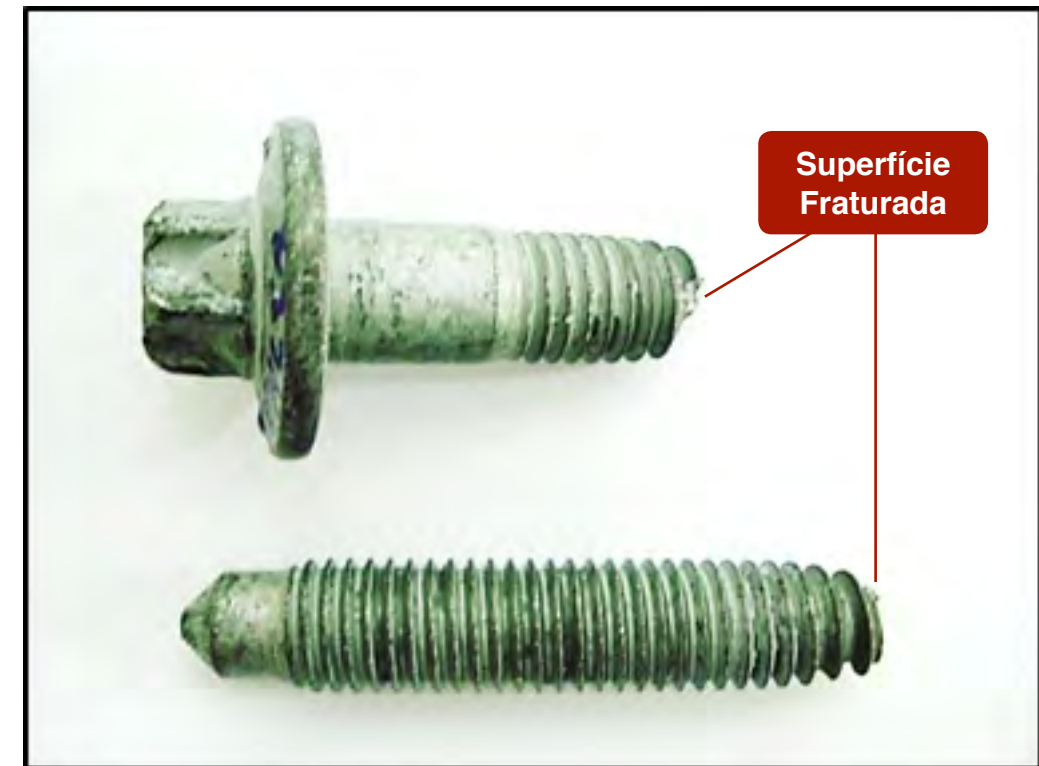


Figura 33: Imagem do berço do motor em que o parafuso é fixado. Fonte: Autora (2013).

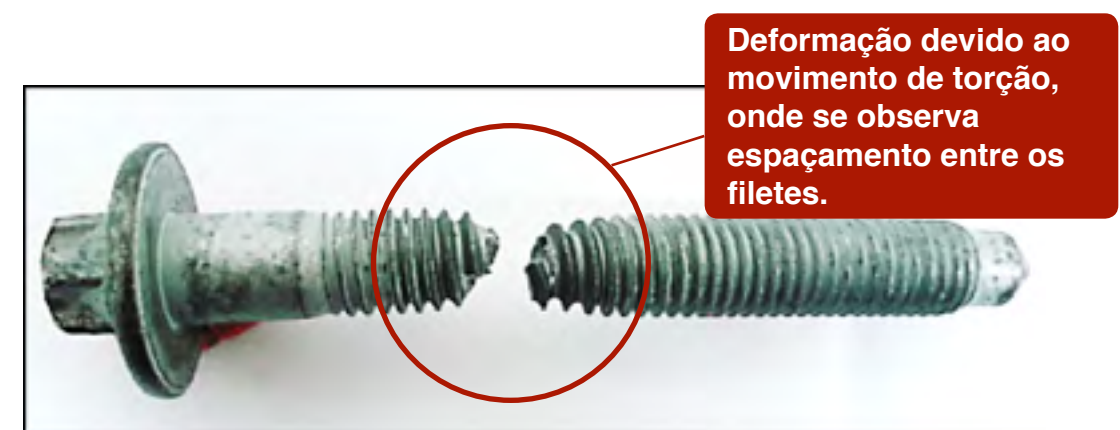
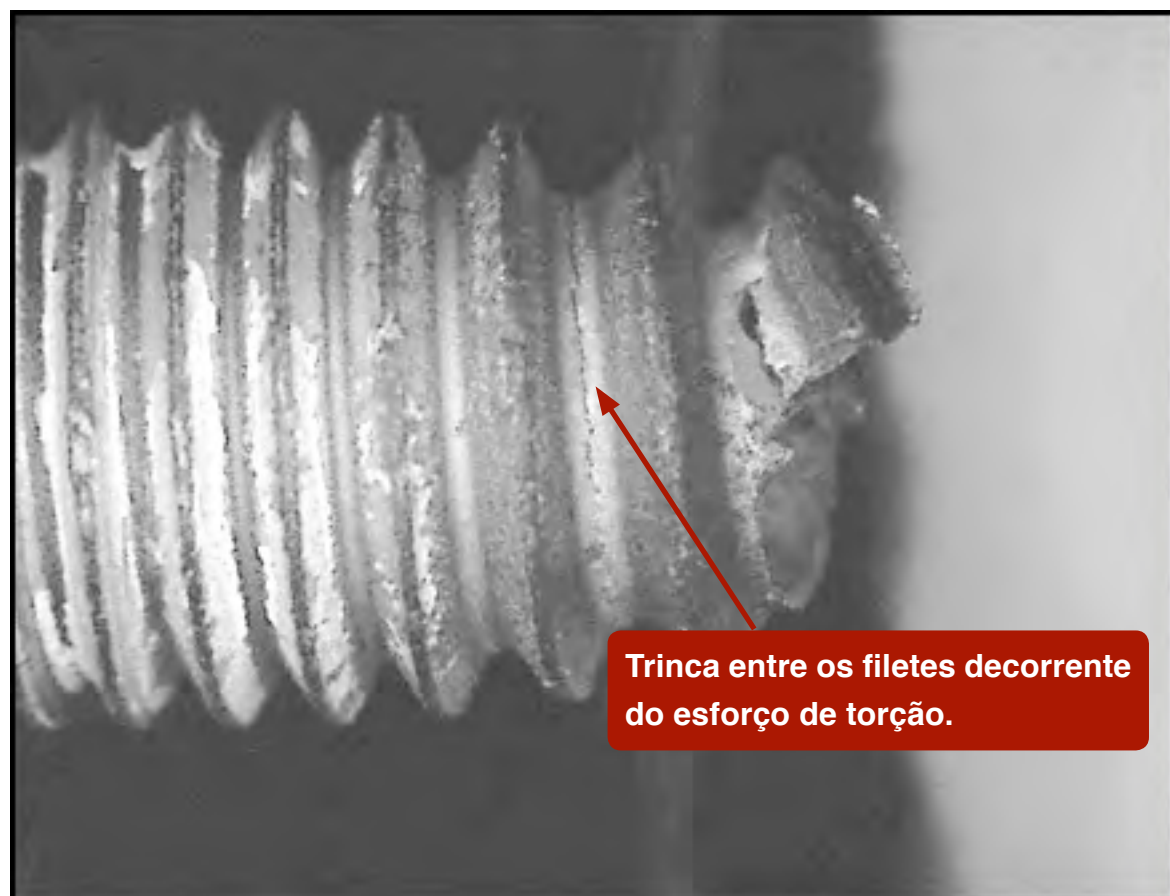


Figura 34: Parafuso fraturado apresentando deformação do tipo torção.

Estudo de caso - Parafuso de fixação do berço do motor

- 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 35.

- registro fotográfico das superfícies fraturadas por meio do estereomicroscópio: registro através do analisador de imagens da superfície fraturada, Figura 36



Trinca entre os filetes decorrente do esforço de torção.

Figura 35: 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).



Figura 36: (a) e (b) - Fotomacrografias das superfícies de fratura. Fonte: Autora (2010).

Estudo de caso - Parafuso de fixação do berço do motor

Após observação da superfície fraturada no estereomicroscópio, realizou-se a avaliação através do 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 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 37.



Figura 37: (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).

Estudo de caso - Parafuso de fixação do berço do motor

Avaliando todas as informações descritas anteriormente, pode-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 as 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 38. 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.

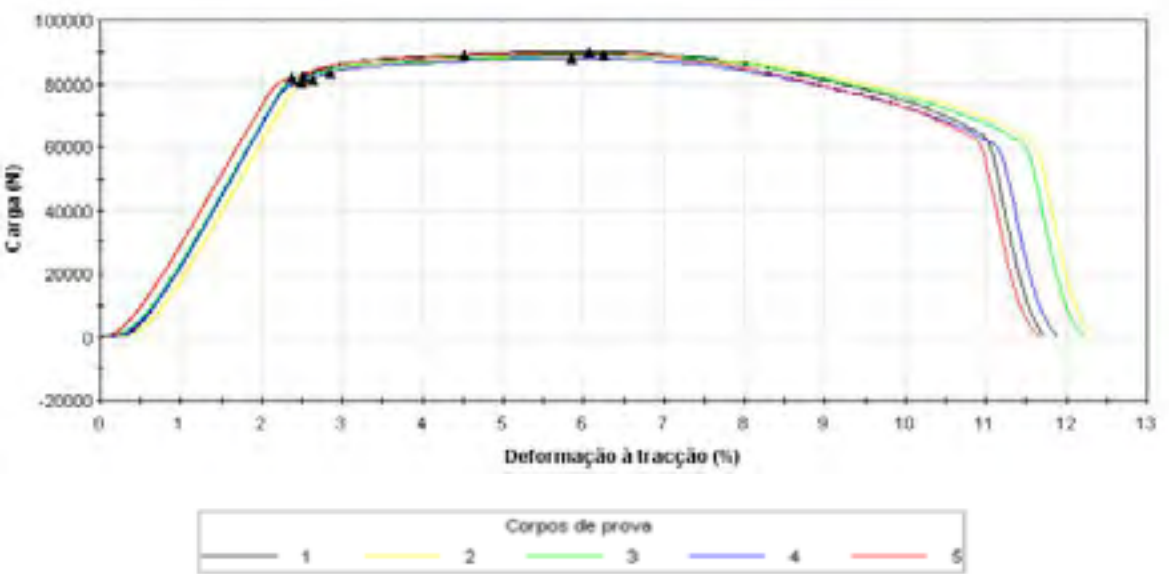


Figura 38: Gráfico com resultados do ensaio de Tração, realizado nos parafusos em estado novo.

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

Parafuso	$R_{p0,2\%}$ (Mps)	R_m (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
Média	965	1055	10,6
Especificação do Material	Mínimo: 900MPa Máximo: 1080MPa	Mínimo: 1000MPa Mínimo: 1200MPa	Mínimo: 9%

Fonte: Autora (2010)

Estudo de caso - Parafuso de fixação do berço do motor

- 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.

Conclusão

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.



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 através do equipamento chamado dinamômetro, que irá simular e aplicar as mesmas condições de resistência (carga) durante uma rotação 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.

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.

Dados da peça

- Parafuso de fixação central do suporte elástico do motor;
- Equipamento utilizado na Montagem: Parafusadeira – Modelo: ECA115 – Georges Renault.

Análise

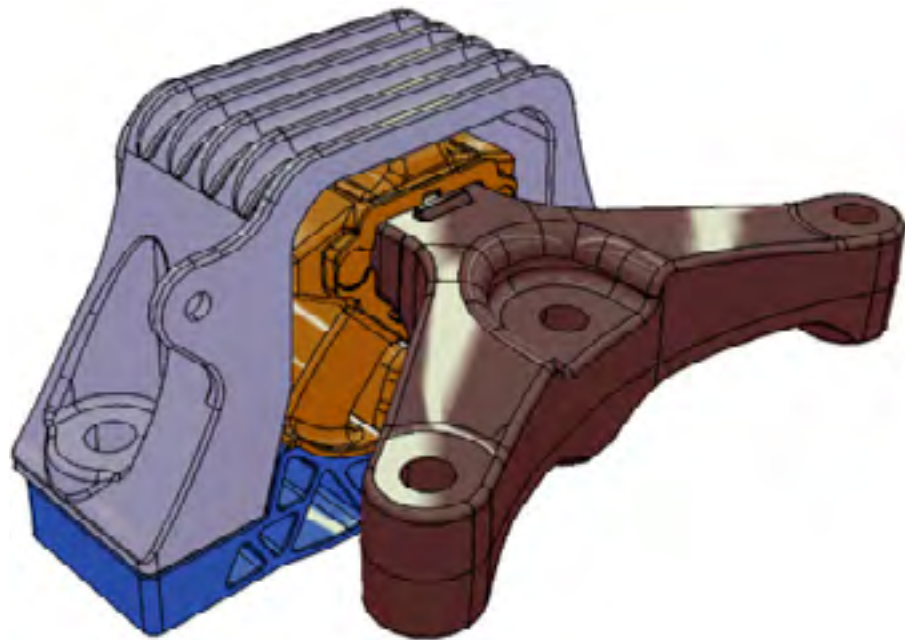
Seguindo as etapas descritas nos fluxogramas, a análise foi conduzida da seguinte forma:

- 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.

As Figuras 39 e 40 mostram o suporte elástico do motor e a região que o parafuso estava fixado quando fraturou.

Estudo de caso - Parafuso de fixação central do Suporte Elástico do Motor

a)



b)

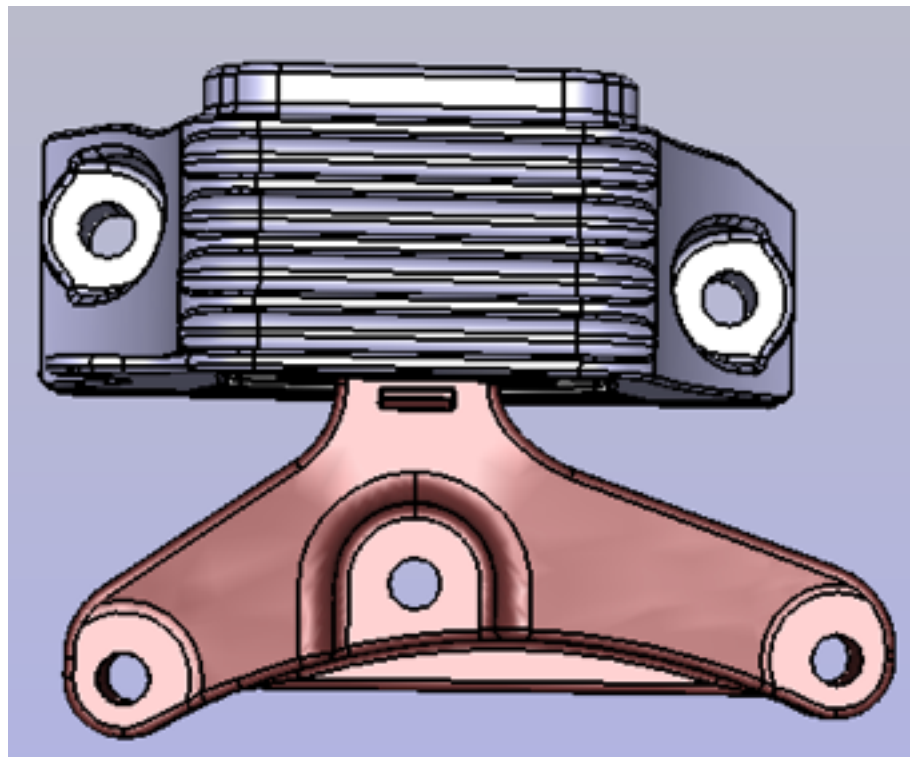


Figura 39: Suporte Elástico do motor (a), e detalhe da região central de fixação do parafuso (b).

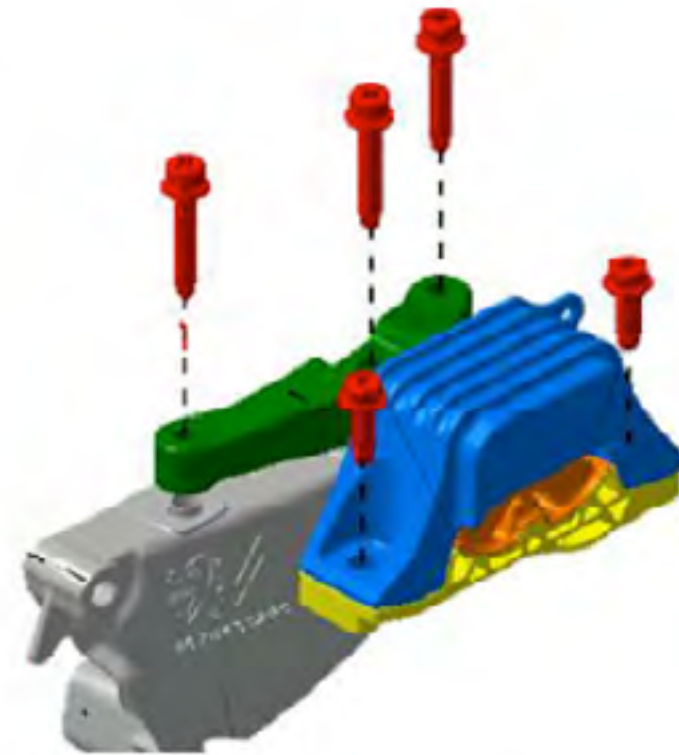


Figura 40: Imagem mostrando o posicionamento dos parafusos no Suporte Elástico do Motor. Em detalhe o parafuso de fixação central.

Estudo de caso - Parafuso de fixação central do Suporte Elástico do Motor

- 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.

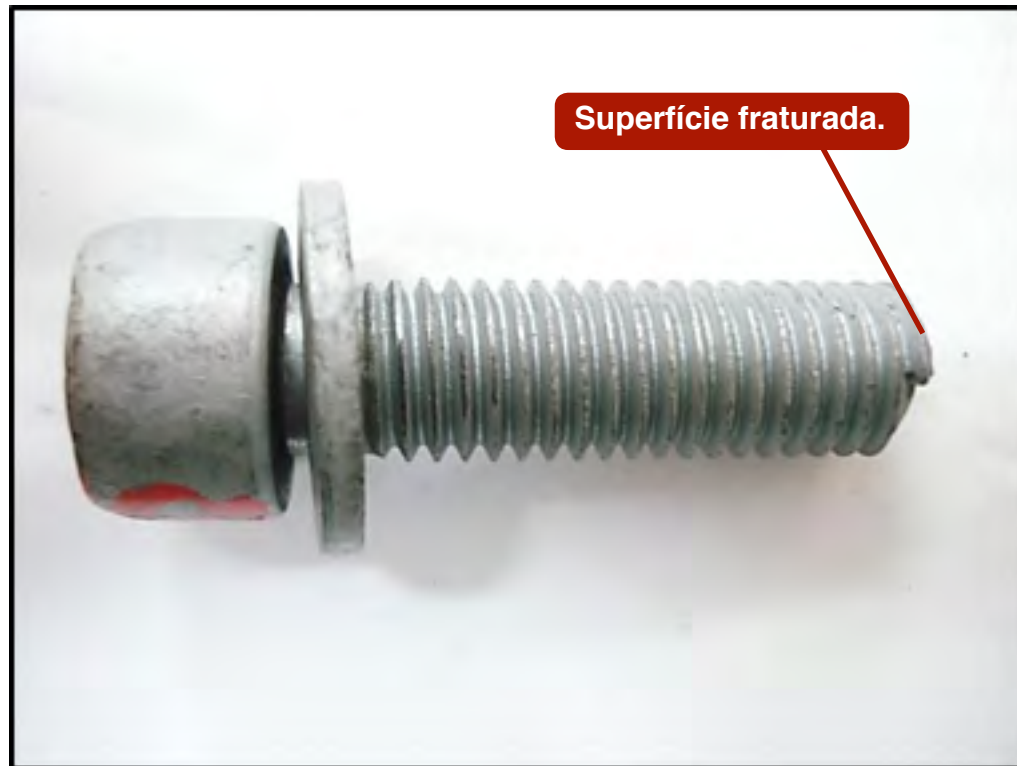


Figura 41: Parafuso de fixação do suporte elástico do motor. Fonte: Autora (2013).

- 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 42.



Figura 42: Parafuso de fixação do suporte elástico do motor. (a) ausência de deformação plástica. (b) marcas de praia na superfície fraturada. Fonte: Autora (2013).

Estudo de caso - Parafuso de fixação central do Suporte Elástico do Motor

- 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 observa-se linhas que indicam o sentido de propagação da fratura e posteriormente as marcas de praia, ocasionadas por alterações no ciclo de tensão, Figura 43.

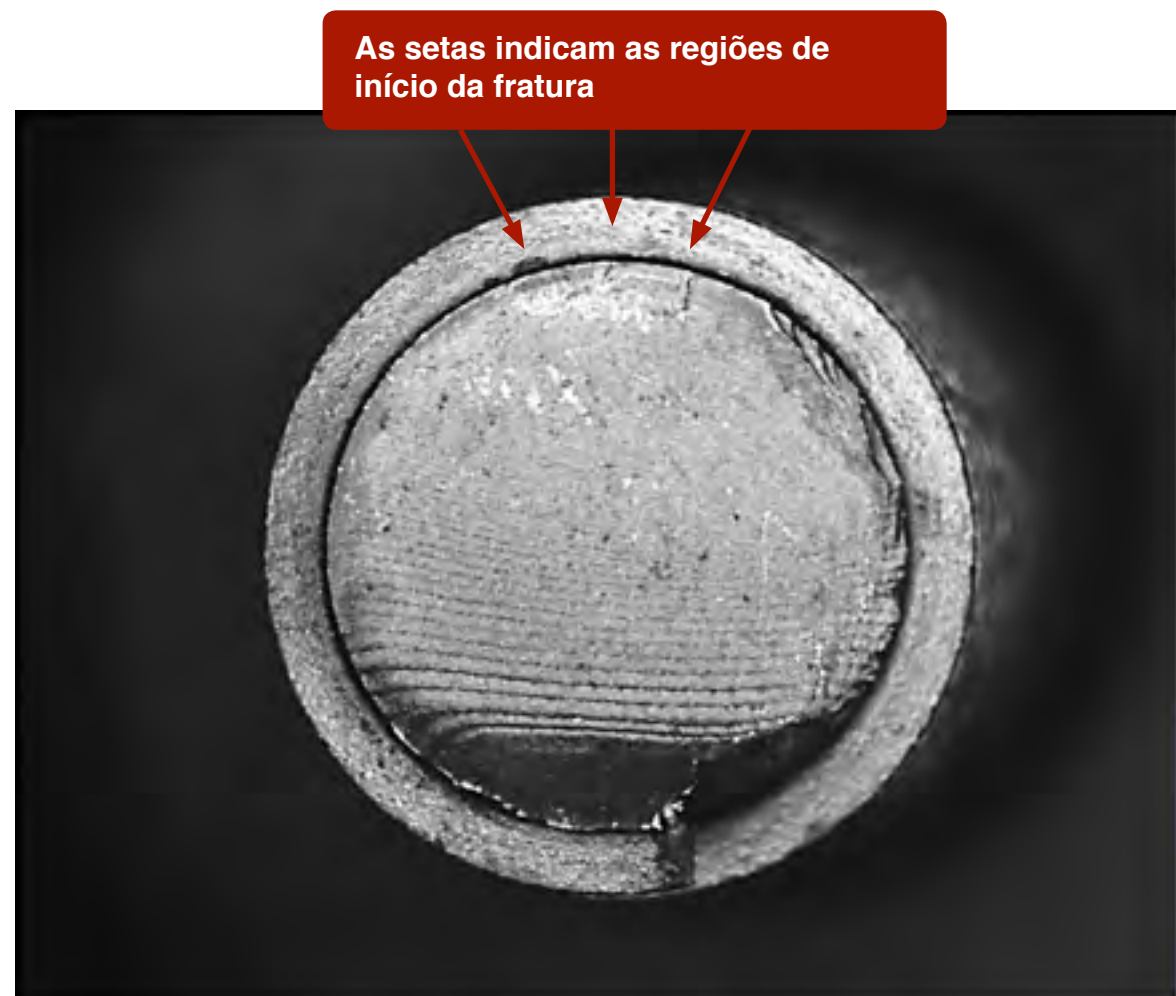


Figura 43: Imagem da superfície fraturada do parafuso de fixação central do suporte elástico. Observam-se as regiões de início e o sentido de propagação da fratura. Fonte: Autora (2013).

Após observação da superfície fraturada no estereomicroscópio, realizou-se a avaliação através do 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 43 (b). Ampliando a imagem em 3000x, podem-se visualizar estrias de fadiga, que são características quando a fratura ocorre por fadiga, Figura 43 (c).

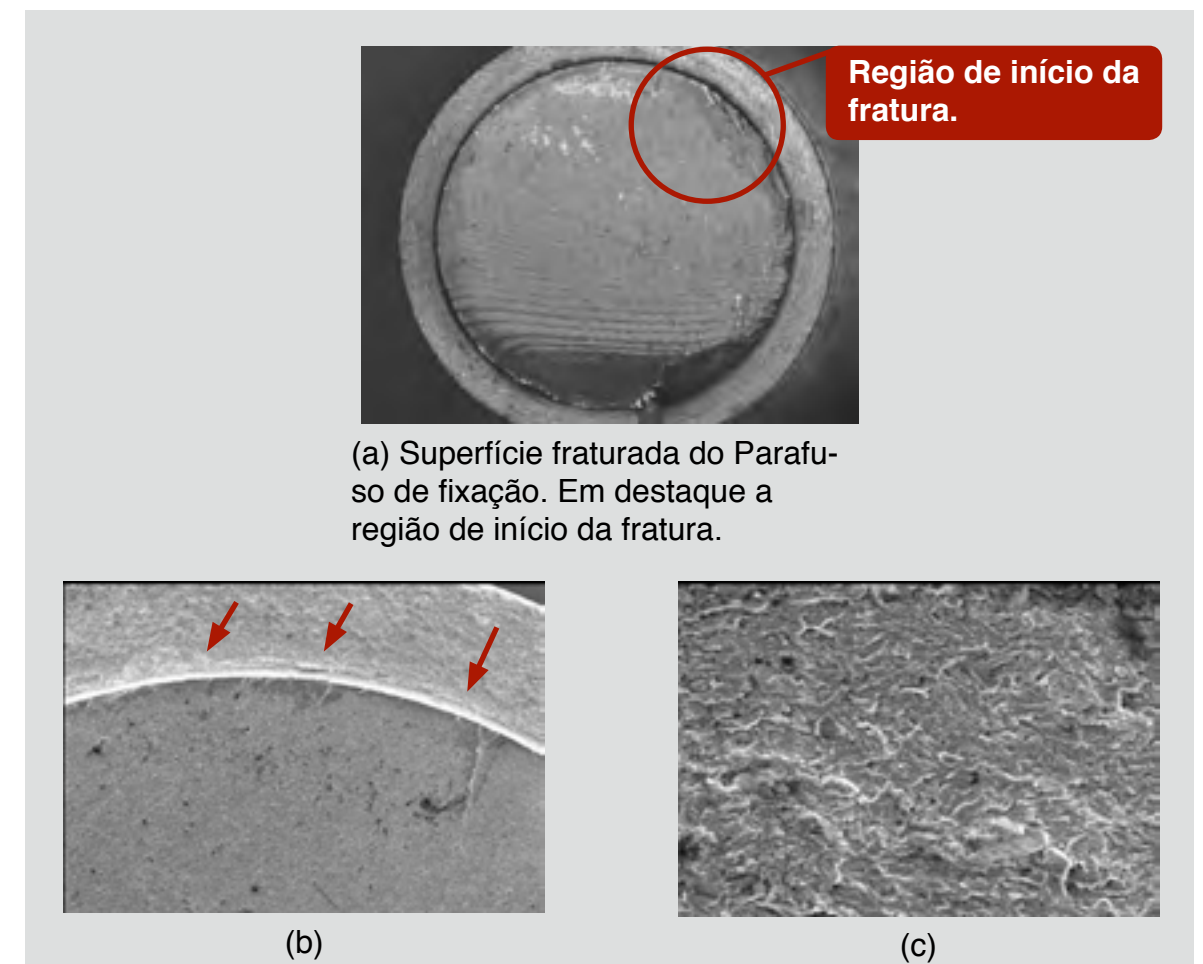


Figura 44: (a) Superfície fraturada do Parafuso de fixação. (b) Detalhe da região de início e o sentido de propagação da fratura. (c) Estrias de fadiga, características quando a fratura ocorre por fadiga, observadas na região de início. Fonte: Autora (2013).

Estudo de caso - Parafuso de fixação central do Suporte Elástico do Motor

- 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 45.

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 suficiente para o parafuso resistir aos esforços de durabilidade.

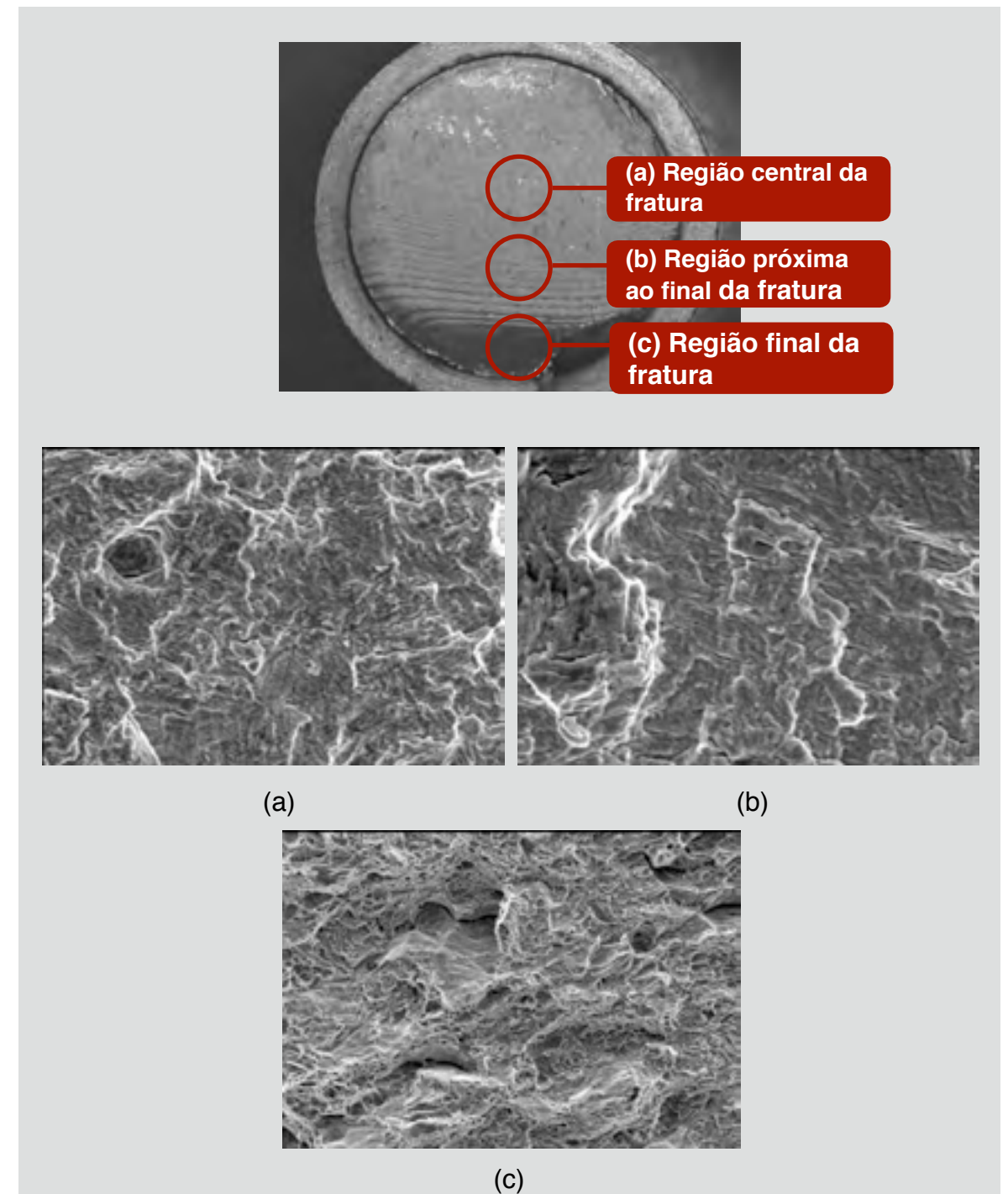


Figura 45: Detalhe das demais regiões da superfície fraturada do parafuso. (a) região central da fratura, apresentando estrias de fadiga. (b) região próxima ao final da fratura, em que ainda observa-se estrias de fadiga. (c) região final, apresentando microcavidades (dimples). Fonte: Autora (2013)

Estudo de caso - Parafuso de fixação central do Suporte Elástico do Motor

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 na superfície, Figura 46. 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.



Figura 46: Fotomicrografias do parafuso. (a) observa-se ausência de descarbonetação na superfície dos filetes do parafuso. (b) microestrutruura da região central do parafuso, formada por cerca de 90% de martensita.

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 (2010)

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 (2010)

- 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 54Nmser insuficiente para resistir aos esforços de durabilidade.

Estudo de caso - Parafuso de fixação central do Suporte Elástico do Motor

Conclusão

Para realização o ensaio de resistência, que consiste em aplicar ao sistema (Parafuso de fixação central + Suporte elástico + Motor) os esforços de durabilidade através 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.

