

BRUNO AKIRA KOSEKI

**Análise de falha em eixo de saída de aço SAE 4340 da caixa de redução do
Baja de competição da Equipe Poli**

SÃO PAULO

2018

Departamento de Engenharia
Metalúrgica e de Materiais d
Escola Politécnica da USP

BRUNO AKIRA KOSEKI

**Análise de falha em eixo de saída de aço SAE 4340 da caixa de redução do
Baja de competição da Equipe Poli**

**Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Engenheiro.**

**Departamento de Engenharia Metalúrgica e
de Materiais.**

**Orientador: Prof. Dr. César Roberto de
Farias Azevedo**

SÃO PAULO

2018

TF-2018 K 847 a

2895202 H 2018 E

DEDALUS - Acervo - EPMT



31800009339

Catálogo-na-publicação

Koseki, Bruno Akira

Análise de falha em eixo de saída de aço SAE 4340 da caixa de redução do Baja de competição da Equipe Poli / B. A. Koseki -- São Paulo, 2018. 82 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1. Análise de falhas 2. aço SAE 4340 3. fadiga I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II. t.

Dedico este trabalho à minha família e a todos aqueles que acreditam em si, que aprendem com as dificuldades e as superam com dignidade.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais e meu irmão pela paciência durante todos esses anos e por todo o suporte, sem o qual jamais estaria aqui.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Cesar Roberto de Farias Azevedo pela atenção na orientação do trabalho.

Ao Hamilton Ito e Marcelo Ferreira, que gentilmente se dispuseram a compor a banca de avaliação.

Ao Livio Nunes e Rafael Maia, por toda a ajuda no laboratório de corrosão e de metalografia e especialmente aos momentos de descontração nos corredores do PMT.

À Equipe Poli pela oportunidade de trabalhar com o componente, pelas informações fornecidas e especialmente à colaboração de Glauco Eltink e Eduardo Seiji.

Ao Raphael Ferreira pela inestimável colaboração com a análise em MEV do Laboratório de Fenômenos de Superfície.

À Luíza C. Harman (HARMAN, Luiza C.) a pessoa mais incrível que conheci em todos esses anos, dona de um otimismo contagiante e dos conselhos mais preciosos nos momentos mais oportunos. Mulher inspiradora de alma sublime, obrigado pelo carinho, paciência e a companhia nos momentos mais felizes e principalmente pela compreensão nos momentos mais difíceis.

Aos meus amigos de mais longa data, que nunca me deixaram na mão, na loucura ou na tristeza, Rafaella Diels (Finha), Igor e Adriana Grotkovski, Carolina Fernandes. Obrigado pelas risadas de todos os dias e por todas aquelas manhãs de sábado, ensurdecedoras, no estúdio.

À Jessica Ribeiro por todo carinho, amizade, causos, histórias, vinhos, indicações de livros, cantorias no trânsito e por surtar junto comigo em todas as feiras de livros da USP.

À Adriana Dellagiustina com quem sempre pude conversar abertamente, me encorajou a encontrar um caminho na escuridão e mesmo com as agendas apertadas, arranjamos alguns instantes para celebrar essa amizade.

Aos meus amigos politénicos:

Aos guerreiros que estiveram juntos na Poli desde o começo, Mário Iácono (Rolândia), Danilo César (TK), Rafael Godinho (Concha), Bruno Facina, Diego de Moura (Sport), André Filipe (Nenê), que me receberam no CMR e aos áureos, Antônio C. Strabelli Jr. (Tonhão), Felipe Lima (Francês), Felipe Martins (Felipão), Livia Lima, Marco Barros, William Mourão, Bruno Nagle, Henrique de Santis, Diogo Cirulli, André Granja, com quem sempre fiz grupos de trabalhos e com "grande frequência" marcamos nossos encontros anuais sagrados.

Aos meus amigos do Bonde, Carolina Person, Jady Auada, Victoria Beatriz, Isabelle Pereira, Laura Abrantes, Beatriz Sato, Lucas Landi, Lucas Coimbra (Toca), Heitor Lira, Gabriel Alencar (Fanta), Nayara Brischi, Nelson Ewert, Gabriel Piazzalunga (Piazza), que mudaram o conceito de "rolê praia" e são a prova viva de que com música ruim se faz muito rolê bom. Obrigado por todos esses anos maravilhosos na companhia de vocês e por todas as viagens inesquecíveis, das quais não me lembro de muita coisa.

Aos meus amigos e colegas do PMT/CMR, obrigado por toda a parceria, todo o carinho e ensinamentos em todos esses anos. A companhia e o apoio de vocês todos os dias foram essenciais para me fazer seguir em frente. Todos os dias procuro a melhor forma de retribuí-los. Natacha Ohannessian, Gustavo Piazza (Bavs), Ana Prata (Banana), Rafael Senefonte (Peruíbe), Fernando Grego, Rafael Ishiyama (Jabuta), Seiji Renan, Vinicius Franca, Lucas Ramos (Lucão), André Soares (DS), Fernando Zagatti (Kiwi), Vinicius Zagatti, Rafael Alves (Jow), Guilherme Niglio, Eduardo Bertin, Lucas Kodaira, Caio Crevelaro (Caio Noia), Ana Luísa Cincerre, Bruno Castro, Fabio Dicezare (Faibo), Matheus Pádua, Rodrigo Takacs, Ana Carla Cezário (AC), Clara Souza, Paula Arantes, Débora Arruda, Julia Sanches, Giovanna Lia, Matheus Rehem, Gustavo Garcia (Gu), Giovanna Cabral (Xô), Luiz Lopes (Japa) Letícia Matson (Gema), Bruno La Valle, Daniel Roubiceck, José Carlos (Hulk), Felipe Marrach, Caio Nogueira, Gabriel Bellini (Madruga), Isabella Duchêne (Bella), Renata Russo, Isabella Perini (Isap), Fernando Ramalli

(Fê), Isabela Vasconcellos, Laura Bonatti, Gabriel Ciasca, João Moscone (Conan) Victor Costa (Gerson), Victor Castro (Teco), Gabriela Kalleder, Guy Rabe (Guy), Bianca Fernandes, Gabriella Christe (Ruiva), Camila Nogueira, Arthur Albertini, Rodrigo Castro (Dinei), Renan Rosenfeld (Champs), Paulo H. Silva (Paulão), Viviane Mieli (Vivi), Sherida Figueiredo (Sher), Natália Guedes (Naty), Milena Umemura, Giovanna Cassini, Gabriel Borba, Sofia Guimarães, Vinicius Segantini, Tiago Valle, Pedro Braga, Luíza Soderó, Camilla Nani, Eduardo Marsola, Alan Borges, Gabriel Messias, Daniela Castro, Sofia Bergamo, Lucas Kadota, Rafael Jun Kunitake, Fernando Garcia, Felipe Garcia, Daniel Legatti, Victor Benito, Camila Renda, Paula Magalhães, Maria Luisa Garbelini (Malu), Caio Avancini (Coruja), Vitor Rossi (Capiau), Beatriz Nassif, Guilherme Bardavira (Barda), Thais Bortolotti, Helena Ferrari, Thiago Loureiro, Guilherme Monteiro, Danilo Cho, Georgia Briano, Marcelo Iost, Thales Nunes, Nathália Senciales, Camila Diniz, Paula Padilha e tantas outras pessoas igualmente importantes que fizeram parte do dia a dia dessa minha jornada pela Poli, com quem tive a honra de conviver e me tornar uma pessoa melhor. Obrigado a todos. Que a vida retribua a gentileza que recebi de todos vocês.

“Queremos certezas e não dúvidas; queremos resultados e não experimentos, sem, entretanto, nos darmos conta de que as certezas só podem surgir através da dúvida, e os resultados através do experimento.”

Carl Gustav Jung (1)

Sumário

Agradecimentos	v
Sumário	ix
Lista de Abreviaturas e Siglas	xi
Índice de Tabelas	xii
Índice de Figuras	xiii
Resumo	xvii
Abstract	xviii
1 Revisão bibliográfica	1
1.1 Introdução	1
1.2 Planejamento e definição do escopo da análise	4
1.3 Classificações de falhas	8
1.4 A prevenção da falha	10
1.5 Fratura dúctil e frágil	12
1.6 Fratura por fadiga	16
1.7 Falhas em eixos	29
1.8 Objetivos do trabalho	31
2 Materiais e métodos	32
2.1 Histórico da falha	33
2.2 Material do eixo	35
2.3 Metodologia de análise de falha	37
3 Resultados	40
3.1 Inspeção visual	40
3.2 Análise macrofractográfica	51
3.3 Caracterização microestrutural	54
3.4 Ensaios de dureza	56

3.5	Exame microfractográfico.....	59
3.6	Microanálise química.....	66
4	Discussão.....	68
4.1	Recomendações para evitar nova falha do componente	72
5	Conclusões	78
6	Sugestões para trabalhos futuros	79
7	Referências	80

Lista de Abreviaturas e Siglas

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
CES	<i>Cambridge Engineering Selector</i>
CVT	<i>Continuously Variable Transmission</i>
EDS	<i>Energy-Dispersive Spectroscopy</i>
IES	Imagem de elétrons secundários
FMEA	<i>Failure Modes and Effects Analysis</i>
HB	Dureza <i>Brinell</i>
HRC	Dureza <i>Rockwell C</i>
HV	Dureza <i>Vickers</i>
LCMHC	Laboratório de Caracterização Microestrutural Hubertus Colpaert
LFS	Laboratório de Fenômenos de Superfície
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
PMT	Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
POLI	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
RPM	Rotações por minuto
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
USP	Universidade de São Paulo

Índice de Tabelas

Tabela 1 – As ferramentas e usos de recursos para análise de falhas (2).....	7
Tabela 2 - composição do aço AISI/SAE 4340. Valores em porcentual de massa (13)	35
Tabela 3 – efeitos da dureza sobre os parâmetros de usinagem. Adaptado de (14).	36
Tabela 4 – Valores de dureza encontrados para os pontos escolhidos na amostra 1	56
Tabela 5 – Valores de dureza encontrados na amostra 3 para os pontos escolhidos.	57
Tabela 6 – Propriedades do aço SAE 4340 temperado em óleo e revenido a 315°C. Retirado de CES 2018 (18).	58
Tabela 7 – Comparação da composição química do aço SAE 4340 encontrado em (13) com os valores obtidos em microanálise química EDS. Nota-se que o elemento químico Carbono não pode ser determinado com precisão através deste método de análise. Valores dados em porcentagem em massa.	67

Índice de Figuras

Figura 1- Ilustração do formato dos alvéolos (<i>dimples</i>) de acordo com o tipo de tensão a qual a peça fraturada foi submetida (4).	14
Figura 2 – desenho esquemático das etapas de um possível mecanismo de fratura por fadiga (4). Considerando que a trinca está se propagando da direita para esquerda, a fratura começa em uma trinca inicial indicada por <i>Stage 1 (origin)</i> e se propaga conforme a segunda região, indicada por <i>Stage 2</i> . Nessa segunda região, a fratura se propaga por pequenos avanços por deformação plástica (<i>plastic deformation</i>) na ponta trinca, que deixam as estrias, indicada como <i>1 striation</i>	18
Figura 3 – Curva R para material com R crescente. Adaptado de (9).....	23
Figura 4 - Modos de carregamento da trinca. Adaptado de (9).	25
Figura 5 – Gráfico Log da/dN x Log ΔK adaptado de (9).	27
Figura 6 – Diagramas de corpo livre mostrando a orientação das tensões e tensões de cisalhamento em um eixo e o comportamento dúctil e frágil de materiais sob esforço simples. (a) Tração; (b) Torção, (c) Compressão. σ_1 = tensão de tração, σ_3 = tensão de compressão, τ_{max} = máxima tensão de cisalhamento. Adaptado de (11).	29
Figura 7 - Montagem do sistema de transmissão do Baja, com destaque para a caixa de redução – semelhante à estudada – ligada a dois semi eixos dotados de cruzeta.	33
Figura 8 – Esquema do traçado do evento em que houve a falha. Retirado de (12)	34
Figura 9 – Preparação das amostras para análises em microscopia óptica e dureza. (a) Regiões de corte no equipamento ISOMET; (b) Amostra 3: corte transversal; (c) Amostra 2: corte transversal e longitudinal; (d) Amostra 1: corte transversal.	38
Figura 10 – Montagem do eixo na caixa de redução, mostrando a posição da peça fraturada (vide seta).	41
Figura 11 – Sequência de montagem das peças que compõem a transmissão. O eixo de saída da caixa de redução (à direita) conecta-se à junta homocinética (centro). A terceira peça, da direita para a esquerda, é a ponta do semieixo – componente interno da junta homocinética. Superfície de fratura não é mostrada na fotografia, mas ocorreu no componente apontado pela seta.	42

- Figura 12 – Imagem ilustrando uma junta homocinética, com semelhança à utilizada pelo projeto da equipe. Retirada de www.gkn.com/en/our-divisions/gkn-driveline/our-solutions/cvjs/cv-joint-solutions, acessada em 03/06/2018.43
- Figura 13 – Fatores de superfície para diversos tipos de acabamento superficial para aços. Autoria de R. C. Juvinall, extraído de (10).44
- Figura 14 – Peça fraturada em perfil para mostrar a geometria da peça fraturada. (a) Representação da peça, com destaque para a região fraturada; (b) Peça fraturada com destaque para as duas regiões de interesse.45
- Figura 15 – Geometria interna do eixo. Devemos considerar que essa peça era simétrica, portanto a região 1 e sua continuação possuíam as mesmas características da extremidade apresentada. A seta em (a) indica a região observada em (b).46
- Figura 16 – Detalhe dos defeitos de usinagem na região próxima à raiz dos dentes internos do eixo (Figura 15b).47
- Figura 17 – Macrofotografia da superfície fraturada – observa-se a presença de ranhuras e a proximidade da fratura com a região de mudança de geometria do eixo (região concentradora de tensão). A seta em (a) indica a região observada em (b). 48
- Figura 18 – Corte longitudinal do eixo, da Região 3. A seta menor em (a) indica a posição da trinca observada em (b). Seta preta: trinca interna; seta branca: ressaltos de usinagem; seta pontilhada: degrau na superfície de usinagem.49
- Figura 19 – Fotografia em outro ângulo da região 3 para melhor observação do caminho percorrido pela trinca dentro da peça. Seta sólida branca: trinca sobre degrau de usinagem; seta pontilhada: ponta da trinca; seta sólida preta: possível direção de propagação da trinca50
- Figura 20 – Fotografia da vista superior da região 1 (fratura).51
- Figura 21 – (a) Peça sã, mostrando região do raio de concordância, possível região de início de fratura (vide seta); (b) Fotografia em lupa da superfície de fratura, vista de topo, que a fratura foi iniciada junto às marcas de usinagem e na região de raio de concordância (possível presença de canto vivo, vide seta sólida). Observa-se ainda possível presença de dentes junto ao raio de concordância (vide seta pontilhada).52

- Figura 22 – Trincas em forma de marcas de catraca, na parte externa do eixo (junto ao raio de concordância) e adjacente à superfície de fratura.....53
- Figura 23 – Caracterização microestrutural do eixo fraturado; (a) Região de meia espessura do eixo, seção transversal; (b) Seção longitudinal do eixo. Microestrutura de martensita revenida homogênea ao longo da espessura na peça. MO, 200x ataque: Nital.55
- Figura 24 – Amostra 1: os pontos utilizados para medição da dureza estão indicados pelas 4 seta.....56
- Figura 25 – Amostra 3 os pontos utilizados para a medição estão indicados pelas setas.....57
- Figura 26 – Quadrantes da superfície analisada em MEV59
- Figura 27 – Exame microfractográfico da superfície externa do eixo do quadrante 3 (Figura 26). (a) 20x de aumento (b) 100x de aumento; (c) 1000x de aumento; (d) 5000x de aumento. Observa-se em a presença de alvéolos equiaxiais (sobrecarga em tração), típicos de fratura dúctil. Observou-se ainda a presença de oxidação superficial, decorrente do armazenamento inadequado da peça fraturada. Não foi observada possível presença de estrias de fadiga. MEV, IES.61
- Figura 28 – Exame microfractográfico do quadrante 3 (Figura 26) próximo à superfície interna do eixo. (a) 50x de aumento (b) 100x de aumento; (c) 1000x de aumento; (d) 5000x de aumento. Observa-se a presença de alvéolos equiaxiais (sobrecarga em tração), típicos de fratura dúctil. Observou-se ainda a presença de oxidação superficial, decorrente do armazenamento inadequado da peça fraturada. Não foi observada possível presença de estrias de fadiga. A microfractografia revelou a presença de clivagem transgranular em 5000x de aumento. MEV, IES....63
- Figura 29 - Exame microfractográfico próximo à superfície interna do eixo. (a) 500x de aumento (b) 3000x de aumento. Observa-se a presença de fratura intergranular, típicos de fratura frágil. MEV, IES.65
- Figura 30 – (a) Fotografia da região analisada; (b) Mapa de picos obtidos pela microanálise química por EDS. Modo área, tensão de 20,0 keV com tempo total de análise de 396 s.67

Figura 31 – Fator geométrico de concentração de tensão K_t para um eixo com um rebaixo arredondado em torção (10).	69
Figura 32 – Diagrama de Resfriamento contínuo para o aço SAE 4340. Adaptado de (20) onde B = Bainita, M = Martensita, F = Ferrita, P = Perlita. Ms e Bs mostram a curva de início da formação de martensita e bainita respectivamente; Mf indica a curva de término da transformação martensítica; Fs e Ps as curvas de início de formação de Ferrita e Perlita, respectivamente. Pf mostra a curva de término da formação de Perlita.	70
Figura 33 – Fratura por sobrecarga em eixo carregado por torção, com presença de morfologia de dente de serra junto à superfície externa do eixo (23), similar à observada no presente trabalho (Figura 17b).	72
Figura 34 – linha do tempo de processos atômicos que ocorrem durante o tratamento térmico (24)	74
Figura 35 – Gráfico de critério de decisão para diferentes tratamentos térmicos do aço SAE 4340, cujos critérios adotados foram o limite de escoamento e a resistência à fratura. (17).	76
Figura 36 – Gráfico de critério de seleção de materiais, cujos critérios adotados foram o limite de escoamento e a resistência à fratura, englobando diferentes tipos de ligas ferrosas (17).	77

Resumo

A análise de falhas é uma importante ferramenta para que os engenheiros possam através de análises consistentes e com base em profunda teoria, melhorar um projeto, maximizar a eficiência de componentes e principalmente compreender o que leva um componente à falha. A análise de falhas é comumente empregada em caráter investigativo de cunho jurídico em projetos de engenharia que culminaram em falha e, conseqüentemente danos e prejuízos às partes envolvidas.

Este estudo de caso visa a compreensão da falha do componente para aperfeiçoamento do projeto do eixo de saída da caixa de redução do veículo tipo Baja de competição da Equipe Poli que rompeu em serviço e levou o veículo à total imobilização, não completando o circuito proposto pela organização do evento (SAE Brasil). Suspeita-se que um tratamento térmico, não previsto pelo projeto da Equipe Poli, utilizado pela empresa que confeccionou a caixa de redução tenha levado à falha do eixo. Com uso de técnicas laboratoriais e investigativas inerentes à análise de falhas, que inclui a documentação do histórico da vida da componente, inspeção visual do sistema e da fratura, microscopia óptica, microscopia eletrônica, microanálise química, etc., foi possível elencar uma série de fatores que juntos apontam para um possível mecanismo de falha. Mas, mais importante do que apenas encontrar o mecanismo que levou ao rompimento da peça, está uma importante revisão das técnicas de manufatura e propriedades do material utilizado – desde a seleção do material e tratamento térmico adequado até a alteração nas técnicas de manufatura – que seguramente poderiam substituir o material escolhido e superar as exigências de projeto que também é parte da função de uma análise de falha.

Palavras chave: Análise de falhas, aço SAE 4340, eixo, fadiga, torção.

Abstract

Failure analysis is an important tool for engineers to improve a project, maximize efficiency of components and most importantly comprehend what leads a component to failure, based on deep theory and consistent analysis. It is greatly used on lawsuits investigations of engineering projects that ended in failure and consequently in injuries and/or financial losses.

This case study aims to understand the component failure to improve the output axle design of *Equipe Poli* Baja competition vehicle's low gear transfer case. The axle failed in service and led the vehicle to a total stop, not completing the circuit purposed by the event staff (SAE Brasil). It is suspected that a heat treatment, not foreseen by the team project, was applied by the company that produced the transfer case, and led to the axis failure. Using laboratory and investigation techniques inherent to fault analysis, which includes documentation of the component life history, visual inspection of the system and fracture, optical microscopy, electron microscopy, chemical microanalysis, and others, it was possible to list a series of factors that points to a possible failure mechanism.

But greater than just finding the mechanism that led to the component failure is an important review of the manufacturing techniques and properties of the material - from material selection and appropriate heat treatment to changes on manufacturing techniques - that safely could replace the chosen material and exceed the design requirements, which is also part of the function of a failure analysis.

Keywords: Failure Analysis, SAE 4340 steel, axle, fatigue, torsion.

1 Revisão bibliográfica

1.1 Introdução

A análise de falhas é um processo realizado quando é necessário determinar as causas e/ou fatores que levaram um componente à perda indesejada de suas funções. A engenharia de materiais tem sido muito importante na contribuição dos fundamentos científicos para o avanço da análise de falhas, baseando-se em diferentes técnicas de caracterização e no uso de grande diversidade de técnicas de observação, inspeção e análise laboratorial. Alguns analistas de falhas definem as causas de uma falha de forma binária, buscando respostas no campo do defeito ou da sobrecarga. Naturalmente, existem diferentes tipos de defeitos, incluindo aqueles provenientes de uma falha de projeto, seleção de material inadequado e presença de defeito de manufatura. As razões são as mais diversas e geralmente elas dependem da análise microscópica e por mais popularizadas que sejam as técnicas de microscopia, o conhecimento necessário para interpretar as imagens ainda é restrito, sendo necessária a análise de um engenheiro com conhecimentos em engenharia de materiais (2).

Por falha entende-se como um evento ou condição indesejada e pode ser definida em três diferentes níveis. Quando um componente ainda está operante, mas não tem desempenho esperado para a função é considerada uma “perda de funcionalidade”. O próximo nível diz respeito a um sistema ou componente operacional, porém instável ou inseguro, classificado como “fim de vida útil”. O último nível envolve um sistema ou componente inoperante devido a ruptura, deformação ou desgaste excessivo dos elementos que o compõe (3).

A análise física de um objeto é apenas uma parte de uma investigação cuja intenção é prevenir a recorrência do problema. Uma falha não deve ser vista como um evento isolado. É muito mais útil ver a falha e a sua análise como um processo de várias etapas que podem ser exploradas de formas diferentes. O evento físico da falha – fratura, explosão, ou dano ao componente por corrosão ou estresse térmico – é óbvio. No entanto sempre há outras fases que levam à falha. Por exemplo, uma falha causada por um mau controle da dureza de uma peça está associada a fatores

humanos, que permitiram que um componente com defeito na dureza fosse assim produzido e utilizado. Os fatores humanos geralmente são mais difíceis de ser investigados, uma vez que não há como avaliar com profundidade o motivo, que pode ter sido, por exemplo, um operador mau treinado. O simples fato de uma empresa não permitir a investigação da forma como foi o treinamento, gera dificuldade na solução do problema (2).

De acordo com Aliya (2), o princípio primordial para um analista é preservar as evidências e se certificar de que qualquer informação necessária do objeto a ser estudado foi recolhida antes que qualquer ação fosse tomada e possa ter alterado sua condição. As ações iniciais podem ser resumidas nos tópicos a seguir:

- Preservação da amostra
- Realizar os testes não destrutivos antes dos destrutivos
- Ter consciência das limitações do conhecimento individual
- Saber como e onde recorrer à ajuda
- Não realizar a análise sem antes estudar como a peça foi preservada e coletada
- Assegurar que um teste destrutivo será necessário

Também é preciso compreender que um problema de análise de falhas pode ser interpretado de diferentes pontos de vista, dependendo da profundidade e do escopo da análise. A definição do escopo da investigação aumenta as chances de obter respostas de forma mais eficiente. Por mais simples que seja uma análise, ela está aberta a interpretação e pode ser contestada. Mesmo os analistas mais experientes estão sujeitos a erros, como por exemplo, pelo direcionamento vicioso da análise pelo cliente ou por uma das partes interessadas, no caso de uma análise com finalidade jurídica. Sempre se deve tomar cuidado com o direcionamento inicial e quando o tempo é um fator limitante da análise, que abre espaço para uma análise menos cuidadosa (2).

Outro princípio importante é que qualquer análise pode ser abordada de diferentes formas. Selecionar a abordagem mais apropriada para a solução do problema é uma tarefa deveras importante e é inerente à destreza do analista. A abordagem clássica envolve seguir uma série de etapas, entre elas, o planejamento, pesquisa de casos anteriores, testes físicos sobre a peça e a elaboração do

relatório. Ainda que eficiente e de grande ajuda a analistas iniciantes, essa abordagem pode não produzir resultados satisfatórios que permitam chegar a uma conclusão com clareza. Saber qual delas utilizar é tão importante quanto saber utilizá-la (2).

Os objetivos ou propósitos de uma análise de falhas são geralmente definidos como uma forma de prevenir a recorrência da falha no futuro corrigindo o projeto. No entanto, pode-se estendê-la ao campo da criminalística, quando a falha culmina na lesão de uma ou mais pessoas e torna-se necessário atribuir a alguém a responsabilidade. É importante compreender que nem sempre a análise gera uma melhoria no projeto, especialmente em componentes de baixo custo, que em alguns casos a correção não se justifica economicamente, nesse caso é mais viável conviver com a recorrência da falha do que modificar o projeto (2).

Os objetivos podem variar de acordo com a etapa da produção que se encontra o componente. Durante a fase de protótipo, por exemplo, o objetivo pode ser testar o componente para o atendimento da necessidade do mercado e da expectativa do cliente quanto à durabilidade. A análise de falhas de um projeto que já esteja inserido no mercado pode ajudar o fabricante a reduzir seus custos com o reparo do equipamento em garantia ou melhorar a vida útil para atender clientes que buscam produtos com maior durabilidade, ou o oposto, reduzir custos a fim de oferecer o mínimo necessário para que a vida útil do componente seja compatível com a vida útil do sistema (2).

Observa-se que cada vez mais as agências do governo e outras organizações têm desenvolvido novos padrões para a indústria, exigindo maior segurança operacional e qualidade, que obrigam as indústrias a seguir um padrão de qualidade, geralmente superando a expectativa do consumidor. Um sistema de produção que exemplifica essa exigência é o sistema "Seis Sigma", que introduz um limite estatístico para o máximo número de defeitos em um produto, permitindo até 3,4 defeitos por milhão (3).

1.2 Planejamento e definição do escopo da análise

O escopo da análise depende da profundidade e complexidade do projeto. Análise cujo tempo de resposta é fator limitante gera respostas superficiais e imprecisas. Quanto maior a profundidade da análise maior o custo envolvido, portanto, é necessário ponderar o grau de detalhamento de acordo com o interesse econômico (2).

Segundo Aliya (2), uma investigação também deve levar em consideração encontrar a causa raiz da falha. A determinação da causa raiz tem recebido bastante atenção recentemente. Quando ela possui ligação com alguma causa física ou humana, há um bom encaminhamento da investigação. Às vezes o termo "causa raiz" é mal utilizado quando empregado para componentes que não atendem as especificações do projeto. Quando isso ocorre a não conformidade se torna uma forma conveniente de causa raiz. No entanto, se a causa física não encontra um correspondente à não conformidade, a abordagem adotada não é válida.

De acordo com Scutti (3) há três níveis de causa raiz na análise de falhas, que podem ser de origem física, humana ou latente. São consideradas causas físicas quando as falhas podem ser associadas aos componentes ou materiais empregados. Raízes humanas envolvem o fator humano, ou seja, alguma falha humana de julgamento, por exemplo, quando há inspeção inadequada dos componentes. As raízes latentes fazem referência a um erro humano, porém quando há falhas de treinamento para o processo produtivo, ou inspeção.

A classificação dos tipos de causa raiz física em grupos é uma maneira de priorizar qual aspecto do produto ou sistema precisa de correção. As quatro categorias fundamentais são: deficiência de projeto, defeito do material, defeitos de manufatura ou instalação e anomalia de vida útil. As que se originam da deficiência de projeto referem-se a comportamentos inaceitáveis de um produto ou sistema que seja inerente a um projeto deficiente. Nesta classificação é incluída a seleção e especificação de materiais e processos de manufatura (3).

O projeto envolve ainda a identificação e definição da necessidade do produto, os requisitos de desempenho, as limitações, previsão das condições de serviço e os riscos associados à falha. A escolha incorreta de um material, que seja

incapaz de oferecer a resistência desejável para o projeto, seja ela resistência mecânica, fadiga, fratura, corrosão, temperatura, desgaste, também é considerado uma deficiência de projeto. Os defeitos associados ao material correspondem às imperfeições ou descontinuidades que resultam em redução da capacidade do componente exercer seu máximo desempenho. Dentre os defeitos, podemos citar as juntas frias, lascamentos, cavidades, porosidade, inclusões, delaminações, trincas, etc. Os defeitos de manufatura e instalação são aqueles que surgem durante o processo de fabricação do componente ou durante sua instalação, mas que não esteja associado ao material. Entre eles estão as trincas e lascamentos por usinagem, superaquecimento, crescimento de grão, defeitos de soldagem, etc. As anormalidades na vida útil são fortemente dependentes das condições em que o componente opera em serviço. A vida útil de um componente inclui o funcionamento, manutenção, inspeção, reparo e modificações (3).

É importante lembrar que nem sempre é possível determinar a causa raiz e nem sempre determiná-la significa resolver o problema. A partir de uma análise é necessário que ações cabíveis sejam tomadas pelos responsáveis do projeto a fim de sanar o problema.

O analista deve ter em mente que erros e falta de atenção durante a análise podem implicar em consequências econômicas ou não econômicas (danos morais, psicológicos) para clientes e empresas. Para tanto se devem evitar erros. Em casos que envolvem vítimas, o profissional deve se limitar à sua área de conhecimento. Quando o problema envolve diversas origens de causas latentes, é necessária a consulta de diversos especialistas (2).

Um único teste não constitui uma fonte confiável de informações para a análise, assim como há uma série de outros fatores que podem se tornar armadilhas para o analista, dentre elas, chegar a conclusões precipitadas, mau entendimento do problema, mau entendimento do funcionamento do sistema, subestimar o problema, superestimar o conhecimento ou destruir a amostra por erro de planejamento (2).

Outras fontes de informações, que nem sempre estão ao alcance do analista, incluem as informações coletadas nas peças quebradas, amostras de fatores externos que possam contribuir com a falha, fotografias, parâmetros de operação – pressão, temperatura, velocidade, etc. Entrevistas com testemunhas que estavam

próximas ao equipamento no momento da falha, para determinação de um possível histórico de manutenção ou mau uso. As entrevistas podem fornecer grande quantidade de informações a qualquer investigação. Elas podem confirmar as evidências físicas, desde que coletadas de forma precisa. As principais razões dessa coleta de dados é a obtenção de informações de primeira mão, dados circunstanciais e informações técnicas, com testemunhas, operadores e outros profissionais (3).

É importante preservar amostras de fragmentos próximos, lubrificantes e outros fluidos que façam parte do sistema. Se possível, é de boa prática coletar amostras de componentes semelhantes para comparação. Após a coleta de dados é necessário que haja uma análise em laboratório para verificar as evidências físicas e compreender quais os possíveis mecanismos de falha com base no conhecimento de engenharia. Dentre os procedimentos possíveis de se realizar laboratório, está a documentação fotográfica, exames não destrutivos, análise fractográfica, análise metalúrgica, determinação das propriedades mecânicas, análise das evidências e escrever o relatório (3).

Assim que bem definido o escopo, os objetivos da análise e a coleta de dados *in situ*, é preciso definir a melhor abordagem para a análise de acordo com o orçamento disponível. Mesmo as análises mais simples não são inúteis, pois frequentemente os profissionais envolvidos possuem algumas ideias do mecanismo da falha, ou propostas que aperfeiçoem o mecanismo. Em teoria, um analista possui uma grande diversidade de ferramentas à sua disposição, no entanto, nem todas as análises exigem tanta profundidade, como aquelas que possuem pouco interesse econômico, ou se seu ambiente de trabalho não dispõe de todos os recursos. É essencial sempre utilizar os métodos não destrutivos antes dos métodos destrutivos e certificar que um teste destrutivo seja viável ou necessário (2). Na Tabela 1 se encontram as ferramentas e seus principais usos.

Ferramenta	Uso
Intelecto	Estruturação, fornecimento e coleta de informações. Planejamento da investigação, formulação de perguntas, cruzamento de informações
Olhos	Exame visual dos componentes, do contexto
Comunicação	Condução das entrevistas com testemunhas e cliente
Ferramentas de aumento	Aumento dos detalhes, busca de marcas características nas superfícies de fratura, busca de possíveis defeitos de manufatura
Macrofotografias	Facilita a compreensão da fratura, fornece informações de carregamento e orientação dos carregamentos.
Exame visual dos efeitos do meio	Busca por marcas causadas por fatores ambientais
Exame visual de desgaste	Entendimento das marcas de desgaste, de acordo com sua natureza e materiais envolvidos
Fotografia com controle de proximidade e iluminação	Documentação de detalhes importantes. Em alguns casos, a documentação fotográfica de cada etapa da análise é requerida.
Testes não destrutivos	Radiografia, ressonância magnética, inspeção por líquido penetrante, para estudo de trincas, porosidade e outros detalhes que podem ser detectados por esses métodos
Microfractografias	Determinação de comportamento frágil ou dúctil, fratura intergranular ou por clivagem por meio de MEV. Determinação de composição química por EDS
Metalografia	Análise da microestrutura, caminho da trinca
Testes mecânicos	Teste de dureza, propriedades mecânicas: tenacidade, limite de escoamento, etc...

Tabela 1 – As ferramentas e usos de recursos para análise de falhas (2).

Um teste destrutivo inclui qualquer processo de corte da peça. No entanto, mesmo ao mover fragmentos é possível perder informações que poderiam ser obtidas através da posição deles. O mesmo vale para a limpeza da peça: não limpar a peça pode condená-la a um processo de corrosão ao passo que ao limpá-la pode-se remover substâncias que causaram ou contribuíram para a falha ou para a degradação do material. Nesse caso, pode-se dizer que as etapas não destrutivas devem ser relativizadas (2).

1.3 Classificações de falhas

Existem diversas formas de classificar as falhas e danos a materiais em termos de formas, mecanismos ou causas. Nenhum é necessariamente completo e consistente com a diversidade de possibilidades. Porém essas classificações ajudam a identificar atalhos na investigação. Para determinar as causas de falha no material, considera-se a presença de um estressor ativo. Um estressor é uma influência externa que pode ser causa direta ou indireta da falha. Compreender essas influências é importante para uma análise efetiva e para determinação da causa raiz. Normalmente a mitigação dos estressores é a solução mais lógica para reduzir a suscetibilidade à falha (3).

De acordo com Scutti (3) existem seis diferentes tipos de estressores, que podem ser mecânicos (esforço estático aplicado, cargas dinâmicas ou cíclicas, pressão, impactos, tensões residuais); químicos (exposição a agentes agressivos, problemas com compatibilidade de material); eletroquímico (material suscetível em ambiente úmido); térmicos (exposição a temperaturas elevadas, degradante ao material); por radiação (raio ultravioleta, radiação de outras naturezas); e elétrico (interferência por presença de campo eletromagnético)

As quatro categorias propostas por Scutti (3), distorção/deformação indesejada, fratura, corrosão ou desgaste, são as que melhor classificam as falhas de modo a discutir, prevenir e compreender as causas. Essas quatro categorias representam formas genéricas dos tipos de falhas e podem ocorrer duas ou mais simultaneamente em algumas fraturas. Elas se integram com as quatro causas raiz fundamentais. Para quaisquer tipos, o desempenho do material tem um papel

importante, uma vez que o desempenho do um componente depende diretamente do comportamento do material.

- **Distorção:** Uma falha por distorção ocorre quando uma variação geométrica impede um componente de funcionar corretamente, como por exemplo, o inchamento de um polímero dentro de um tubo, impedindo seu movimento, ou o encurvamento de um eixo, que impede seu movimento. As causas mais comuns de distorções em componentes incluem aumento de temperatura de metais, causando sua dilatação ou até mesmo mudança de fase, absorção de fluidos por não metálicos e encolhimento pós-cura (3).
- **Fratura:** é definida de forma geral como a separação de um material. Existem diversas formas e causas de fraturas, incluindo fratura frágil, dúctil, e mecanismos progressivos que podem levar à fratura final. O entendimento do desenho do componente, o carregamento, arredores e a aplicação de técnicas laboratoriais de técnicas investigativas, como a interpretação das superfícies fraturadas são essenciais para uma análise efetiva do componente fraturado (3).
- **Corrosão** é a degradação do material pelo meio. Nos metais, o mecanismo mais comum de corrosão é pelo fenômeno eletroquímico que ocorre entre a superfície exposta com um meio corrosivo. Outros mecanismos que podemos citar é a oxidação por exposição a alta temperatura e corrosão por sais fundidos. As superfícies corroídas apresentam pites, rachaduras, delaminações, que eventualmente convergem para uma falha por sobrecarga (3).
- **As falhas por desgaste** são resultantes de remoção ou deslocamento do material superficial por contato e movimento relativo, entre sólidos, líquidos ou gases. Há uma grande influência de atrito e lubrificação na taxa e severidade do dano por desgaste. Desgaste geralmente resulta em perda de material e de capacidade de carregamento, adesão, elevação da taxa de fricção e geração de limalhas (3).

1.4 A prevenção da falha

A prevenção começa com uma idealização do projeto, manufatura, instalação, operação, manutenção de um componente, de acordo com suas especificações. Nesse momento também se determina o grau de confiabilidade do componente. Existe um custo envolvido com a prevenção da falha, assim como há um custo envolvido com a aceitação delas (3).

Projetar com confiabilidade desde o início é a forma mais eficiente de atingir níveis de confiabilidade que reduzirão as falhas, assim como desenvolver uma especificação de desempenho que estabeleça um critério para aceitação do desempenho obtido, para eliminar dúvidas críticas. Quais são os aspectos importantes da forma, ajuste e função? Qual deve ser a vida útil? Quais são os estressores esperados e inesperados? (3).

Análise dos modos de falha e efeitos. – do inglês *Failure Modes and Effects Analysis* (FMEA) – é uma abordagem multidisciplinar que contribui para um projeto resistente a falhas. O procedimento FMEA envolve examinar cada componente, especulando como ele pode falhar e determinando como a falha do componente pode afetar o sistema. Esse procedimento ajuda o analista a desenvolver um entendimento mais profundo das relações entre os diferentes componentes do sistema e realizar quaisquer alterações para eliminar ou minimizar os possíveis efeitos indesejáveis da falha (3).

De acordo com Scutti (3) os passos para realizar o FMEA envolve identificar todos os modos de falha; determinar o efeito da falha para cada modo de falha, localmente e para o sistema; classificar a falha por seus efeitos na operação do sistema e missão; determinar a probabilidade da falha ocorrer; identificar como a falha pode ser detectada; e identificar qualquer providência ou alteração no projeto para minimizar os efeitos da falha.

A necessidade de garantir o intercâmbio, compatibilidade de peças e fator de segurança levou ao desenvolvimento de códigos, padrões e regulamentações. Em geral, os códigos são um conjunto de leis ou regulamentações que resultam no controle legal de atividades. O termo “padrão” é frequentemente entendido como

especificação. No entanto, especificação é um termo que se refere a características mais refinadas de um componente (3).

A seleção do material mais apropriado tem papel fundamental na minimização das falhas, assegurando confiabilidade ao componente. A escolha do material depende diretamente do produto final e da sua finalidade. Todos os requisitos funcionais devem ser considerados de modo a satisfazer os requisitos do projeto, bem como satisfazer o perfil econômico. Uma das considerações mais comuns durante a escolha do material é atender as propriedades mecânicas requeridas. Por exemplo, para obter uma peça que seja resistente à fratura, pode-se escolher um material dúctil, reduzindo a probabilidade de ocorrer fratura frágil. Em contrapartida, um material dúctil é normalmente menos resistente ao desgaste, deformação e tensão. Pode-se então realizar tratamentos de superfície, para melhorar as propriedades de desgaste (3).

Nos metais, as propriedades que precisam ser consideradas para garantir a funcionalidade e reduzir a probabilidade de falhas são: resistência à tração; limite de resistência; módulo de elasticidade; ductilidade; resistência à fadiga; tenacidade; dureza; tensão de cisalhamento; usinabilidade; coeficiente de atrito; resistência ao impacto; resistência à corrosão; densidade; coeficiente de expansão térmica; condutividade térmica; resistividade elétrica (3).

Atingir a vida útil esperada para um sistema também é responsabilidade do usuário que deve operar e realizar a manutenção do equipamento conforme o estabelecido pelo fabricante. Para isso o fabricante deve definir quais as condições de operação apropriadas durante a fase de projeto e testes, fornecendo um manual de utilização junto com o produto. É responsabilidade do fabricante prever mau uso do equipamento, advertindo o usuário (3).

1.5 Fratura dúctil e frágil

A fratura frágil é um tipo de fratura que ocorre com pequena ou nenhuma deformação plástica antes da ruptura. Esse tipo de fratura ocorre normalmente em materiais de alta dureza e baixa tenacidade. De acordo com Wulpi (4) os fatores que devem estar presentes para que ocorra a fratura frágil em um material normalmente dúctil são: concentradores de tensão, tensão aplicada e baixas temperaturas.

Concentradores de tensão geralmente estão presentes devido à geometria de um projeto, como em cantos vivos, estrias, furos e sulcos, ou em concentradores de tensão não intencionais, como trincas, trincas por corrosão sob tensão, defeitos de soldagem (4). Por Exemplo, uma trinca pode surgir e propagar rapidamente em uma junta soldada pelo efeito da fragilização por hidrogênio.

As fraturas frágeis possuem superfície bastante peculiar que permitem ser identificadas facilmente, como a ausência de deformação plástica na região fraturada, podendo apresentar deformação plástica ao redor dessa região, a posição da fratura, que ocorre perpendicularmente em relação à tensão de solicitação em serviço (tração) e marcas secundárias como as marcas de sargento, que é utilizada para identificar a região onde a fratura se originou. Fraturas frágeis geralmente se propagam por meio de planos de clivagem e/ou de forma intergranular. Em muitos casos é necessário estudar a superfície de fratura com microscopia eletrônica (4).

As razões para a fragilização dos contornos de grãos são frequentemente sutis e mal compreendidas. Sob certas circunstâncias, alguns metais estão sujeitos a migração ou difusão de elementos ou compostos fragilizantes para o contorno de grão (4).

Ao contrário da fratura frágil, a fratura dúctil possui um histórico de intensa deformação plástica antes da ruptura sendo essa sua principal característica. Um exemplo de fratura dúctil é o teste de resistência à tração de um corpo de prova de alumínio. Durante esse ensaio, é possível observar a intensa deformação plástica do metal, a formação de uma estricção e finalmente a ruptura em formato cônico.

A fratura dúctil ocorre com a aplicação de uma força excessiva sobre o metal que tenha a capacidade de absorver a energia aplicada, em forma de deformação plástica, antes da ruptura. A superfície de fratura não está necessariamente relacionada à direção da tensão. O relevo da superfície de fratura dúctil mostra-se

repleta de pequenas cavidades, comumente conhecidas como alvéolos (*dimples*), que dá à superfície um aspecto fibroso (4).

Os alvéolos surgem a partir das microfissuras que se originam a partir de descontinuidades localizadas de tensão, como em partículas de segunda fase, inclusões, contornos de grãos e pilhas de discordâncias. O tamanho dos alvéolos está associado com o número e distribuição das microfissuras (5).

A forma dos alvéolos carregam informações importantes sobre a direção da tensão aplicada (Figura 1). Às fraturas reservam-se cuidados especiais na interpretação da superfície analisada, devido às possíveis introduções de defeitos devido à quebra, como a fricção e pancadas das partes rompidas, causando marcas secundárias, que dificultam a compreensão da falha.

Há também riscos de danos na preparação da superfície para análise, como desbaste por agentes químicos durante a limpeza das peças oxidadas. Deve-se ater ao fato de que em alguns casos em que há cavidades, estas podem ser interpretadas como alvéolos, mas podem ser na verdade porosidades. Vale lembrar que as fraturas não são binárias: é possível observar em uma mesma superfície regiões em que a fratura foi por clivagem e outras regiões que a fratura foi intergranular. Pode-se dizer que há predominância de um dos mecanismos.

Essas diferenças podem ser resultado da orientação cristalina em relação à tensão aplicada, ou devido a diferenças na microestrutura do metal (4).

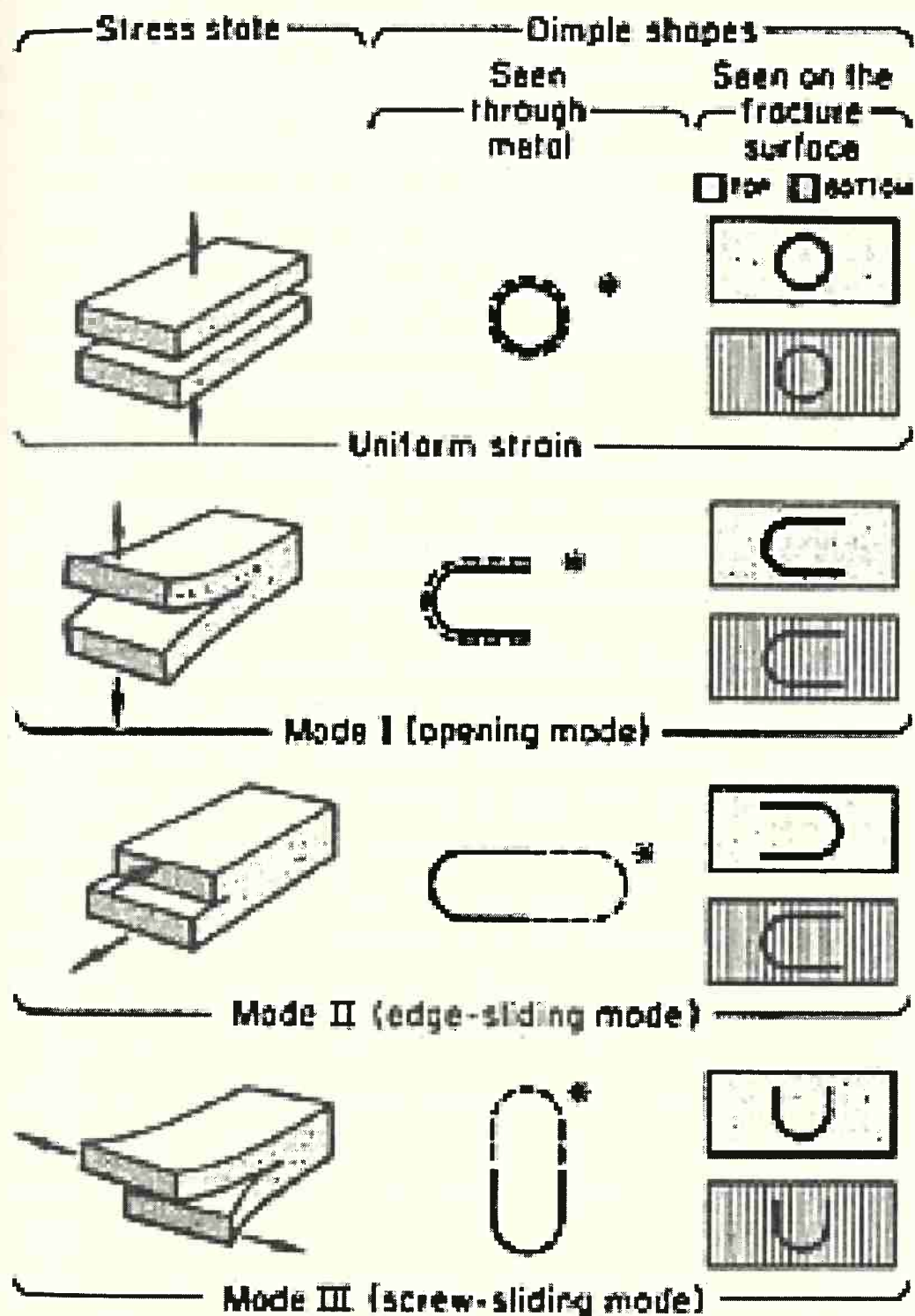


Figura 1- Ilustração do formato dos alvéolos (*dimples*) de acordo com o tipo de tensão a qual a peça fraturada foi submetida (4).

Para os analistas de falhas em materiais o termo sobrecarga refere-se à fratura, dúctil ou frágil, de um material quando são aplicadas cargas acima daquela suportada pelo material, seja pela tensão aplicada ou pela degradação das propriedades mecânicas do material por fragilização ou outros meios que levem o material a perder suas propriedades mecânicas. Para outros engenheiros a falha por sobrecarga limita-se a aplicação de esforços acima daquela prevista em projeto. No entanto esta concepção presume que há problemas com o projeto/aplicação e não leva em consideração a degradação do material, que leva o componente a falhar mesmo sob condições normais de carregamento (6).

Segundo Miller (6) as falhas por sobrecarga se classificam em três categorias: falha por sobrecarga devido à falta de resistência do material e subdimensionamento; falha por sobrecarga devido a concentração de tensão e defeito de material; falha por sobrecarga devido a alteração do material.

Falha dúctil por sobrecarga apresenta intensa deformação plástica visível macroscopicamente, com presença de ruptura de alvéolos, na escala microscópica. A presença de deformação plástica torna a fratura dúctil menos catastrófica que a frágil, por possibilitar o inspetor detectar a falha antes da ruptura. Devido a sua natureza, normalmente ocorrem durante a manufatura, instalação ou no início da vida útil e geralmente é atribuída a falha de projeto, mau uso, escolha incorreta de material, etc. No entanto é necessário levar em consideração a degradação do material, portanto analisar o material a fim de encontrar a causa raiz (6).

Falha frágil por sobrecarga é caracterizada por pouca ou nenhuma deformação plástica visível macroscopicamente. Em escala microscópica, podem haver componentes de fratura dúctil e frágil, mas macroscopicamente a fratura apresenta pouca ou nenhuma deformação plástica. A energia é geralmente absorvida pela criação de superfícies, isto é formação de trincas, por isso, normalmente apresentam múltiplas trincas e estilhaços. A fratura frágil nem sempre é uma deficiência do material característica, sendo um resultado comumente observado em casos de sobrecarga. Na superfície de fratura, pode-se identificar fratura por clivagem transgranular e intergranular (6).

1.6 Fratura por fadiga

Historicamente a investigação dos casos de desintegração da fuselagem dos aviões *Comet* da empresa britânica *De Havilland Aircraft Company* levou a um intenso estudo das estruturas destes aviões até a compreensão das causas dos acidentes. O *Comet* foi um avião comercial pioneiro a utilizar a tecnologia a jato, o que no início dos anos 1950 foi um avanço tecnológico indiscutível. Com velocidade máxima de 900 km/h e altitude cruzeiro de 42,7 mil pés (13 km) o avião à jato superava o avião com motor a pistão mais avançado em operação na época, o *Lockheed Super Constellation*, com velocidade máxima de 540 km/h e teto operacional de 24 mil pés (7,3 km). A altitude é um fator que influencia o consumo de combustível e proporciona um voo com menos turbulência, porém acima de 7 mil pés (2,4 km) há necessidade de compensar a diferença de pressão com o meio externo na cabine da aeronave (7).

Dois grandes acidentes com o *Comet* em 1954, até então misteriosos, envolvendo aeronaves com pelo menos dois anos de operação em altitude cruzeiro, levou os engenheiros ingleses a investigarem as possíveis causas envolvidas na aparente explosão das aeronaves. Em um primeiro momento, suspeitaram de uma explosão por vapores de combustível. O segundo acidente, levou os engenheiros a considerar outras hipóteses. Assim, alguns testes hidrostáticos foram realizados na fuselagem de um terceiro avião do mesmo modelo, já com mais de 1200 ciclos de compressão e descompressão da cabine. Ao atingir pouco mais de 1800 ciclos, a fuselagem explodiu e a partir dos fragmentos estudaram-se as possíveis causas dessa explosão (7).

Os estudos foram conduzidos pelo engenheiro Arnold Hall do centro de pesquisa aeronáutico britânico *Royal Aircraft Establishment* (RAE) e chegou-se a conclusão que os ciclos de compressão e descompressão da cabine – com pressões até 50% maiores do que aquelas praticadas nos aviões que voavam a altitudes menores, como os *Lockheed* – produziam trincas nas escotilhas da saída de emergência e nas janelas. Observou-se a concentração das trincas próximas aos cantos vivos presentes nas janelas e escotilhas, que se propagavam com o carregamento cíclico da pressurização da cabine (7).

Fraturas por fadiga são geralmente consideradas o tipo mais grave de fratura, pois ocorrem em serviço, sem sobrecargas e sob condições normais de operação. As fraturas por fadiga frequentemente ocorrem sem indícios de que a falha esteja prestes a acontecer. Em ambientes corrosivos, ou se o componente é submetido a ciclos com sobrecarga a possibilidade aumenta (4).

A fratura por fadiga é resultado de carregamento cíclico repetitivo e geralmente ocorre em três estágios: iniciação (estágio 1), propagação (estágio 2) e ruptura (estágio 3) (5).

No estágio 1 o fator mais significativo para a iniciação da trinca são as alterações irreversíveis na estrutura cristalina, causada pela aplicação repetitiva da tensão de cisalhamento, que movimenta discordâncias para as bordas da estrutura cristalina. Eventualmente quando muitas discordâncias se encontram em uma mesma região, forma-se a microfissura, que dá início ao primeiro estágio (4).

A partir da trinca inicial, os carregamentos contínuos fazem a trinca se propagar dentro do material, muitas vezes deixando estrias na superfície de fratura. Existem pelo menos dois modelos que explicam o segundo estágio e a formação das estrias. O primeiro modelo é baseado na teoria de que há deformação plástica na ponta da trinca (Figura 2). O segundo modelo é baseado no escorregamento de planos na região da ponta da trinca (5).

Estrias nem sempre são facilmente visíveis, como por exemplo em materiais com dureza elevada – 50 HRC – provavelmente pela falta de ductilidade. Com a propagação da trinca, a área transversal local do material diminui, o que eventualmente enfraquece a peça até que a tensão a qual o componente está submetido rompe o material restante. Essa situação é classificada como o estágio 3, sendo um evento em que a ruptura ocorre por modo dúctil e/ou frágil, dependendo do material e da tensão aplicada. As fraturas por fadiga possuem características que auxiliam a identificar facilmente esse tipo de fratura. Muitas vezes para analisar essas evidências, usa-se até 50x de aumento (4).

Devido às baixas tensões em que a fratura por fadiga ocorre, geralmente apresenta pouca ou nenhuma deformação plástica em parte da superfície de fratura.

No entanto, em falhas de baixo ciclo e altas tensões aplicadas, pode haver evidência de deformação plástica (4).

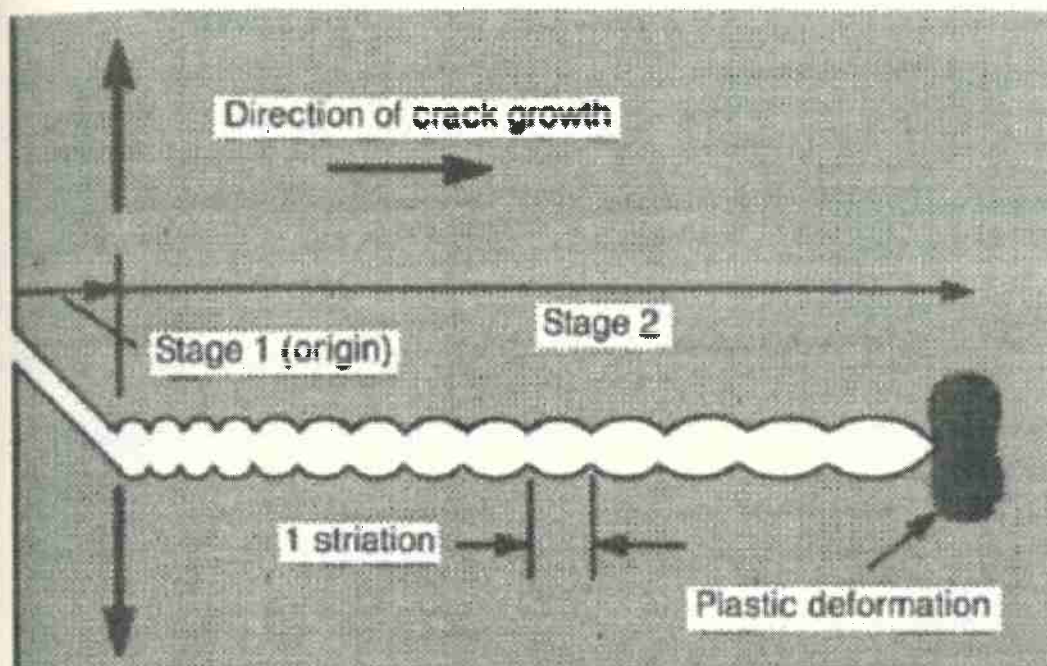


Figura 2 – desenho esquemático das etapas de um possível mecanismo de fratura por fadiga (4). Considerando que a trinca está se propagando da direita para esquerda, a fratura começa em uma trinca inicial indicada por *Stage 1 (origin)* e se propaga conforme a segunda região, indicada por *Stage 2*. Nessa segunda região, a fratura se propaga por pequenos avanços por deformação plástica (*plastic deformation*) na ponta trinca, que deixam as estrias, indicada como *1 striation*.

Marcas de praia: marcas de praia estão presentes em muitas fraturas por fadiga. São marcas deixadas pela interrupção da propagação da trinca, geralmente em paradas do sistema ou quando a tensão aplicada não é suficiente para propagar a trinca. A diferença de tempo de corrosão das superfícies expostas – a região mais próxima à origem está exposta à oxidação há mais tempo que as novas regiões de propagação da trinca - explica a presença das marcas de praia e mudanças bruscas na magnitude/frequência da carga – são efeitos que causam um aumento significativo no espaçamento das estrias (4).

Marcas de catraca: são marcas que ocorrem quando há vários locais de origem de trincas adjacentes. Em cada local propagar-se-á sua própria trinca de fadiga. As marcas observadas não correspondem ao ponto de origem, mas à região entre dois pontos de origem distintos. As marcas de catraca são perpendiculares à superfície que originou a trinca e nos eixos essas marcas são radiais (4).

1.6.1 Propagação da trinca de fadiga

A magnitude do campo de tensões em torno da ponta da trinca é quantificada pelo fator de intensidade de tensão, K . A comparação deste parâmetro com a tenacidade do material à fratura possibilita prever se um componente trincado irá ou não romper quando submetido a alguma solicitação (8).

A primeira evidência quantitativa para o efeito da concentração de tensão foi proposto por Inglis através da análise de furos elípticos em amostras planas. O furo consistia em uma elipse com comprimento $2a$ e largura $2b$ com aplicação da tensão perpendicular ao maior eixo da elipse (9).

A tensão na ponta do maior eixo é dada por:

$$\sigma_A = \sigma \left(1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right) \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

$$\rho = \frac{b^2}{a} \quad (\text{Eq. 2})$$

ρ é o raio de curvatura da ponta da elipse.

Observa-se que o efeito da concentração de tensão será tanto maior quanto menor for o raio de curvatura da elipse. No entanto, nota-se que nessa equação, para um raio de curvatura zero, tal como na ponta de uma trinca, a equação resulta em uma tensão σ_A infinita e o material romperia com uma tensão aplicada σ próxima de zero. Esse paradoxo da trinca motivou Griffith a desenvolver uma teoria com base na primeira lei da termodinâmica para explicar o comportamento da trinca (9).

Segundo Griffith para uma trinca aumentar seu tamanho é preciso fornecer energia potencial suficiente para superar a energia de superfície do material. O equacionamento desse balanço de energia, para um incremento de área de trinca dA , sob condições de equilíbrio é expresso por (9):

$$\frac{dE}{dA} = \frac{d\Pi}{dA} + \frac{dW_s}{dA} = 0 \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

E é a energia total; Π é a energia potencial aplicada e W_s o trabalho de formação de superfície.

Aplicando a análise de tensão proposta por Inglis, Griffith mostrou que:

$$\Pi = \Pi_0 - \frac{\pi \sigma^2 a^2 B}{E} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

Π_0 é a energia potencial total de uma placa sem trinca e B a espessura da placa.

Uma vez que a formação de trinca envolve a criação de duas superfícies, o trabalho W_s é dado por:

$$W_s = 4aB\gamma_s \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde:

γ_s é a energia de superfície do material.

Substituindo as equações 4 e 5 em 3 obtém-se a equação para tensão de fratura:

$$\sigma_f = \left(\frac{2E\gamma_s}{\pi a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Eq. 6})$$

Há de se observar que a equação 6, com base na teoria de Griffith, é válida apenas para sólidos frágeis ideais. Assim sendo, Griffith obteve apenas uma boa aproximação experimental para a resistência à fratura de vidros, pois a equação não leva em consideração a resistência à fratura dos metais (9).

Levando a resistência à fratura em consideração, Irwin e Orowan modificaram a equação de Griffith para incluir os materiais capazes de deformar-se plasticamente. A expressão modificada é dada por:

$$\sigma_f = \left(\frac{2E(\gamma_s + \gamma_p)}{\pi a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde:

γ_p é o trabalho plástico por unidade de área de superfície tipicamente muito maior que γ_s (9).

Irwin propôs uma abordagem para fratura semelhante à de Griffith, com base em energia, definindo a Taxa de Alívio (G), que é uma medida de energia potencial absorvida para aumentar a extensão da trinca, onde:

$$G = - \frac{d\Pi}{dA} = - \frac{\pi \sigma^2 a}{E} \quad (\text{Eq. 8})$$

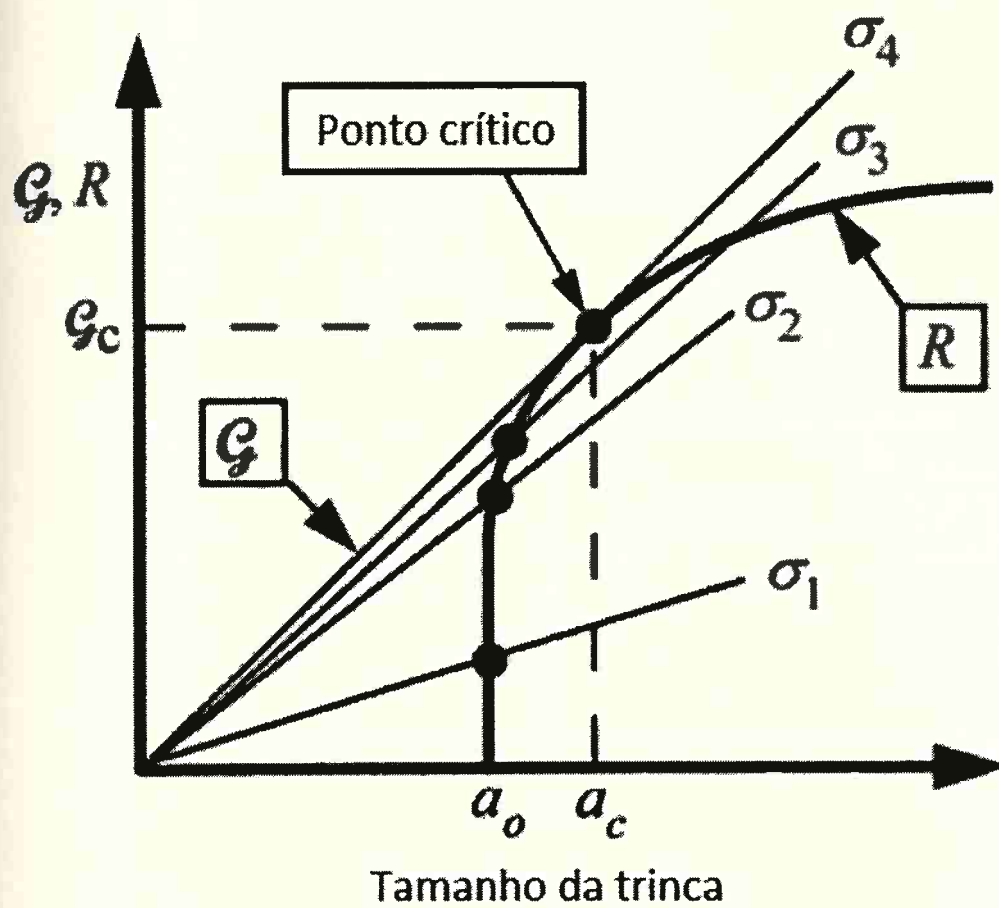
O aumento da trinca ocorrerá quando G atingir um valor crítico G_c , ou seja:

$$G_c = \frac{dW_s}{dA} = 2W_f$$

Onde:

W_f é a energia de fratura, que inclui o efeito plástico, visco elástico ou visco plástico, dependendo do material (9).

O crescimento da trinca pode ser estável ou instável, dependendo de como G e W_f variam com o tamanho da trinca. Para ilustrar esse comportamento, substituímos $2W_f$ por R, que é a resistência do material ao crescimento da trinca. O gráfico R x comprimento da trinca é chamado curva R (9) e para metais dúcteis pode ser representado tal como na Figura 3a e para materiais frágeis, tal como na Figura 3b.



(a)

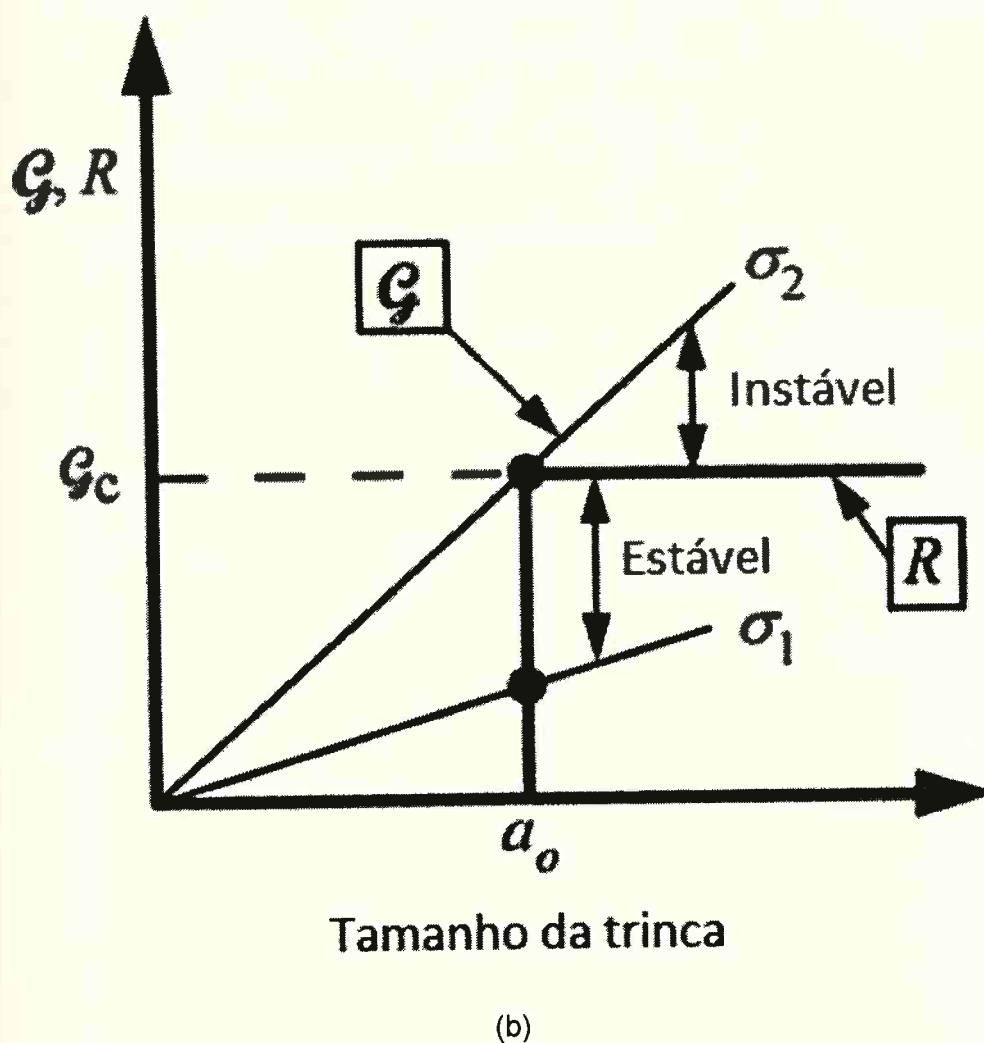


Figura 3 – Curva R para material com R crescente. Adaptado de (9)

A trinca cresce pouco quando a tensão aplicada atinge σ_2 mas não crescerá mais a menos que a tensão aumente. A trinca terá propagação estável até que o valor da tensão atinja σ_4 . Valores de tensão superiores a σ_4 farão a trinca se propagar de forma instável (9).

As condições para propagação estável podem ser expressas pelas equações 9 e 10:

$$G = R \quad (\text{Eq. 9})$$

$$\frac{dG}{da} \leq \frac{dR}{da} \quad (\text{Eq. 10})$$

Onde:

a é o comprimento da trinca.

A propagação instável da trinca ocorre quando:

$$\frac{dG}{da} > \frac{dR}{da} \quad (\text{Eq.11})$$

1.6.2 Fator de intensidade de tensão (K)

Definem-se 3 modos geométricos de carregamento da trinca I, II e III, representados pela Figura 4.

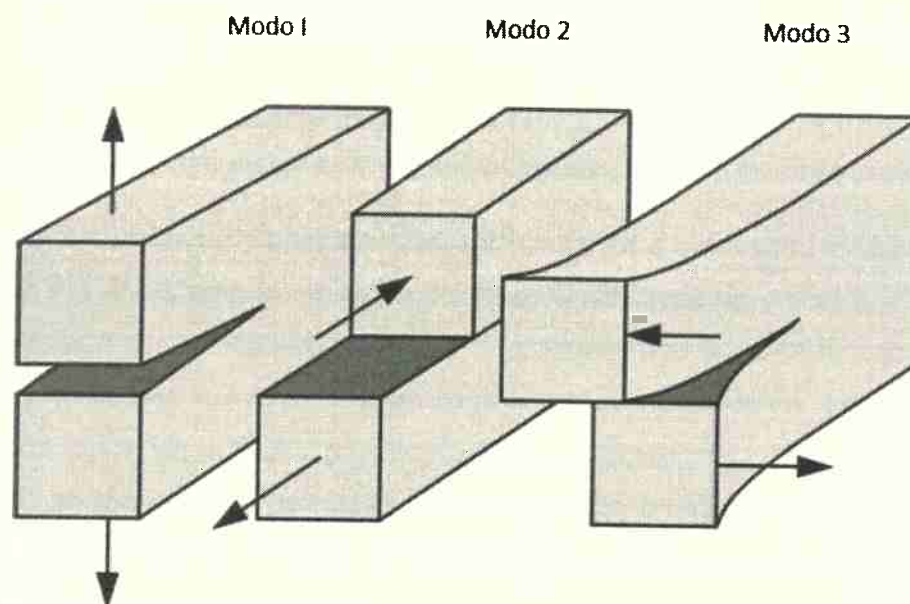


Figura 4 - Modos de carregamento da trinca. Adaptado de (9).

Dependendo da orientação entre o carregamento e a trinca, a carga aplicada tenderá a puxar a trinca para abrir em tração (Modo I), deslizar a trinca no plano (Modo II) ou deslizar a trinca fora do plano (Modo III). A maioria das pesquisas da mecânica da fratura e testes tem sido voltadas ao caso do escorregamento de tração (Modo I) (10).

O campo de tensão em um material elástico trincado pode ser dado pela expressão, em coordenadas polares:

$$\sigma_{ij} = \left(\frac{k}{\sqrt{r}} \right) f_{ij}(\theta) + \sum_{m=0}^{\infty} A_m r^{\frac{m}{2}} g_{ij}^{(m)}(\theta) \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde:

σ_{ij} é o tensor de tensões; r e θ são as coordenadas polares; k é uma constante relacionada ao fator de intensidade de tensões ($K = k\sqrt{\pi a}$); e $f_{ij}(\theta)$ uma função de θ (8).

Tensões próximas da ponta da trinca aumentam proporcionalmente com o K , podendo adotá-lo como único valor para avaliar a trinca. Para o Modo I se K_I é conhecido, podemos determinar a carga aplicada, a tensão e o tamanho da trinca (9) através da expressão:

$$K_I = \beta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (\text{Eq. 13})$$

Onde:

β é um fator adimensional de correção que depende da geometria da peça.

Se $a \ll b$, onde a é o semi comprimento da trinca e b é o semi comprimento da amostra, $\beta = 1$. Para uma trinca passante situada na borda da placa, $\beta = 1,12$ (10). Enquanto o fator de intensidade de tensão K for menor que um valor crítico chamado tenacidade à fratura K_{IC} (que é uma propriedade do material) a trinca pode ser considerada em modo estável. Quando K atinge K_{IC} devido ao incremento da tensão nominal ou ao crescimento do comprimento da trinca, a trinca propaga-se de modo instável, subitamente até a falha. O coeficiente de segurança (N_{FM}) para falha de fratura mecânica é definido por (10):

$$N_{FM} = \frac{K_{IC}}{K} \quad (\text{Eq. 14})$$

Observa-se que K é uma função do comprimento da trinca. Aplicando a Eq. 13 na Eq. 14 e conhecendo os valores de K_{IC} e do comprimento da trinca, determina-se a máxima tensão nominal permissível para um fator de segurança escolhido e vice e versa. O K_{IC} é uma propriedade do material e sua determinação é feita de modo empírico (10).

1.6.3 Curva de Paris-Erdogan

O crescimento da trinca pelo mecanismo de fratura por fadiga pode ser representado pelo gráfico $\log \frac{da}{dN} \times \log \Delta K$ da Figura 5. Nele se observam 3 regiões distintas: região I (Região do limiar), região II (Região de Paris) e região III (Região de fratura).

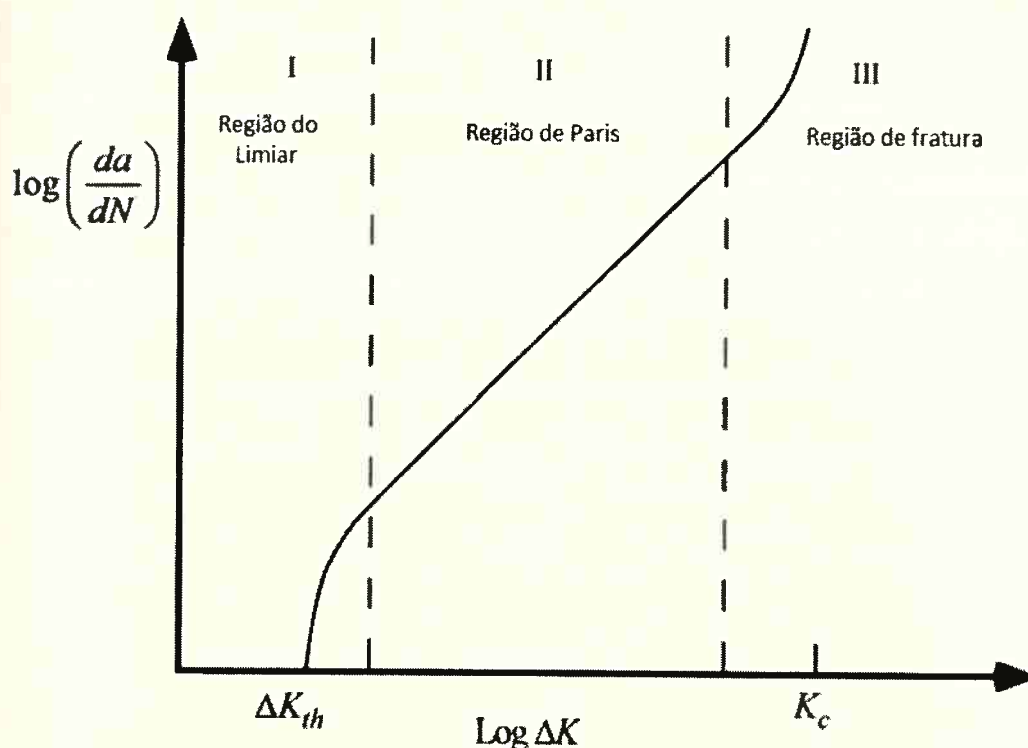


Figura 5 – Gráfico $\log da/dN \times \log \Delta K$ adaptado de (9).

De forma genérica, o crescimento da trinca por ciclo $\frac{da}{dN}$ é representado como uma função da amplitude da intensidade de tensão $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ e da razão $R = \frac{K_{min}}{K_{max}}$ (9). Sendo assim:

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R) \quad (\text{Eq. 15})$$

Na região I (região do limiar) se encontra o limiar da fadiga ΔK_{th} abaixo do qual a trinca não cresce. Acredita-se que esse limiar é definido por dois componentes: um intrínseco do material (microestrutura) e outro que é função de variáveis como a razão R (9).

A região II (região de Paris) corresponde à região em que a trinca se propaga de forma estável. Sua linearidade é descrita pela equação 16, conhecida como Lei de Paris. Nessa região, a taxa de crescimento da trinca não é influenciada pela microestrutura, à carga ou espessura da peça (9).

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (\text{Eq. 16})$$

Onde:

C e m são constantes do material, determinadas empiricamente.

Na região III (região de fratura) ocorrem clivagem e/ou coalescência de microfissuras. Nessa região ocorre o rompimento catastrófico quando se atinge o K_{IC} do material. É sensível à microestrutura, à carga e à espessura da peça.

1.7 Falhas em eixos

O eixo é uma barra, geralmente cilíndrica, maciça ou oca, utilizada para transmitir força ou momento por movimento axial (11). São componentes amplamente utilizados em equipamentos mecânicos, podendo apresentar complexidade geométrica devido a necessidade de encaixe com os demais componentes do sistema. As variações na geometria do eixo produzem regiões concentradoras de tensão, que precisam ser estudadas em projeto.

As fraturas em eixos ocorrem em regiões concentradoras de tensão, introduzidas durante o processo de fabricação e/ou durante o funcionamento. Os principais concentradores de tensão em eixos são rasgos de chaveta, montagem por interferência, cantos vivos nas extremidades ou furos. Os concentradores de tensão incluem defeitos de usinagem e tensões residuais de tratamento térmico (11).

Através de diagramas de corpo livre (Figura 6) analisam-se as tensões que atuam no corpo, que podem ter natureza de compressão, torção ou tração.

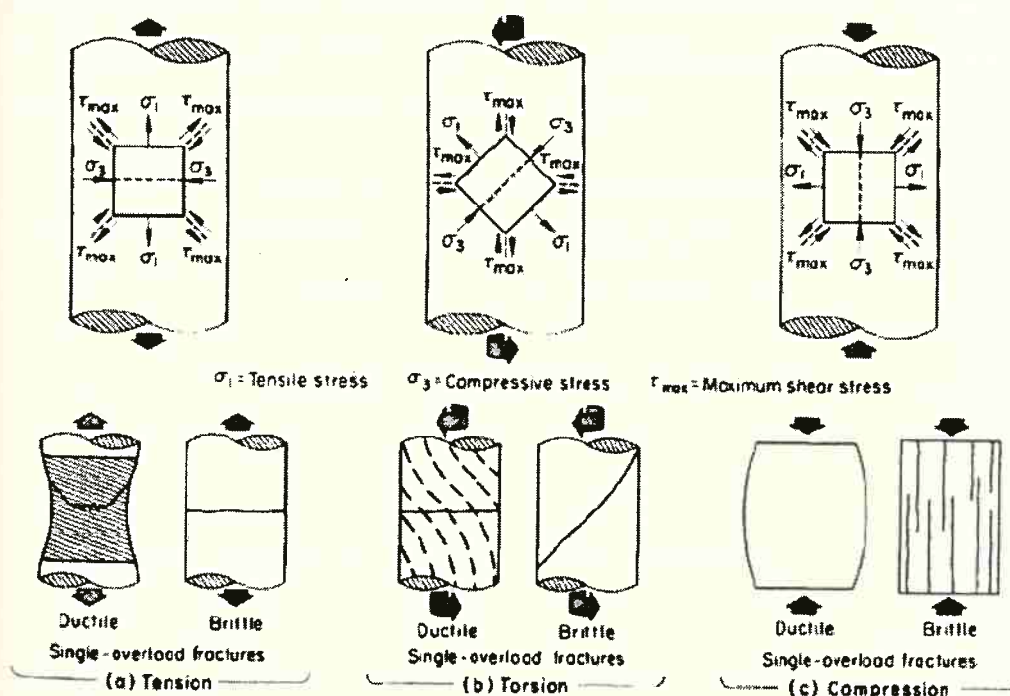


Figura 6 – Diagramas de corpo livre mostrando a orientação das tensões e tensões de cisalhamento em um eixo e o comportamento dúctil e frágil de materiais sob esforço simples. (a) Tração; (b) Torção; (c) Compressão. σ_1 = tensão de tração, σ_3 = tensão de compressão, τ_{max} = máxima tensão de cisalhamento. Adaptado de (11).

Sob tração pura (Figura 6a), a tensão de tração (σ_1) é longitudinal, enquanto a tensão de compressão (σ_3) é radial. A máxima tensão de cisalhamento ($\tau_{\max}$) está a 45° em relação à direção longitudinal do eixo. Em um material dúctil essa tensão de cisalhamento por tração causa uma considerável deformação – alongamento e estrangulamento da seção transversal – antes da fratura, que pode assumir formato cônico. Em materiais frágeis, a separação ocorrerá perpendicularmente à tensão de tração, portanto, a superfície de fratura é transversal ao eixo (11).

Sob torção pura (Figura 6b), o sistema de tensão gira 45° em relação ao sistema de tensão para tração, dessa forma, a tensão máxima de cisalhamento passa a ter uma componente radial e uma longitudinal. Em materiais dúcteis a deformação causada pela torção não é facilmente percebida. Em materiais frágeis, a separação também ocorre perpendicular à tensão de tração, portanto a superfície de fratura ocorrerá a 45° com forma helicoidal (11).

Sob compressão pura (Figura 6c), o sistema de tensão gira 90° em relação ao sistema de tensão para tração, assim, a tensão de tração (σ_1) é radial. Em materiais dúcteis, normalmente não há ruptura. O eixo sofre encurtamento e abaulamento devido à tensão de cisalhamento. Em materiais frágeis, a superfície de fratura tende a ocorrer perpendicular à tensão de tração (σ_1) (11).

Em seções circulares um elemento diferencial retirado de qualquer lugar da superfície externa está sujeito a tensões de cisalhamento puro devido ao torque e varia de zero, no centro, até um máximo no raio externo (10).

$$\tau = \frac{T\rho}{J} \quad (\text{Eq. 17})$$

Onde:

T é o torque aplicado, ρ o raio até o centro geométrico da peça e J o momento de inércia.

Para uma seção circular oca de diâmetro externo d_e e diâmetro interno d_i o momento de inércia J é:

$$J = \frac{\pi(d_e^4 - d_i^4)}{32} \quad (\text{Eq. 18})$$

1.8 Objetivos do trabalho

- Analisar a falha de um eixo de saída da caixa de redução do veículo Baja da Equipe Poli, que rompeu em serviço, examinando o componente em seus aspectos físicos e químicos, a superfície de fratura e as propriedades mecânicas do material analisado e do escolhido em projeto.
- Fornecer sugestões com embasamento técnico para os responsáveis da Equipe Poli, para minimizar a ocorrência de novas falhas nos termos estudados por este trabalho.
- Acompanhar as modificações a serem realizadas no projeto, bem como auxiliar no exame visual do componente recebido em busca de defeitos perniciosos.

2 Materiais e métodos

O objeto de estudo desta análise é um eixo de saída da caixa de redução do Baja da Equipe Poli, cujo projeto prevê a utilização do aço SAE/AISI 4340 sem tratamento térmico de revenimento, ou seja, no estado temperado. De acordo com a equipe o projeto prevê um material com pelo menos 250 MPa de resistência à tração, que é a carga máxima prevista a qual a peça pode ser submetida e observou-se que tal peça teria capacidade de suportar até 500 MPa segundo as simulações feitas pela equipe no software de simulação ANSYS.

A caixa de redução é um componente mecânico que tem como objetivo reduzir a velocidade de rotação vinda da caixa de câmbio e aumentar o torque em relação ao eixo de entrada, por meio de engrenagens de diferentes diâmetros. Sobre o eixo foram feitas diversas análises, dentre elas a análise visual à vista desarmada, aumentos com lupa, análise em microscópio eletrônico, análise metalográfica e ensaio de dureza a fim de elencar os possíveis problemas e estudá-los para buscar esclarecimento sobre o caso.

O eixo foi removido da caixa de redução (Figura 7), desmontando-a cuidadosamente, para não introduzir na peça nenhuma avaria que pudesse comprometer a análise. O eixo foi retirado da engrenagem manualmente e em seguida o rolamento foi extraído com a utilização de uma prensa hidráulica disponível na oficina, uma vez que este estava montado no eixo por interferência. A peça foi armazenada em embalagem plástica, protegida pelo óleo da própria transmissão. Nenhuma outra intervenção mecânica ou química foi feita sobre a peça, para minimizar interferências externas que pudessem comprometer a análise.

2.1 Histórico da falha

O Baja é um veículo de competição montado em uma estrutura tubular, projetado para uso fora de estrada em competições técnicas e dinâmicas proposta pela SAE. Possui tração traseira, transmissão do tipo CVT com pratos de alumínio e correia de borracha e motor monocilindro à gasolina. Dentre os elementos mecânicos presentes no veículo, a transmissão é o único componente que as equipes têm maior liberdade de projeto e, portanto, torna-se um elemento estratégico. Por esse motivo cálculos e desenhos não foram fornecidos pela equipe. Devido à relação de patrocinador, a equipe preferiu manter a identidade do fornecedor em sigilo.



Figura 7 - Montagem do sistema de transmissão do Baja, com destaque para a caixa de redução – semelhante à estudada – ligada a dois semi eixos dotados de cruzeta.

O trem de força, conjunto formado pelo motor e transmissão, é montado na traseira do veículo, com um motor e uma caixa de transmissão ligada à caixa de redução, ao centro (Figura 7). O veículo não apresenta um conjunto de diferencial para mover as rodas, transmitindo integral e igualmente o torque sobre os dois semieixos e consequentemente para as rodas, através do eixo de saída estudado.

A falha do componente ocorreu durante uma competição em circuito *Off Road* (Figura 8) com superfície de rodagem composta por terra e cascalho, além de obstáculos, como troncos e rochas, terreno considerado de baixo atrito e bastante acidentado. Pela primeira vez o veículo foi projetado para transmitir o momento através de uma junta homocinética, a principal alteração no projeto. O eixo rompeu com apenas algumas horas de uso, desde os testes na oficina até a ruptura em prova.

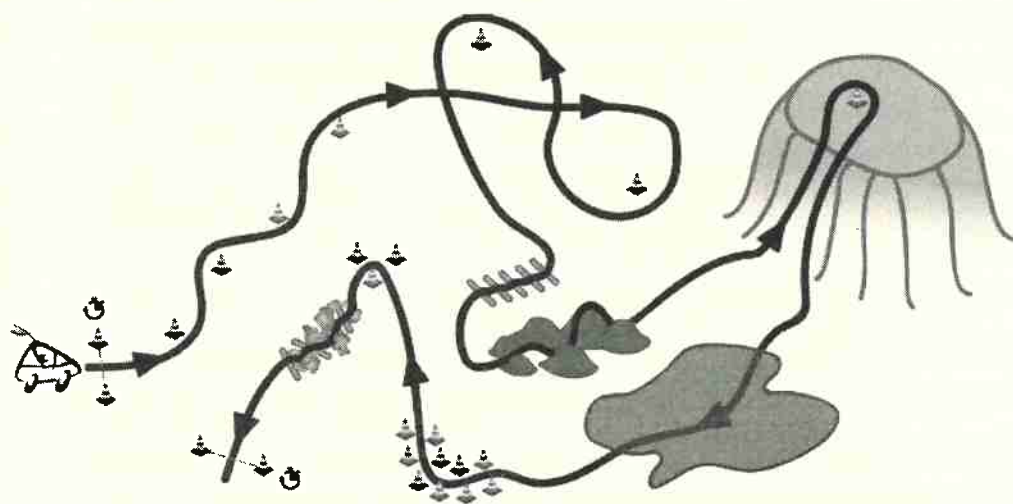


Figura 8 – Esquema do traçado do evento em que houve a falha. Retirado de (12)

Conforme descrito, o veículo parou imediatamente após a passagem por uma valeta, que se situava na saída de um morro, onde a roda travou. As peças fraturadas só foram detectadas pela equipe no momento da desmontagem do carro na oficina da Equipe Poli, nas dependências do Departamento de Engenharia Mecânica da Poli-USP.

Por meio de entrevista com os membros da equipe, suspeita-se que a falha tenha sido causada por um defeito na produção da peça, que possivelmente recebeu um tratamento térmico fora das especificações do projeto. Esta suspeita é devido a uma informação do fabricante, que teria colocado um eixo de entrada com tratamento térmico, mas não soube informar se havia ou não tratado o eixo de saída.

2.2 Material do eixo

O aço SAE 4340 pertence à família dos aços 4XXX, que compreende os aços cromo-níquel ligados ao molibdênio. É amplamente utilizado em construções mecânicas e pela indústria automobilística, devido as suas excelentes propriedades mecânicas, para a fabricação de pontas de eixo, árvore de manivelas, bielas e outros componentes com elevada solicitação mecânica.

O molibdênio age como um elemento de liga com a finalidade de melhorar as propriedades em sinergia com o manganês, cromo e níquel. Sua adição aumenta a temperatura de crescimento de grão de austenita, aumenta a temperatura de revenimento, ductilidade e tenacidade da liga. Melhora a temperabilidade, especialmente em ligas que contenham cromo e elimina a fragilidade ao revenido. (13)

A liga cromo-níquel-molibdênio mantém boas propriedades mecânicas quando submetidos aos tratamentos de têmpera e revenimento, que normalmente fragilizam outras ligas de aço. Dessa forma, podem-se atingir elevados valores de dureza (13) sem comprometer demasiadamente as demais propriedades, atribuindo à liga bom desempenho de resistência à fadiga, altas cargas e alta ciclagem.

A composição básica do aço SAE 4340 é mostrada na tabela:

Composição básica do aço SAE 4340							
C	Mn	P(Max)	S(Max)	Si	Ni	Cr	Mo
0,38- 0,43	0,60- 0,80	0,035	0,040	0,15- 0,35	1,65- 2,00	0,70- 0,90	0,20- 0,30

Tabela 2 - composição do aço AISI/SAE 4340. Valores em porcentual de massa (13)

A alta temperabilidade da liga SAE 4340 se deve principalmente pela presença de níquel em sua composição, que estabiliza a austenita na temperatura de austenitização e a partir dela, durante o processo de têmpera, formar-se-á a martensita. É importante tomar o cuidado para que a peça não se torne excessivamente frágil, devido ao elevado endurecimento, após o este tratamento. O endurecimento é apreciado quando a peça será submetida à desgaste em uso

(atrito), no entanto é indesejável quando a peça será solicitada em tração, torção e/ou compressão.

Devido a sua elevada dureza, o aço SAE 4340 apresenta difícil usinabilidade no estado temperado. De acordo com as tabelas encontradas em (14), para ferramentas de corte de aço rápido, carbetos, *cermets* e cerâmicas, deve-se realizar a usinagem sobre o material recozido. No entanto, pode-se usinar o material no estado temperado e revenido desde que se utilize baixas velocidades de rotação, avanço e profundidade de corte, conforme a tabela a seguir:

Parâmetros da máquina	Dureza do metal usinado		
	15 HRC	47 HRC	52 HRC
Velocidade (RPM)	1090	350	226
Avanço (mm/revolução)	0,48	0,15	0,10
Profundidade de corte (mm)	3,05	3,05	3,05

Tabela 3 – efeitos da dureza sobre os parâmetros de usinagem. Adaptado de (14).

2.3 Metodologia de análise de falha

A desmontagem da caixa de transmissão foi feita com uso de ferramentas apropriadas e a limpeza do óleo feita sem uso de solventes, apenas com uso de papel absorvente. Foram realizadas fotografias de modo a registrar as principais características da peça, sequência de montagem do mecanismo, bem como da fratura em uma escala macroscópica.

Após as análises na escala macro, a amostra foi submetida a cortes de diversas seções, utilizando o método *cut-off*, quando as regiões adjacentes não fossem relevantes para a análise e utilizando o corte no equipamento ISOMET a 375 RPM com disco diamantado e refrigeração constante, para evitar as alterações na microestrutura que podem ser introduzidas pelo calor gerado por um corte muito rápido, o surgimento de novas trincas e/ou o rompimento total da peça restante. As regiões do corte foram escolhidas de modo a preservar a superfície trincada do eixo.

Todas as amostras cortadas (Figura 9) foram embutidas em baquelite e passaram por etapas de limpeza realizadas seguindo o padrão adotado pelo departamento, que inclui a limpeza da peça com álcool etílico absoluto para remoção de óleos, lavagem da peça com detergente neutro para remoção de outros resíduos sem uso de abrasivos e ou escova, enxágue da peça em água corrente e posterior enxágue com álcool etílico para facilitar a evaporação da água na superfície. As amostras foram secas com ar quente e guardadas em embalagem plástica individual.

A porção da amostra com a superfície de fratura ficou retida pela equipe para apresentação à SAE Brasil. Dessa forma ficou exposta à manipulação e consequente oxidação e carregam uma grande diversidade de partículas indesejadas à análise, como poeira, solventes, lubrificantes, etc., que não fazem parte desta análise e puderam ser removidos antes da análise através de limpeza por ultrassom submersa em álcool etílico e agitadas por 20 minutos.

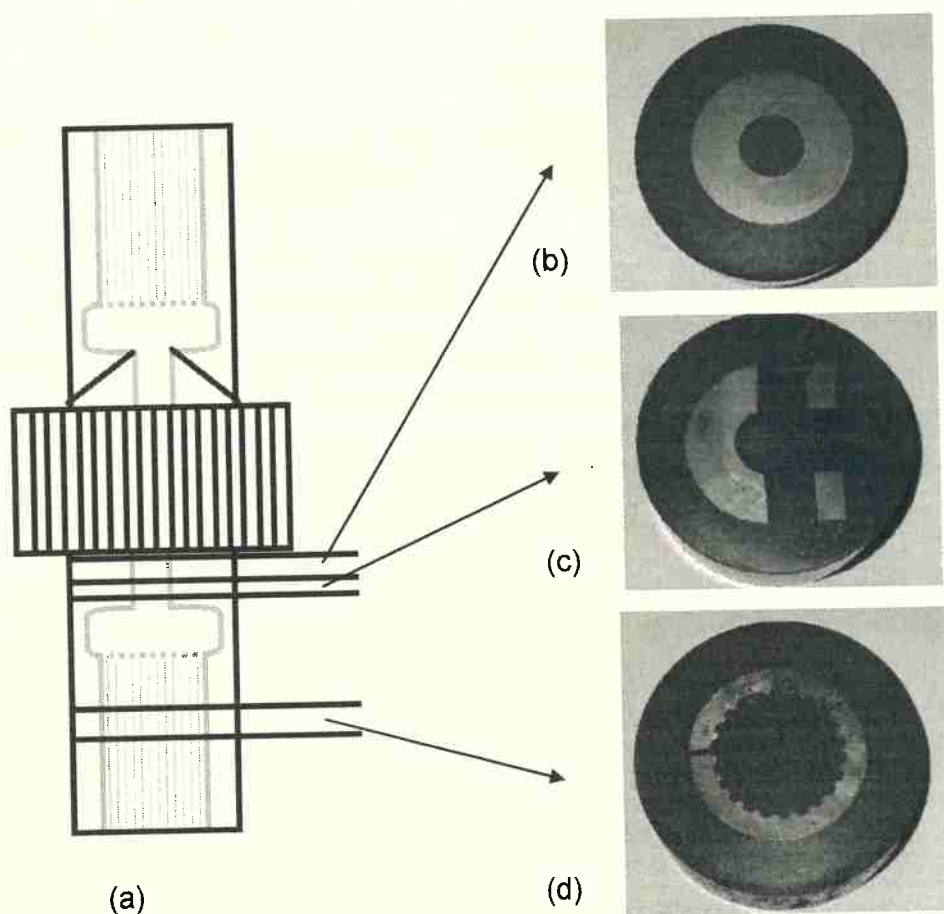


Figura 9 – Preparação das amostras para análises em microscopia óptica e dureza. (a) Regiões de corte no equipamento ISOMET; (b) Amostra 3: corte transversal; (c) Amostra 2: corte transversal e longitudinal; (d) Amostra 1: corte transversal.

Através da microscopia eletrônica de varredura foram realizadas micrografias da superfície de fratura no Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) do Departamento de engenharia mecânica da Poli-USP, no microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo JSM 6010LA fabricado pela JEOL e no microscópio eletrônico de varredura Philips XL 30 do Labmicro do PMT, além de caracterização por microanálise química por EDS (*Energy-dispersive Spectroscopy*) para a obtenção da composição da amostra, microscópio do LFS.

A análise em microscopia óptica foi realizada em todas as amostras, para obter um comparativo da microestrutura nas diferentes geometrias da peça. Na amostra 2 (Figura 9c) foi analisada a microestrutura do corte transversal e

longitudinal. Todas as amostras foram lixadas para obter uma superfície plana e polidas com pasta de diamante ($6\text{ }\mu\text{m}$ / $3\text{ }\mu\text{m}$ / $1\text{ }\mu\text{m}$). Para a análise em microscópio óptico, foi feito o ataque químico com Nital 3% por aproximadamente 10 segundos em cada amostra.

Os ensaios de dureza foram feitos sobre as amostras 1 e 3 no durômetro Testor disponível no Laboratório de Caracterização Microestrutural Hubertus Colpaert (LCMHC) no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP. De acordo com o responsável, o equipamento estava calibrado e foi utilizado 150 kg de massa, na escala *Rockwell C* (HRC).

3 Resultados

3.1 Inspeção visual

Durante a desmontagem da caixa de transmissão para a coleta da peça fraturada, não foi observado nenhum tipo de contaminação – poeira, limalha, cavaco – na parte interna da caixa, que pudesse interferir no funcionamento do mecanismo ou que apontasse para algum corpo estranho que tenha contribuído com a quebra por meio de travamento do sistema. Não havia nenhuma marca nos dentes das engrenagens – amassamento ou trinca - que indicasse travamento por alguma partícula, ou funcionamento anômalo do sistema, por exemplo, excentricidade da engrenagem ou desbalanceamento, que pudesse introduzir no sistema alguma vibração indesejada.

No entanto, a caixa de redução havia sido previamente desmontada pela equipe e os estilhaços da ponta do eixo fraturada foram inadvertidamente descartados. É possível que nesse momento quaisquer outras impurezas possam ter sido removidas, mas prevalece a análise visual realizada nos dentes da engrenagem, que não apresentou nenhum tipo de avaria. O eixo foi entregue ainda montado na caixa de redução, preso a um dos rolamentos e à engrenagem de saída da redução.

O eixo estudado é montado na caixa de redução conforme a Figura 10, ligando-se à engrenagem por meio de estrias. Na imagem o eixo aparece removido da engrenagem, porém sobreposto à posição em que estava instalado. Em cada saída do eixo, é montado um rolamento por interferência, que serve como mancal para montagem na carcaça de alumínio. Não foram detectadas trincas, amassamentos, perfurações ou outras avarias na carcaça. Na peça recebida não há presença de deformações plásticas por ferramenta.

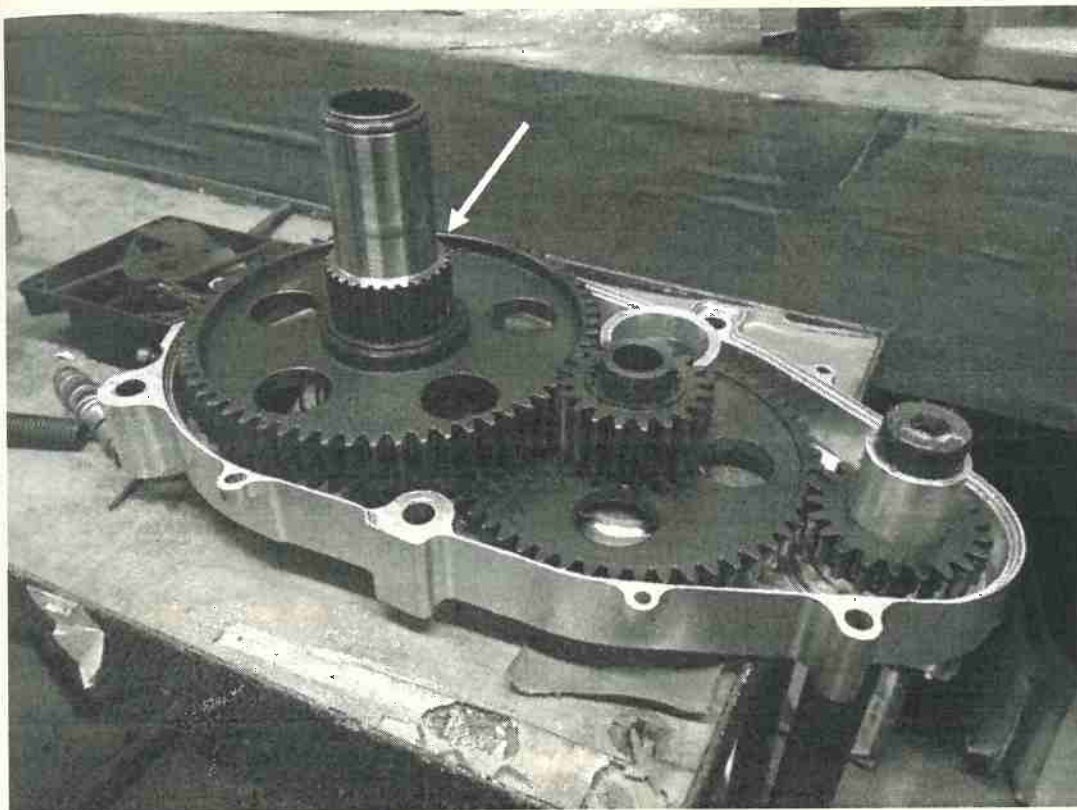


Figura 10 – Montagem do eixo na caixa de redução, mostrando a posição da peça fraturada (vide seta).

Na parte externa à caixa de redução, estão os semieixos de transmissão, que ligam a caixa de transmissão às rodas do veículo. A montagem externa à caixa de redução é composta por uma junta homocinética, que é apresentada totalmente desmontada do restante do sistema na Figura 11. Através dessa montagem, o momento aplicado ao eixo de saída é transmitido às rodas.



Figura 11 – Sequência de montagem das peças que compõem a transmissão. O eixo de saída da caixa de redução (à direita) conecta-se à junta homocinética (centro). A terceira peça, da direita para a esquerda, é a ponta do semieixo – componente interno da junta homocinética. Superfície de fratura não é mostrada na fotografia, mas ocorreu no componente apontado pela seta.

A junta homocinética (Figura 12) é a parte do semieixo que liga o eixo de saída da caixa de redução à roda e permite que o torque seja transmitido entre dois eixos conectados entre si, formando um ângulo que pode ser variado dentro do limite físico do componente, por meio de rolamento, dessa forma, reduz-se o efeito da flexão sobre o eixo de saída, permitindo que a suspensão tenha um curso livre.

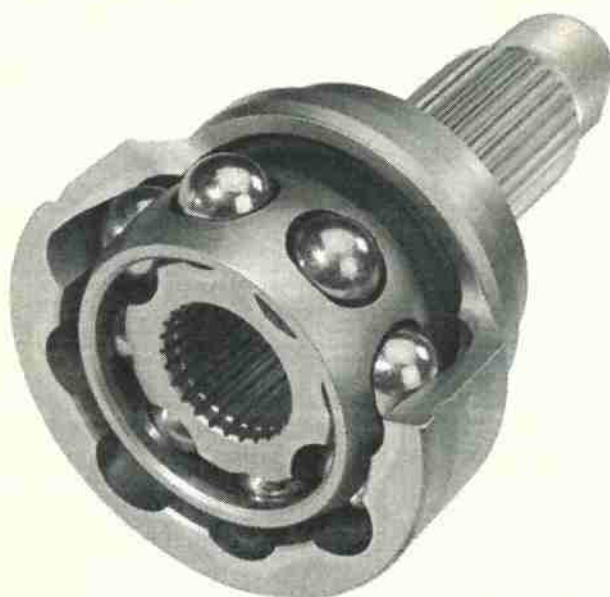


Figura 12 – Imagem ilustrando uma junta homocinética, com semelhança à utilizada pelo projeto da equipe. Retirada de www.gkn.com/en/our-divisions/gkn-driveline/our-solutions/cvjs/cv-joint-solutions, acessada em 03/06/2018.

No eixo estudado, é possível verificar uma grande quantidade de riscos de usinagem em toda a superfície. Essas marcas de usinagem tornam-se regiões concentradoras de tensão que podem dar origem a trincas, favorecendo o processo de fratura por fadiga, funcionando como pré-trinca.

A rugosidade superficial após a usinagem afeta a resistência à fadiga de um material, que deve ser levada em consideração quando se determina a vida em fadiga de um componente (10), como mostra o gráfico da Figura 13. No caso de um aço SAE 4340 temperado e revenido a 315 °C e com limite de resistência de aproximadamente 1800 MPa (ou 260 kpsi), rugosidade superficial pode reduzir o limite de fadiga do material em até 50% comparado à condição ideal (polimento espelhado) ou uma redução de 30% em relação à condição de superfície retificada.

De acordo com Lopes (15) o aumento da rugosidade superficial aumenta com o avanço da ferramenta no processo de usinagem. Existe um aumento no desvio padrão, permitindo supor que a variação do avanço resulta em uma variação proporcional nas irregularidades superficiais. O aumento da velocidade de corte melhora o acabamento superficial.

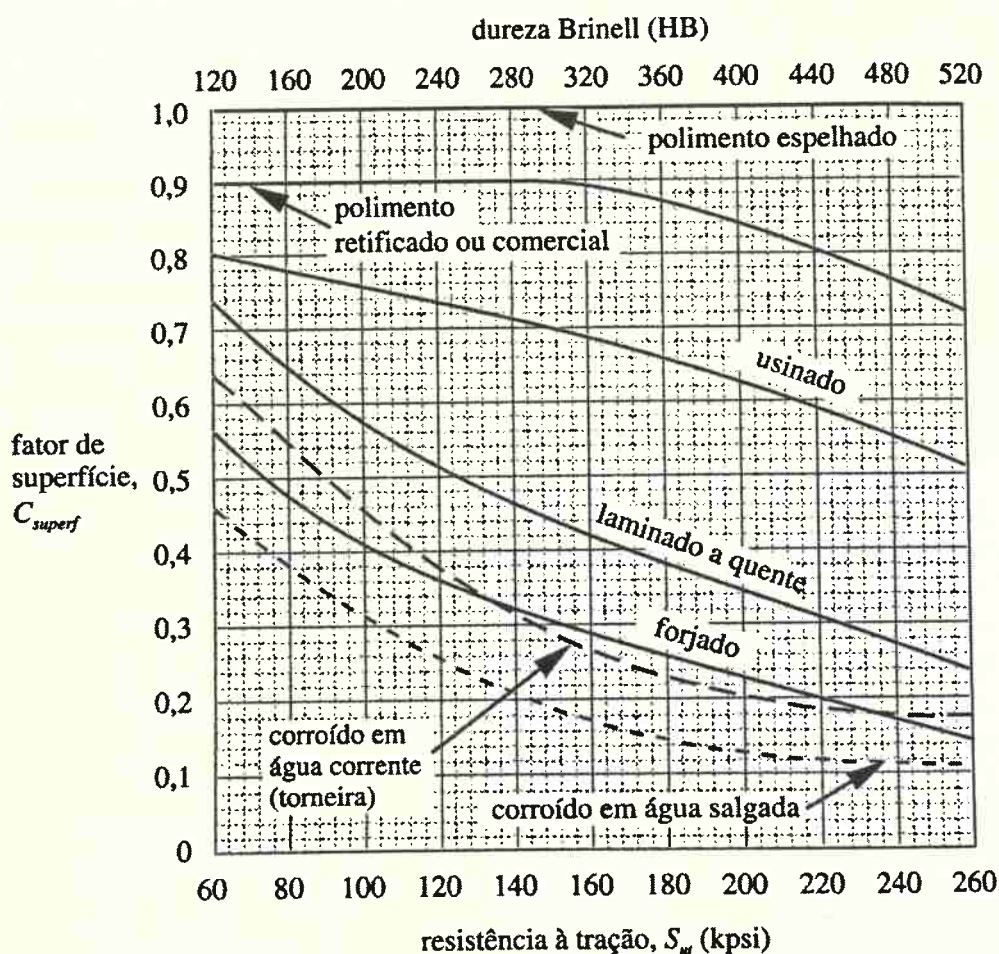


Figura 13 – Fatores de superfície para diversos tipos de acabamento superficial para aços. Autoria de R. C. Juvinall, extraído de (10).

A análise do gráfico (Figura 13) mostra que para um componente usinado, devemos atribuir um fator de superfície de acordo com a resistência à tração do aço. Quanto maior a resistência à tração, menor é o fator de superfície, o que indica que, em termos de fadiga, a rugosidade superficial afeta negativamente a resistência do material. Esse fato é observado por Lopes (15), que mostrou que o limite de resistência à fadiga diminui linearmente com o aumento da rugosidade média em corpos de provas usinados, uma vez que a rugosidade impõe na superfície usinada um aumento da concentração de tensões devido ao alto nível de irregularidades.

O eixo de saída é uma peça única, usinada em aço SAE 4340, e segundo informação de projeto, a peça seria usada na condição bruta de têmpera (sem tratamento térmico de revenimento). O eixo é composto de duas saídas, uma para cada lado da caixa de redução, conseqüentemente uma saída para cada roda motriz. O eixo apresenta uma cavidade circular de 22 mm concêntrica ao eixo com ranhuras internas para o encaixe da ponta da junta homocinética. O eixo está representado na Figura 14a. Para melhor entendimento, define-se a “região 1” como a porção do eixo em que ocorreu separação das partes e a “região 2” como a porção do eixo que não houve desprendimento das partes, conforme a Figura 14b.

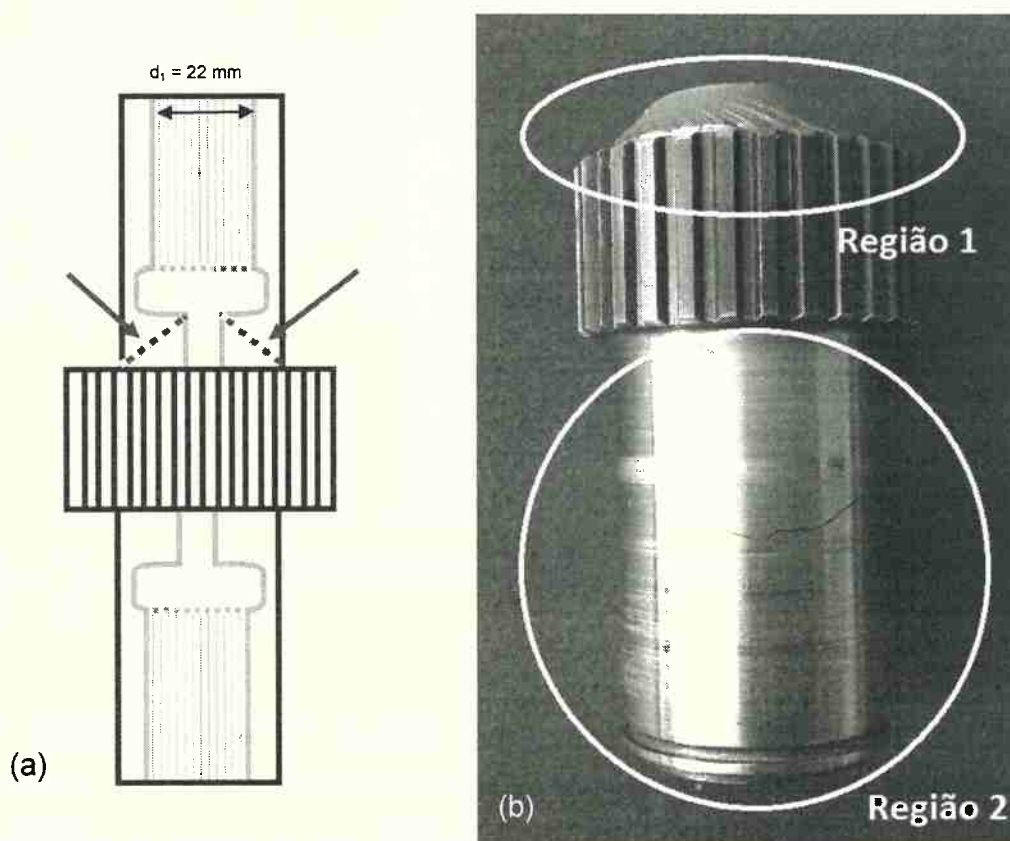


Figura 14 – Peça fraturada em perfil para mostrar a geometria da peça fraturada. (a) Representação da peça, com destaque para a região fraturada; (b) Peça fraturada com destaque para as duas regiões de interesse.

A região central da peça possui um sobressalto (com 36 mm de diâmetro e furo passante concêntrico ao eixo de 12 mm) que é dotado de ranhuras para montagem na engrenagem da caixa de redução. Ambas as extremidades do eixo, segundo o projeto, são lisas e nelas são montados rolamentos por interferência. A

parte interna do eixo possui ranhuras para encaixe da ponta da junta homocinética (Figura 15b).

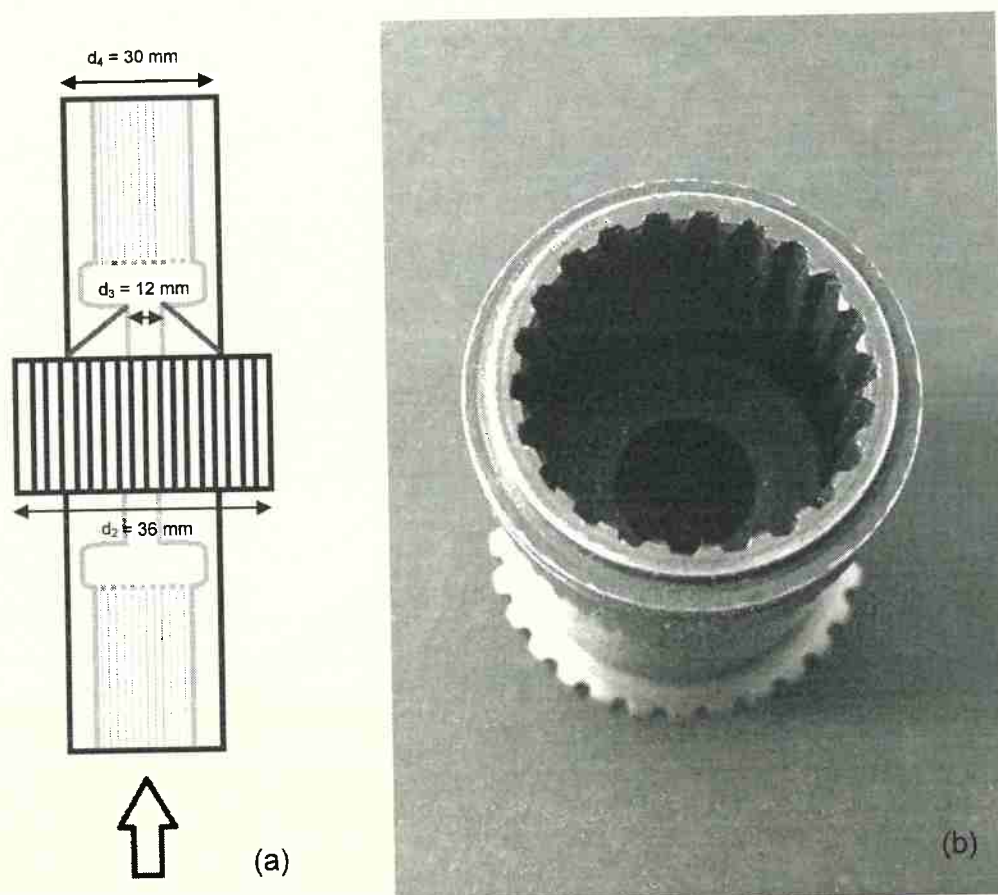


Figura 15 – Geometria interna do eixo. Devemos considerar que essa peça era simétrica, portanto a região 1 e sua continuação possuíam as mesmas características da extremidade apresentada. A seta em (a) indica a região observada em (b).

A presença de “dentes” na parte interna do eixo também deve ser analisada com cuidado, uma vez que as indentações tornam-se concentradores de tensão, especialmente na região da raiz dos dentes, e a análise cuidadosa das estrias revelou grande quantidade de imperfeições, como cantos vivos, ressaltos e heterogeneidade na geometria de dentes adjacentes, devido aos defeitos durante o processo de usinagem.

Na Figura 16 observam-se os defeitos de usinagem nas ranhuras da parte interna do eixo. Há presença de diversos pontos em que houve arrancamento de material. A imagem também mostra uma trinca próxima da raiz da estria, que por natureza é uma região de concentração de tensão e muitos riscos na superfície.

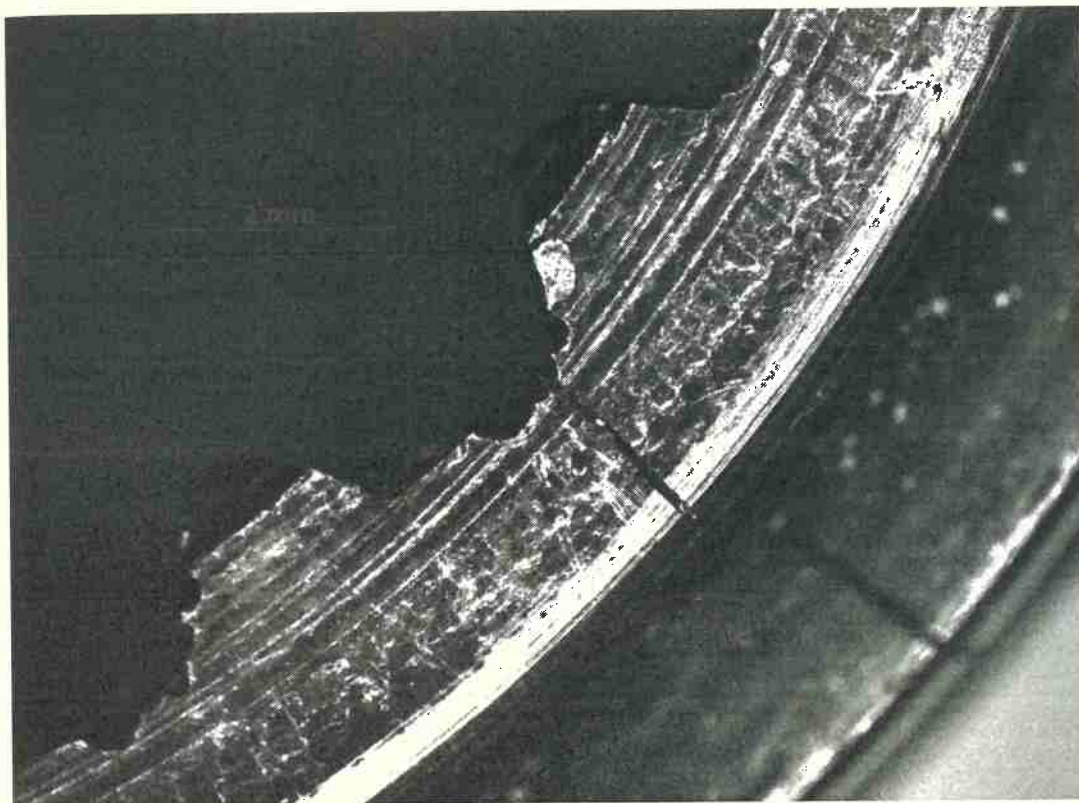
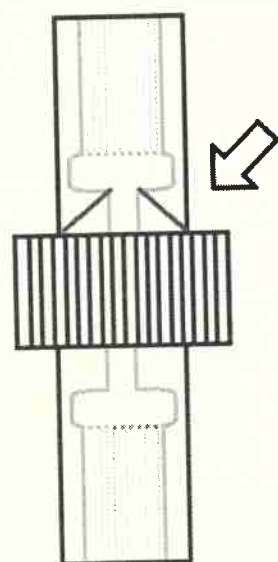


Figura 16 – Detalhe dos defeitos de usinagem na região próxima à raiz dos dentes internos do eixo (Figura 15b).

Conforme é possível observar, o acabamento da superfície está bastante ruim e o processo de usinagem deixou uma grande quantidade de falhas, que podem contribuir para reduzir a vida útil de um componente mecânico, gerando regiões concentradoras de tensão em diversos pontos da peça.

A análise macroscópica à vista desarmada da superfície de fratura mostra-se predominantemente fibrosa (Figura 17b). Observam-se trincas na região do raio de concordância do eixo com o sobressalto e estrias inclinadas em relação à direção radial.



(a)



(b)

Figura 17 – Macrofotografia da superfície fraturada – observa-se a presença de ranhuras e a proximidade da fratura com a região de mudança de geometria do eixo (região concentradora de tensão). A seta em (a) indica a região observada em (b).

Feitos alguns cortes na região 2 (Figura 14b), foi possível isolar uma terceira região do eixo, para análise da superfície interna de usinagem. Na região isolada (Figura 18b), observa-se que tanto a mudança na geometria quanto os defeitos de usinagem encontrados produzem regiões de possível concentração de tensões. Observa-se ainda a diminuição da espessura da parede do eixo, que submeteria a região à maior tensão em relação ao restante do eixo devido à menor área resistente. Um corte transversal foi feito na região isolada, destacada na Figura 18a, para que fosse possível a inspeção da parte interna.

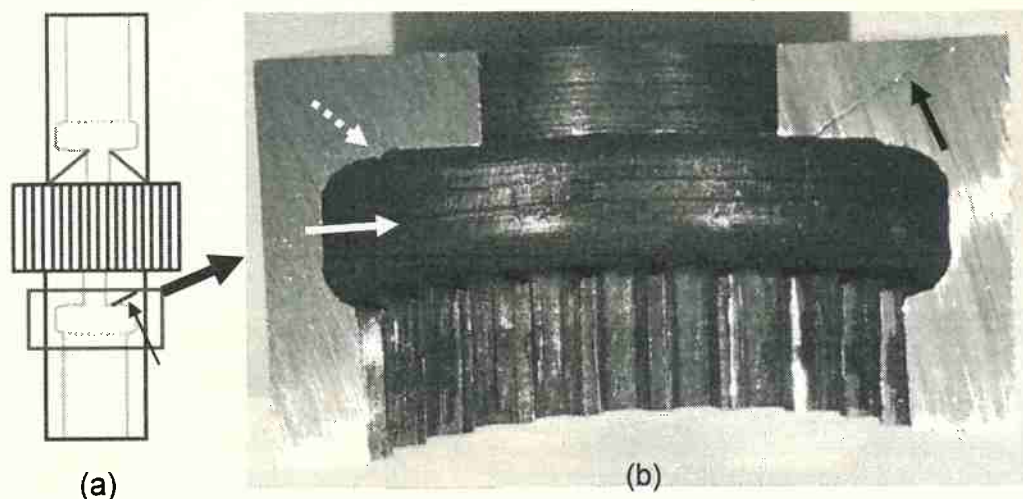


Figura 18 – Corte longitudinal do eixo, da Região 3. A seta menor em (a) indica a posição da trinca observada em (b). Seta preta: trinca interna; seta branca: ressaltos de usinagem; seta pontilhada: degrau na superfície de usinagem.

Nota-se na Figura 18b uma trinca diagonal da porção superior direita, em que uma das extremidades da trinca termina em um degrau na superfície usinada. Nessa figura nota-se presença de degraus (seta pontilhada) e ranhuras (seta branca sólida) deixadas pela usinagem da peça. É importante notar que os defeitos de usinagem tornam-se regiões de grande concentração de tensão, que podem nuclear ou acelerar a propagação de trincas em um componente mecânico.

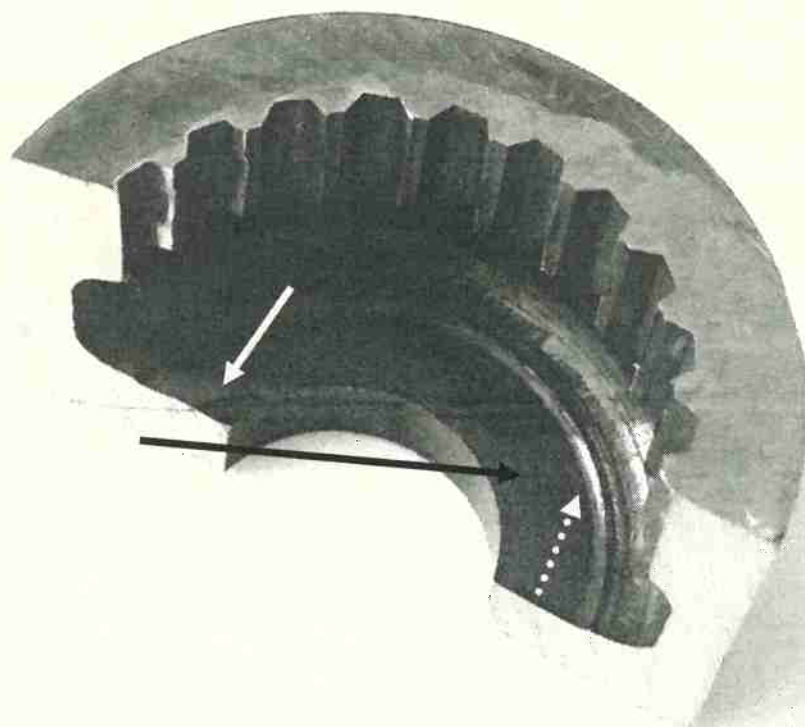


Figura 19 – Fotografia em outro ângulo da região 3 para melhor observação do caminho percorrido pela trinca dentro da peça. Seta sólida branca: trinca sobre degrau de usinagem; seta pontilhada: ponta da trinca; seta sólida preta: possível direção de propagação da trinca

Na Figura 19 observa-se como a trinca se propaga dentro do eixo. A seta pontilhada aponta para a ponta da trinca. Isso sugere que a trinca se propaga na direção apontada pela seta sólida preta. Considerando que este componente esteja sujeito à cargas cíclicas, é de se esperar que esta trinca observada se propague pelo mecanismo de fadiga.

3.2 Análise macrofractográfica

A Figura 20 retrata a vista de topo da superfície de fratura. Nela nota-se a presença de uma região de fratura com presença de marcas de catraca na superfície externa do eixo (vide seta sólida) e marcas de propagação de trinca (vide seta pontilhada), sugerindo ação de torção.

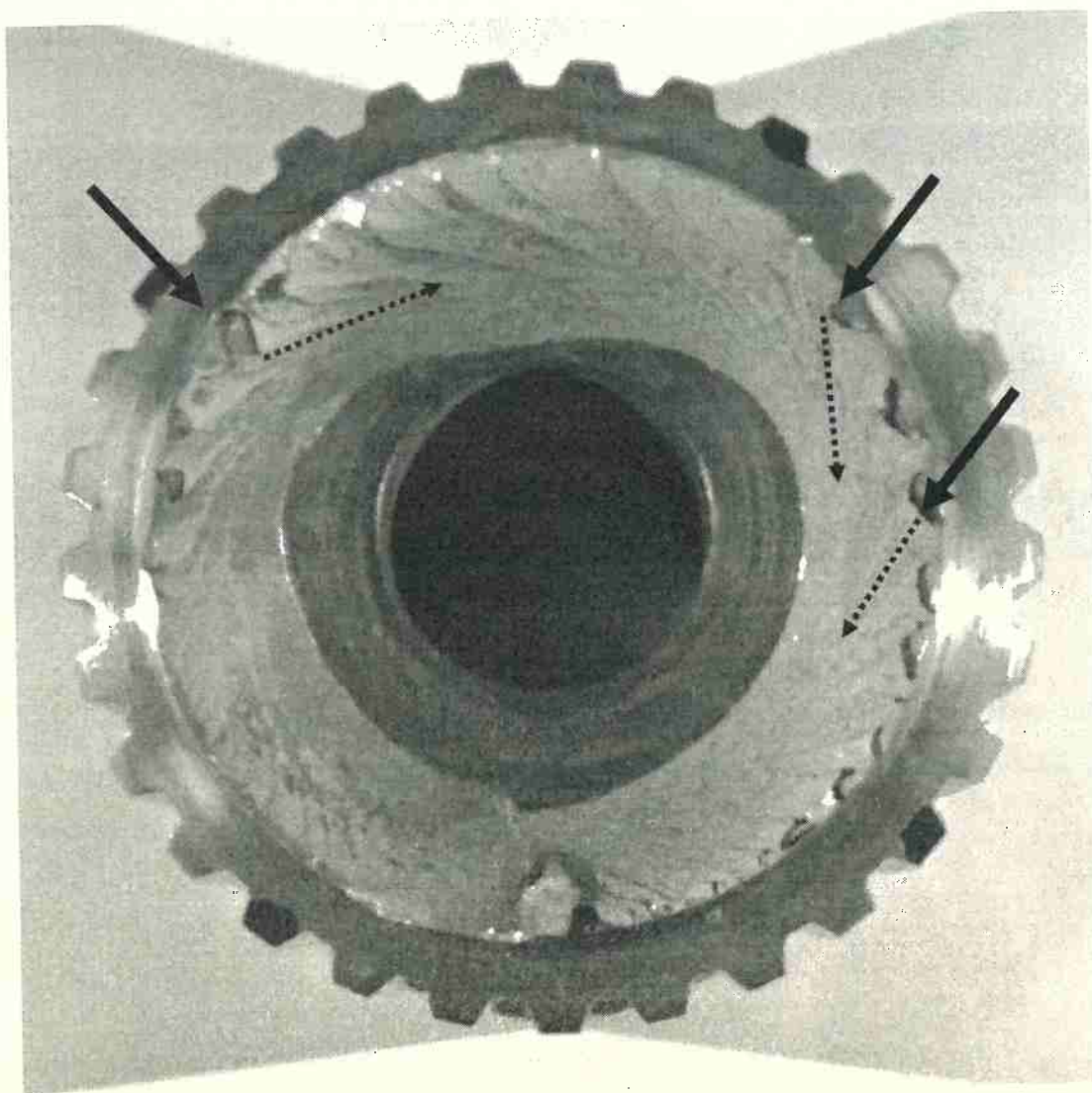


Figura 20 – Fotografia da vista superior da região 1 (fratura).

A Figura 21b, vista de topo do eixo, sugere que fratura foi iniciada junto às marcas de usinagem e na região de raio de concordância (destaca-se a possível presença de canto vivo na Figura 21a).

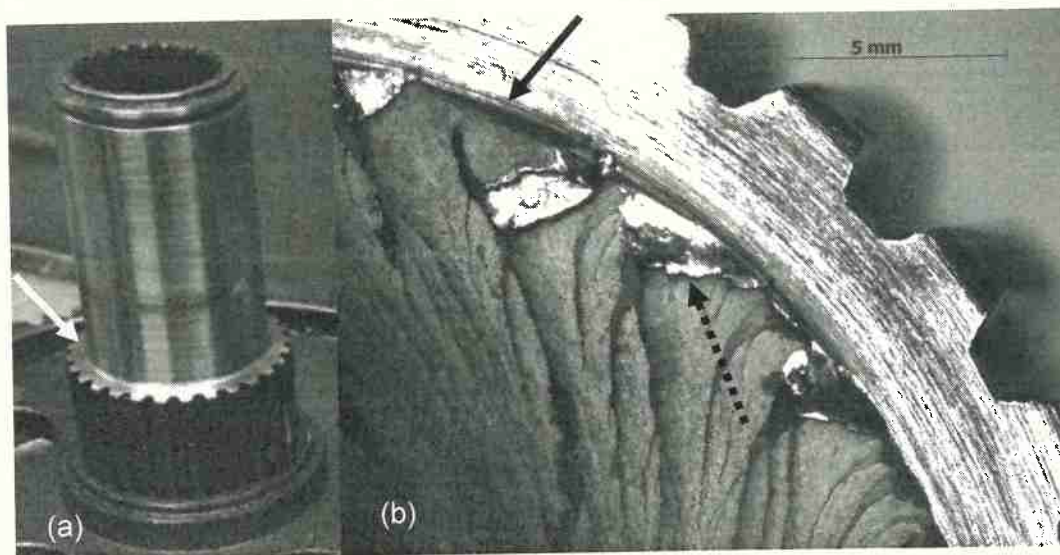


Figura 21 – (a) Peça sã, mostrando região do raio de concordância, possível região de início de fratura (vide seta); (b) Fotografia em lupa da superfície de fratura, vista de topo, que a fratura foi iniciada junto às marcas de usinagem e na região de raio de concordância (possível presença de canto vivo, vide seta sólida). Observa-se ainda possível presença de dentes junto ao raio de concordância (vide seta pontilhada).

A Figura 22 mostra em detalhe outro ângulo de observação da região de raio de concordância do eixo e adjacente à superfície de fratura, onde há a presença de marcas de catraca.

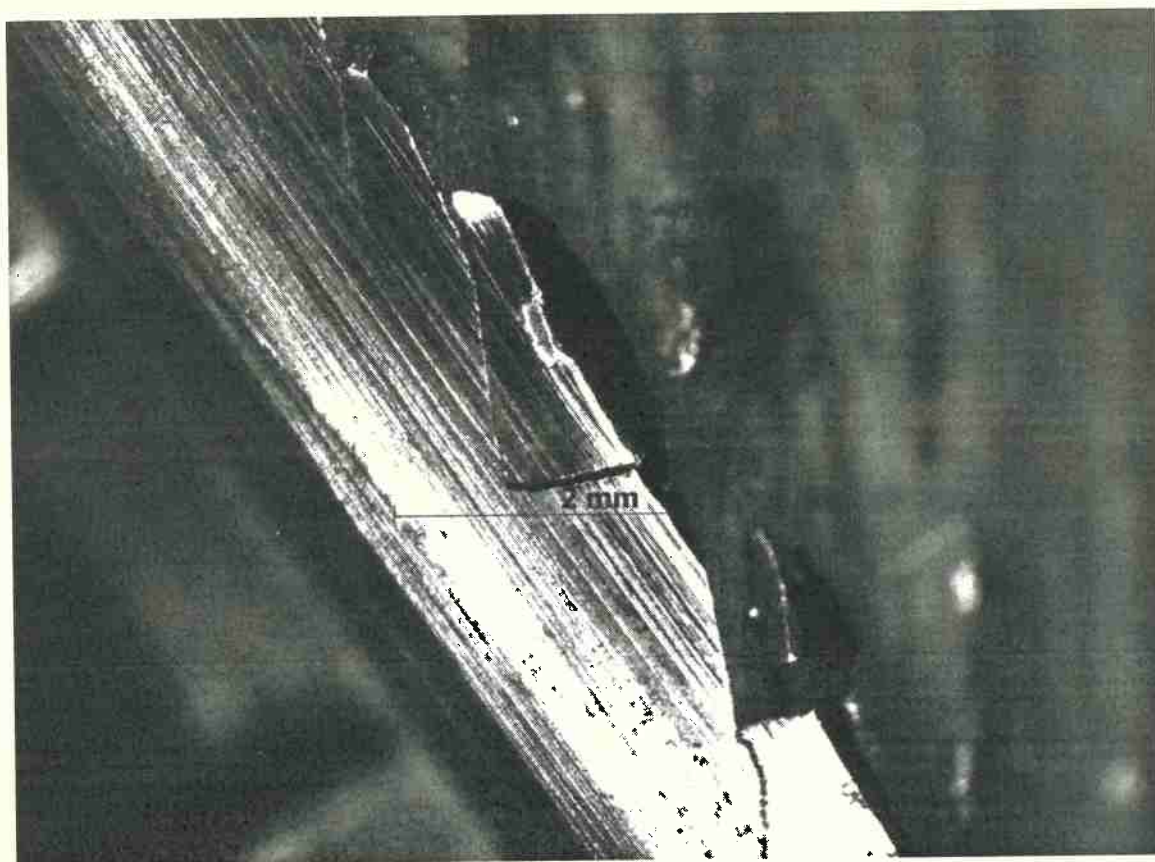
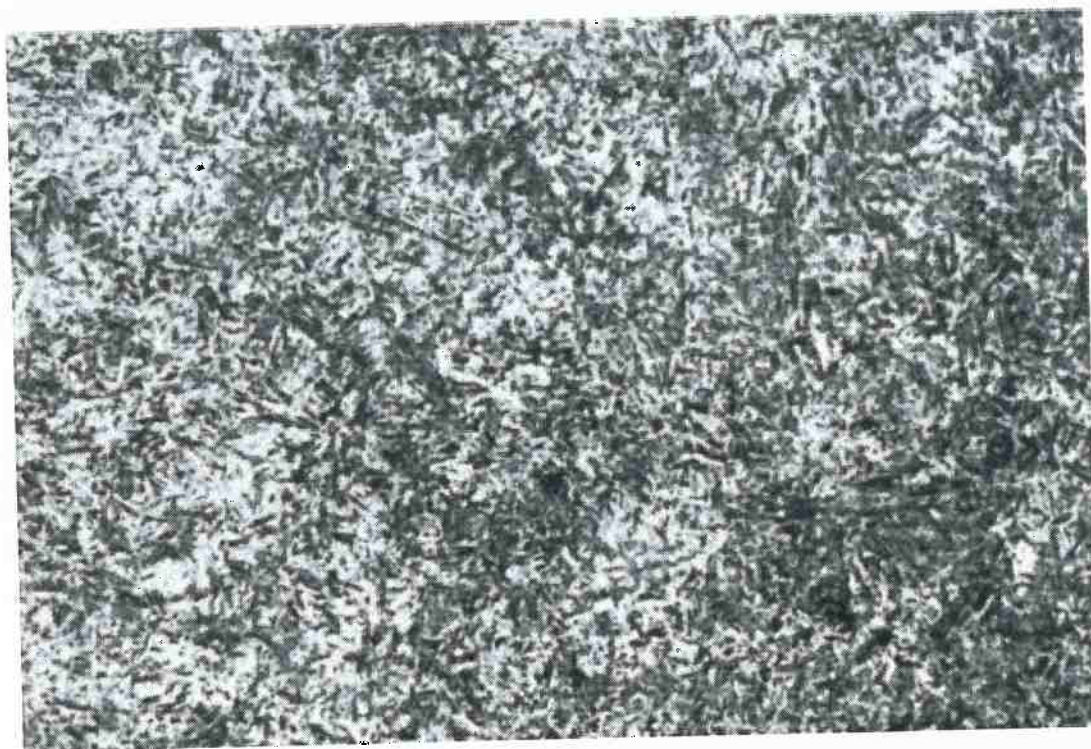


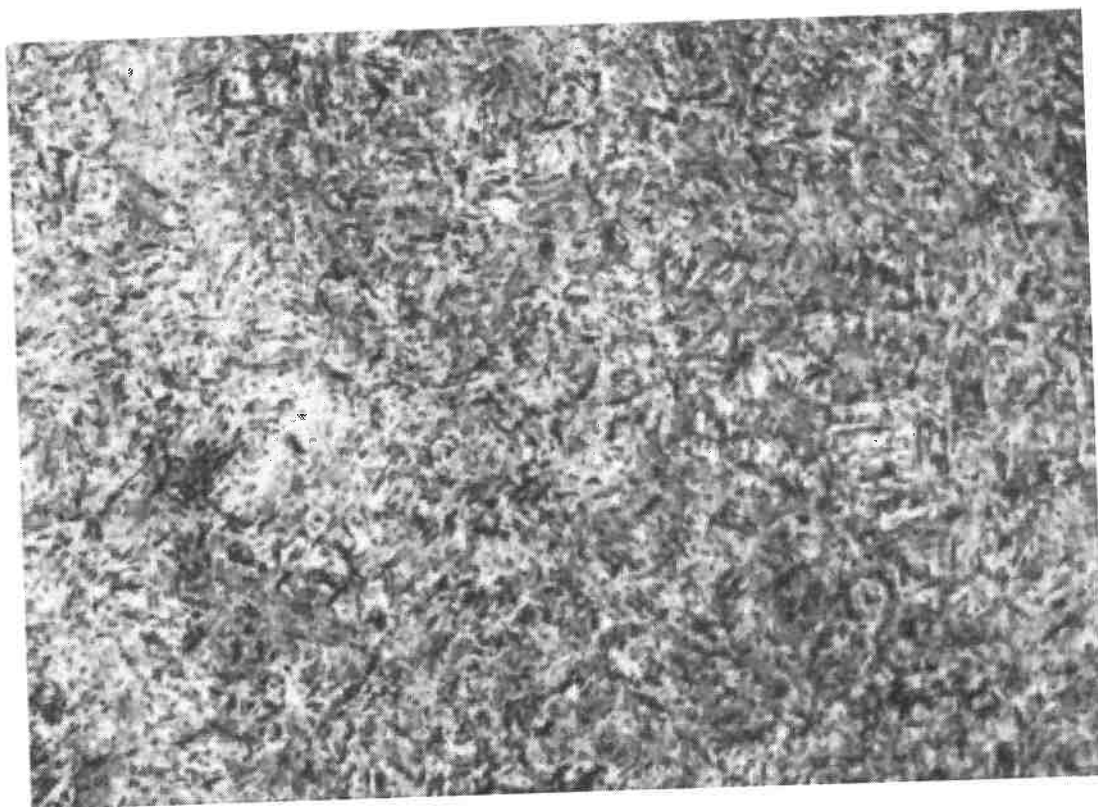
Figura 22 – Trincas em forma de marcas de catraca, na parte externa do eixo (junto ao raio de concordância) e adjacente à superfície de fratura.

3.3 Caracterização microestrutural

A análise microestrutural foi realizada nas amostras 1 (Figura 9d), 2 (Figura 9c) e 3 (Figura 9b), de modo a avaliar a microestrutura em diferentes regiões e complexidade de geometria. Observou-se homogeneidade na microestrutura nas três amostras analisadas. Por representatividade, destaca-se a análise realizada na amostra 2 (Figura 23), onde observa-se que há homogeneidade na microestrutura do eixo na seção transversal (Figura 23a) e longitudinal (Figura 23b). Em ambas as figuras pode-se observar a microestrutura típica de martensita revenida.



(a)



(b)

Figura 23 – Caracterização microestrutural do eixo fraturado; (a) Região de meia espessura do eixo, seção transversal; (b) Seção longitudinal do eixo. Microestrutura de martensita revenida homogênea ao longo da espessura na peça. MO, 200x ataque: Nital.

3.4 Ensaios de dureza

As amostras 1 (Figura 24) e 3 (Figura 25) foram submetidas a ensaio de dureza, para avaliar a propriedade nas diferentes partes da peça,

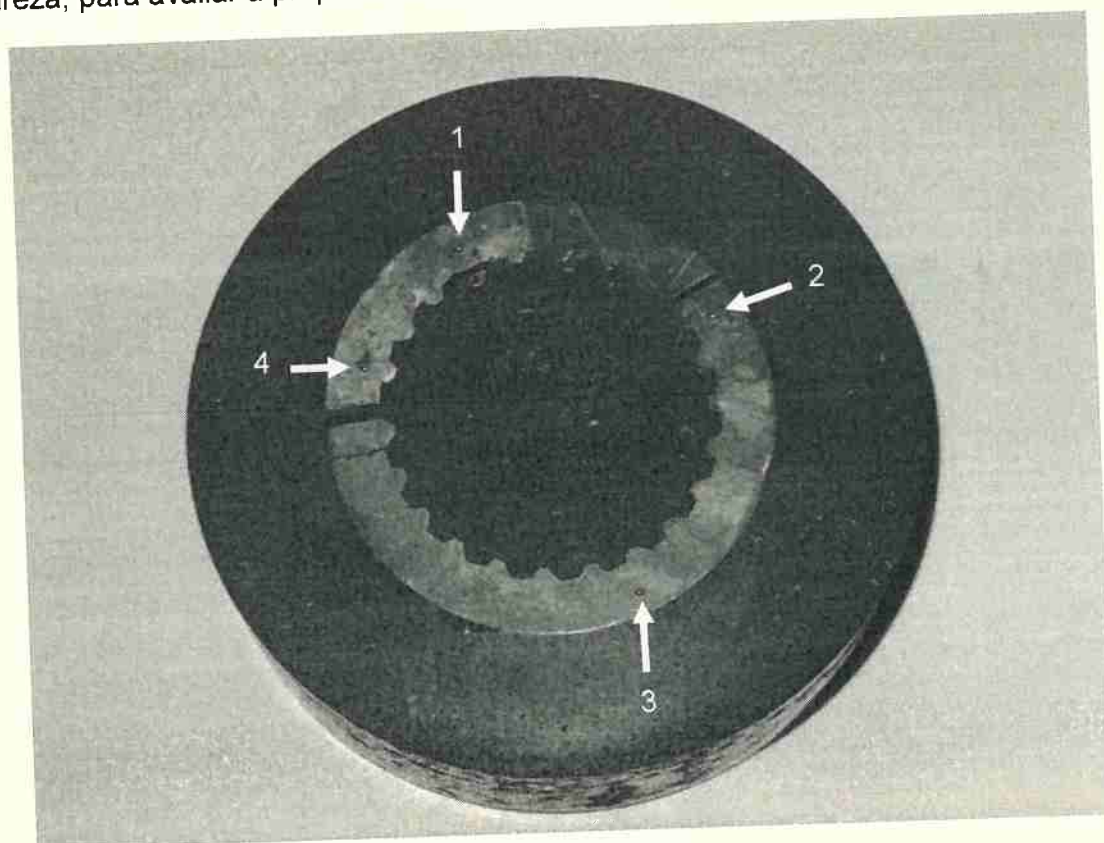


Figura 24 – Amostra 1: os pontos utilizados para medição da dureza estão indicados pelas 4 seta.

Na amostra 1, os pontos para a medição foram na região intermediária em relação às superfícies interna e externa, a fim de avaliar se há alguma discrepância no valor da dureza nas regiões próximas da trinca e distante delas. Os valores encontrados estão mostrados na tabela a seguir:

Amostra 1: Valores de dureza em HRC	
1	53
2	53
3	52
4	52

Tabela 4 – Valores de dureza encontrados para os pontos escolhidos na amostra 1

Na amostra 3 foram escolhidas três posições na direção radial (a), (b) e (c) para medir a dureza na região próxima da superfície externa (a), intermediária (b) e próxima da superfície externa (c). O ensaio foi repetido 4 vezes a cada 90 graus.

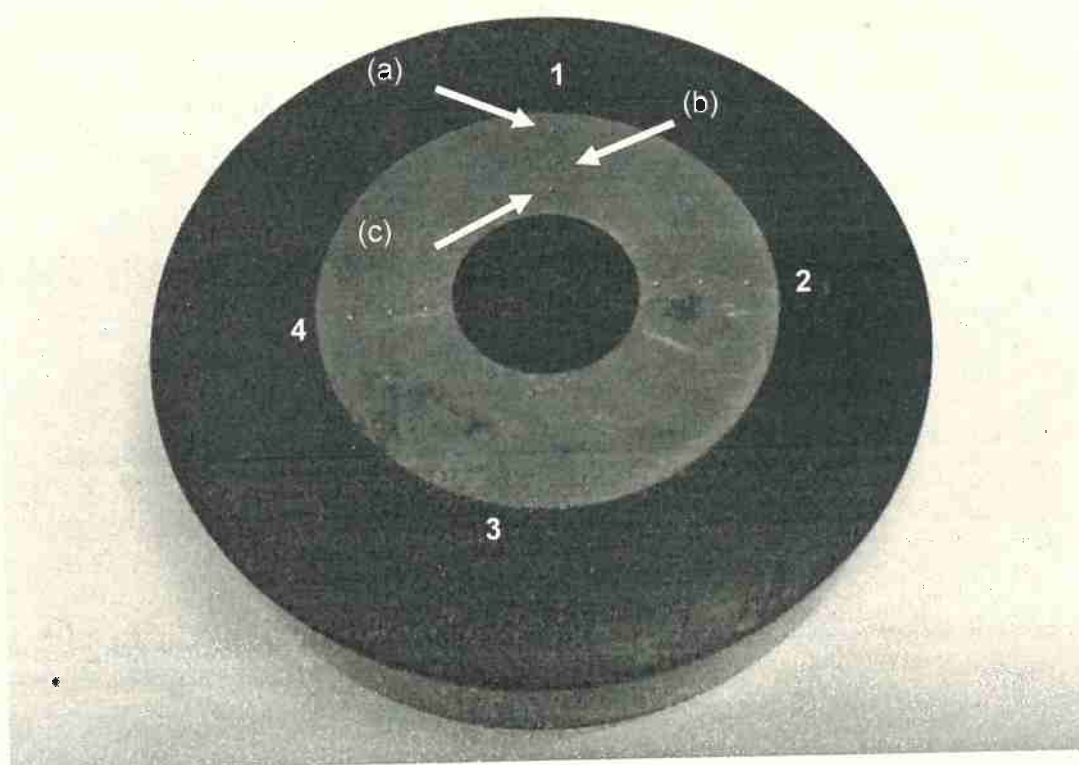


Figura 25 – Amostra 3 os pontos utilizados para a medição estão indicados pelas setas

Amostra 3: valores de dureza em HRC				
Posição	1	2	3	4
a	53	53	52	51
b	53	51	53	53
c	52	52	52	52

Tabela 5 – Valores de dureza encontrados na amostra 3 para os pontos escolhidos.

Observa-se homogeneidade na dureza, que apresenta valor médio = 52 HRC. Utilizando a tabela de conversão de dureza encontrada em (16), os valores para

essa faixa de dureza na escala Vickers são 545 a 562 HV e na escala Brinell, de 509 a 522 HB. Para esses valores de dureza do aço SAE 4340, foi encontrado através do software CES (*Cambridge Engineering Selector*) (17), que o aço SAE 4340 encontra-se na condição temperada em óleo e revenido a 315 °C.

A partir dessa informação foram encontrados os seguintes valores para as propriedades do aço SAE 4340 que se encontra na condição temperada em óleo e revenido a 315 °C (vide Tabela 6). Com base nesses valores, pode-se estimar o comprimento crítico da trinca, utilizando o menor valor encontrado para tenacidade à fratura e o valor da tensão máxima de cisalhamento igual a 250 MPa. Assim, utilizando a equação 13, com $\beta = 1,12$ (trinca na superfície do material), temos que o tamanho crítico de trinca seria igual a 2,5 mm.

$$\text{Para } K_{IC} = 25 \text{ MPa.m}^{0,5}: K_I = \beta \sigma \sqrt{\pi a} \Rightarrow 25 = 1,12 \cdot 250 \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \\ \Rightarrow ac = 0,0025m$$

Módulo de elasticidade	205 – 213 GPa
Limite de elasticidade	1,43 – 1,75 GPa
Resistência à tração	1,55 – 1,99 GPa
Módulo de Cisalhamento	79 - 83 GPa
Resistência à fadiga	581 – 693 MPa
Tenacidade	25 – 52 MPa.m^{0,5}

Tabela 6 – Propriedades do aço SAE 4340 temperado em óleo e revenido a 315°C. Retirado de CES 2018 (17).

3.5 Exame microfractográfico

A superfície de fratura foi analisada em 4 quadrantes (vide Figura 26). De cada quadrante, escolheram-se duas regiões distintas – próxima às superfícies externa e interna do eixo – para determinar a morfologia da topografia de fratura ao longo de toda a superfície.

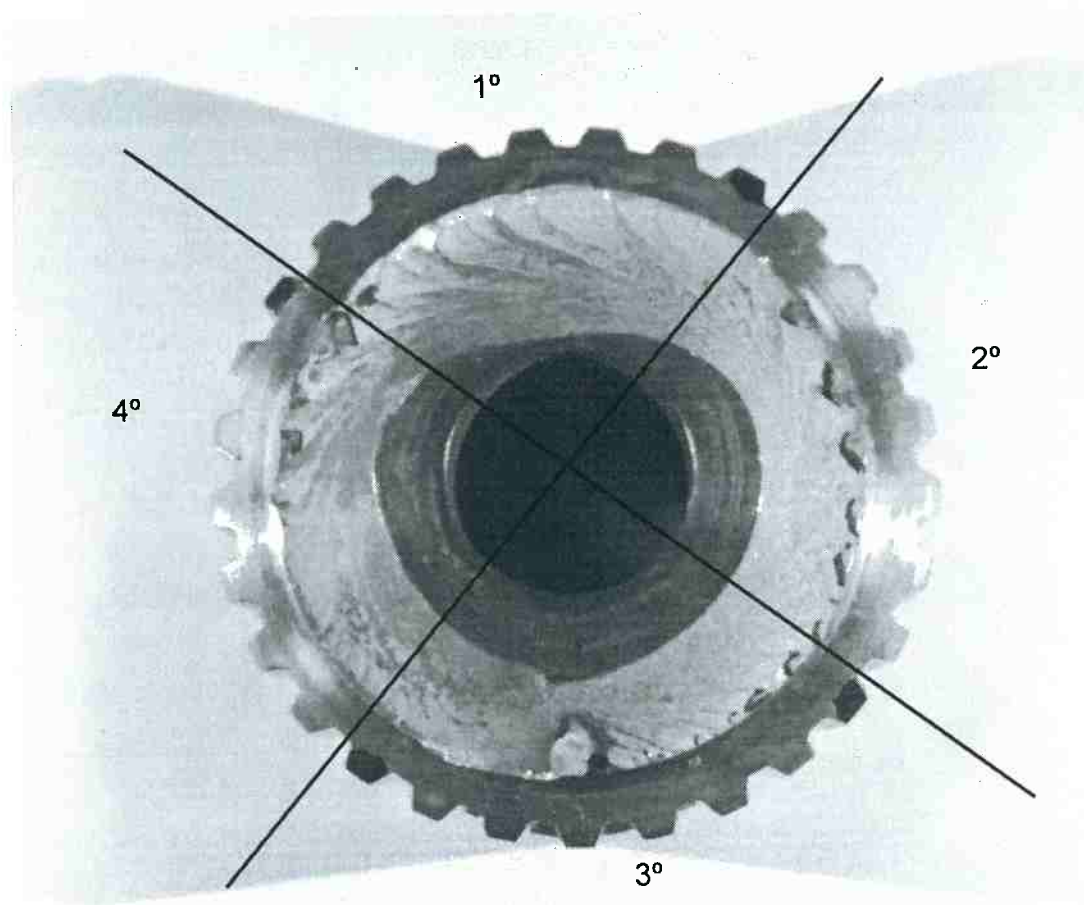
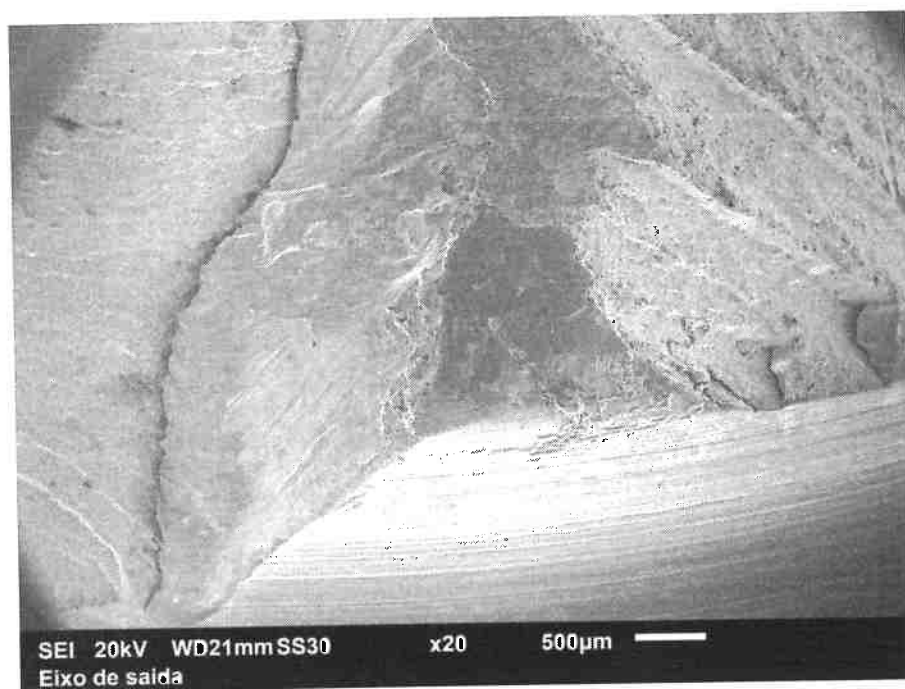
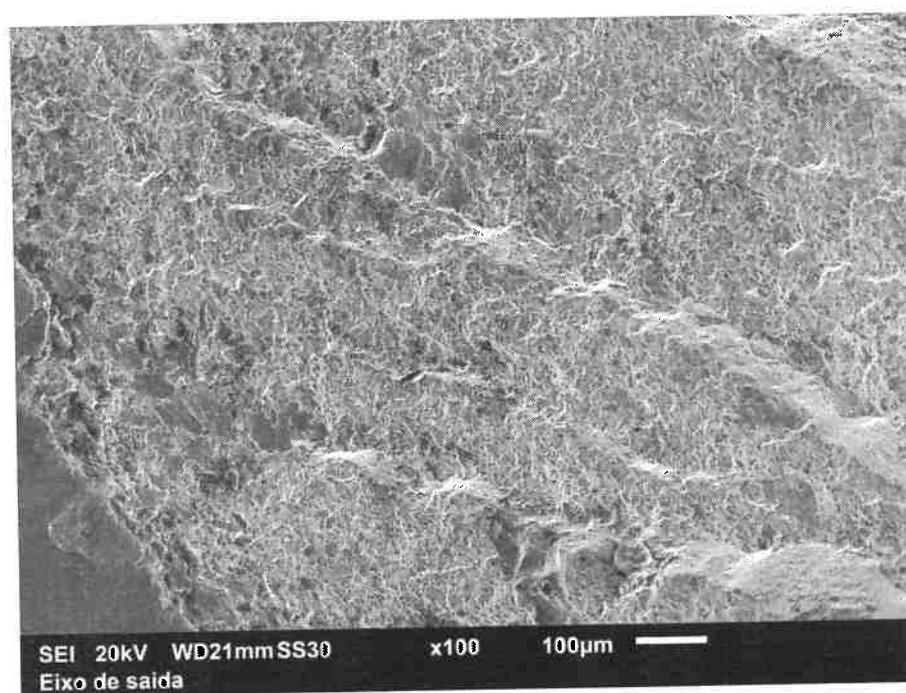


Figura 26 – Quadrantes da superfície analisada em MEV

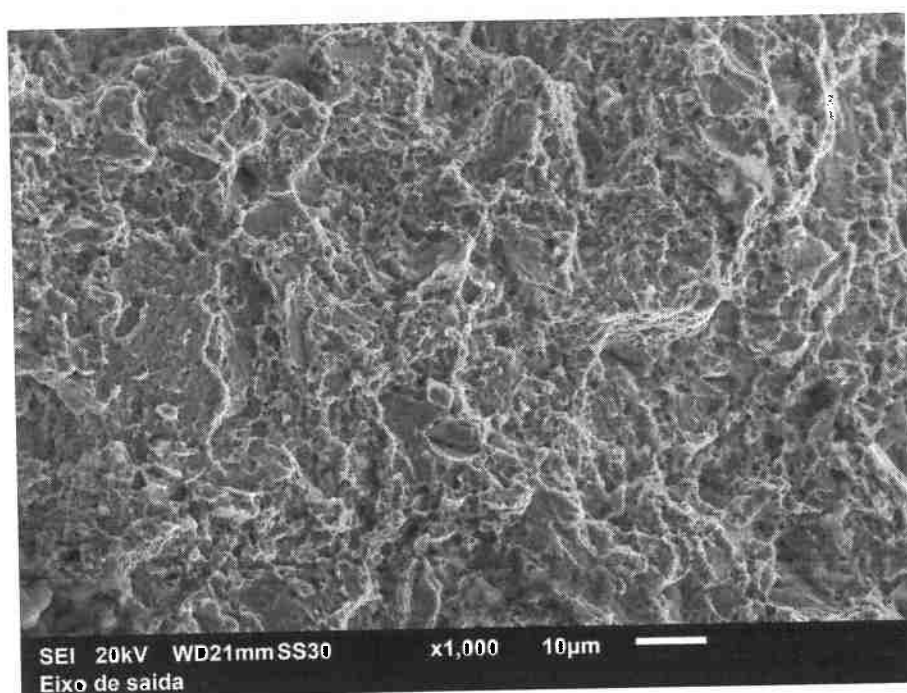
Das imagens obtidas, observa-se que a superfície de fratura possui alvéolos, típica de mecanismo dúctil, além da presença de fratura intergranular, típica de fratura frágil. A Figura 27 mostra as microfractografias realizadas próximas à superfície externa do eixo com morfologia alveolar predominante (Figura 27d) na região próxima à marca de catraca.



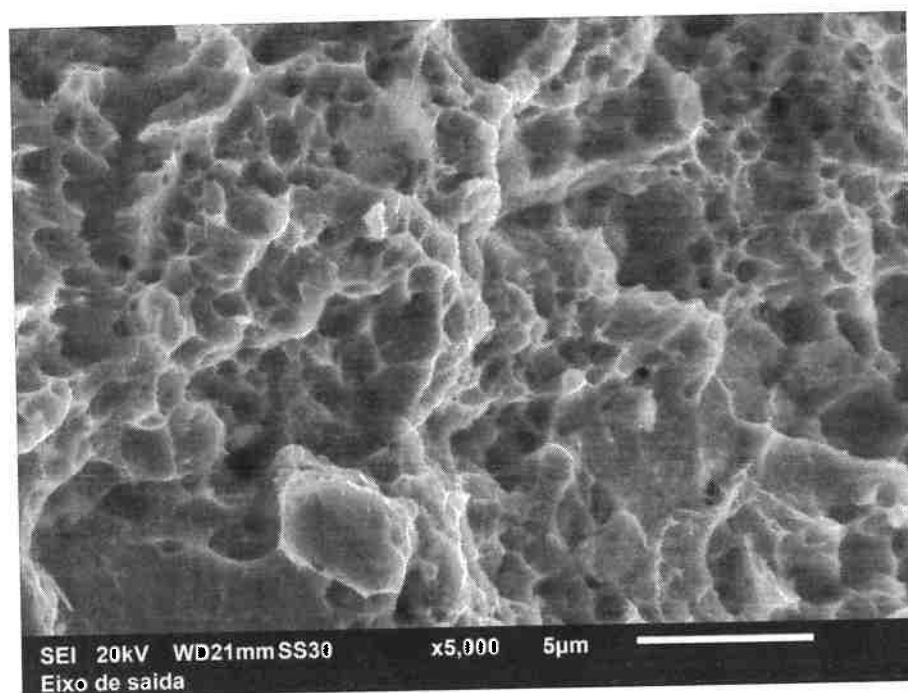
(a)



(b)



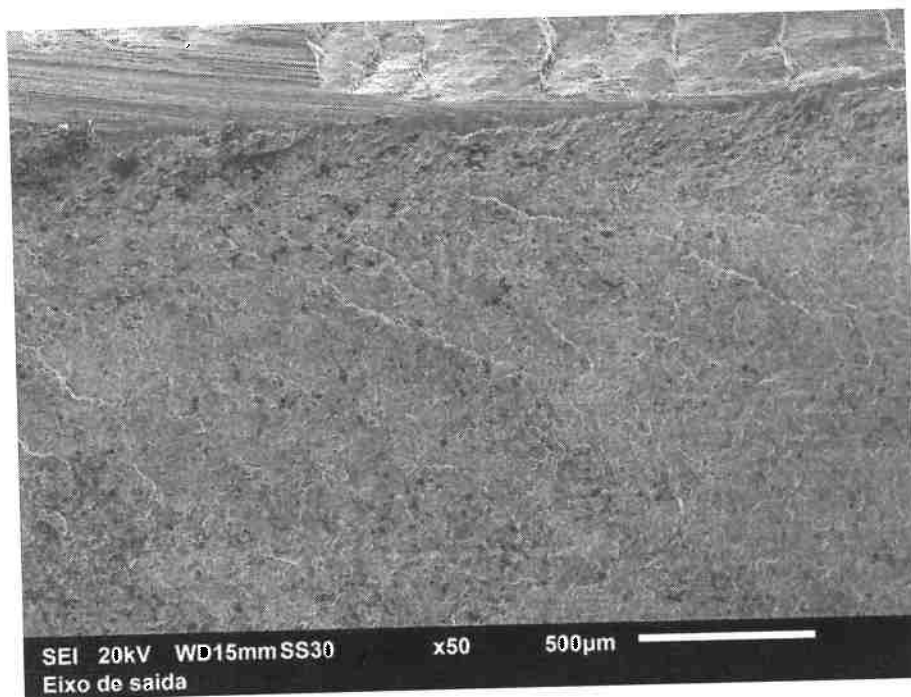
(c)



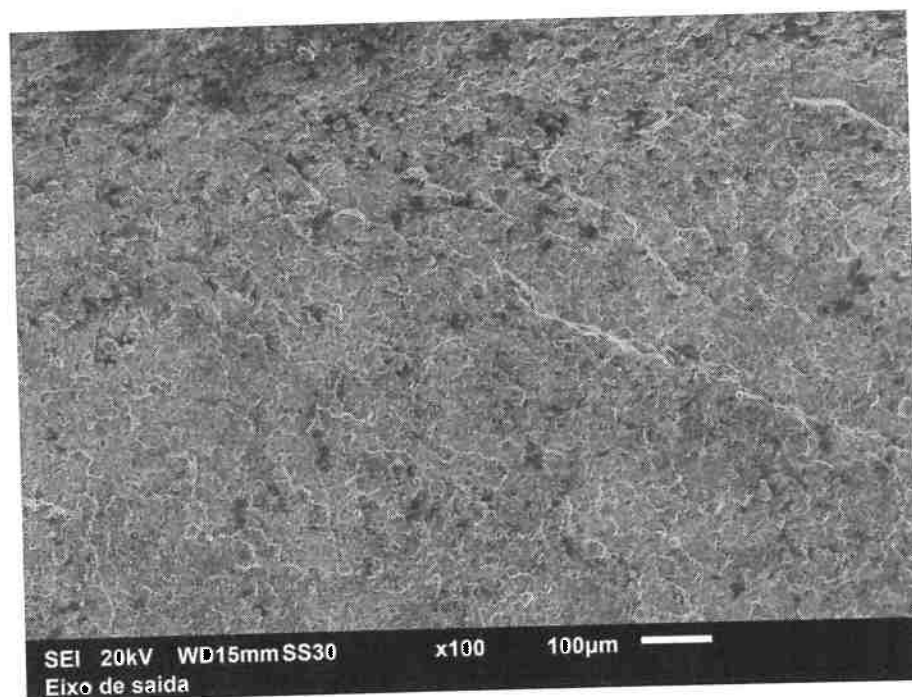
(d)

Figura 27 – Exame microfractográfico da superfície externa do eixo do quadrante 3 (Figura 26). (a) 20x de aumento; (b) 100x de aumento; (c) 1000x de aumento; (d) 5000x de aumento. Observa-se a presença de alvéolos equiaxiais (sobrecarga em tração), típicos de fratura dúctil. Observou-se ainda a presença de oxidação superficial, decorrente do armazenamento inadequado da peça fraturada. Não foi observada possível presença de estrias de fadiga. MEV, IES.

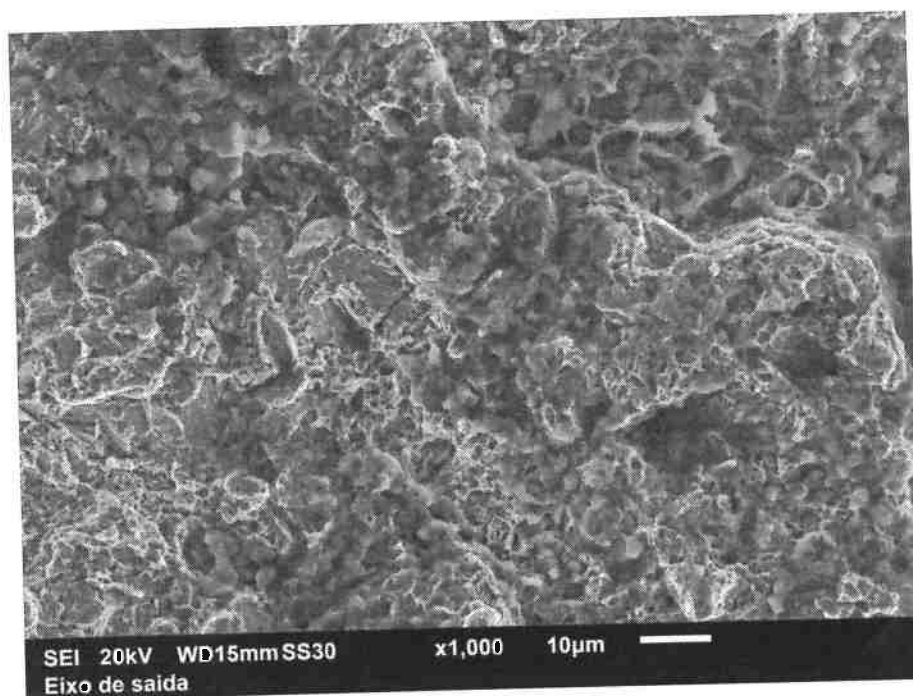
A Figura 28 apresenta as microfractografias da superfície de fratura próxima à região da superfície interna do eixo. Há presença de alvéolos na superfície de fratura com presença de clivagem transgranular (Figura 28d).



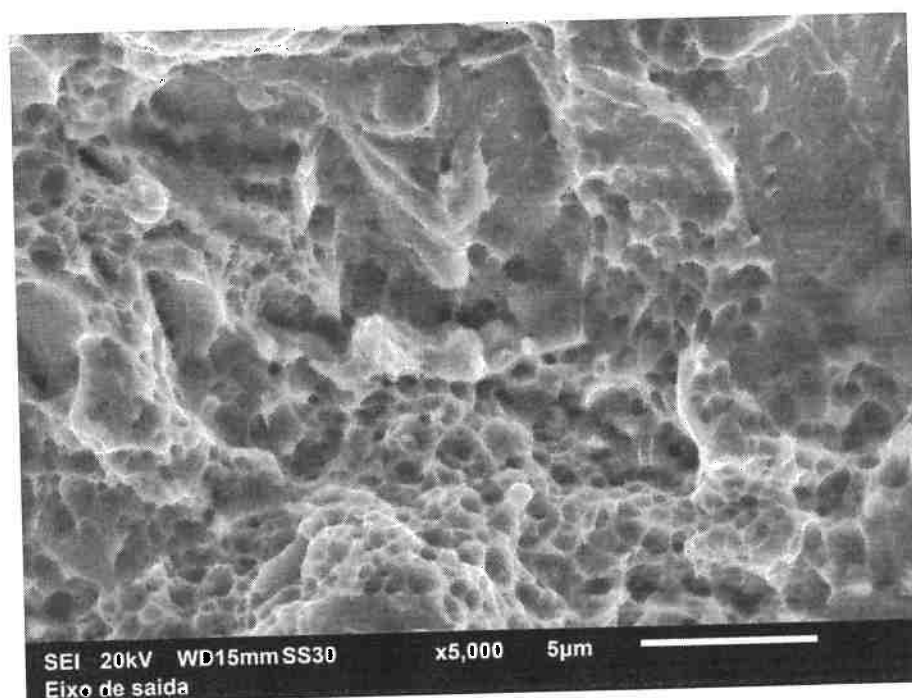
(a)



(b)



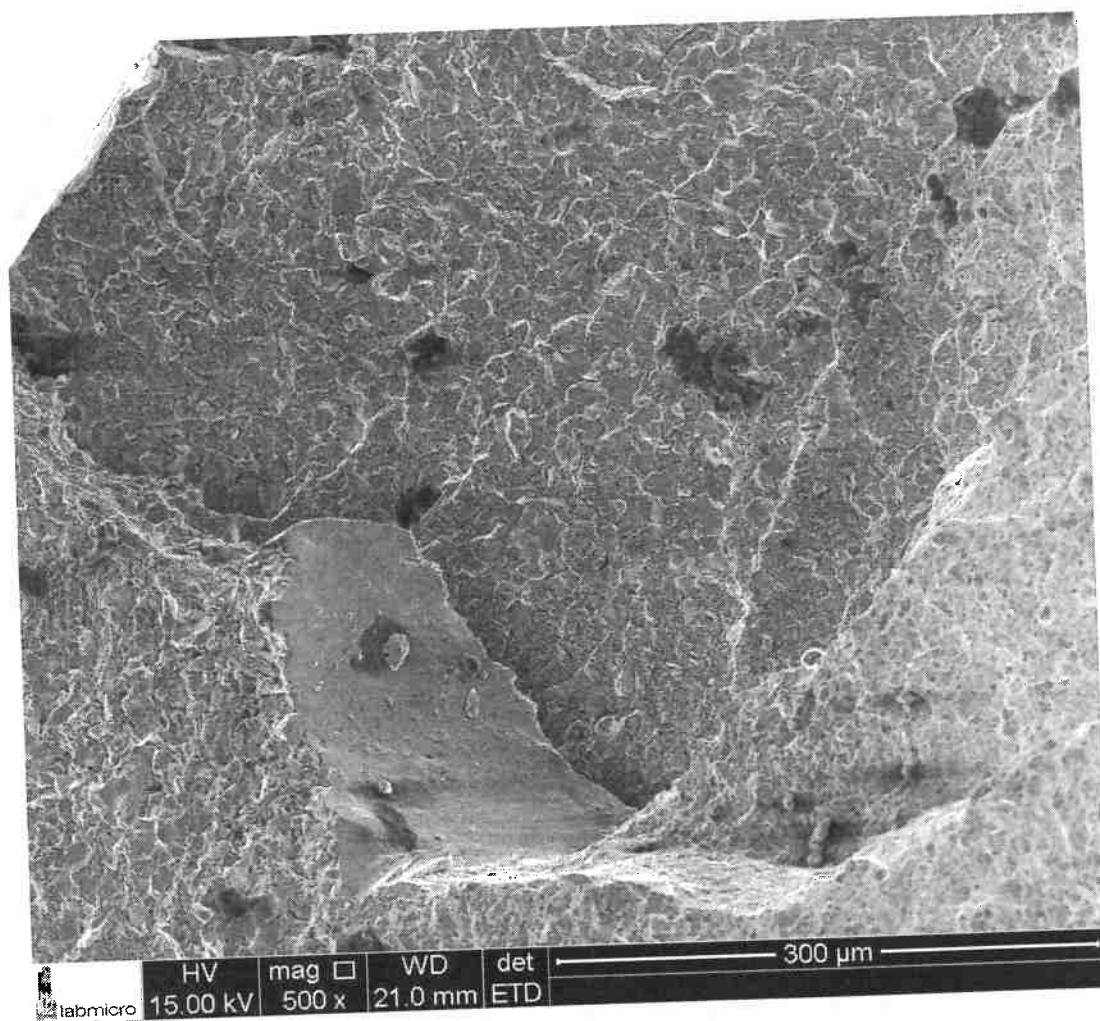
(c)



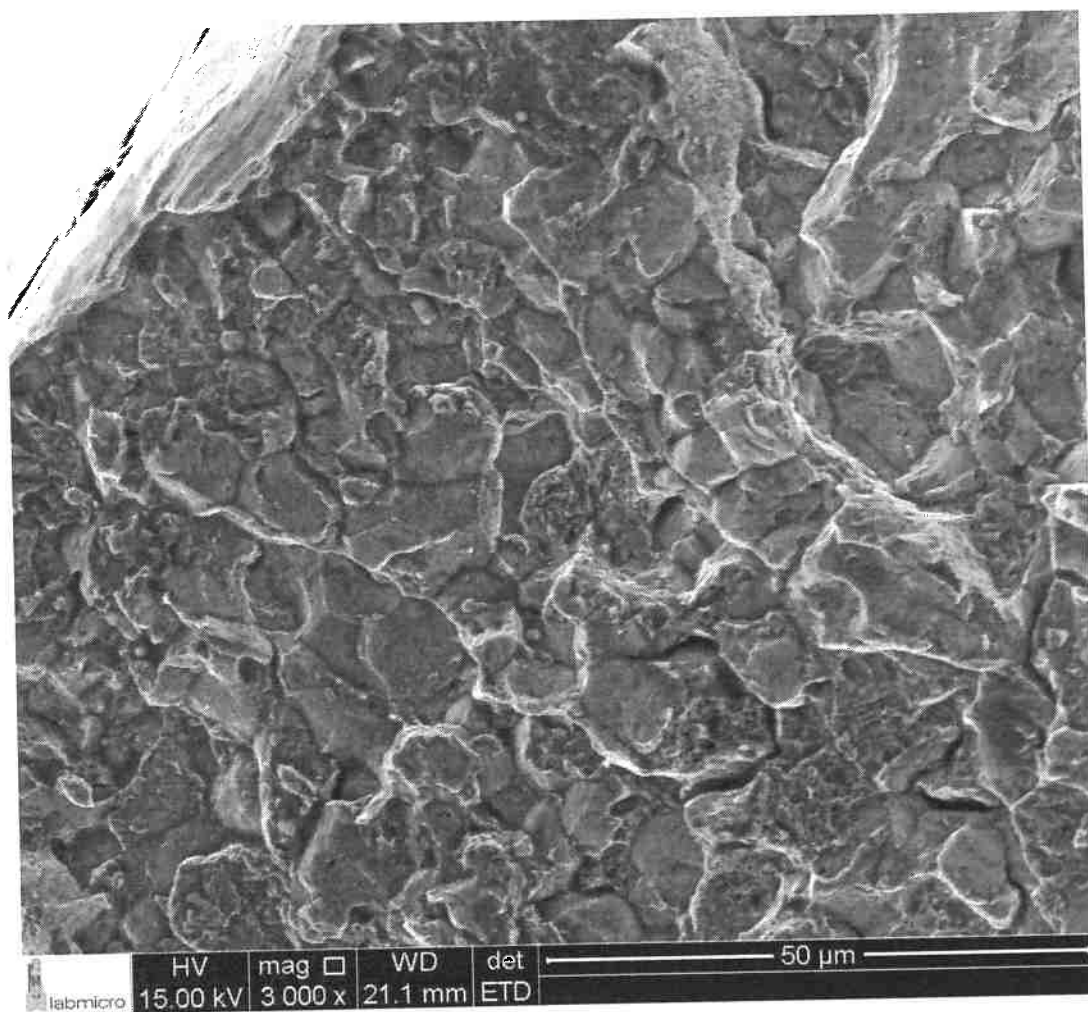
(d)

Figura 28 – Exame microfractográfico do quadrante 3 (Figura 26) próximo à superfície interna do eixo. (a) 50x de aumento (b) 100x de aumento; (c) 1000x de aumento; (d) 5000x de aumento. Observa-se a presença de alvéolos equiaxiais (sobrecarga em tração), típicos de fratura dúctil. Observou-se ainda a presença de oxidação superficial, decorrente do armazenamento inadequado da peça fraturada. Não foi observada possível presença de estrias de fadiga. A microfractografia revelou a presença de clivagem transgranular em 5000x de aumento. MEV, IES.

Na análise feita no microscópio Philips XL-30 do Labmicro do PMT, observou-se que em determinadas regiões próximas à superfície externa do eixo, havia a presença de fratura intergranular (Figura 29b). Nota-se ainda que na parte inferior da Figura 29a a presença de uma superfície com amassamento – aspecto liso – devido ao raspamento com a superfície de fratura correspondente. Essa região está relacionada ao “dente de serra” observado na Figura 21b.



(a)



(b)

Figura 29 - Exame microfractográfico próximo à superfície interna do eixo. (a) 500x de aumento (b) 3000x de aumento. Observa-se a presença de fratura intergranular, típicos de fratura frágil. MEV, IES.

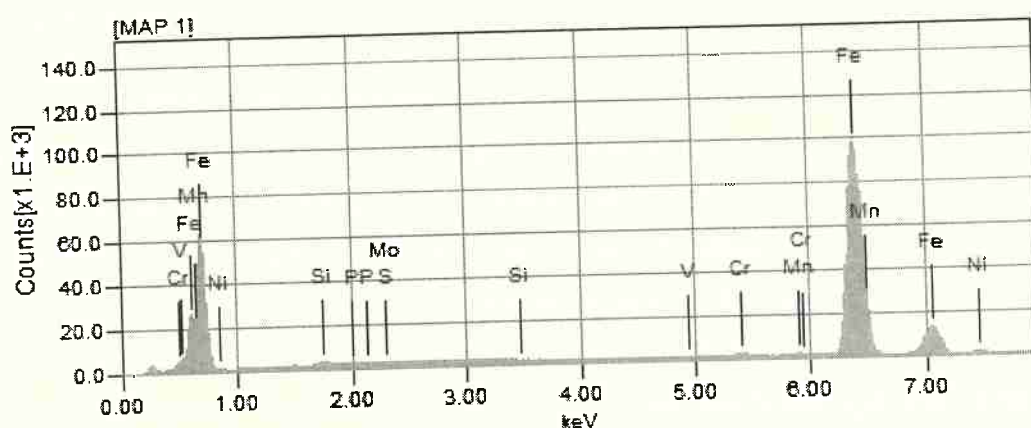
3.6 Microanálise química

A microanálise química do material foi realizada no Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) no Departamento de engenharia mecânica da Poli-USP, no microscópio eletrônico de varredura modelo JSM 6010LA da fabricante JEOL, através da microanálise química EDS sobre a superfície mostrada na Figura 30a

Foi utilizado um aumento de 100x sobre uma área do metal da amostra que foi cortada utilizando o *cut-off* com refrigeração constante e pequenos avanços do disco de corte para evitar excesso de calor de corte sobre metal. A superfície foi lavada e posteriormente submetida a limpeza por ultrassom utilizando álcool etílico 99% e detergente neutro por 20 minutos.



(a)



(b)

Figura 30 – (a) Fotografia da região analisada; (b) Mapa de picos obtidos pela microanálise química por EDS. Modo área, tensão de 20,0 keV com tempo total de análise de 396 s.

Os valores obtidos para a composição química da amostra utilizando método de correção ZAF estão de acordo com as especificações da literatura (13) e (17), vide Tabela 7.

Elemento	Especificação SAE 4340 (13)	Análise EDS
Carbono	0,38 – 0,43	Não determinado
Manganês	0,60 – 0,80	0,91
Fósforo	0,035	0,03
Enxofre	0,040	Não determinado
Silício	0,15 – 0,35	0,35
Níquel	1,65 – 2,00	1,80
Cromo	0,70 – 0,90	0,87
Molibdênio	0,20 – 0,30	0,30

Tabela 7 – Comparação da composição química do aço SAE 4340 encontrado em (13) com os valores obtidos em microanálise química EDS. Nota-se que o elemento químico Carbono não pode ser determinado com precisão através deste método de análise. Valores dados em porcentagem em massa.

4 Discussão

A escolha inicial da equipe era utilizar o aço SAE 4340 sem o tratamento de revenimento, porém a boa prática sugere que seja feito este tratamento térmico para reduzir a dureza e aumentar a tenacidade do material. A menos que seja especificado pelo cliente algum outro tipo de tratamento térmico ou outra especificação de tempo e temperatura de revenimento, há um padrão informal na prática industrial que realiza o tratamento de têmpera em óleo seguido de revenimento a 315°C em qualquer componente fabricado em aço SAE 4340, como foi possível determinar nesta análise.

Durante a desmontagem da caixa, não foram detectadas avarias, deformações plásticas causadas pelo uso incorreto de ferramentas, como martelamento, uso de alavanca ou que o componente analisado tenha sido utilizado como fulcro na montagem de outro componente do carro. Dessa forma não há indícios de ocorrência de descuidos na montagem ou possível reparo do componente, tanto pelo fabricante quanto pela equipe.

Observou-se uma grande quantidade de riscos de usinagem sobre a peça. Esses riscos são concentradores de tensão na superfície que podem nucelar trincas, agindo como uma trinca inicial que por sua vez podem se propagar dentro do material por mecanismo de fadiga se as condições de tensões aplicadas forem favoráveis ou podem se propagar rapidamente em caso de sobrecarga.

A estimativa do número de ciclos é de 800 ciclos por km rodado, levando em consideração o raio de 0,2 m do pneu utilizado no veículo. Dessa forma, para atingir 1 milhão de ciclos é necessário percorrer 1250 km com o veículo. É improvável que essa distância tenha sido percorrida durante a prova e testes, considerando uma velocidade média de 25 km/h com duração de 2h de prova.

Usando a equação 17 mostra-se que a tensão da superfície externa é 2,5 vezes maior que a da superfície interna. Na região do sobressalto central, notou-se que há um canto vivo na região de mudança de diâmetros (Figura 21a) que se torna um relevante ponto de concentração de tensão. A Figura 31 mostra um gráfico do fator geométrico de concentração de tensão K_t para um eixo com rebaixo arredondado em torção.

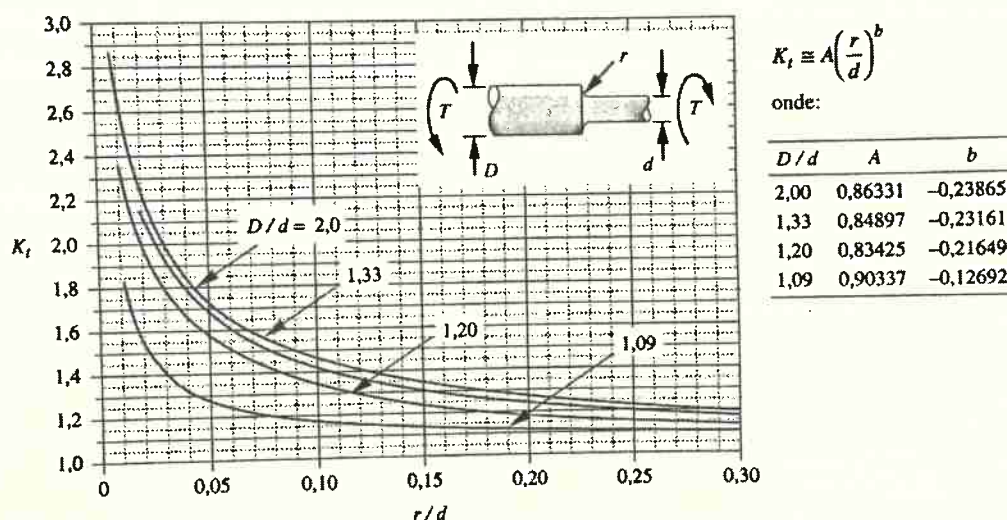


Figura 31 – Fator geométrico de concentração de tensão K_t para um eixo com um rebordo arredondado em torção (10).

Para os diâmetros medidos no eixo ($D = 36\text{mm}$; $d = 30\text{ mm}$) temos $\frac{D}{d} = 1,2$, portanto os parâmetros A e b são: $A = 0,83425$ e $b = -0,21649$. Para o raio de concordância de aproximadamente 1 mm : $K_t = 0,83425 \frac{1}{30}^{-0,21649} = 1,742$. Esse fator deve ser levado em consideração no projeto do componente, uma vez que ele será utilizado para calcular o torque máximo que poderá ser aplicado para o raio de concordância utilizado.

A conformidade de composição química obtida através da microanálise química EDS nos mostra que não houve problemas com o material fornecido conforme ocorreu com Guimarães (18) tendo recebido do fabricante um eixo produzido com o aço SAE 4140 ao invés do aço SAE 4340 especificado pela equipe.

Comparando a microestrutura observada pela análise em microscopia óptica com a microestrutura do aço SAE 4340 temperado e revenido encontrada por Suresh (19) pode-se afirmar que há compatibilidade na morfologia do material analisado com a morfologia apresentada por outros autores, o que sugere que o material tenha passado por tratamento térmico. Observou-se que a morfologia do material analisado era homogênea em toda a superfície analisada e não foram observadas diferenças relevantes de morfologia quando se analisou a superfície de corte transversal e longitudinal, ou seja, pode-se considerar que as propriedades são

isotrópicas. Porém não é possível determinar com exatidão quais fases e estruturas estão presentes na microestrutura da amostra através dessa análise.

Para determinar a microestrutura esperada, pode ser utilizado o diagrama de resfriamento contínuo (Figura 32).

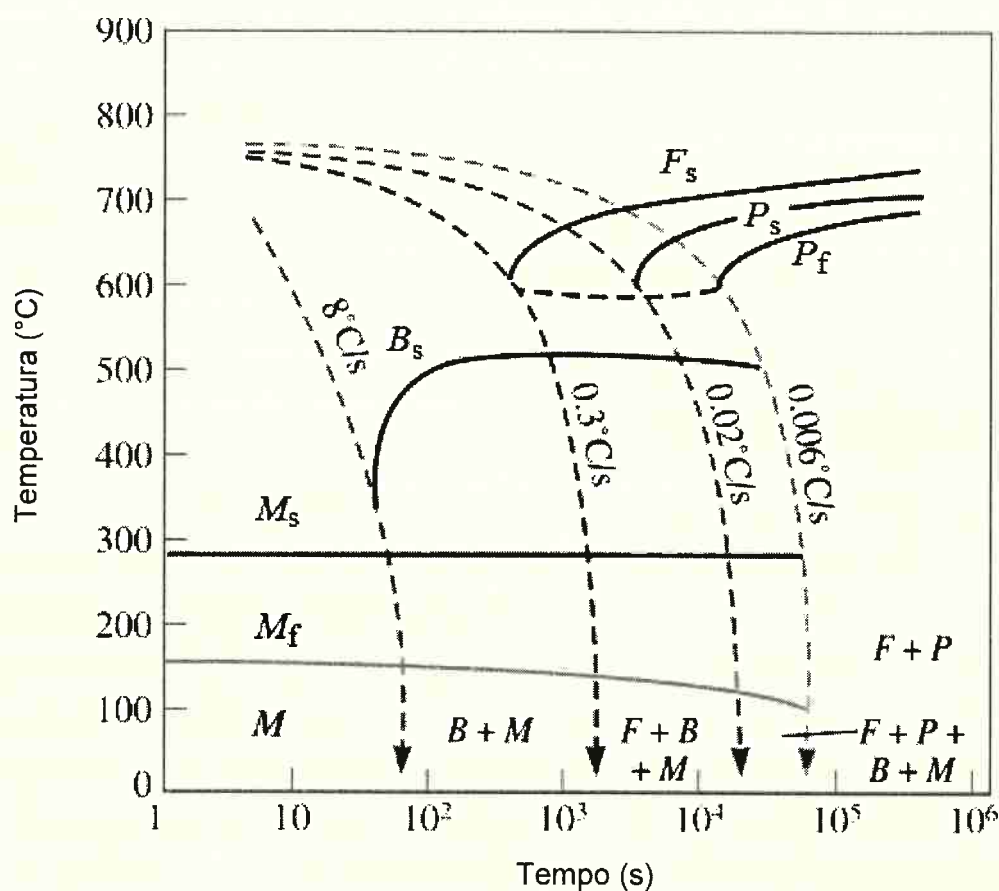


Figura 32 – Diagrama de Resfriamento contínuo para o aço SAE 4340. Adaptado de (20) onde B = Bainita, M = Martensita, F = Ferrita, P = Perlita. Ms e Bs mostram a curva de início da formação de martensita e bainita respectivamente; Mf indica a curva de término da transformação martensítica; Fs e Ps as curvas de início de formação de Ferrita e Perlita, respectivamente. Pf mostra a curva de término da formação de Perlita.

Para a análise da microestrutura teórica, o gráfico de resfriamento contínuo (CCT) é o mais adequado em detrimento ao gráfico de transformação isotérmica (TTT), pois no gráfico TTT assume-se que o resfriamento ocorre instantaneamente, o que em termos de processos industriais não é verdade. Pela leitura do gráfico apresentado determina-se quais as fases e estruturas esperam-se na microestrutura para uma dada taxa de resfriamento. Diante disto, mostra-se que é preciso levar em consideração qual a temperatura de início e taxa de resfriamento utilizadas durante

o tratamento térmico para se obter informações das diferentes microestruturas e consequentemente das diferentes propriedades mecânicas.

A falta de um memorial de cálculo também dificulta a investigação do problema que causou a ruptura do eixo. Poucos dados das tensões aplicadas ao eixo e nenhum dado dos carregamentos previstos foram fornecidos pela equipe. Dessa forma assumiu-se que o carregamento sobre o eixo foi torção pura, sem carregamentos axiais (tração) ou radiais (flexão).

A dureza encontrada pelo teste realizado está entre 51 e 53 HRC e de acordo com o software consultado (17), o material utilizado na fabricação da peça é o SAE 4340 temperado em óleo e revenido a 315°C, porém tanto para a peça analisada quanto para os valores encontrados no *software* não há informações sobre o tempo e temperatura de austenitização utilizadas para realizar a têmpera e nem sobre o tempo e temperatura de revenimento.

De acordo com os exames macroscópicos realizados, não há correlação dos elementos de fratura observados no componente analisado com os resultados encontrados por Ritchie (21) nas superfícies de fratura em ensaios de fadiga em Modo III para corpo de prova de aço SAE 4340, para tensões altas de cisalhamento $K_{III} = 30 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$, com trincas se propagando a partir da superfície externa do eixo (entalhe), com aplicação de tensão em Modo I. Tanto Ritchie (21) quanto Tschegg (22) observaram na superfície de fratura por fadiga em Modo III, marcas de raspagem do material, ausentes na superfície de fratura analisada. A fratura observada por Ritchie e Tschegg ocorre perpendicularmente ao eixo.

Os defeitos de usinagem sobre a superfície do eixo, que podem ser observados na análise macroscópica, próxima à região do raio de concordância, pode ter sido um fator contribuinte para a nucleação de trincas na superfície do eixo, que deram origem às trincas radiais, com aspecto de dentes de serra observadas. A superfície de fratura observada é compatível com a encontrada por Brooks (23) (Figura 33). Segundo o autor, a fratura ocorreu por torção e havia presença de trincas na superfície externa, que causaram o aparecimento das trincas em forma de dente de serra. Observa-se que a superfície de fratura ocorre em um ângulo próximo a 45°.

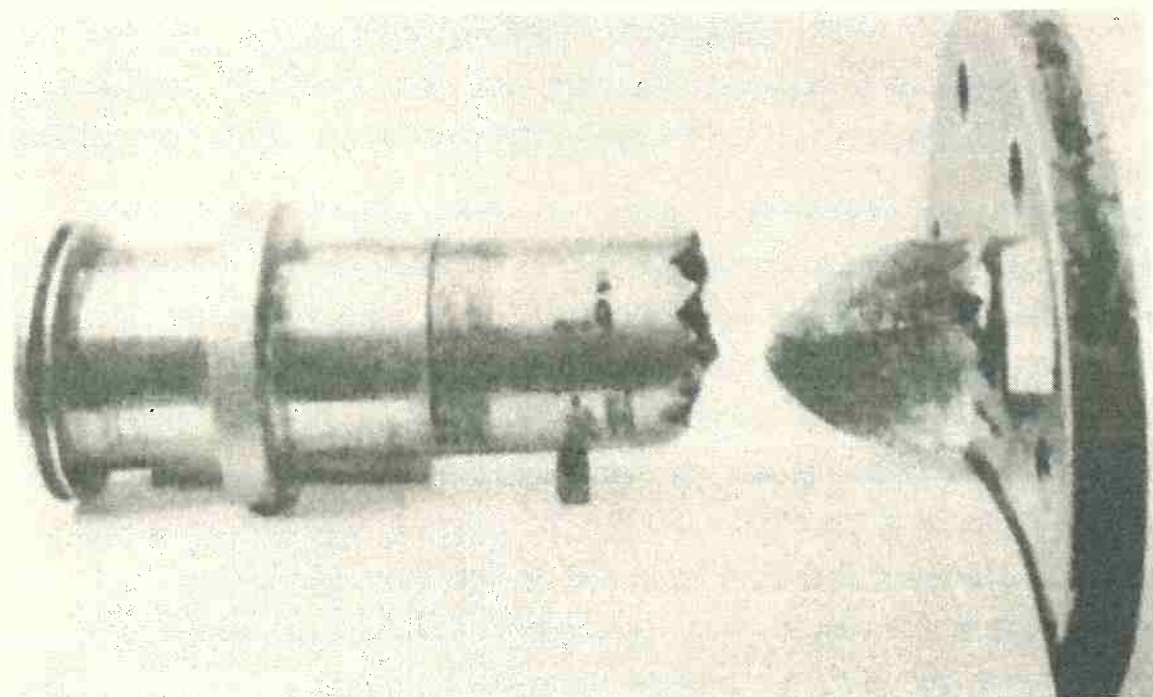


Figura 33 – Fratura por sobrecarga em eixo carregado por torção, com presença de morfologia de dente de serra junto à superfície externa do eixo (23), similar à observada no presente trabalho (Figura 17b).

4.1 Recomendações para evitar nova falha do componente

Com base nas observações feitas sobre a ausência de dados dos parâmetros utilizados para a usinagem, têmpera e revenimento, mostra-se que é necessário que um componente possua um memorial descritivo das etapas de manufatura, desde o estado bruto da matéria prima para que haja documentação da condição pré usinagem do metal para comparação com os parâmetros utilizados na máquina durante a usinagem. Dessa forma tornar-se-ia possível fornecer uma melhor análise quanto à manufatura, se o procedimento adotado está correto para o estado do material bruto ou, se a falha foi causada por problemas de manufatura, tornar-se-ia possível fornecer sugestões para corrigi-la.

O mesmo vale para os processos de tratamento térmico. O fornecimento da temperatura e tempo de austenitização, bem como a taxa de resfriamento, a temperatura inicial do tratamento de têmpera e o meio utilizado – água, salmoura ou óleo, com ou sem agitação – e a temperatura e tempo de revenimento, informações mais precisas do estado do tratamento, ofereceriam melhores condições para

encontrar as propriedades mecânicas catalogadas adequadas e sobre a microestrutura esperada que por sua vez proporcionaria condições para determinação com maior precisão de possíveis desvios no material.

Durante o processo de seleção de material, é fundamental que a escolha seja feita levando-se em consideração outras importantes propriedades do material relevantes ao projeto, como a tenacidade, limite de escoamento e resistência à fadiga. A escolha do material consideração apenas seu limite de resistência, tal como foi feito pelo software de simulação de elementos finitos, ANSYS, mostrou-se demasiadamente modesta, especialmente em componentes submetidos a carregamentos dinâmicos e cíclicos. Por exemplo, sabendo-se a tensão máxima desejada para o projeto e aplicando os fatores de segurança desejados, podem-se escolher valores de tenacidade à fratura de possíveis materiais e por sua vez determinar o comprimento de trinca crítico aceitável para o projeto, ou ajustar as dimensões do componente para que esses parâmetros sejam aceitáveis para os diferentes materiais escolhidos.

O solicitante queria usar um aço na condição bruta de tempera, priorizando a resistência à tração do material, mas nessa condição a tenacidade do material é baixa. A boa prática utiliza o tratamento térmico de revenimento para reduzir a dureza do material e consequentemente aumentar a tenacidade.

Para que o material bruto seja usinado, é necessário que o metal base seja submetido a um processo de recozimento para aumentar a usinabilidade do metal. Após a usinagem da peça, esta deve passar por um processo de têmpera em óleo, a partir da temperatura de austenitização (850°C) em óleo a 80°C . O tratamento de revenimento deve ser realizado na temperatura desejada por 2h com resfriamento em forno para temperaturas de revenimento maior que 450°C , ou em ar para temperaturas menores que 450°C . Como pode ser observado na Figura 35, existem outras temperaturas de revenimento possíveis para este tratamento, que influenciam na resistência do material.

A Figura 34 mostra uma linha do tempo para as principais transformações que ocorrem em um aço genérico submetido a tratamento térmico a 500°C .

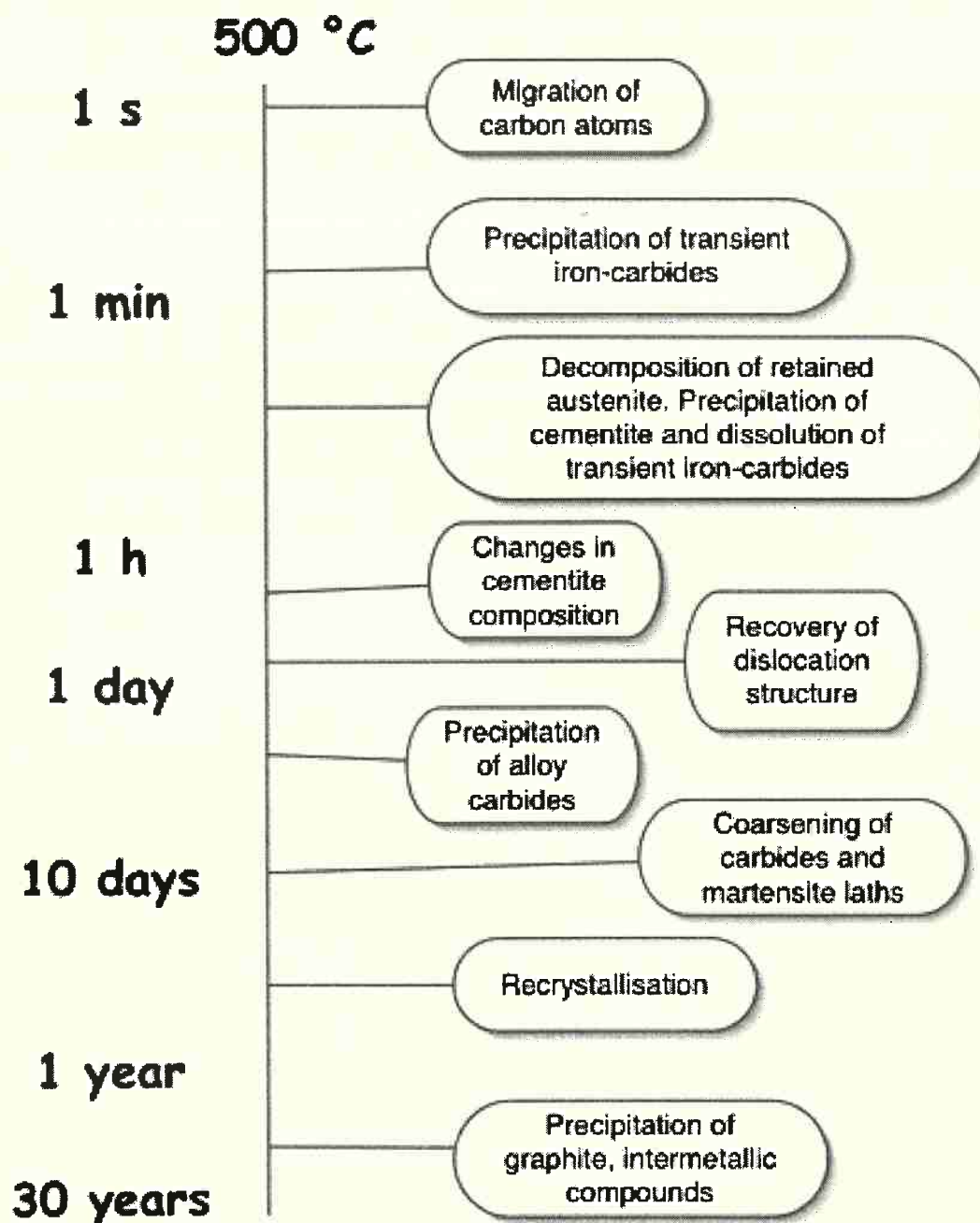


Figura 34 – linha do tempo de processos atômicos que ocorrem durante o tratamento térmico (24)

A imagem tem caráter apenas ilustrativo, uma vez que os tempos variam de acordo com a liga submetida ao tratamento, mas é suficiente para mostrar quais fenômenos ocorrem na estrutura atômica da liga e sua importância.

Na Figura 35, obtida no Software CES, é apresentado um critério de seleção de material que leva em consideração o limite de escoamento e a resistência à

fratura. Pelo gráfico observa-se que o aumento da temperatura de revenimento reduz o limite de escoamento e aumenta a resistência à fratura do aço SAE 4340. Observa-se ainda que o aço SAE 4340 temperado em óleo e revenido a 425°C apresenta limite de escoamento ligeiramente menor que o mesmo aço revenido a 315°C, porém com resistência à fratura consideravelmente maior.

Fora do âmbito do aço SAE 4340, o uso do software CES (17) fornece outras sugestões de ligas e materiais que podem ser utilizadas (Figura 36), de acordo com os critérios de seleção adotados (limite de escoamento e resistência à fratura) para diferentes famílias de aços, por exemplo, destaca-se a liga Fe-5Cr-Mo-V *aircraft steel, quenched and tempered*.

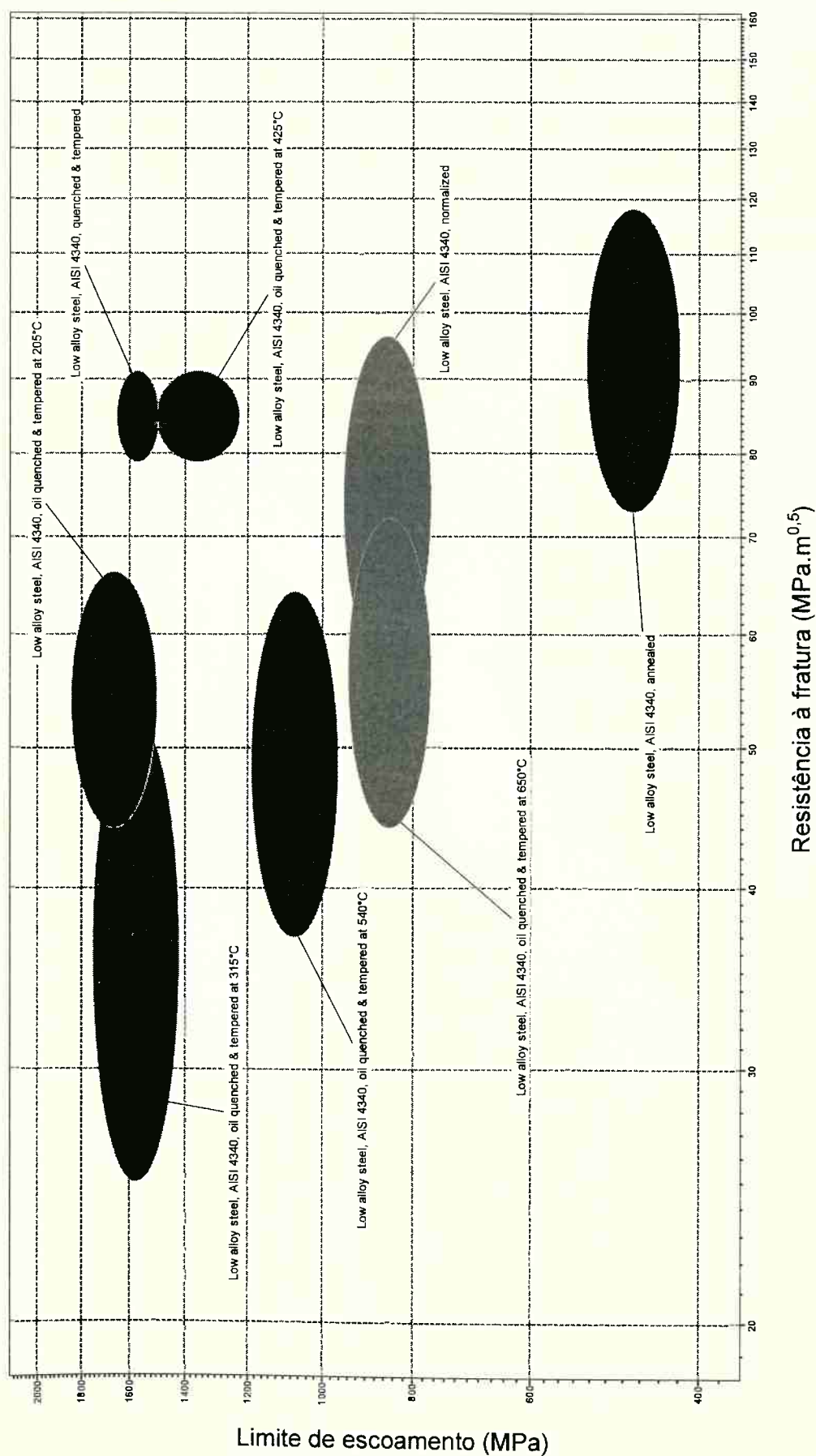


Figura 35 – Gráfico de critério de decisão para diferentes tratamentos térmicos do aço SAE 4340, cujos critérios adotados foram o limite de escoamento e a resistência à fratura. (17).

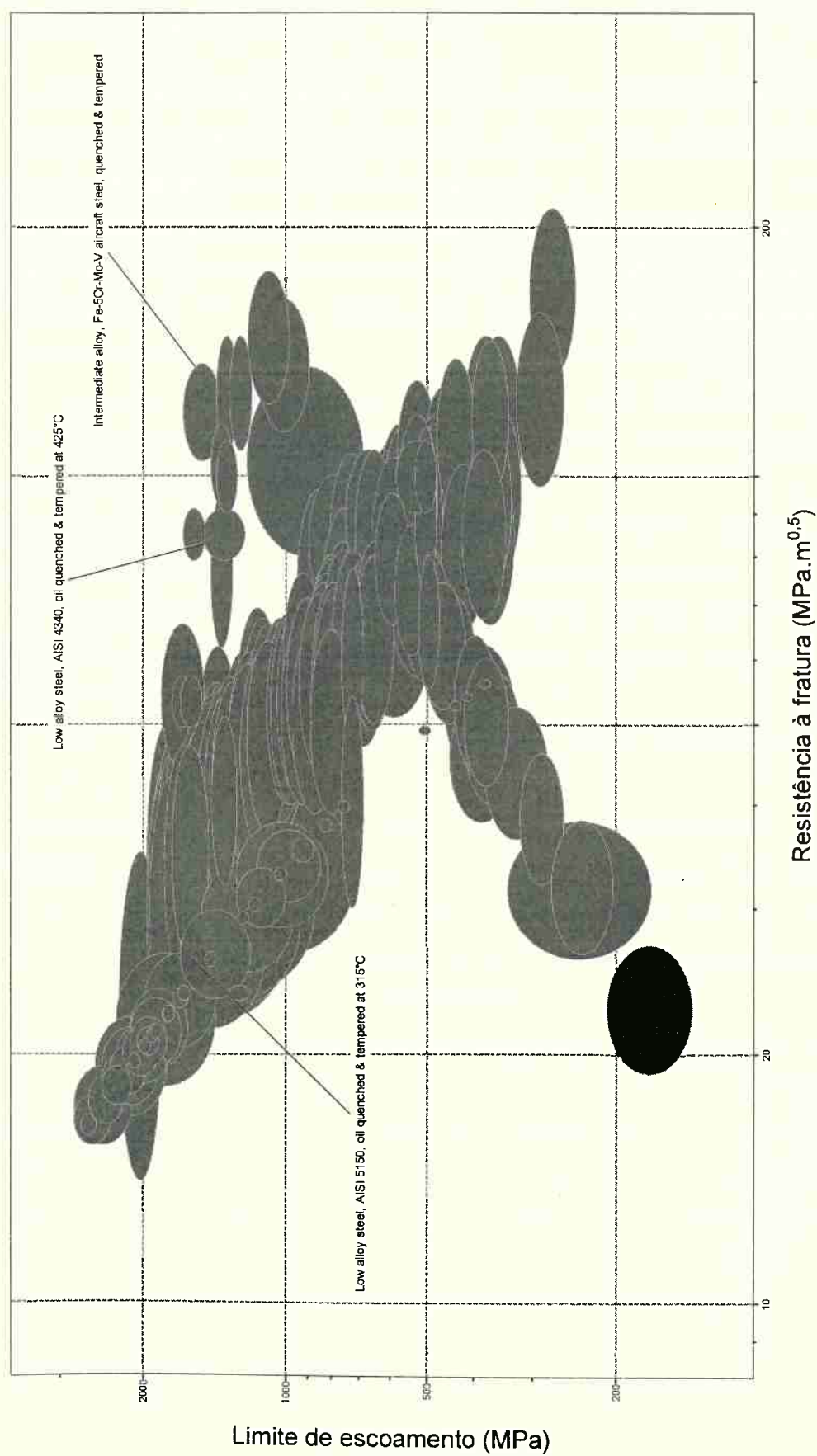


Figura 36 – Gráfico de critério de seleção de materiais, cujos critérios adotados foram o limite de escoamento e a resistência à fratura, englobando diferentes tipos de ligas ferrosas (17).

5 Conclusões

1. A limitação de dados fornecidos sobre a manufatura e o projeto do componente mostrou a necessidade de melhoria da documentação técnica do projeto e manufatura do produto por parte da Equipe Poli.
2. Os resultados de dureza e de caracterização microestrutural indicam que o tratamento térmico que revenimento do aço SAE 4340 foi realizado a uma temperatura de 315 °C, produzindo uma microestrutura com baixa tenacidade à fratura (entre 25 e 50 MPa.m^{0,5});
3. O tratamento térmico de revenimento do aço SAE 4340 realizado a uma temperatura de 425 °C produziria uma microestrutura com maior tenacidade à fratura (entre 80 e 90 MPa.m^{0,5});
4. O exame microfractográfico mostrou presença de alvéolos equiaxiais, típico de fratura dúctil, além de fratura intergranular, típico de fratura frágil. A presença de "dentes de serra", comumente conhecidos como "marcas de catraca" e dos diferentes mecanismos de fratura observados na superfície de fratura, indicam que a falha ocorreu por fadiga.
5. O baixo ciclo ao qual o eixo foi submetido até a ruptura indica que há subdimensionamento da peça.
6. Os resultados sugerem que a fratura foi iniciada na superfície externa do eixo, no raio de concordância e presença de marcas de usinagem. Sugere-se, deste modo, revisar o projeto mecânico, considerando a utilização de um raio de concordância relevante, e o processo de fabricação do componente de modo a evitar a presença de concentradores de tensão;
7. É possível selecionar aços para a fabricação do eixo com maiores valores de tenacidade à fratura, contudo sugere-se revisar as dimensões do eixo de modo a evitar a falha por sobrecarga do material, cujo limite de resistência é próximo de 1700 MPa. No entanto, deve-se levar em consideração que a tensão cisalhante máxima que um material suporta é igual à metade da tenacidade à fratura.

6 Sugestões para trabalhos futuros

1. Uma investigação mais profunda levando em consideração diferentes modos de carregamento e simulações contribuiriam para uma compreensão mais abrangente da natureza da fratura.
2. Uma análise metalográfica para determinar o tamanho do grão austenítico poderia ajudar a estimar a temperatura de austenitização.
3. Identificar o fabricante, mantido em sigilo pela equipe, permitiria entrevistas que levassem a informações relevantes sobre os processos de manufatura e assim investigar com maior critério as propriedades mecânicas do material.
4. A análise fractográfica da superfície de fratura da região 2 e 3 pode ser feita para verificar se há correlação entre as trincas observadas nessas regiões com o tipo de fratura observada na região 1.

7 Referências

1. **Jung, Carl Gustav.** *A dinâmica do inconsciente: A natureza da psique.* Petrópolis : Vozes, 2011. p. 344. Vol. 8/2.
2. **Aliya, Debbie.** The Failure Analysis Process: An Overview. [A. do livro] ASM International. *ASM Handbook Vol. 11 - Failure Analysis and Prevention.* s.l. : ASM International, 2002.
3. **Scutti, James J. e McBrine, William.** Introduction to Failure Analysis and Prevention. [A. do livro] ASM International. *ASM Handbook Vol 11 - Failure Analysis and Prevention.* s.l. : ASM International, 2002.
4. **Wulpi, Donald J.** *Understanding how components fail.* s.l. : ASM International.
5. **Kerlins, Victor.** Modes of Fracture. [A. do livro] ASM International. *ASM Handbook vol. 12: Fractography.* s.l. : ASM International.
6. **Miller, Brett A.** Overload Failures. [A. do livro] ASM International. *ASM Handbook vol. 11: Failure Analysis and Prevention.* s.l. : ASM International, 2002.
7. *Wikipédia.* [Online] Wikimedia. [Citado em: 30 de maio de 2018.] https://en.wikipedia.org/wiki/De_Havilland_Comet.
8. **Miranda, Antonio Carlos de Oliveira.** *Propagação de trincas por fadiga em geometrias 2D complexas sob cargas cíclicas variáveis.* Rio de Janeiro : s.n., 2003.
9. **Anderson, T.L.** *Fracture Mechanics.* s.l. : CRC, 1995.
10. **Norton, Robert L.** *Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada.* Porto Alegre : Bookman, 2013. 978-85-8260-022-1.
11. **Wulpi, Donald J.** Failures of Shafts. [A. do livro] ASM International. *ASM Handbook Vol. 11 - Failure Analysis and Prevention.* s.l. : ASM International, 2002.
12. **SAE Brasil.** *Regulamento administrativo e técnico Baja.* s.l. : SAE Brasil, 2017.
13. **Souza, Sérgio Augusto de.** *Composição Química dos Aços.* São Paulo : Edgard Blücher, 1989.

14. Traditional Machining Processes: Turning. [A. do livro] ASM International. *ASM Handbook Vol. 16: Machining*. s.l. : ASM International, 1990.
15. **Lopes, Karina Estefânia Souza**. *Influência dos parâmetros de usinagem na resistência à fadiga de aços AISI 4140*. Belo Horizonte : s.n., 2006.
16. **Silva, André Luiz da Costa e**. *Aços e ligas especiais*. São Paulo : Edgard Blücher, 2010.
17. *Cambridge Engineering Selector Database level 3*. [Software] s.l. : Granta Design, 2018.
18. **Guimarães, A. V., et al**. Failure analysis of a half-shaft of a formula SAE racing car. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. 2016, Vol. 7.
19. **Suresh, R., Basavarajappa, S e Gaitonde, Vinayak N**. State-of-the-art research in machinability of hardened steels. *Institution of Mechanical Engineers*. 2013.
20. **Askeland, Donald R**. *The Science and Engineering of Materials*. s.l. : Cengage Learning, 2010.
21. **Ritchie, R. O., et al**. Mode III fatigue crack propagation in low alloy steel. *Metallurgical transactions A*. 1982, Vol. 13A.
22. **Tschegg, E. K**. Mode III and Mode I fatigue crack propagation behaviour under torsional loading. *Journal of Materials Science*. 1983, Vol. 18.
23. **Brooks, C. R. e Choudhury, A**. *Metallurgical Failure Analysis*. s.l. : McGraw-Hill, 1993.
24. **Colpaert, Hubertus**. *Metalografia dos produtos siderurgicos comuns*. São Paulo : Edgard Blücher, 2008.
25. **al., S.K. Bhaumik et**. Fatigue Failure of a Hollow power transmission shaft. *Engineering Failure Analysis*. 2002, Vol. 9.
26. **Lee, Woei-Shyan e Su, Tzay-Tian**. Mechanical properties and microstructural features of AISI 4340 high-strength alloy steel under quenched and tempered conditions. *Journal of Materials Processing Technology*. 1999.

27. **Meyers, Marc A.** *Dynamic Behavior of Materials*. s.l. : John Wiley & Sons, 1994.
28. **Ritchie, R. O., Francis, B. e Server, W. L.** Evaluation of toughness in AISI 4340 alloy steel austenitizes at low and high temperatures. *Metallurgical Transactions*. 1976, Vol. 7A.
29. **Voort, George F. Vander.** *Atlas of Time-Temperature Diagrams for Irons and Steels*. s.l. : ASM International, 1991. p. 35.
30. **Bhadeshia, H. K. D. H.** Tempered martensite. *University of Cambridge*. [Online] [Citado em: 05 de Junho de 2010.] <http://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2004/Tempered.Martensite/tempered.martensite.html>.