

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA – PPGEM**

**Metodologia de Análise e Diagnóstico de Fratura em um Componente Automotivo
sujeito a Cargas Cíclicas Alternadas.**

ISMAR PAULO SIQUEIRA DE ANDRADE

Dissertação n. / PPgEM

Orientador: PROF. DR. CARLOS ALBERTO PASKOCIMAS

**Natal
Janeiro / 2010**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA – PPGEM

**Metodologia de Análise e Diagnóstico de Fratura em um Componente Automotivo
sujeito a Cargas Cíclicas Alternadas.**

ISMAR PAULO SIQUEIRA DE ANDRADE

**Dissertação apresentada ao programa de
Pós-graduação em Engenharia Mecânica,
como requisito para obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA
MECÂNICA.**

Orientador: PROF. DR. CARLOS ALBERTO PASKOCIMAS

Natal
Janeiro / 2010

Ficha Catalográfica

Siqueira de Andrade, Ismar Paulo

Metodologia de Análise e Diagnóstico de Fratura em um Componente Automotivo sujeito a Cargas Cíclicas Alternadas./ Ismar Paulo Siqueira de Andrade-Natal / janeiro 2010. 111 p.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Programa de pós-graduação de ciências e engenharia mecânica-PPGEM 2010.

1. Fratura 2. Fadiga 3. Metodologia pericial 4. Causa judicial mecânica

COD: _____

-----ata-----

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA NA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE

ISMAR PAULO SIQUEIRA DE ANDRADE

**APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E
ENGENHARIA MECÂNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO
NORTE EM 29 DE JANEIRO DE 2010.**

BANCA EXAMINADORA

**Prof.Dr. Carlos Alberto Paskocimas.
Orientador e presidente da Banca.**

**Prof. Dr. Handerson Jorge Dourado Leite
Examinador Externo -IFBA**

**Prof . Dra. Núbia Moura Ribeiro
Examinador Externo-IFBA**

**Prof. Dr. Luiz Gustavo da Cruz Duarte
Examinador Externo- IFBA**

“Todo nosso conhecimento
se inicia com sentimentos”

Leonardo da Vinci

“A imaginação é mais importante
que o conhecimento”

“A coisa mais perfeita que podemos
experimentalizar é o misterioso, é a fonte
de toda arte e de toda ciência verdadeira”

Albert Einstein

A Deus

A memória póstuma dos meus avós maternos

A minha mãe e meu pai, pelo constante incentivo

A minha esposa e meus filhos, pelo apoio

Aos amigos e colegas que muito contribuíram

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Dr. Carlos Alberto Paskocimas, pela contribuição mediando e direcionando a evolução do trabalho.

Aos colegas do laboratório de caracterização de materiais e de mecânica da UFRN, pelo acolhimento e troca de experiências, cedendo espaço e orientações na preparação das amostras. Ao prof. e Doutorando Flavio Timóteo Junior, pelo apoio e recepção no período de realização de análises na UFRN.

Ao prof. Gilberto Augusto de Moraes, do Laboratório de ciências dos materiais, pela recepção e apoio nos ensaios de dureza.

Aos Prof. Clodomiro Alves Junior, responsável pelo laboratório de plasma da UFRN, onde foram executados ensaios de microdureza.

À profa. Dra. Ana Mayra Oliveira Andrade, pelas orientações extra oficiais que em demasia contribuíram para a geração de artigos e trabalhos envolvendo os meus estudos.

Aos colegas do programa MINTER, em especial Prof. Rui Santana, Prof. Bráulio Lima Mota, Prof. Aldemiro Palma, Prof. Raimundo Jorge Santos Paranhos e Prof. Eduardo Jorge Vidal Dultra, pelo apoio na chegada na UFRN, facilitando o deslocamento interno.

A toda equipe do CTGAS do Rio Grande do Norte, pelo profissionalismo na execução dos ensaios lá realizados, especialmente nas pessoas do doutorando Maximmmme Mendes de Melo e Darlan Santos.

Ao prof. Coordenador da CELME, Prof. Everard Lucas, do IFBA Vitória da Conquista, pelo sempre incentivo e apoio, gerando tranquilidade para encaminhamento de todo o trabalho envolvendo o cumprimento dos créditos e realização de experimentos e dissertação.

À diretoria do IFBA Vitória da Conquista, prof. Dr. Paulo Marinho, que também contribuiu para gerar tranquilidade nos períodos de cumprimento de créditos e experimentos laboratoriais.

À profa. Dra. Núbia Moura, coordenadora do programa Minter, pelo acompanhamento e grande trabalho profissional.

Aos professores da UFBA, em especial Prof. Danilo Barreto e Prof. Roberto Sacramento, que contribuíram para a minha formação básica de engenharia.

Ao colega Whellington Dias Martins recepção, acolhimento residencial e apoio na chegada em Natal.

Aos meus alunos do curso de Eletromecânica do IFBA, que entenderam a minha ausência no período de experimento e cumprimento dos créditos.

RESUMO

A competitividade do comércio gerado pela maior disponibilidade de produtos com qualidade e custos menores, promoveu uma nova realidade de produção industrial com pequenas folgas. Desvios de trajetória na produção não são descartados, as incertezas estatisticamente podem ocorrer. O consumidor mundial e o brasileiro estão respaldados pelo código de defesa do consumidor, para pleitos quanto à má qualidade dos produtos. O automóvel é composto por diversos sistemas e milhares de peças constituintes, aumentando a probabilidade de falhas. Os sistemas dinâmicos e de segurança, são críticos em relação às conseqüências das falhas possíveis. A investigação da falha nos dá a possibilidade de aprendizado e contribuição para diversas melhorias. O nosso objetivo principal neste trabalho é desenvolver metodologia específica sistemática através da investigação da causa raiz da falha ocorrida em uma ponta de eixo da suspensão dianteira de um automóvel, realizar análises comparativas de dados entre a peça fraturada e estoque e informações de projeto. A nossa investigação foi baseada em uma falha gerada em um sistema de suspensão automotivo, envolvido em uma causa judicial mecânica, gerando danos materiais e pessoais. Nas investigações que envolvem análise de falhas mecânicas, o conhecimento de engenharia de materiais tem papel crucial no processo, pois permite a aplicação de técnicas para caracterização dos materiais, relacionando os atributos técnicos exigidos de uma respectiva peça com a sua estrutura de material de fabricação, dando um maior aporte científico ao trabalho. A metodologia específica desenvolvida obedece a um fluxograma próprio. Na fase inicial foram coletados dados dos autos e informações dos envolvidos. As seguintes análises laboratoriais foram executadas: macrografia da fratura, micrografia com MEV (microscópio eletrônico de varredura) da fratura inicial e final, análise de fases com microscopia ótica, análise de dureza Brinell e microdureza Vickers, análise química quantitativa e qualitativa, utilizando fluorescência de raios x e espectroscopia ótica para análise de carbono, foi feito estudo qualitativo do estado de tensão. Dados de campo também foram coletados. Nas análises foram comparados dados dos valores resultantes das peças fraturada estoque e valores de projeto. Após a investigação, foi concluído que: a metodologia desenvolvida sistematizou a investigação e permitiu cruzamentos de dados minimizando probabilidade de erros de diagnóstico, a morfologia da fratura indica falha pelo mecanismo de fadiga em um local geometricamente propício concentrador de tensão, a peça foi submetida a tensões baixas pela área de secção da fratura final, o material de fabricação da peça fraturada tem baixa ductilidade, o componente fraturou em um momento inferior ao preconizado pelo fabricante,

os percentuais de C, Si, e Cr da peça fraturada estão com os valores diferentes do projeto, o valor de dureza do limite superior da peça fraturada está maior que o projeto e não existe uniformidade de fabricação entre peça fraturada e estoque. O trabalho contribuirá para otimizar o norteamto das ações em uma perícia judicial de engenharia mecânica.

Palavras chaves: Fratura, Fadiga, Metodologia pericial, Causa judicial mecânica.

ABSTRACT

The competitiveness of the trade generated by the higher availability of products with lower quality and cost promoted a new reality of industrial production with small clearances. Track deviations at the production are not discarded, uncertainties can statistically occur. The world consumer and the Brazilian one are supported by the consumer protection code, in lawsuits against the products poor quality. An automobile is composed of various systems and thousands of constituent parts, increasing the likelihood of failure. The dynamic and security systems are critical in relation to the consequences of possible failures. The investigation of the failure gives us the possibility of learning and contributing to various improvements. Our main purpose in this work is to develop a systematic, specific methodology by investigating the root cause of the flaw occurred on an axle end of the front suspension of an automobile, and to perform comparative data analyses between the fractured part and the project information. Our research was based on a flaw generated in an automotive suspension system involved in a mechanical judicial cause, resulting in property and personal damages. In the investigations concerning the analysis of mechanical flaws, knowledge on materials engineering plays a crucial role in the process, since it enables applying techniques for characterizing materials, relating the technical attributes required from a respective part with its structure of manufacturing material, thus providing a greater scientific contribution to the work. The specific methodology developed follows its own flowchart. In the early phase, the data in the records and information on the involved ones were collected. The following laboratory analyses were performed: macrography of the fracture, micrography with SEM (Scanning Electron Microscope) of the initial and final fracture, phase analysis with optical microscopy, Brinell hardness and Vickers microhardness analyses, quantitative and qualitative chemical analysis, by using X-ray fluorescence and optical spectroscopy for carbon analysis, qualitative study on the state of tension was done. Field data were also collected. In the analyses data of the values resulting from the fractured stock parts and the design values were compared. After the investigation, one concluded that: the developed methodology systematized the investigation and enabled crossing data, thus minimizing diagnostic error probability, the morphology of the fracture indicates failure by the fatigue mechanism in a geometrically propitious location, a tension hub, the part was subjected to low tensions by the sectional area of the final fracture, the manufacturing material of the fractured part has low ductility, the component fractured in an earlier moment than the one recommended by the manufacturer, the percentages of C, Si, Mn and Cr of the fractured part

present values which differ from the design ones, the hardness value of the superior limit of the fractured part is higher than that of the design, and there is no manufacturing uniformity between stock and fractured part. The work will contribute to optimizing the guidance of the actions in a mechanical engineering judicial expertise.

Key-words: Fracture, Fatigue, Expert methodology, Mechanical judicial cause.

ÍNDICE DE ASSUNTOS.

AGRADECIMENTOS		V
RESUMO		VI
ABSTRACT		VIII
ÍNDICE DE TABELAS		XIII
ÍNDICE DE FIGURAS		XIV
LISTA DE SÍMBOLOS		XVII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS		XVIII
1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MERCADO GLOBALIZADO E QUALIDADE DOS PRODUTOS	1
1.2	DIREITO DO CONSUMIDOR: BREVE HISTÓRICO MUNDIAL E BRASILEIRO	2
1.2.1	Direitos do consumidor no Brasil	2
1.3	ANÁLISE DE FALHAS: PERICIAS MECÂNICAS JUDICIAIS	3
2	OBJETIVOS	6
2.1	OBJETIVO GERAL	6
2.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	6
3	RELEVÂNCIA DO TRABALHO	7
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
4.1	FALHAS E FALHAS MECÂNICAS	8
4.1.1	Consumo	9
4.1.2	Ciclo de vida dos produtos	10
4.1.3	Confiabilidade	12
4.1.4	Produtos, tipos e fontes de falhas	15
4.1.5	Falhas e algumas metodologias de análises de falhas (FMEA, FTA, RCFA, PDCA, diagrama causa e efeito e SIX SIGMA)	29
4.1.6	Análise de falha: superficiais (geometria/fabricação), macroanálise, rugosidade, microanálise, defeitos cristalográficos e áreas remanescentes da trinca	38
4.1.7	Falhas Mecânicas Automotivas	47
4.1.8	Ferro fundido: obtenção, falhas de fundição e modagem, classificação, componentes químicos principais e seus efeitos e fratura	49
5.	MATERIAIS E MÉTODOS	54
5.1	FLUXOGRAMA GERAL DE DESENVOLVIMENTO DA ANÁLISE DE ENGENHARIA PERICIAL	55
5.2	FLUXOGRAMA ESPECÍFICO DE DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE	59
5.3	COMPONENTES UTILIZADOS PARA INVESTIGAÇÃO	62
5.3.1	Peça fraturada	63
5.3.2	Peça estoque	63
5.4	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	63
5.4.1	Equipamento para análise macrográfica	63

5.4.2	Microscopia ótica	63
5.4.3	Microscópio eletrônico de varredura (MEV)	64
5.4.4	Dureza e microdureza	64
5.4.5	Qualitativo e quantitativo químico	64
5.5	MÉTODO	64
5.5.1	Metodologia	65
5.5.2	Realização da investigação	65
5.5.2.1	Dados iniciais	66
5.5.2.2	Dados importantes gerados pelas respostas aos termos de diligencias	66
5.5.2.3	Dados de visita ao local e depoimentos	67
5.5.2.4	Perícia de engenharia no automóvel	67
5.5.2.5	Análise qualitativa do estado de tensão	67
5.5.2.6	Análise laboratorial	68
6	RESULTADOS OBTIDOS	74
6.1	DADOS RELACIONADOS COM A INVESTIGAÇÃO NOS AUTOS	74
6.2	DADOS IMPORTANTES COLETADOS ATRAVÉS DOS TERMOS DE DILIGENCIA	75
6.3	DADOS RELACIONADOS COM A VISITA AO LOCAL DO ACIDENTE E VISTORIA NO AUTOMÓVEL	77
6.4	ESTADO DE TENSÃO E DADOS DE ANÁLISES LABORATORIAIS DA PEÇA FRATURADA E PEÇA ESTOQUE	80
6.4.1	Estado qualitativo de tensão	80
6.5	DADOS LABORATORIAIS DA PEÇA FRATURADA	82
6.5.1	Macrografia da superfície da fratura	83
6.5.2	Micrografia da região de fratura inicial e final	85
6.5.3	Microscopia ótica de fases e percentuais constituintes da peça fraturada	92
6.5.4	Dureza e microdureza da peça fraturada e estoque	96
6.5.5	Quantitativo e qualitativo químico da peça fraturada	98
6.6	DADOS LABORATORIAIS DA PEÇA ESTOQUE	99
6.6.1	Microscopia ótica de fases e percentuais de constituintes da peça estoque	99
6.6.2	Dureza e microdureza da peça estoque	100
6.6.3	Qualitativo e quantitativo químico da peça estoque	101
7	ANÁLISE DOS DADOS, DISCUSÕES E CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES	103
7.1	DADOS NOS AUTOS, TERMOS DE DILIGENCIA, VISITA AO LOCAL E VISTORIA DE ENGENHARIA.	103
7.2	DADOS LABORATORIAIS, CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E PROJETO	103
7.3	ANÁLISE DA METODOLOGIA ESPECÍFICA EMPREGADA	107
7.4	CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES	108
7.4.1	Autos, dados de campo, do sistema de suspensão, imediações da peça fraturada, análises laboratoriais da peça fraturada e peça estoque	108
7.4.2	Análise comparativa e comentários - Peça fraturada x Projeto x Peça Estoque	110
8	CONCLUSÃO	112

9	SUGESTÕES E AVANÇOS NA PESQUISA	114
10	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	115

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1	SCF, Fatores concentradores de tensão para um eixo	21
Tabela 2	Exemplo real de aplicação de RCFA: B1101 A, B e B1102 A, B	31
Tabela 3	Exemplo de índices de severidade	35
Tabela 4	Exemplo de critério de avaliação de ocorrência	35
Tabela 5	Exemplo de critério de avaliação de detecção, FMEA projeto	36
Tabela 6	Formulário geral de uma FMEA	36
Tabela 7	Norma NBR 6916/1981	54
Tabela 8	Dados e necessidades dos termos de diligencia emitidos	67
Tabela 9	Análises seqüenciais na peça fraturada e respectivos objetivos	69
Tabela 10	Dados do fabricante e especificações de projeto	76
Tabela 11	Percentual de constituintes das fases grafita, perlita e ferrita, peça fraturada e peça estoque	95
Tabela 12	Mapeamento de dureza Brinell, peça estoque e fraturada	96
Tabela 13	Resultado da microdureza HV na peça fraturada	97
Tabela 14	Resumo da microdureza da peça fraturada e percentual de área de cada fase	97
Tabela 15	Resultado da microdureza HV na peça estoque	98
Tabela 16	Resumo da microdureza da peça estoque e percentual de área de cada fase	98
Tabela 17	Percentual quantitativo e qualitativo químico da peça fraturada	99
Tabela 18	Resultado da microdureza HV na peça estoque	101
Tabela 19	Resumo da microdureza da peça estoque e percentual de área de cada fase	101
Tabela 20	Percentual quantitativo e qualitativo químico da peça estoque	101
Tabela 21	Comparativo de microdureza HV e percentual em cada fase	105
Tabela 22	Valores comparativos de dureza: projeto, peça estoque e peça fraturada	106
Tabela 23	Composição química qualitativa e quantitativa: projeto, peça estoque e peça fraturada. FRX	106
Tabela 24	Percentual de carbono e carbono equivalente: projeto, peça estoque e peça fraturada	107
Tabela 25 a	Dados: peça fraturada, peça estoque e dados de projeto, comentários e análise comparativa (I)	110
Tabela 25 b	Dados: peça fraturada, peça estoque e dados de projeto, comentários e análise comparativa (II)	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Subfases de projetos	10
Figura 2	Processo de fabricação	11
Figura 3	Montagem	11
Figura 4	Curva da banheira	14
Figura 5	Estrutura de um problema	16
Figura 6	Mapa conceitual, mecanismos básicos de falha	18
Figura 7	Eixo: secções diferentes submetidas à flexão	20
Figura 8	Distribuição de tensão, influencia de pontos concentradores de tensão	21
Figura 9	Entalhes em “U” e em “V”, diferentes valores de Kt	21
Figura 10	Ponto de concentração de tensão, trinca em uma pá de uma turbina hidráulica [20]	22
Figura 11	Trinca em um ponto concentrador de tensão [20]	22
Figura 12	Rugosidade como fator de diminuição da resistência à fadiga	23
Figura 13	Vida fadiga x Ciclos ensaio x Rugosidade	23
Figura 14	Contorno de tensão de Von-Mises, para rugosidade superficial Rq=1	24
Figura 15	Contorno de tensão de Von-Mises, para rugosidade superficial Rq=0,1	24
Figura 16	Indicação de pontos concentradores de tensão nos vales. Princípio de cálculo do fator de concentração de tensão através de elementos finitos	24
Figura 17	Tipos de Carregamento: a) Solicitação repetida, b) Carregamento reverso e c) Tração e compressão flutuantes	26
Figura 18	Carregamento irregular. Próximo à realidade	27
Figura 19	Teste de fadiga: corpo de prova em ferro fundido GS51, 35 Hz no teste convencional mecânico e 20 kHz no teste com ultra som	27
Figura 20	Terminologia para tensões alternadas	28
Figura 21	Ciclo PDCA	32
Figura 22	Distribuição normal: faixas exigidas de probabilidade para o produto passar no controle	33
Figura 23	Fluxograma básico de aplicação de uma FMEA	34
Figura 24	Diagrama de causa e efeito, genérico guia	37
Figura 25	Simbologia para eventos FTA	38
Figura 26	Simbologias de porta lógica FTA	38
Figura 27	Desenho técnico do eixo do pinhão	40
Figura 28	Eixo do pinhão: localização da fratura em um ponto concentrador de tensões	40
Figura 29	Visão geral do eixo fraturado	40
Figura 30	Pontos de solda, nucleação de micro trincas	41
Figura 31	Vida a fadiga e profundidade de entalhe	41
Figura 32	Marcas de praia de fadiga reversa, A e B, nucleação de micro trincas HAZ e OL região de fratura final	42
Figura 33	Estágios de propagação de trincas por fadiga	43
Figura 34	Secção de fratura mostrando os três estágios de propagação	43
Figura 35	Marcas de rio e propagação das microtrincas [10]	44
Figura 36	Marcas de rio e propagação de microtrincas [52]	44

Figura 37	Marcas de catraca [1]	45
Figura 38	Trinca intergranular [13]	45
Figura 39	Trinca intragranular [13]	45
Figura 40	Fotos em MEV depois de ataque com reagente de Clark, observamos: a) coalescimento de microcavidades na região de início da falha e b) clivagem na região de ruptura final [48]	46
Figura 41	<i>Dimple</i> na face de fratura, material dúctil [10]	46
Figura 42	<i>Dimple</i> na região III, fratura por sobrecarga [52]	47
Figura 43	Região de fratura final, clivagem [8]	47
Figura 44	Temperatura do eutético estável e metaestável	51
Figura 45	Fratura de ferro fundido nodular tipo dúctil com coalescimento de cavidades	53
Figura 46	Fratura de ferro fundido nodular tipo frágil	53
Figura 47	Fluxograma geral de desenvolvimento de análise de engenharia pericial	56
Figura 48	Fluxograma específico	59
Figura 49	Banho de ouro nas amostras para coleta de imagens no MEV	70
Figura 50	Ponto de retirada de corpo de prova da peça estoque	72
Figura 51	Corpo de prova da peça estoque	71
Figura 52	Amostra da peça fraturada	73
Figura 53	Corpo de prova da peça estoque para FRX	73
Figura 54	Visão geral do automóvel com avarias generalizadas	75
Figura 55	Desenho de acordo com boletim de acidente de trânsito (V1 = outro veículo, V2= autor)	75
Figura 56	Local do acidente com marcas e rasgo na pista	77
Figura 57	Vista inferior da suspensão dianteira direita	78
Figura 58	Vista inferior da suspensão dianteira esquerda	78
Figura 59	Vista inferior da suspensão dianteira direita, ponta de eixo desmontada	79
Figura 60	Vista inferior da suspensão dianteira esquerda	79
Figura 61	Ponta de eixo fraturada, conjunto montado	79
Figura 62	Ponta de eixo desmontado	79
Figura 63	Inscrições em alto relevo na ponta de eixo da peça estoque	80
Figura 64	Inscrições em alto relevo da ponta de eixo da peça fraturada	80
Figura 65	Concentração de tensão para deslocamento retilíneo	81
Figura 66	Tensões preferenciais para deslocamento retilíneo na seção de mudança de geometria	81
Figura 67	Concentração de tensão para esterçamento à esquerda	82
Figura 68	Tensões preferenciais para trajetória de esterçamento à esquerda na seção de mudança de geometria	82
Figura 69	Ponta de eixo montada e indicação da região da fratura	83
Figura 70	Visão geral da peça fraturada	83
Figura 71	Região onde foi retirada a amostra na peça fraturada	84
Figura 72	Macrografias: marcas de catraca na parte inferior e superior da peça fratura	84
Figura 73	Amostra da região de fratura inicial	85
Figura 74	Detalhe de marca de catraca, topo da trinca. Fratura inicial, MEV 24x	85
Figura 75	Detalhe da marca de catraca, meio da trinca. Fratura inicial MEV 24x	86

Figura 76	Marca de catraca no final da crista da trinca, marcas de rio circundadas (estrias). Fratura inicial, MEV 24x	86
Figura 77	Marcas de rio e evolução de trincas intergranular. Fratura inicial MEV 50x	87
Figura 78	Trincas na superfície dos grãos. Fratura inicial MEV 1000x	87
Figura 79	Detalhe de grãos, fratura evoluiu de forma intergranular. MEV 1000x	88
Figura 80	Detalhe de um grão, com trinca no seu contorno. MEV 1500x	88
Figura 81	Parte superior da peça fraturada, seleção da região amostral de fratura final (setas verdes) e fratura inicial (setas vermelhas)	89
Figura 82	Amostra da região de fratura final	89
Figura 83	Perfil morfológico da região de fratura final. MEV 45x	90
Figura 84	Detalhe da fratura final com superfície com desagregação superficial intergranular e microtrincas intragranular, setas vermelhas. MEV 270x	90
Figura 85	Detalhe da fratura final, microtrinca intragranular	91
Figura 86	Superfície da fratura na região final, sem a presença de coalescimento ou dimples, microtrinca intergranular. MEV 450x	91
Figura 87	Grão na região de fratura final com desagregação superficial e microtrincas, setas vermelhas. MEV 400x	92
Figura 88	Peça fraturada sem ataque, nódulos de grafita e matriz. Microscópio ótico 50x	92
Figura 89	Peça fraturada, microscópio ótico, com ataque nital 2%, nódulos de grafita, perlita e matriz de ferrita. 100x	93
Figura 90	Peça fraturada. Trinca perpendicular a superfície de fratura. 200x, com ataque nital 2%	93
Figura 91	Peça fraturada. Trinca perpendicular a superfície da fratura. 50x, com ataque nital 2%	94
Figura 92	Peça fraturada. Trinca perpendicular a superfície da fratura. 100x, com ataque nital 2%	94
Figura 93	Peça estoque (uma das regiões): vermelho são nódulos de grafita e amarelo corresponde a matriz e perlita. Microscópio óptico 100x	95
Figura 94	Peça estoque. 100x, sem ataque. Nódulos de grafita e o restante de constituintes	99
Figura 95	Peça estoque. 200x, com ataque nital 2%. Nódulos de grafita, matriz ferrítica e perlita	100

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	Índice de falhas.
μ	Taxa de reparos.
σ	Tensão.
α	Coefficiente linear de expansão térmica.
e	Número de Euler
F(t)	Função acumulada de falhas
C(t)	Função confiabilidade
Kt	Fator concentração de tensão
Kf	Fator de redução de resistência a fadiga
Sf	Tensão resistente a fadiga
Rq	Rugosidade média quadrática
R	Razão de tensão
Nf	Número de ciclos de ruptura a fadiga para um nível de tensão
Hz	Hertz
kHz	Kilo Hertz
σ_a	Amplitude de tensão
Ar	Razão de amplitude de tensão
E	Módulo de elasticidade
ΔT	Varição de temperatura
HB	Dureza Brinell
HV	Dureza Vickers
LR	Tensão ruptura
LE	Tensão de escoamento
A	Alongamento
D	Disponibilidade

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Sistema Anti-Bloqueio
ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
BO	Boletim de Ocorrência Policial
C2C	Metodologia do Consumidor para o Consumidor
CDC	Código de Defesa do Consumidor
CE	Carbono Equivalente
CI	<i>Continuos Improvement</i>
CI	<i>Consumers International</i>
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CPC	Código de Processo Civil
CT	Comitês Técnicos
CTGÁS	Centro de Tecnologia do Gás
DETRAN	Departamento Estadual de Trânsito
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
EUA	Estados Unidos da América
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
FRX	Fluorescência de Raio x
FTA	<i>Failure Tree Analysis</i>
IDEC	Instituto Brasileiro de Defesa do Consumidor
IFBA	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia
IOCU	<i>International Organization of Consumers Unions</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MERCOSUL	Mercado Comum do Sul
MINTER	Mestrado interinstitucional
MM	Meritíssimo
MTBF	<i>Mean Time Between Failure</i>
MTTR	<i>Mean Time to Repair</i>
NPR	Nível de Prioridade de Risco
PDA	<i>Pulse Height Analysis</i>

PDCA	<i>Plan-Do-Check-Action</i>
PROCON	Proteção e Defesa do Consumidor
RCFA	<i>Root Cause Failure Analysis</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SCF	Fator Concentrador de Tensão
SIX SIGMA	Seis Sigma
SUV	<i>Sport Utility Vehicles</i>
TMEF	Tempo Médio Entre Falhas
TMPF	Tempo Médio Para Falhas
TMPR	Tempo Médio Para Reparo
TQM	<i>Total Quality Management</i>
TRPT	Tempo de Reparo Total
5S	Cinco S

1. INTRODUÇÃO

1.1 MERCADO GLOBALIZADO E QUALIDADE DOS PRODUTOS.

As movimentações do homem e da sociedade na busca de novos mundos e perspectivas remontam desde o início da sua existência. A partir da década de 70, a vida no cotidiano humano está passando por situações e acontecimentos diferenciados em função principalmente do aprimoramento de tecnologias desenvolvidas no segmento de informática. Partindo deste grande desenvolvimento das telecomunicações, as redes de comunicação tornaram-se mais densas, e com o aumento das velocidades de transmissão de dados os “caminhos se estreitaram”, através de uma forma mais eficiente e com custos mais reduzidos de contato entre pessoas, e isto fez com que o marketing e as relações comerciais se universalizassem, possibilitando grandes alternativas de acesso a vários produtos de países diversos. “A revolução da informação possibilita um salto na unificação do mercado mundial” [53]. Uma das conseqüências destas novas relações, também é um desenvolvimento maior de tecnologias e métodos gerenciais voltados para o aumento qualidade e diminuição dos custos, assim como desenvolvimento de técnicas produtivas que absorvessem as instabilidades do mercado. Como coloca Menezes [54], a reestruturação da produção deve atender a quatro atributos básicos: “o tecnológico, o organizacional, o trabalho e o mercado”. No segmento automotivo, principalmente por envolver a segurança do consumidor, as indústrias também tem se adequado às exigências de qualidade do mercado aliado à composição do custo dos produtos, aumentando assim a capacidade competitiva. Conforme Murad [55], em especial as empresas do setor automotivo tem missão de satisfação dos clientes, melhoria da qualidade e redução dos custos de garantia. O TQM (*Total Quality Management*) está exercendo forte impacto na maioria dos setores da sociedade. De acordo com Chase [17] e Slack [70]:

A noção de administração da qualidade total foi introduzida por Feigenbaum, em 1957. Mais recentemente, tem sido desenvolvida através de várias abordagens amplamente conhecidas, introduzidas por vários “gurus da qualidade”, como Deming, Juran, Ishikawa, Taguchi e Crosby.

Os produtos de “classe mundial”, selos de qualidade e busca de certificações como fruto da competitividade mundial, e a abertura do mercado foram sendo desenvolvidos nas empresas. Uma das instituições de cunho não governamental que reza de creditação na esfera internacional é a ISO (*International Organization for Standardization*). Uma organização

criada na Suíça, em 1947, na qual os trabalhos de normatização são desempenhados por Comitês Técnicos (CT) de diversos países, contando atualmente com 157 membros relacionados com várias normas também com reconhecimento internacional. “Atualmente, empresas certificadas são consideradas possuidoras de um diferencial competitivo diante da concorrência” [64, 61]. Apesar do grande número de programas visando à otimização dos processos produtivos, os desvios de trajeto na fabricação dos bens de consumo existem, mas a defesa do consumidor vem sendo respaldada e historicamente está evoluindo, conforme desenvolvimento do nosso próximo tópico.

1.2 DIREITO DO CONSUMIDOR: BREVE HISTÓRICO MUNDIAL E BRASILEIRO.

O consumo visando à sobrevivência nasceu com os organismos vivos, a história da humanidade é permeada de situações envolvendo primeiramente as necessidades básicas de sobrevivência: alimento, abrigo e vestuário. Nas relações de troca, compra e venda, podemos citar como atores principais deste processo, a necessidade das partes e o produto. O consumidor projeta no seu interior a sua necessidade, o seu anseio, quanto ao componente que está desejando. A defesa do consumidor, remonta desde o século XVIII a.C., através do código de Hamurabi, como coloca Santos [67], Pedron e outros [60]. Conforme PROCON (Fundação de Proteção e Defesa do Consumidor) o código de Massú, no século XIII a.C., afirmava que a “Índia estabelecia sanções para os casos de adulterações de alimentos”. Também de acordo com o PROCON de São Paulo, o microscópio foi um grande aliado no século XVII, para punirem comerciantes quando adulteravam alimentos e especiarias de maneira geral.

Um marco nas relações comerciais entre fornecedores e consumidores foi a criação da *International Organization of Consumers Unions* (IOCU) em 1960, que inicialmente era composta por cinco países: Austrália, Bélgica, Estados Unidos, Holanda e Reino Unido. Atualmente a IOCU, é denominada de CI (*Consumers International*), composto por 220 organizações membros e 115 países, o Brasil participa através da fundação PROCON e do IDEC (Instituto Brasileiro de Defesa do Consumidor).

1.2.1 Direitos do consumidor no Brasil.

A industrialização, particularidade do final do século XIX, aumentada após a segunda grande guerra, a guerra fria e queda dos sistemas socialistas na década de setenta e o interesse dos

EUA (Estados Unidos da América) em globalizar os mercados com objetivo de melhorar o seu fluxo de produtos, foram fatores que intensificaram as relações de consumo nas transações comerciais internas e internacionalmente.

O Brasil também está inserido no contexto de consumo mundial, as primeiras diretrizes de tutela ao consumidor, de natureza protecionista surgiram em 1934 conforme citação de Faria [26]. A lei delegada numero quatro de 1962, de livre distribuição de produtos, respaldava o consumidor. A Constituição brasileira de 1988 confere direito fundamental do cidadão a responsabilidade do estado quanto a defesa do consumidor, no inciso XXXII do artigo 5, e no artigo 48 do ato das disposições Constitucionais Transitórias, a edição do Código de Defesa do Consumidor (CDC). Em 1990 foi promulgada a lei número 8078/90-CDC que respalda o consumidor nas relações de consumo. Esta lei objetiva atender as necessidades, o respeito à dignidade, a saúde e segurança, a proteção dos interesses econômicos, a melhoria da qualidade de vida e harmonizar o entendimento comercial do consumidor.

1.3 ANÁLISE DE FALHAS: PERÍCIAS MECÂNICAS JUDICIAIS.

Bens de consumo são produzidos e não estão isentos de defeitos, eles podem apresentar falhas antes de findar a sua vida útil prevista, pois os controles de fabricação não são totalmente dominados pelas indústrias produtoras. Grande parte das indústrias tem agregado valor ao produto através de aumento dos prazos de garantia, minimizando os efeitos das falhas dos produtos juntos ao consumidor. Conforme Pizzolato e outros [62]:

Garantia pode ser definida como um contrato ou acordo que estabelece que o produtor de um produto ou serviço deve concordar em reparar, repor ou oferecer a assistência necessária quando o produto falha ou o serviço não atende às demandas do usuário, antes de um momento pré-especificado no tempo, correspondente à duração da garantia.

As estimativas dos prazos de garantia estão atreladas à qualidade dos produtos, que por sua vez está ligado ao planejamento da estimativa de atendimento às solicitações de cada projeto. Na utilização operacional dos produtos, os desvios não são descartados, as probabilidades de anormalidades são reais e acontecem. As falhas podem ter causas diversas: concepção de projeto, subdimensionamento, definição de materiais, fabricação de materiais, fabricação do produto, montagem, manutenção e operação indevida. Em todas estas fases o ser humano está presente e é passível de erro. O desgaste pode levar a falha, e existem diversos mecanismos que levam os componentes ao desgaste, e dentre eles a fadiga é considerada por diversos

autores como um fator importante. Descontentamentos dos consumidores em relação às não conformidades são freqüentes, principalmente quando as suas expectativas são feridas, a criticidade destas falhas depende das suas conseqüências, como: uma parada de planta, um prejuízo na produção, um equipamento indisponível, a segurança comprometida ou até em casos críticos o óbito de pessoas diretamente ou indiretamente envolvidas. Existem diversas situações envolvendo disparidades entre o esperado pelo consumidor e o produto no segmento automotivo. Conforme Andrade e Paskocimas [2], na vara especializada de defesa do consumidor em Vitória da Conquista ao longo do ano de 2008 foram registrados 599 processos com autuação, envolvendo discordância mecânica, sendo sete casos relacionados com o segmento automotivo. O juiz envolvido em cada situação tem o poder de julgar, fundamentado nas leis vigentes e respaldado também pelo suporte técnico agregado pelo perito judicial. Nos casos envolvendo sistemas automotivos o juiz nomeia o perito judicial, para somar informações técnicas a fim de fundamentar o julgamento. Nossa investigação partiu de informações de um processo gerado por reclamação oriunda de uma falha mecânica registrada na defesa do consumidor, em Vitória da Conquista, causando avarias generalizadas em um veículo SUV (*Sport Utility Vehicles*), através da quebra de uma ponta de eixo dianteira.

A maioria dos componentes aplicados na fabricação dos equipamentos são projetados quanto à geometria, aos materiais envolvidos e processos de produção visando atendimento às solicitações nas quais são submetidos. Estas solicitações têm ligação direta com a função a ser desempenhada pelo equipamento ou peça, podemos chamá-la de atributos técnicos, que tem características diversas, como: elétrica, térmica, resistência química, magnéticas, óticas, mecânicas, dentre outras. Para componentes de máquinas mecânicas, estes atributos podem atender a várias solicitações, como: tração, compressão, flexão, fluência, impacto e fadiga. Estes atributos têm uma relação muito importante com os materiais dos quais são constituídos e seu processo de fabricação. A ciência e engenharia dos materiais têm papel crucial nos projetos e fabricação dos componentes para a aplicação em diversos segmentos dentre eles os utilizados nas peças automotivas mecânicas. As respostas às solicitações mecânicas de uma peça são dependentes diretamente da sua estrutura micro e macro e respectivos constituintes químicos, como: seu arranjo atômico, percentual de fases e sua distribuição, formação, direção e percentual de grãos, defeitos presentes nano e micrométricos. O projeto da geometria macro da peça está associada a todos os fatores citados, como também às solicitações de trabalho e dependências de espaço disponível para a montagem ou aplicação

direta do item. Na elaboração de projetos e nas análises de falhas, o conhecimento em ciência e engenharia de materiais tem papel importante. A aplicação de técnicas e equipamentos para caracterização dos materiais nas investigações que envolvem componentes mecânicos, como é o nosso caso, embasam cientificamente o trabalho. Na investigação foi montada a estratégia pré-definida de trabalho, desenhando um fluxograma específico, tornando a investigação metódica. Nos trabalhos foram coletados dados iniciais nos autos do processo, dados através de termos de diligência, dados de campo, dados na perícia no automóvel, dados laboratoriais como: macrográficos, micrográficos com MEV (microscópio eletrônico de varredura), análise química FRX (fluorescência de raio x) e espectrometria ótica, dureza e microdureza, análise de fase e seus respectivos percentuais com microscópio ótico e análise qualitativa dos perfis de tensões que a peça sofreu.

A sistematização e cientificidade das investigações envolvendo estes casos são pobremente divulgados, ou quase inexistentes, fato que nos envolveu buscando contribuir para a comunidade científica de engenheiros de materiais e mecânicos peritos e os que pretendem enveredar neste veio de mercado para desenvolvimento de trabalhos de forma metodológica, encurtando caminhos na estratégia da coleta de dados, análises e emissão de laudo pericial de engenharia, respaldando os trabalhos periciais com maior embasamento científico.

2. OBJETIVOS.

2.1 OBJETIVO GERAL.

Desenvolver metodologia específica sistemática através da investigação da causa raiz da falha ocorrida em uma ponta de eixo da suspensão dianteira de um automóvel.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.

- a) Desenvolver metodologia específica de perícia de engenharia judicial no caso da falha da ponta de eixo do automóvel (Ranger).
- b) Identificar as causas prováveis da falha ocorrida na peça descrita.
- c) Averiguar a veracidade das argumentações do autor no processo judicial envolvido na falha da peça: ponta de eixo dianteira do automóvel.
- d) Comparar dados de caracterização da peça fraturada, peça coletada no estoque e dados de projeto.

3. RELEVÂNCIA DO TRABALHO.

Falhas em componentes da suspensão de sistemas automotivos são consideradas críticas pelas suas possíveis conseqüências danosas no veículo e principalmente por ser considerado item de segurança, pois afeta a dirigibilidade, podendo causar danos pessoais. O trabalho investigativo propõe o desenvolvimento de uma metodologia específica para o tratamento dos casos de acidentes automotivos contribuindo para o estreitamento dos caminhos e direcionando de maneira sistemática o desenrolar das análises, como também suprir de dados e verificações comparativas científicas de caracterização dos materiais de engenharia envolvidos.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

4.1 FALHAS E FALHAS MECÂNICAS.

Falhas em diversos segmentos industriais são indesejáveis, porém os controles totais sobre os processos de produção ainda não são totalmente dominados.

A aleatoriedade pode se manifestar em diversas áreas produtivas e dentre várias causas podemos citar a incerteza relacionada com fenômenos e eventos. Tais incertezas podem gerar riscos e desvios nos processos. As incertezas são definidas como a probabilidade ou possibilidade da ocorrência de valores para determinados eventos e fenômenos indesejáveis e/ou, adversos [69]. Conforme Silva [69] nas áreas de ciência econômica e engenharia, em estudos de sistemas, nem sempre é possível determinar com confiabilidade as fontes de aleatoriedade envolvidas. A incerteza de um processo pode significar o grau de qualidade dos produtos gerados, funcionando como um parâmetro competitivo. De acordo com GUM (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement - ISO GUM*) para o cálculo da incerteza são considerados além de outros fatores, os componentes de incerteza que são as fontes potenciais de geração de incertezas na situação envolvida. É importante a discriminação correta para evitar a dupla contagem e negligenciar os componentes de incerteza, podendo utilizar o diagrama causa efeito para auxílio na definição destes componentes. De acordo com Jornada [40], são apresentados componentes específicos de incerteza envolvendo ensaios mecânicos de tração e compressão: incerteza na medição da força aplicada, incerteza na medição do corpo de prova, condições ambientais e repetitividade. Analisando o processo de obtenção do ferro fundido através do forno Cubilô, comentado na seção 4.1.8, podemos discriminar os seguintes componentes geradores de incerteza: incerteza no controle de temperatura do processo, incerteza na composição do material de alimentação, incerteza na composição do coque dentre outros. Estes componentes de incerteza no processo de fundição através do forno Cubilô podem gerar lotes fabricados de diferentes qualidades. Por tais razões as probabilidades de desvios devem ser levadas em consideração e podem ser utilizadas para repensar práticas buscando otimização dos processos produtivos.

4.1.1 Consumo.

A economia na esfera atual tem sido norteadada pelo alto consumo de produtos não tangíveis e tangíveis. Conforme Chase [17]: “*Estas nuevas compañías de classe mundial establecieron puntos de referencia em las áreas de calidad y productividad. Las operaciones se convirtieron em el arma competitiva clave requerida para alcanzar el éxito global*”.

A população mundial tem crescido também pelo aumento da expectativa de vida do cidadão, em consequência uma quantidade cada vez maior de alimentos e produtos têm que ser produzidos. Vivemos a era do consumo defendido pelas economias neoliberais globalizadas. De acordo com Dias [24]:

A expansão da economia global se moveu rapidamente ao longo da última década do século XX, e continua. Nos anos 90, o volume mundial de negócios aumentou cerca de 80%, e o volume de investimentos das empresas multinacionais em outros países aumentou cerca de 140%.

Quantidades maiores de produtos remetem à produção em série, hoje personalizada pela flexibilização das linhas de produção. A sistematização das empresas, com produção *Just in time*, proporciona linhas produtivas enxutas, com processos de encadeamento entre fornecedores de matérias primas e necessidades do mercado no momento que é preciso. A cadeia produtiva é iniciada com idealizações que em empresas focadas no cliente partem de pesquisas que buscam a necessidade direta do consumidor, projetos focados no objetivo fim que é o consumidor, do consumidor para o consumidor, metodologia intitulada C2C, conforme descreve Souza [71]. Grande parte das empresas contemporâneas de maneira geral, sobretudo fabricantes ditos de classe mundial implementam mecanismos e programas contínuos de melhoramento da qualidade e otimização de custo mantendo a competitividade. Uma das ferramentas utilizadas para isto é o círculo de Deming PDCA (*Plan-Do-Check-Action*), conforme cita Chase [17].

4.1.2 Ciclo de vida dos produtos.

Os produtos que consumimos obedecem a um ciclo de vida, que não remete simplesmente ao seu projeto, fabricação e entrega. A busca por um nicho no mercado e sua permanência exige tratamento aos produtos que perpassa pelas fases descritas e transcende a simples entrega: projeto, fabricação, montagem, operação, distribuição/venda, manutenção e pós-venda. Em todas estas fases temos a interferência humana e cada etapa pode ser subdividida em outras etapas. Na fase de projeto de produtos o pensamento inicial é o objetivo fim a que se destina o equipamento, peça ou componente. Na figura 1, elaborada pelo autor, é detalhado as subfases do projeto: objetivo fim (função objetivo), idealização, esboço, detalhamento, memorial cálculo, especificação de materiais, cotação, detalhamento final, simulação e armazenamento de dados.

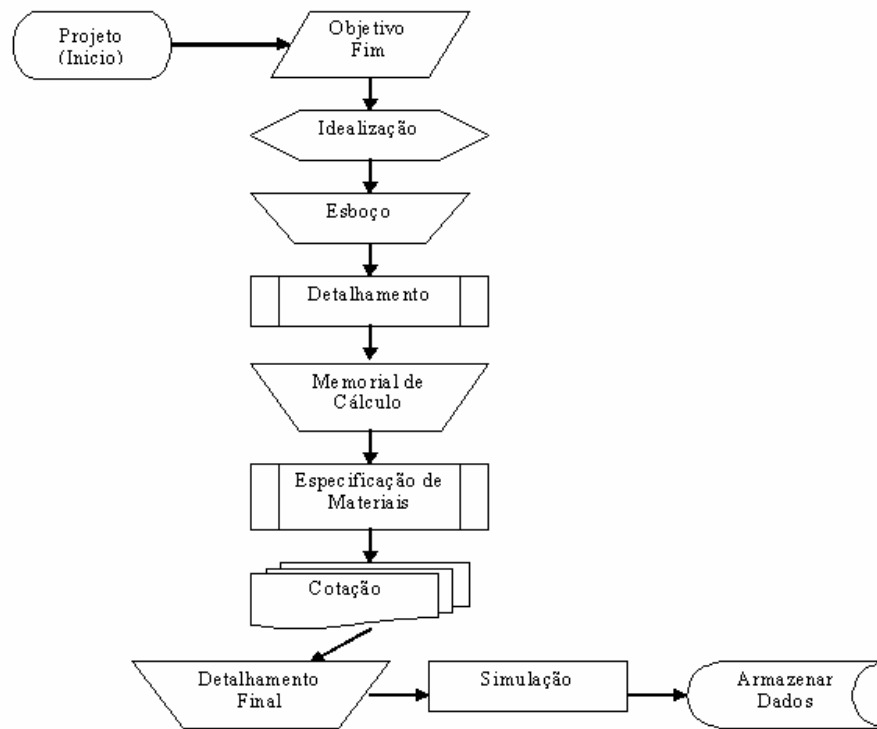


Figura 1-Subfases de projetos.

A fase seguinte após projeto é a etapa de fabricação, que envolve recursos estruturais como energia, instalações, equipamentos e ferramental, aliado às matérias primas e aos recursos humanos. Na fabricação, de forma generalizada seqüenciamos esta fase compondo o nosso fluxograma com: detalhamento do processo de fabricação, compra de matéria prima,

estocagem, metodologia (*layout*) seqüencial de produção, ajuste de equipamentos, fabricação, controle de qualidade e estoque. O fluxograma da figura 2, elaborado pelo autor, mostra um processo de fabricação (genérico).

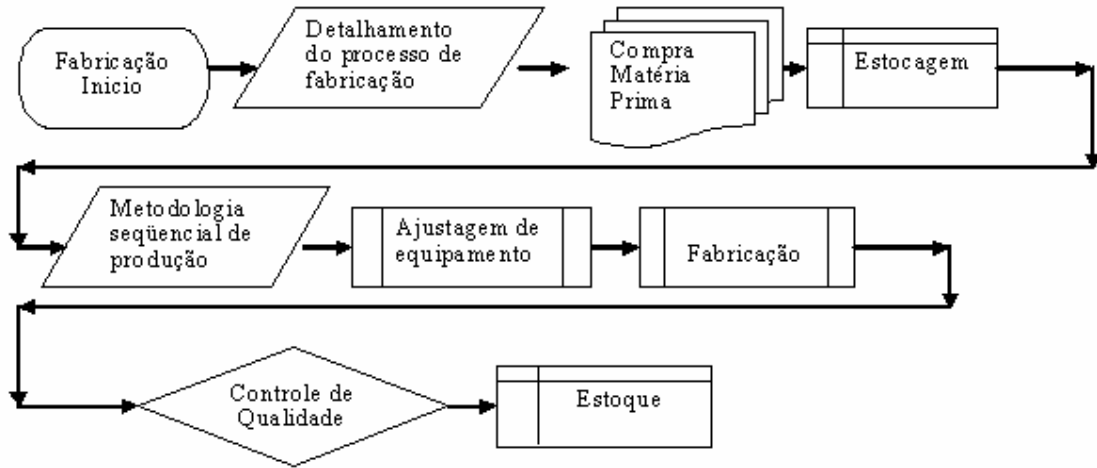


Figura 2-Processo de fabricação.

Após a fabricação de componentes a etapa subsequente é a montagem destes itens formando um produto com função pré-definida final. Simplificamos a montagem através do fluxograma (elaborado pelo autor) mostrado na figura 3 com os itens: metodologia Seqüencial de montagem, montagem, ajuste, controle de qualidade e estoque.

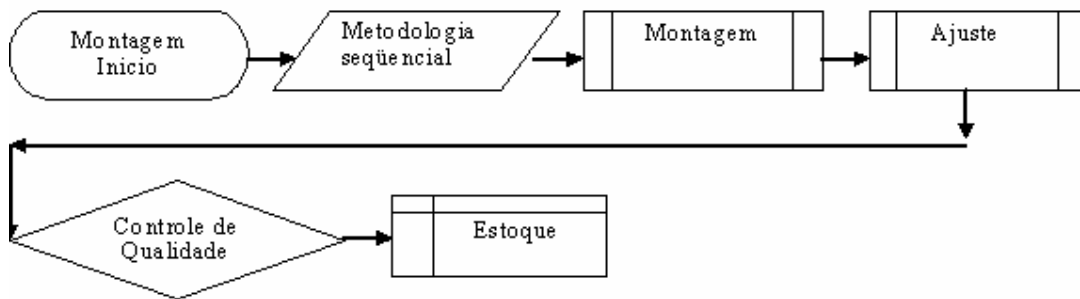


Figura 3-Montagem.

Fazem parte da maioria dos produtos os manuais com os procedimentos de operação, que são desenvolvidos e compostos basicamente pelas seguintes fases: detalhamento do processo operacional, metodologia de operação e operação pelo usuário do produto. O processo seguinte será a distribuição do produto final após a venda, que de forma genérica e

considerando uma empresa que tem sua frota própria de caminhões para atendimento ao transporte de seus produtos, as seguintes etapas são executadas: venda, emissão de notas fiscais, separação dos produtos, embalagem, emissão de roteiros seqüenciados de entrega, arrumação nos caminhões conforme roteiro e entrega.

A empresa nomeada pelo fabricante tem a responsabilidade de disponibilizar a assistência técnica ao produto no mercado, a manutenção do bem produzido. Nos manuais do proprietário, na maioria dos casos o fabricante disponibiliza as orientações quanto aos procedimentos operacionais e requisitos mínimos de manutenção, processos que são definidos por equipes e recursos humanos do fabricante. Nos planos de manutenção serão contemplados basicamente; planejamentos de lubrificação; tipo de manutenção a ser aplicada (corretiva, preventiva, preditiva, manutenção produtiva total, detectiva dentre outras); planos de sobressalentes; criação de históricos; instrução de manutenção (metodologia de desmontagem, montagem e ajuste).

O ciclo de vida do componente fabricado, em algumas empresas, recebe o tratamento final com a pesquisa de satisfação do consumidor, elemento fornecedor de dados de campo dos produtos fabricados, o controle de qualidade no campo, em alguns casos gerará ajustes no produto ou mesmo em alguma fase do ciclo de vida exposto: projeto, fabricação, montagem, operação, distribuição e venda, manutenção e pós venda. Uma nova filosofia industrial tem sido aplicada com a visão do desenvolvimento sustentável, chamada em alguns casos de: Projeto para o Ambiente (*Design for the Environment-DfE*) e *Ecodesign*. Nestes casos a proposta é implantação de estratégias visando minimizar o impacto ambiental em todas as etapas do ciclo de vida dos produtos até o descarte [35, 47].

Em todas as fases do produto, são envolvidos dentre outros recursos: materiais, equipamentos, ajustes, instalações e processos, nestas fases a interferência humana acontece seguidamente e as probabilidades de desvios e falhas existem, tanto por ajustagens com desvios ou mudança destes ajustes por desgaste nos componentes dos equipamentos.

4.1.3. Confiabilidade.

Equipamentos eternos na prática é ficção. A prevenção de falhas de componentes, máquinas e sistemas são perseguidos pelas equipes mantenedoras desde os primeiros marcos da manutenção na história, mesmo que de forma corretiva como na primeira revolução industrial, conforme Kardec e Nascif [45] e outros. A busca por baixos índices de manutenção e reparos é uma constante. A mudança e a busca de metas mais agressivas nas indústrias atuais, como

defeito zero, ou seja, paradas não programadas são enfatizadas, através de programas mais acirrados da gestão da manutenção, nomeados de manutenção de classe mundial. De acordo com Mirshawaka, citado por Otani e Machado [59], “o termo classe mundial significa para um fabricante ter as condições para competir em qualquer lugar do mundo oferecendo produtos com qualidade e com preços atrativos, prazos de entrega e ser reconhecido como fornecedor confiável”.

As inúmeras possibilidades de falhas desde a concepção de um produto até a sua efetiva operação são notadas e registradas pela sociedade e comunidade industrial de maneira geral. Falhas em indústrias, aeronaves, sistemas automotivos e equipamentos são fatos noticiados e acompanhados por todos, a exemplo das avarias em dutos da Petrobras citado por Duek [25]. A qualificação e quantificação da probabilidade da falha foi historicamente buscada inicialmente por Henley e Kumamoto após a primeira guerra mundial, segundo Lafraia [50] e Duek [25] entre outros. Lafraia [50] define confiabilidade como: a probabilidade de um componente ou sistema funcionando dentro dos limites especificados de projeto não falhar durante um período de tempo previsto para a sua vida, dentro das condições de agressividade do meio. De acordo com Duek [25], a aeronáutica, através da diretriz DM A 400-6, define confiabilidade como: probabilidade de um dispositivo executar, com sucesso, a função para a qual foi desenvolvida, durante um período de tempo especificado e sob condições operacionais pré estabelecidas. As definições e conceitos relacionados com confiabilidade têm intrínseca relação com falhas, tempo, função e probabilidade. A gestão que vislumbra otimizar objetivos continuamente é acompanhada por controles em diversas fases do processo a depender do projeto do próprio controle.

Em manutenção, indicadores são ferramentas utilizadas para subsidiar tomada de decisão gerenciais, conforme diversos autores: Kardec e Nascif [45], Lafraia [50], Filho [29], e Nepomuceno [57] dentre outros. Dentre vários indicadores utilizados em manutenção, podemos citar: tempo médio entre falhas (TMEF) ou MTBF (*Mean Time Between Failure*, do inglês), índice ou taxa de falhas (λ), tempo transcorrido da última falha (x), tempo médio para reparo (TMPR) ou MTTR (*Mean Time to Repair*, do inglês), tempo médio para falha (TMPEF), disponibilidade (D), tempo de reparo total (TRPT). Conforme Kardec e Nascif [45]: “quem não mede não gerencia”. Para estimativa da confiabilidade de um sistema, equipamento ou componentes são também utilizados estes conceitos. O índice ou taxa de falhas (λ) é a frequência com que falhas acontecem por um intervalo de tempo, oposto da confiabilidade.

$$\lambda = \sum_{i=0} N_i / T \quad N = \text{falha}, T = \text{tempo} \quad (4.1.3-1)$$

Os componentes mecânicos principalmente de maneira geral obedecem ao perfil gráfico de índice de falhas por período de tempo que é conhecida como curva da banheira, citado por vários autores como: Kardec e Nascif [45], Lafraia [50], Filho [29], Nepomuceno [57], dentre outros, conforme figura 4. A primeira fase é a da adaptabilidade, os índices de falhas são altos por conta de acomodações do sistema como um todo (mecânica, operacional, de manutenção dentre outros); na fase mediana a taxa de falhas é mais baixa onde a estabilidade do sistema ocorre, falhas aleatórias acontecem, a opção para esta fase é procedimento de manutenção preditiva, obedecendo características de cada sistema ou equipamento; na fase final acontecem índices maiores de falha por desgaste, diminuição da vida útil.

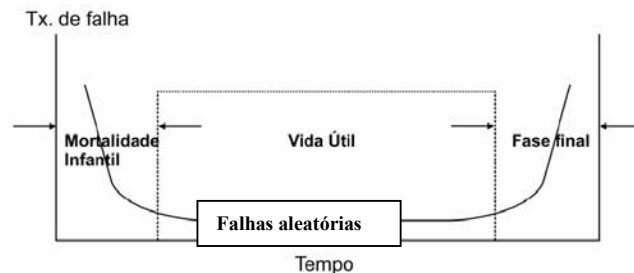


Figura 4-Curva da banheira.

TMPF é o tempo médio de operação.

$$\text{TMPF} = \sum_{i=0}^n t_i / N \quad N = \text{falha}, t = \text{tempo de operação de cada ciclo} \quad (4.1.3-2)$$

Considerando taxa de reparos (μ): $\mu = \text{número de reparos} / \text{tempo}$

O tempo médio para cada reparo será:

$$\text{TMPR} = 1 / \mu \quad (4.1.3-3)$$

O tempo médio entre falhas será:

$$\text{TMEF} = \sum_{i=0}^n \Delta d_i / N \quad (4.1.3-4)$$

$\Delta d_i = \text{tempo entre inicio e primeira falha}$ e $N = \text{número de falhas}$

O tempo médio entre falhas, também será:

$$TMEF = 1/\lambda \quad (4.1.3-5)$$

λ = índice ou taxa de falhas

A disponibilidade (D) será o tempo que o equipamento está disponível para a operação pelo tempo total:

$$D = t / T \quad t = \text{tempo disponível}, \quad T = \text{tempo total}$$

Ou

$$D = TMEF / TMEF + TMPR \quad (4.1.3-6)$$

Considerando $F(t)$ a função acumulada de falhas e $C(t)$ a função confiabilidade, a confiabilidade é:

$$C(t) = 1 - F(t) \quad (4.1.3-7)$$

A confiabilidade poderá também ser expressa pela relação:

$$C(t) = e^{-\lambda t} \quad (4.1.3-8)$$

λ = Taxa de falhas, t = tempo transcorrido da última falha, $e = 2,7182$.

4.1.4 Produtos, tipos e fontes de falhas.

Dentro do ciclo de vida dos produtos existem diversas fases potenciais de falha. O nível de automação nos processos atualmente, dentre outros objetivos, busca minimizar falhas da interferência dos recursos humanos em operações com ajustes com maior precisão e repetitivas. Como também cita Menezes [54]: “a partir do momento em que a máquina de trabalho executa todos os movimentos..., temos um sistema de maquinaria automático...”.

Fatores subjetivos e objetivos estão envolvidos nas atividades e relações humanas, e são inerentes ao fato de estarmos atuando, a probabilidade de desvios existe e acontece como citamos anteriormente. O controle total de todos os processos produtivos ainda é utópico.

A falha é tão importante quanto maior for a sua consequência danosa; desvios com pequenas consequências são pouco notados, conforme Kepner e Tregoe [46]: “Quanto maior o efeito do declínio há mais urgência de se achar a causa e fazer algo a respeito”. A ciência da fratura, o atrito, os mecanismos de falha, dentre outros temas fazem parte do rol de pesquisas

científicas. Ainda de acordo com Kepner e Tregoe [46], um problema é identificado quando o desempenho esperado não atinge o que deveria acontecer, como mostrado na figura 5.

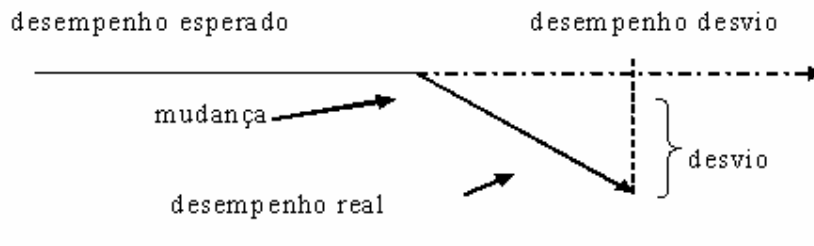


Figura 5-Estrutura de um problema

Os desvios de performance acontecem, e podemos traduzir falhas como sendo: a não operação conforme prerrogativas de projeto. Vários autores definem falhas como descreveremos a seguir: Conforme Gil Branco Filho [29] e a NBR 5462 -1994, “Falha - Término da capacidade de um item desempenhar a função requerida. Depois da falha o item tem uma pane. A falha é um evento; diferente de pane que é um estado. Este conceito, como definido, não se aplica a itens compostos somente de software”. De acordo com Affonso [1]: “Diz-se que um componente de um equipamento falhou quando ele não é mais capaz de executar a sua função com segurança”. A partir de Lafraia [50], em termos operacionais, a função é toda e qualquer atividade que um item desempenha, e a falha é simplesmente a perda de uma função. Contextualizando a falha com confiabilidade, Lafraia [50] também diz: “Impossibilidade de um sistema ou componente cumprir com sua função no nível especificado ou requerido”. Kardec e Nascif [45] definem falha da seguinte forma: “Falha pode ser definida como a cessação da função requerida de um item ou incapacidade de satisfazer a um padrão de desempenho definido”. De acordo com a nossa visão o componente ou equipamento ou sistema pode estar desempenhando sua função e estar em estado de falha, não estar íntegro. O início de uma microfalha (falha “oculta”) poderá ser causa de desvio da função do componente ou do equipamento.

Definições de falha são inúmeras, como já descritas. Os diversos tipos de falhas nos materiais, nos componentes, nas peças, nos equipamentos e nos sistemas, podem ser enquadrados em função das suas respectivas conseqüências: falhas sem perda de produção, com perda de produção, com perda parcial produtiva, falhas com prejuízos materiais, prejuízos humanos e ao ambiente. As falhas mecânicas são oriundas de diversas causas, nos componentes, nos equipamentos estáticos e principalmente nos dinâmicos os contatos entre peças e meio de

trabalho (suas interfaces) geram atrito e índices de desgaste: são os sistemas tribológicos. O desgaste é previsto nos projetos e remetem à vida útil dos sistemas, equipamentos e seus constituintes, os componentes. Desgastes em elementos de fixação e peças podem gerar o efeito dominó, propiciando a transmissão da falha nas diversas partes de um micro ou macro elemento, podendo culminar em falhas no sistema. Índices de desgaste fora do estimado geram parâmetros operacionais diferentes dos padrões traçados, mudam a “assinatura” operacional e podem gerar desvios de performance em equipamentos. A ciência que estuda o atrito e desgaste é a tribologia, de acordo com Suski [75] e a norma DIN 50320 (1979), a definição de desgaste é: “perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido devido a ação mecânica, isto é: o contato e movimento relativo de um corpo sólido contra um corpo sólido, líquido ou gasoso”.

De acordo com Suski [75], a falha pode ser gerada por diversos mecanismos, dentre elas o desgaste. No mapa conceitual criado por Zum-Gahr, figura 6, a falha pode ser gerada por quatro mecanismos básicos: desgaste, trincas, corrosão e deformação plástica. Conforme nossa visão e expandindo o mapa conceitual inicial, estes quatro mecanismos básicos podem ser gerados por diversas fontes. Analisando ainda o mapa conceitual, na figura 6, existem vários fatores que influenciam na reação de corrosão dos materiais, dentre os principais temos: material empregado, meios de trabalho e condições operacionais (tensão, regime contínuo ou descontínuo, condições de imersão dentre outros, conforme Vicente Gentil [33]). A deformação plástica é uma condição geradora de falhas, que por sua vez pode ser iniciada através de: subdimensionamento, sobrecargas, material inadequado ou defeitos de material, impactos, temperaturas altas de trabalho, tempo de alto de carregamento. Trincas, que são elementos que geram o início de fraturas em componentes podem ser nucleadas através de diversos mecanismos como: subdimensionamento, sobrecarga, fadiga, impacto, material inadequado e defeitos de material, submissão a temperaturas baixas, fragilizando o material, e forma geométrica do componente (pontos concentradores de tensão). Os desgastes são ocorrências nos materiais que geram falhas e podem modificar os parâmetros operacionais como vibração, temperaturas, ruídos, corrente de alimentação dentre outros. Podemos citar como fontes de início de processos de desgaste: lubrificação inadequada, materiais de fabricação inadequada ou com defeitos internos, sobrecargas, temperaturas fora de especificação, altos regimes de trabalho (combinação alta frequência de esforços e temperatura, ou altos esforços e temperaturas), forma, ajuste, meio de trabalho com partículas abrasivas e vibração.

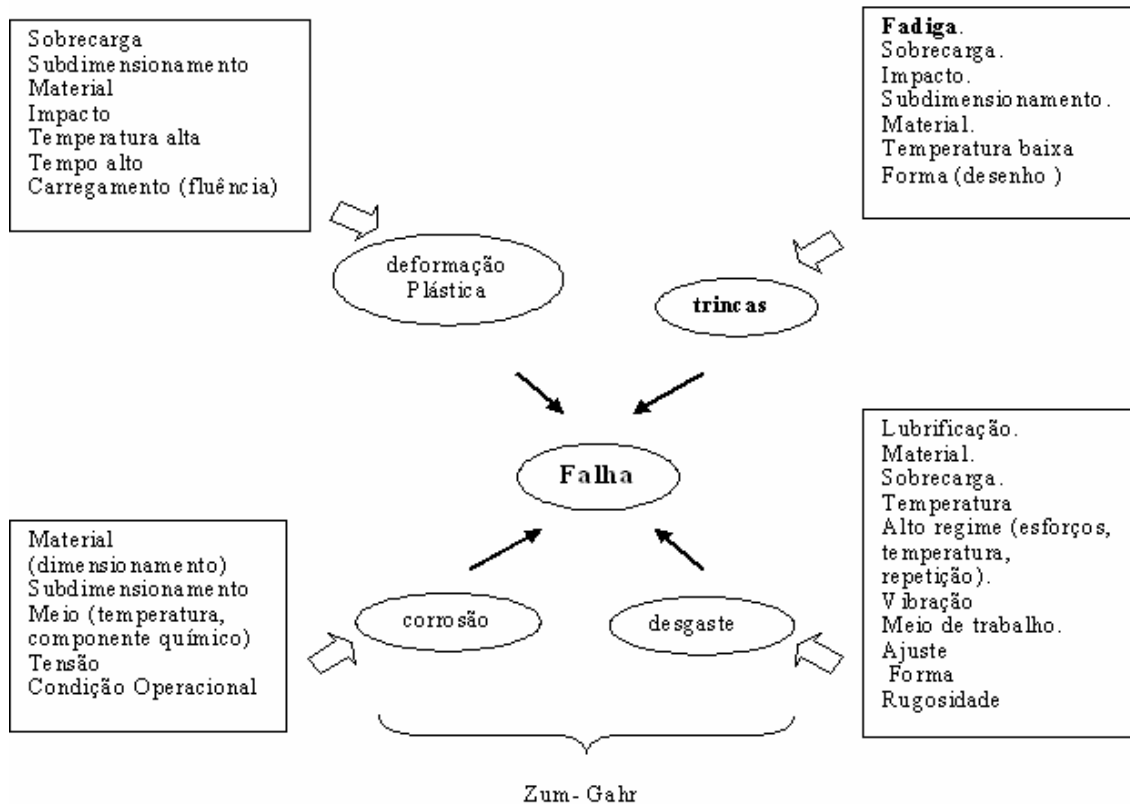


Figura 6 - Mapa conceitual, mecanismos básicos de falha.

Trincas - Geradas por fadiga.

Dentre as causas geradoras de falhas nos componentes ou equipamentos, trincas geradas pelo mecanismo de fadiga devem ser colocadas em um grau de muita importância, pela sua criticidade, pela sua característica de nível de difícil detecção, pelas conseqüências muitas vezes danosas aos sistemas por sua fratura sem indicações prévias e instantaneidade abrupta da ruptura final causando desastres em certas ocasiões catastróficas, dentre outras situações. Conforme Callister [13] e outros autores, a fadiga é considerada a maior falha individual em metais, “ela compreende 90% de todas as falhas em metais”. A fadiga é um processo “silencioso”, que está relacionado com as repetições de solicitações em um determinado componente, portanto tem natureza cíclica.

Conforme Colim [20], cronologicamente os fatos envolvendo fadiga foram primeiramente notados, por volta de 1800, através de registro da fratura de um eixo de locomotiva prematuramente, inicialmente pensava-se que o material teria cristalizado e fragilizado pela ação da ciclagem. Em 1839 Poncelet utilizou o termo fadiga pela primeira vez, material

cansou (fadigou) e cristalizou fragilizando. Em 1843 Rankine defendeu a teoria da cristalização e fragilização do material.

De acordo com Souza [72] e Colim [20], o alemão Wohler pesquisou durante 12 a 20 anos carregamento cíclico, executou ensaios de flexão rotativa, publicou o trabalho em 1871, gerando curva de tensão versus número de ciclos (S – N), e definição do limite de fadiga S_f , diagrama utilizado até os dias de hoje. Em 1886, Bauschinger, propôs limite “elástico natural” [20]. Ewing e Humfrey, em 1903, descobriram linhas de escorregamento, trincas de fadiga, seu crescimento até a falha, invalidando a teoria da cristalização e fragilização do material submetido a cargas repetitivas, e Bairston em 1910 verificou a teoria do limite elástico natural de Bauschinger e limite de fadiga de Wohler, conforme Colim [20].

De acordo com Ashby [7] e Colim [20] em 1910 Basquin, desenvolveu lei exponencial de testes de fadiga, a equação de Basquin. Griffith em 1921 desenvolveu o critério de fratura e relacionou com o crescimento de trincas por fadiga e dados de vários materiais submetidos à fadiga de alto ciclo são publicados em 1927, por Moore e Kommers, conforme Colim [20] e Souza [72].

A concentração de tensão propicia nucleação de trincas. Em 1937 Neuber publica a equação para concentração de tensão em entalhes, a equação de Neuber. Peterson publicou fatores concentradores de tensão de acordo com diversas geometrias, em 1953. Coffin e Manson publicaram a lei de deformações baseada em fadiga de baixo ciclo, em 1955, a lei de Coffin-Manson, conforme Souza [72], Ashby [7] e Colim [20].

A estimativa da vida de uma peça quanto à fadiga não é simples, pois variantes não controladas nos sistemas estão envolvidas, como a não homogeneidade dos materiais, além de fatores concentradores de tensão relacionados com a geometria, variações de cargas cíclicas, transferências de cargas dinâmicas, mudança de ajustes nas fixações ao longo do trabalho da peça, dentre outros. Como coloca Callister [13]:

Existe uma dispersão considerável nos dados de fadiga, o espalhamento dos dados se relaciona com a sensibilidade da fadiga a uma variedade de parâmetros de ensaio e do material que são impossíveis de serem controladas de maneira precisa.

Vários fatores são estudados quando analisamos a fadiga, como: componentes concentradores de tensão, natureza e perfil das cargas cíclicas (amplitude, frequência, local de incidência de aplicação, variação do sinal de tensão), fadiga térmica (flutuação de temperatura) e fadiga por corrosão (meio de trabalho e *pits* atuam como concentradores de tensão), dentre outros.

Estudam-se também mecanismos para minimizar efeitos da fadiga, como: tratamentos superficiais, tensões de compressão residual superficial, melhoria da rugosidade, tratamentos térmicos, dentre outros aspectos trabalhados. Nos eventos envolvendo fraturas por fadiga, são analisados: morfologia superficial macrográfica (marcas de praia, catraca, marcas de garra) e micrográfica (intergranular e intragranular); fratura frágil (clivagem), fratura dúctil (*dimples* ou coalescimento de micro cavidades); evolução e propagação de microtrincas (microtrincas iniciais, fratura inicial, evolução de trincas perpendicular ao plano de aplicação das tensões, estágio de propagação de microtrincas e fratura final com análise do tamanho da secção remanescente, pequena denotando subcarga e zona remanescente grande, denotando sobrecarga); e efeitos da atmosfera de trabalho e ambientais dentre outros.

Regiões de mudanças de geometria no componente é um fator concentrador de tensão, que implica em fragilização do projeto quanto à resistência a fadiga, pois aumenta as tensões atuantes nestes pontos. O aumento da tensão está associado também ao raio de concordância da região onde acontece a mudança de geometria. Conforme Ashby e Jones [7], Callister [13] e outros, o número de ciclos resistentes diminui com o aumento de tensão. Conforme Ashby e Jones [7], nas figuras 7 e 8 e tabela 1, se analisarmos um eixo sob flexão, o valor do fator de concentração de tensão é tanto maior quanto menor a relação r/d e maior também quanto maior a relação D/d . A trinca é um inconveniente indesejável podendo ser considerada uma região de mudança de geometria não projetada, uma descontinuidade. A tensão aumenta muito na ponta de uma trinca, diminuindo a quantidade de ciclos n .

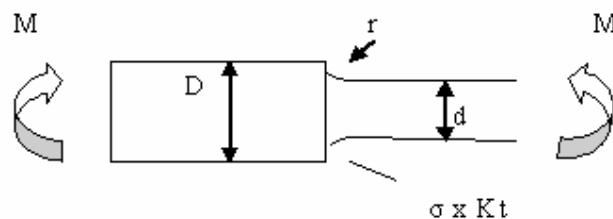


Figura 7-Eixo: seções diferentes submetidas à flexão.

Onde:

K_t = fator de concentração de tensão, D =diâmetro maior, d = diâmetro menor e r = raio de concordância.

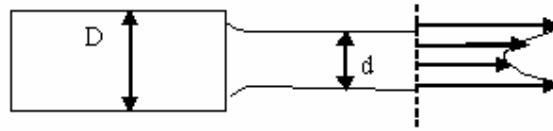


Figura 8 - Distribuição de tensão, influência de pontos concentradores de tensão.

Tabela 1-SCF, Fatores concentradores de tensão para um eixo.

r/d →	0,025	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3
D/d ↓						
1,02	1,9	1,64	1,43	1,34	1,24	1,2
1,05	2,13	1,79	1,54	1,4	1,31	1,23
1,1	2,25	1,86	1,59	1,43	1,37	1,26
1,5	2,59	2,06	1,67	1,5	1,4	1,29
3	2,85	2,3	1,8	1,58	1,43	1,32

Os raios de concordância ou geometria de entalhes também influenciam no fator de redução de resistência a fadiga (K_f). De acordo com Santos [68], o valor do fator de concentração de tensão (K_t) está relacionado ao raio de concordância do entalhe. Na figura 9 são mostrados valores de raios de concordância diferentes e respectivos fatores de concentração de tensão [63].

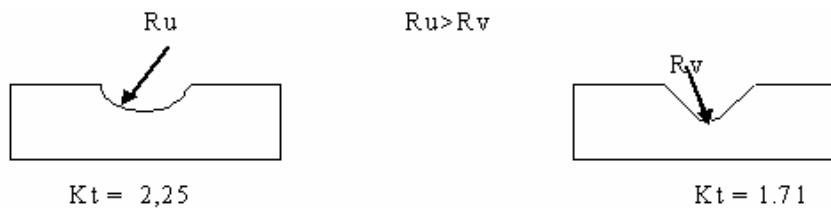


Figura 9-Entalhes em “U” e em “V”, diferentes valores de K_t .

Nas figuras 10 e 11, são mostradas fissuras em local geometricamente susceptível a nucleação de trincas por fadiga, devido à mudança de geometria. No pedal, figura 11 à esquerda, indicamos o ponto de fratura em local também com mudança de geometria. Na foto da figura 11 à direita, na secção da fratura, identificamos a região (a) da fratura inicial com marcas de praia e região da fratura final (b) com mais de 50% da área, indicando carga alta no momento da quebra bipartindo o componente.

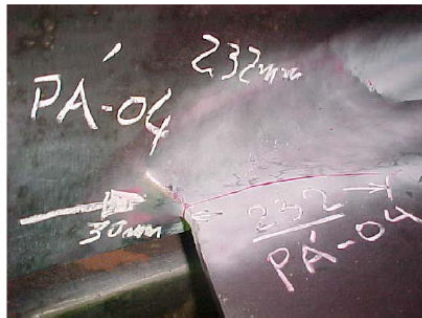


Figura 10-Ponto de concentração de tensão, trinca em uma pá de uma turbina Hidráulica [20].

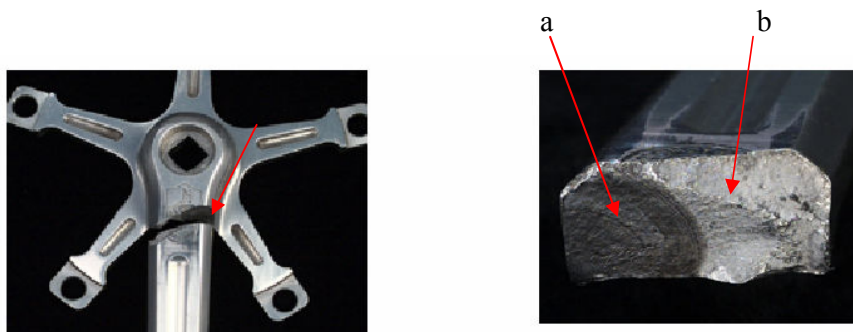


Figura 11-Trinca em ponto concentrador de tensão [20].

A rugosidade superficial de peças é composta por picos e vales, os fundos dos vales funcionam como múltiplos micros pontos concentradores de tensão localizados, que podemos considerar como fatores redutores à fadiga, visto que quando a superfície da peça é submetida a tensões de tração, pequenos raios de concordância do fundo dos vales aumentam o K_f , possibilitando a nucleação de micro trincas. A variação do valor S_f (tensão resistente a fadiga) x N (número de ciclos) é modificada pela aplicação do fator de acabamento superficial, que diminui quanto maior for a rugosidade superficial do aço, como mostrado na figura 12 [68].

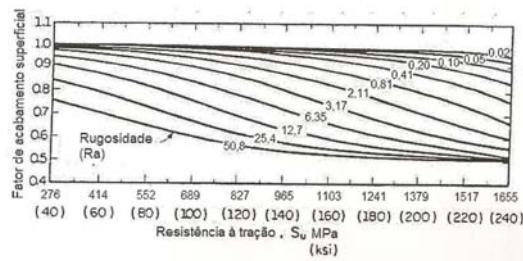


Figura 12-Rugosidade como fator de diminuição da resistência à fadiga.

No trabalho desenvolvido por Ksarekar e outros [49], foi constatada a influência da rugosidade superficial no fenômeno *fretting*, ensaiando contato de corpos de prova com diferentes valores de rugosidades R_q (rugosidade média quadrática), sendo submetidos a carga hertziana tangencial e normal a superfície. Foi constatado através da figura 13, que a rugosidade neste sistema reduz a estimativa de vida: quanto maiores valores de R_q , menores serão as estimativas de vida. Ainda neste trabalho, as tensões de Von Mises atuantes também são maiores e mais instáveis quando no sistema a rugosidade aumenta de $R_q = 0,1$ para $R_q = 1,0$, comprovando a criticidade do aumento da rugosidade superficial, quando tratamos a vida resistente a fadiga, ver figuras 14 e 15. Na figura 16 são mostrados vales como pontos concentradores de tensão.

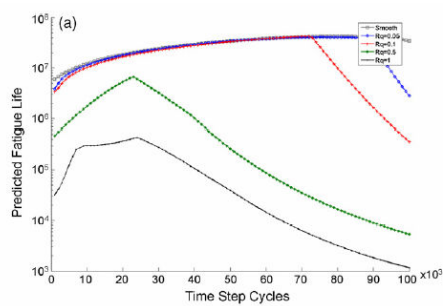


Figura 13-Vida Fadiga x Ciclos ensaio x Rugosidade.

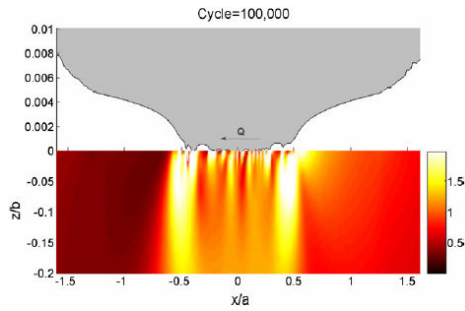


Figura 14-Contorno de tensão de Von-Mises, para rugosidade superficial $R_q = 1$.

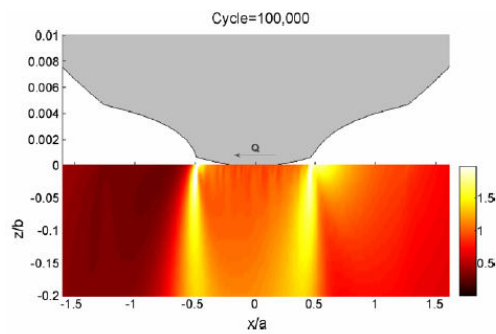


Figura 15 - Contorno de tensão de Von-Mises, para rugosidade superficial $R_q = 0,1$.

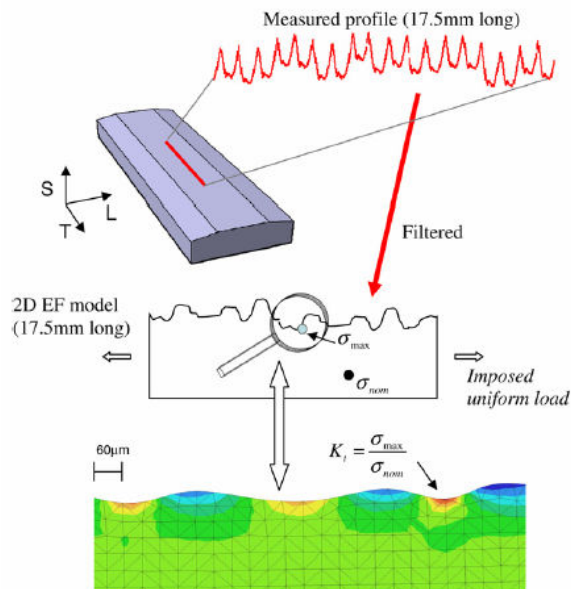


Figura 16 - Indicação de pontos concentradores de tensão nos vales. Princípio de cálculo do fator de concentração de tensão através de elementos finitos.

Projetos com pontos de fixação que propiciem a concentração de tensão tendem a gerar possíveis nucleações de microtrincas, alterando a resistência à fadiga esperada. Defeitos de fundição como inclusões, vazios, trincas, segregações concentrando impurezas, falta de uniformidade do material e outros, também são pontos potenciais para inicialização das microtrincas superficiais que na maioria das vezes são a gênese do processo de falha por fadiga.

Na fabricação, os métodos, processos, equipamentos e matérias-primas de manuseio envolvidas são itens possíveis geradores de pontos falhos macrometricamente ocultos, que quando submetidos ao trabalho de tração podem dar início a falhas, comprometendo o número de ciclos resistivos.

Características como: a sua energia interna de ligação atômica, a morfologia da rede cristalina, no caso dos metais, e sua composição são associadas às propriedades dos materiais. Uma das formas de explicarmos o macro é estudando o micro. O crescimento dos veios cristalinos não são totalmente dominados pelos métodos e processos empregados em sua fabricação, haja vista que defeitos são pontos vulneráveis modificando propriedades, e em várias situações concentrando tensão. Tais defeitos cristalográficos são largamente estudados e citados por diversos autores, tais como: Callister [13], Ashby e Jones [7], Vlack [77], Higgins [38], dentre outros. Podemos citar os diversos tipos de defeitos: inclusões, vazios, discordância, defeitos interfaciais, nos contornos dos grãos cristalinos, maclas (átomos espelhados, defeito de plano cristalográfico). Defeitos inerentes ao processo de fabricação como poros, inclusões e trincas dentre outros estão presentes em um nível grande de incidência, também geradores de vulnerabilidade mecânica.

Quando estudamos falhas pelo mecanismo de fadiga associamos ao componente o “trabalho cíclico”. Sua falha poderá ocorrer na condição de tensão com valores abaixo da tensão de escoamento do material. Conforme Ashby e Jones [7], Callister [13] e outros, são classificados dois tipos de fadiga: a) de alto ciclo, maiores que 10^4 ciclos até a fratura e com tensões atuantes com valores menores que a tensão de escoamento e b) fadiga de baixo ciclo, com valores menores que 10^4 ciclos até a fratura, com tensões atuantes acima do escoamento. O processo de fadiga é gerado pela propagação inicial de micro trincas, em algum ponto de concentração de tensão que tem uma vulnerabilidade maior, e evolui normalmente numa direção perpendicular à direção da tensão de tração aplicada, conforme Ashby e Jones [7], Callister [13], Santos [68], e diversos autores. Na análise levamos em consideração diversos fatores como: amplitude, frequência, localização dos pontos solicitados, variação do sinal de tensão, natureza das solicitações (mecânica, temperatura, química ou meio de trabalho) dentre

outros. Nas solicitações mecânicas, variantes importantes interferem na resistência ao carregamento cíclico como o tipo de carregamento: a amplitude das tensões atuantes e seu sinal. A razão de tensão R mostra o tipo de carregamento.

$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} \quad (4.1.4-1)$$

Para $R = 0$, solicitação repetida.

$R = -1$, carregamento reverso.

$R > 0$, flutuante, somente tração/somente compressão.

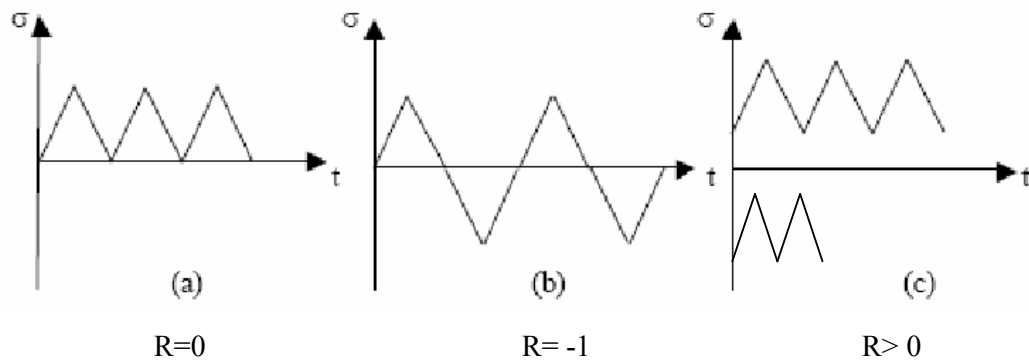


Figura 17-Tipos de Carregamento: a) Solicitação repetida, b) Carregamento reverso, c) Tração e compressão flutuantes.

Na prática, as maiorias dos carregamentos não terão um perfil com amplitudes tão estáveis quanto o mostrado na figura 17. Os perfis reais se assemelham com as tensões com amplitudes variáveis de mesmo sinal ou com sinais diferentes. Apresentamos na figura 8 um exemplo de um carregamento irregular, com amplitudes e sinais irregulares.

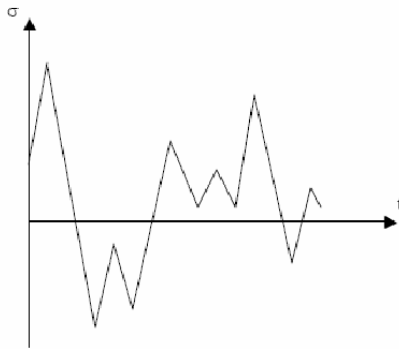


Figura 18 - Carregamento irregular. Próximo à realidade.

Os valores do limite à fadiga são plotados no gráfico S (tensão) x N (número de ciclos), chamado de curva de Wholer. O procedimento é inicialmente aplicar tensões menores que a tensão de ruptura estática e registrar o valor do número de ciclos resistente para aquele valor; em seguida aplica-se tensão maior que a anterior e registra-se o valor e assim sucessivamente. Na plotagem em gráfico Log x Log ou semi Log, no caso dos metais é identificado o ponto de inflexão, S_f (tensão resistente à fadiga) que a partir daquele ponto para baixo, teoricamente, independente do número de ciclos a peça não falhará pelo mecanismo de fadiga. N_f é o número de ciclos que causará ruptura a fadiga para um nível de tensão. Xue e outros [78] mostram na figura 19, um gráfico real de ensaio a fadiga de um corpo de prova de ferro fundido GS51, semi log.

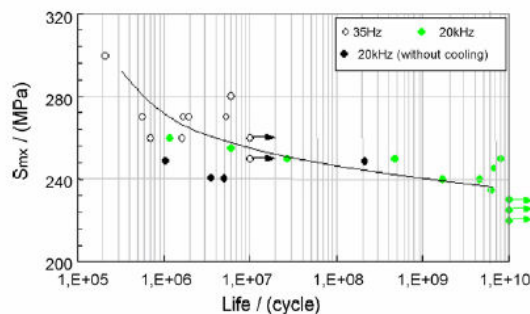


Figura 19 – Teste de fadiga: corpo de Prova em ferro fundido GS51, 35 Hz no teste convencional mecânico, e 20 kHz no teste com ultra-som.

A terminologia para tensões alternadas é utilizada conforme descrito abaixo, por diversos autores, e citada em vários trabalhos científicos, dentre eles: Ashby e Jones [7], Callister [13].

Fazendo um paralelo com análise de vibrações, variações de tensão altas torna a condição de trabalho pior, maior ainda quando as velocidades (frequência de trabalhos são também altas). Como as nucleações das trincas superficiais são originadas pela ação da tensão de tração, quando a razão de tensão for nula, é a condição pior para as falhas se iniciarem pelo processo de fadiga (σ_{\min} for zero). Na figura 20, é mostrada graficamente a terminologia utilizada para tensões alternadas.

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \text{Variação de tensão} \quad (4.1.4-2)$$

$$\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2 = \text{Amplitude de tensão} \quad (4.1.4-3)$$

$$\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2 = \text{Tensão média} \quad (4.1.4-4)$$

$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = \text{Razão de tensão} \quad (4.1.4-5)$$

$$Ar = \sigma_a / \sigma_m = \text{Razão de amplitude} \quad (4.1.4-6)$$

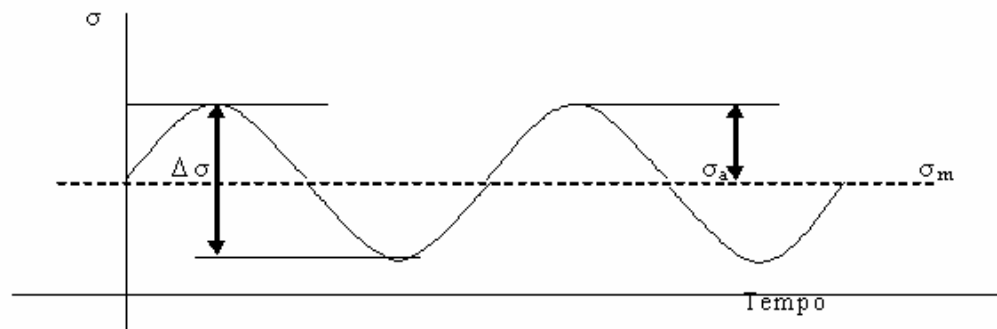


Figura 20 – Terminologia para tensões alternadas.

A maioria dos materiais quando submetidos a variações de temperaturas sofrem dilatações e contrações, em valores diferentes, característico e dependente da sua constituição, da sua energia potencial interatômica, maior grau de liberdade interno maior possibilidade de extensão e diminuição de volume. Quando fisicamente existe o impedimento de movimentações provenientes de dilatações e contrações, são induzidas tensões internas que

fazendo um paralelo com a ajustagem, podemos associar ao ajuste com folga negativa ou ajuste com interferência. Conforme Garcia [32], Santos [68], Callister [13] e outros, o módulo de tensão resultante da mudança de temperatura de T_0 para T é:

$$\sigma = E\alpha (T_0 - T) = E\alpha \Delta T. \quad (4.1.4-7)$$

Onde: σ = Tensão resultante da variação de temperatura (Pa)

E = Módulo de Elasticidade (Pa)

α = Coeficiente Linear de expansão térmica (K^{-1})

Valores de $T > T_0$ remetem à expansão podendo gerar tensões de compressão ($\sigma < 0$). E em contrapartida, valores $T < T_0$ geram contrações que podem gerar tensões de tração ($\sigma > 0$). A resistência à fadiga térmica está relacionada com o parâmetro a , onde:

$$a = \sigma_f.k / E. \alpha \quad (4.1.4-8)$$

Valores altos de a indicam boa resistência a fadiga térmica.

4.1.5. Falhas e algumas metodologias de análises de falhas (FMEA, FTA, RCFA, PDCA, Diagrama de causa e efeito e SIX SIGMA).

O ciclo de vida total de um produto é complexo. Iniciará na concepção pré-gênese e findará quando a sua sucata for descartada de forma harmônica e ecologicamente correta. São diversas etapas envolvendo: pessoas, equipamentos, instalações, fornecedores, materiais, relações humanas e profissionais, enfim uma cadeia muito grande para se controlar. A probabilidade de falha existirá. De acordo com Slack e outros [70]: “...falhas ocorrerão, apesar de todas as tentativas de preveni-las”, como diz Chase e outros [17]: “os defeitos acontecem por que pessoas os cometem”. “O projeto de um componente ou estrutura exige com freqüência que o engenheiro minimize a possibilidade da ocorrência de falha” [13].

O homem moderno de manutenção se depara com um paradigma atual que prega a concepção de falha zero. Os conceitos modernos de manutenção realmente buscam falha zero, porém é dito: falha zero não planejada, ou seja, executar todas as prerrogativas possíveis para manter o equipamento sobre o seu domínio, preparar e planejar atitudes e atividades visando o controle

da indústria, da unidade, do sistema, do equipamento, e por fim dos componentes primários: uma peça, um elemento de fixação, dentre outros.

O leque envolvido no controle de todas as etapas de fabricação e de vida de um produto é extenso. Nos métodos empregados de acompanhamento, por exemplo, em manutenção estimam-se itens considerados críticos; nos estudos preventivos de falhas relacionam-se itens potenciais de ocorrências de falhas. Nos equipamentos mecânicos consideramos os dinâmicos, os de grande potencial de falha. Os trabalhos preventivos e metodologias buscam otimizar os processos de produção, operação e manutenção visando aumento da confiabilidade do produto. Falhas nos equipamentos recaem negativamente no conceito junto ao consumidor final, e o mercado contemporâneo é seletivo quanto à qualidade dos produtos adquiridos.

As metodologias e técnicas de ataque aos problemas de desvios nos produtos e metodologias de fabricação têm sido difundidas e praticadas por diversas indústrias em todo o mercado, objetivando minimizar falhas ou encontrar explicações de problemas ocorridos, emitir diagnósticos, aumento da confiabilidade, traçar ações de melhoria e reengenharia pré e pós ocorrido o desvio. Diversas metodologias de análise de falha são trabalhadas como; RCFA (*Root Cause Failure Analysis*), FMEA (*Failure mode and effect analysis*), FTA (*Failure Tree Analysis*), PDCA (*Plan-Do-Check-Action*), SIX SIGMA, diagrama de causa e efeito dentre várias, citadas por autores como: Chase et al [17], Slack et al [70], Kardec e Nascif [45], dentre outros. A aplicação de cada metodologia é fundamentada no objetivo proposto, cada um dos processos atende a casos específicos, com metodologia específica, como relatam Andrade e Paskocimas [2]. As situações com utilização de duas ou mais metodologias também não são descartadas. Partes das análises, estrategicamente podem ser executadas por metodologias diferentes em fases distintas do curso do trabalho, objetivando otimizar a resolução do problema como um todo, exemplo: metodologia específica em conjunto com FTA e FMEA.

Análise da causa raiz de falhas (RCFA).

A metodologia de RCFA (Análise da causa raiz de falhas) é utilizada para investigação de causa raiz de falhas em sistemas ou equipamentos, buscando também realimentar de informações todo o processo evitando reincidências de desvios de mesma modalidade ou similar. Aplicação deste método visa alimentação de históricos de intervenções e ações preventivas. Conforme Kardec e Nascif [45], “Toda análise de RCFA deve ser documentada para servir de apoio à decisão de implementação de melhorias e modificações e servir de

referência futura, seja como memória seja para revisão da situação”. O aprofundamento ou detalhamento da metodologia depende da criticidade do equipamento investigado, o quão é danoso para a instituição a falha do componente estudado. A metodologia se baseia basicamente no questionamento contínuo “por que”, até chegar à causa mater. Na tabela 2, elaborada pelo autor, é exemplificado um caso prático ocorrido em uma bomba que atendia a planta de produção de ácido, equipamento considerado crítico, pois a sua falha causa parada em toda a unidade metalúrgica.

Tabela 2 - Exemplo real de aplicação de RCFA: B1101 A, B e B1102 A, B.

Pergunta	Resposta
Por que a bomba falhou?	A caixa de gaxetas falhou.
Por que a caixa de gaxetas falhou?	Corrosão acentuada na caixa de selagem.
Porque a caixa de selagem apresentou corrosão?	Contato do líquido de selagem com a caixa de selagem.
Por que o líquido de selagem agrediu quimicamente a caixa?	Acidez acima do permitido.
Por que o líquido estava com a acidez acima do permitido?	Contaminação do líquido de selagem com o fluido de trabalho.
Por que o líquido de selagem foi contaminado?	Pressão de selagem abaixo da pressão da caixa de selagem.
Por que a pressão estava abaixo?	Pressão de alimentação abaixo do requerido.
Por que a pressão estava abaixo do requerido?	Projeto do sistema de alimentação incorreto. Sem folgas.

Neste caso específico a concepção do projeto estava incorreto, razão da incidência anormal de reparos nas caixas de selagem das bombas de ácido fraco. Affonso [1] descreve o processo “5 *Why*” de maneira similar ao RCFA: “O processo é conhecido por 5 *Why* (5 por que) pois consiste em perguntarmos umas 5 ou 6 vezes a causa dos eventos”.

PDCA (*Plan –Do-Check-Action*)

Partindo dos conceitos de programas de qualidade contínuos, uma das metodologias utilizadas é o ciclo PDCA (*Plan-Do-Check-Action*) ou roda de Deming que pode ser adaptada para identificar falhas em componentes e atuar implementando ações de modificação

fundamentada no acompanhamento da performance do equipamento ou peça, visando o melhoramento continuado e progressivo. O processo consiste em realizar ou “girar” o ciclo continuamente, ver figura 21.

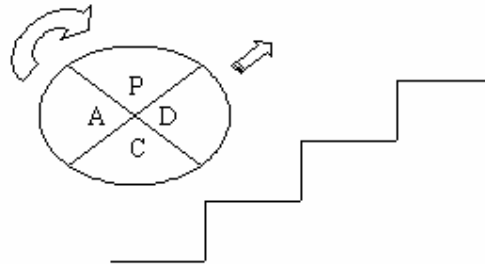


Figura 21-Ciclo PDCA.

O sistema é iniciado pela etapa P, planejar, que consiste em estudo, coleta de dados e planejamento de ações para atuação na situação existente, ou no problema. Na etapa seguinte segue-se a etapa D, fazer, ou executar o que foi planejado, implementar as ações do planejamento, executando fisicamente o preparado previamente. O passo seguinte é a checagem, C, que é a análise ou a checagem de todos os dados coletados, confrontando com o planejado, e finalmente A, de ação, que fazendo um paralelo para a situação de análise de falhas poderemos nesta etapa traçar o diagnóstico final fundamentado em todos os dados do transcurso ou simplesmente agir, mantendo ou evoluindo o que foi planejado ou replanejado. O ciclo de Deming, PDCA, é uma ferramenta e metodologia interessante, pois poderá ser adaptada para vários segmentos envolvendo ações de melhoria como um todo.

SIX SIGMA

A falha é um desvio de trajetória do componente, equipamento ou sistema produtivo. O programa seis sigma, de acordo com Franz [31], foi criado nos anos oitenta, nos Estados Unidos para equalizar a competição com as indústrias japonesas. A denominação seis sigma provem de um dos parâmetros estatísticos que tem a letra grega σ (sigma) como seu símbolo. Quanto maior a dispersão, maior é o desvio em relação ao valor padrão ou característica de projeto. A distribuição de frequências de eventos, por exemplo, desvio, graficamente pode ser representada em uma curva onde no eixo das abscissas é discriminado o evento, e no eixo das ordenadas a frequência. O perfil de dispersão pode ser normal. Em um tipo de distribuição contínua, quando seus valores de probabilidade assumem valores contínuos, dentro de uma faixa, existem diversos perfis de curva de probabilidade, um dos mais importantes por ter um

padrão com simetria com relação a média, é a curva normal ou de Gauss, já amplamente estudada por diversos autores. A área abaixo da curva representa a probabilidade do evento ocorrer, em toda a região o seu valor é um, ou 100% de ocorrer. Como na distribuição normal existe a simetria, o desvio padrão é uma variação em relação ao valor dito como referência, na distribuição normal. Se estipularmos que as tolerâncias terão um desvio padrão máximo de -1 e $+1$, a área abaixo da curva nesta faixa representa 68,26% de ocorrer tal fato, e 31,74% de ocorrer fora desta faixa ou fora deste padrão para sigma igual a um. Conforme figura 22, fonte Franz [31], na faixa permissível levando em consideração seis sigma, a tolerância do evento ocorrer, é de quase 100 % de probabilidade, 99,999998%, tendendo a falha zero, este é o preceito do programa seis sigma, na visão estatística. O foco principal do programa seis sigma é a aplicação de ações preventivas visando atingir a meta de falhas tendendo a zero.

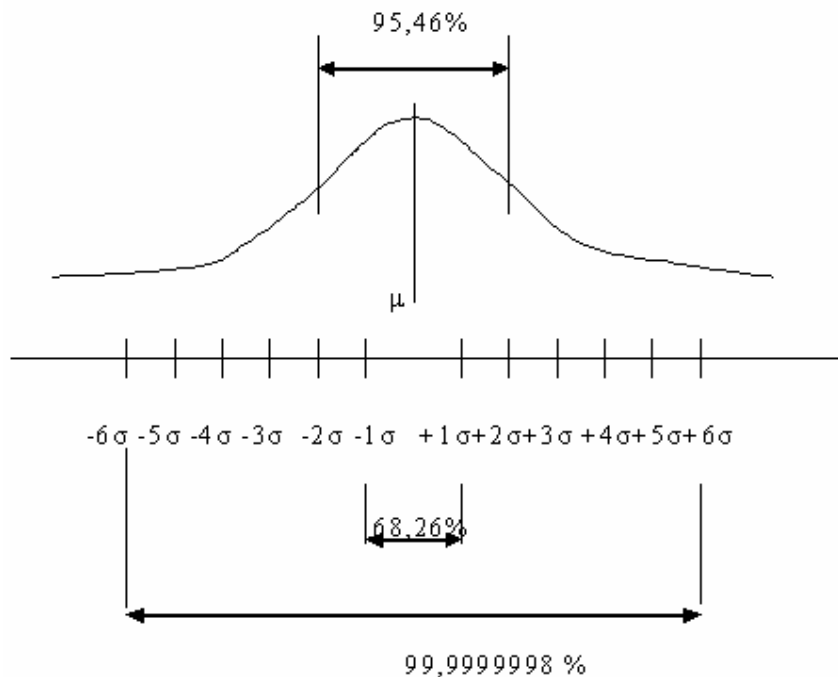


Figura 22 - Distribuição normal: faixas exigidas de probabilidade para o produto passar no controle.

FMEA (*Failure Model and Effect Analysis*)

O FMEA é uma técnica indutiva, sistemática, criada na década de sessenta pela Nasa, utilizada no projeto Apollo, com objetivo de aumentar a confiabilidade, minimizando incidência de falhas potenciais, nos projetos, sistemas, processos e produtos, Fernandes [27], Lafraia [50] e outros.

Conforme manual aplicado pela *General Motors*, *Ford Motor Company* e *Daimler Chrysler*, desenvolvido por Lange e outros [51], atendendo ao QS 9000, “a FMEA deve ser uma ação antes do evento”, é um método preventivo. A FMEA foi gerada para ser aplicada em novos projetos, novas tecnologias e novos processos, em modificações em projetos e processos existentes e uso em projeto ou processo existente em um novo ambiente. Algumas das aplicações principais do método FMEA são:

- Diminuir a probabilidade de falha em novos projetos e produtos.
- Diminuir a probabilidade de falha em processo.
- Diminuir a probabilidade de falha em projetos e processos já em andamento, melhorar sua confiabilidade.
- Diminuir os riscos em processos administrativos.

As etapas básicas de implantação de uma FMEA iniciam-se na formação de grupos de trabalho que deverão identificar nos processos e produtos: suas funções, tipos de falhas que podem ocorrer (modos de falha), avaliação dos riscos (nível de severidade, possibilidade de ocorrência, possibilidade de detecção, seus efeitos), possíveis causas fontes destas falhas e ações recomendadas. Na figura 23, é desenhado um fluxograma de aplicação de uma FMEA, tomando como referência Lange e outros [51] e diversos autores. Para cada fase do fluxograma terá um formulário.

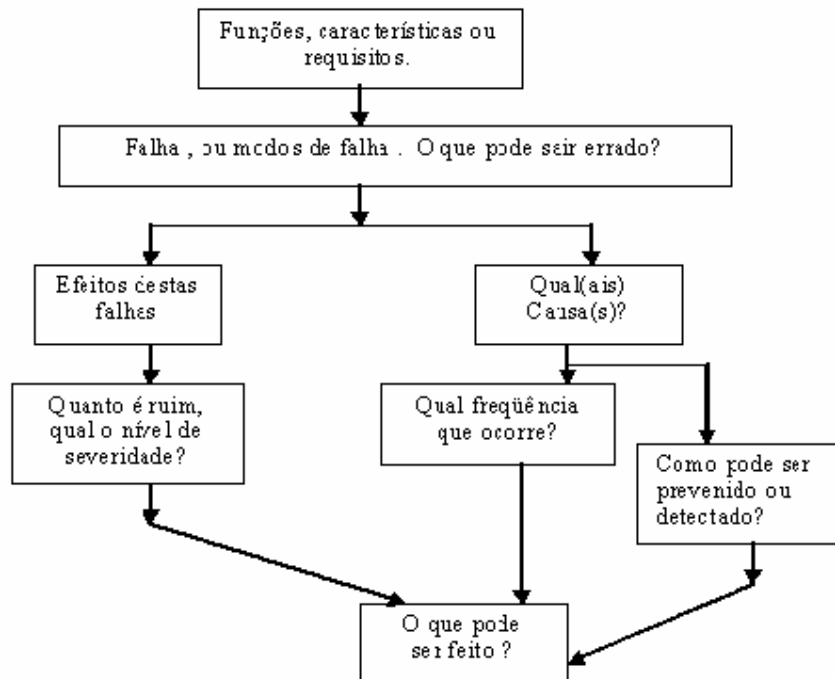


Figura 23 - Fluxograma básico de aplicação de uma FMEA.

No tópicos de avaliação dos riscos a própria empresa cria critérios de severidade; na tabela 3, é exemplificado.

Tabela 3-Exemplo de índices de severidade.

Índice	Critério: Severidade do efeito	Efeito
10	Índice de severidade muito alta quando o modo de falha potencial afeta a segurança na operação do veículo e/ou envolve não-conformidade com a legislação governamental sem aviso prévio.	Perigoso sem aviso prévio.
.	.	.
2	Itens de ajuste: acabamento/ chiado e barulho não-conformes. Defeitos notados pelos clientes somente com boa acuidade (menos de 25%)	Muito menor
1	Sem efeito perceptível	Nenhum

Os critérios de ocorrência se relacionam com a pontuação associada para cada nível de quantidade ocorrida. Na tabela 4, é mostrado um exemplo de pontuação critério de avaliação de ocorrência. Quanto maior a ocorrência maior será seu índice de ocorrência.

Tabela 4-Exemplo de critério de avaliação de ocorrência.

Probabilidade de falha	Taxas de falhas possíveis	Índice de Ocorrência
Muito alta: falha persistente	≥ 100 por mil veículos /itens	10
.	.	.
.	.	.
Baixa: relativamente poucas falhas	0,5 por mil veículos /itens	3
	0,1 por mil veículos /itens	2
Remota	$\leq 0,010$ por mil veículos / itens	1

A falha terá maior criticidade dentro do resultado do nível de prioridade de risco (NPR), quanto maior for o valor de cada índice em separado: índice de severidade, ocorrência e detecção. Na tabela 5, é mostrado exemplo de índices de possibilidades de detecção. Quanto maior a possibilidade de detecção menor será seu índice.

Tabela 5 - Exemplo de critério de avaliação de detecção, FMEA projeto.

Detecção	Critério: probabilidade de detecção pelo controle de projeto	Índice de Detecção
Absoluta Incerteza	Controle de projeto não irá e/ou não pode detectar uma causa /mecanismo potencial e subsequente modo de falha; ou não existe controle de projeto.	10
.	.	.
Muito alta	Possibilidade muito alta que o controle de projeto irá detectar uma causa /mecanismo potencial e subsequente modo de falha.	2
Quase certamente	O controle de projeto irá quase certamente detectar uma causa /mecanismo potencial e subsequente modo de falha.	1

O valor de NPR é o produto de: índice de severidade, índice de ocorrência e índice de detecção. Este valor varia de 1 até 1000. Valores altos deverão ser tratados com maior presteza e prioritariamente.

Conforme Lafraia [50], Slack e outros [70], Lange e outros [51], na tabela 6, é mostrado um formulário geral típico de uma FMEA.

Tabela 6 - Formulário geral de uma FMEA.

Item	Compo- nente/pro- cesso	Função (ões)	Modo de falha	Efeito	Seve- ri- dade	Causas	Ocor- rên- cias	Meios de detec- ção	Detec- ção	N PR	Ações pré ven- tivas

Diagrama de causa e efeito.

Para análise de falha em produtos como também em sistemas o rastreamento de possibilidades de causas raiz, o diagrama de causa e efeito, também chamado diagrama Ishikawa ou “diagrama espinha de peixe”, é um método bastante utilizado em manutenção. A aplicação deste método também visa alimentação de históricos de intervenções e ações preventivas de melhoria. O processo utilizado para desenho de um diagrama causa efeito segue-se primeiramente colocando o efeito na caixa correspondente, em seguida são identificadas as principais categorias de causas prováveis, comumente são usados quatro a cinco categorias: recursos humanos, sistemas, materiais, processos e equipamentos, podendo ser analisadas e inseridas outras categorias, como operação, instalações, custos e outros, a depender de cada

caso em particular. Na figura 24, é mostrada a montagem genérica do diagrama. Em cada ramificação de cada categoria são relacionadas causas prováveis do efeito relacionado na caixa de efeito, mostrado através das setas.

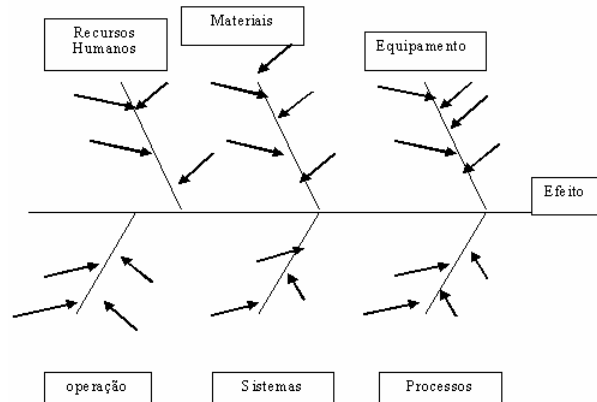


Figura 24 - Diagrama causa efeito, genérico guia.

FTA (*Failure Tree Analysis*)

A análise de falhas utilizando a técnica árvore de falhas FTA possibilita a investigação qualitativa e quantitativa de forma lógica dedutiva e estruturada, conforme Lafraia [50], Slack e outros [70]. A informação visual da análise é parte preponderante da técnica, pois utiliza uma simbologia própria para mudar a linguagem descritiva para um diagrama lógico, como coloca também Franco [30]: “A FTA consiste na introdução de um sistema físico em um diagrama lógico estruturado (árvore de falhas)”.

O sistema parte do evento principal, a falha que origina a investigação, chamada de evento topo, que estudadas as possíveis indicações de falhas, ramificam-se em vertentes que se assemelham aos galhos de uma árvore. A metodologia segue uma seqüência sistemática para trabalho da investigação:

- Seleção do evento principal, evento topo.
- Determinação de fatores ou sistemas contribuintes.
- Diagramação lógica, com simbologia específica.
- Simplificação booleana.
- Avaliação qualitativa e quantitativa.
- Conclusões.

A simbologia é composta para representar eventos e portas lógicas. Nas figura 25 e 26, mostramos a simbologia para eventos e portas lógicas respectivamente, conforme Lafraia [50] e outros.






	Evento Falha, topo.
	Evento Básico.
	Evento não desenvolvido
	Evento normal
	Evento condicional

Figura 25 – Simbologia para eventos FTA.

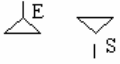



	Transferência
	Porta lógica “E”
	Porta lógica “ou”
	Porta inibidora.

Figura 26 – Simbologias para porta lógica FTA.

O procedimento dedutivo, lógico, é iniciado com a definição do evento topo, a investigação é no sentido de baixo para cima, “*top-down*”, com o objetivo de identificar as causas ou possíveis causas destas falhas, Lafraia [50] e Franco [30].

4.1.6 Análise de falha: superficiais (geometria/fabricação), macroanálise, rugosidade, microanálise, defeitos cristalográficos e áreas remanescentes da trinca.

O desenvolvimento científico tecnológico de engenharia volta-se na maioria das vezes para o aprimoramento da confiabilidade, buscando mínimas falhas. Sabemos que o trabalho não é

simples, pois envolve diversos fatores como: objetivo principal do projeto, limitação de tecnologia, limitação de convívio com o meio, de materiais, de recursos, dentre outros fatores. A busca da minimização dos desvios com custos adequados é tônica na realidade contemporânea.

A falha pode ser uma grande oportunidade de modificar procedimentos duvidosos e de desenvolvimento de melhorias diversas. A mudança no trajeto não prevista por um sistema ou componente pode dar início a um processo investigativo criterioso e científico. A falha não deve ser tratada como evento fim e sim começo de estudos de aprimoramento de engenharia. Conforme Callister [13]: “falhas são indesejáveis, mas bastante estudadas por engenheiros para melhorar a confiabilidade dos sistemas”.

Existem diversas razões para execução de estudos e investigações relacionadas com fatos em componentes que falharam, dentre vários citamos: busca da causa raiz, diagnósticos atendendo a causas judiciais, necessidades de alocar responsabilidades e os custos das conseqüências do ocorrido, rodar o PDCA, programar ações de melhoria, trabalho de reengenharia, mudanças de projeto, desenvolvimento de novos materiais, correção de desvios nos processos de produção, implementar planos e controles de manutenção, traçar procedimentos operacionais, somando-se a estes o desenvolvimento de falhas induzidas para realização de estudos científicos.

Os fatos que se desenrolam para evoluir uma anormalidade adquirem características próprias. De acordo com Neto [58], “em cada pericia o perito defende uma tese”. Cada falha, evolutiva ou abrupta, tem e uma característica peculiar, particular, tem uma “assinatura própria”, “uma impressão digital”, estudos de similaridade entre eventos diferentes são catalogados e registrados, gerando banco de dados para posterior associação com possíveis causas comuns.

O comportamento dos equipamentos quando se inicia o processo de desvio de sua trajetória de projeto é mudado. Agrega-se ao parâmetro operacional do equipamento a conseqüência de sua modificação, por exemplo, folgas maiores geram vibrações maiores. Vestígios são deixados nas peças tanto em falhas abruptas quanto em falhas evolutivas, até o colapso total. As análises investigativas de engenharia se fundamentam também nestas informações, que agregadas a outras, se cruzam minimizando possibilidades de diagnósticos errôneos, informações complementares são importantes.

Um dos componentes importantes e indesejáveis em muitas das peças são as trincas, e existem condições propícias para a nucleação destas microtrincas iniciais, são os fatores concentradores de tensão, dentre outros citamos: geometria, rugosidade superficial, defeitos superficiais e ausência de tratamento superficial. Nas investigações as primeiras averiguações

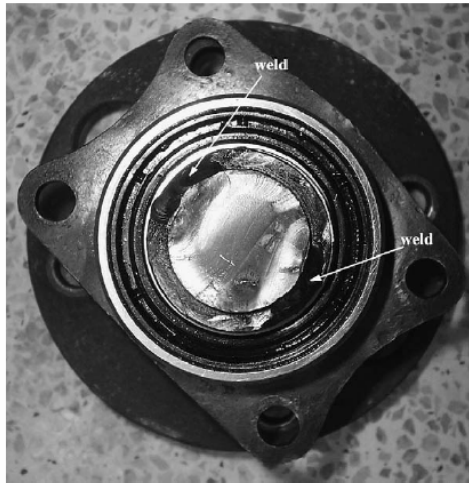


Figura 30 - Pontos de solda, nucleação de micro trincas.

Na maioria dos casos de fadiga, as microtrincas nucleiam-se a partir da superfície em pontos de concentração de tensão [13]. Defeitos superficiais, riscos, rasgos de roscas, vales do perfil de rugosidades superficiais são pontos susceptíveis a concentração de tensão. No estudo feito por Nanninga e White [56], é associado o limite de fadiga com a profundidade de entalhe de um componente extrudado. Pontos com profundidade de entalhe maior resultaram em vidas menores com relação à resistência a fadiga, figura 31.

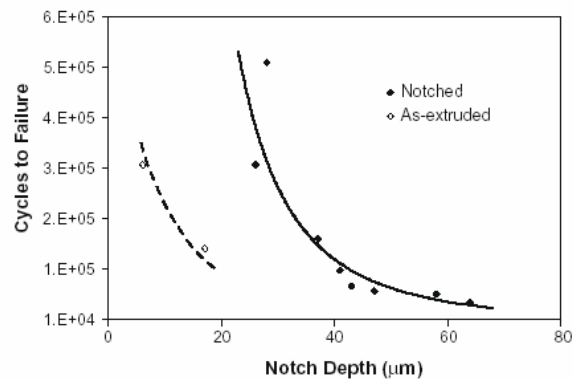


Figura 31 – Vida a fadiga e profundidade de entalhe.

Nos colapsos de peças, a sua separação pode ser iniciada por vários processos, como: sobre tensão, impactos diretos, geometrias dimensionais propícias a concentrações de tensões, meio agressivo, falhas superficiais, cargas de baixo, médio e alto ciclo, dentre outros. Fisicamente a cisão de peças metálicas acontece pelo desgarramento das suas ligações atômicas e moleculares, cristalinas e de fases.

A morfologia da falha pode nos indicar características e propriedades daquele material e como transcorreu o processo da falha. Nos processos envolvendo tensões cíclicas, existem indicações macrométricas, através de macrografias superficiais das faces da fratura, que indicam que ocorreram esforços repetidos, como marcas de catraca e marcas de rio, marcas de garra, como mostrado por diversos autores como: Ashby e Jones [7], Callister [13], Affonso [1], Colpaert [22], Andrade e Paskocimas [2], Nanninga e White [56] dentre outros. Na figura 32, secção transversal da superfície da fratura, Asi [8] mostra marcas de rio, em uma peça submetida a esforços reversos, com duas fontes de nucleação, A e B. *Ratched marks*, ou marcas de catraca, de acordo com Affonso [1], também evidencia pontos concentradores de tensão.

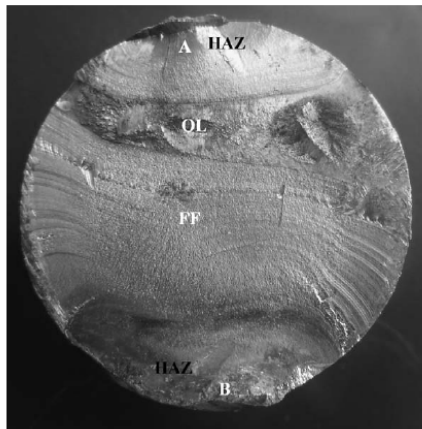


Figura 32 - Marcas de praia fadiga reversa, A e B, nucleação de micro trincas HAZ e OL região de fratura final.

Aliado às marcas de praia, ação das tensões cíclicas, a morfologia e aparência do relevo superficial da região da fratura exposta também pode indicar características do material que falhou. Superfícies com maior aspereza indicam regiões de fratura final, asperezas menores evolução de micro trincas, segundo Callister [13], Ashby e Jones [7], Affonso [1] e outros.

Nos processos de falha envolvendo fadiga, as microtrincas normalmente são iniciadas na superfície da peça, e seguem um direcionamento como mostrado na figura 33, dividindo-se em estágios de propagação: estágio I, 45 graus em relação ao plano de carregamento, estágio II de estriamento cíclico numa direção perpendicular a direção de tensão, marcas de praia ou marcas de garra, e estágio III, região de fratura final com velocidades bem maiores de evolução e superfície mais ásperas, conforme diversos autores como: Callister [13], Santos

[68] e outros. Na figura 34, é mostrada a foto de seção de falha de um parafuso envolvendo os três estágios [52].

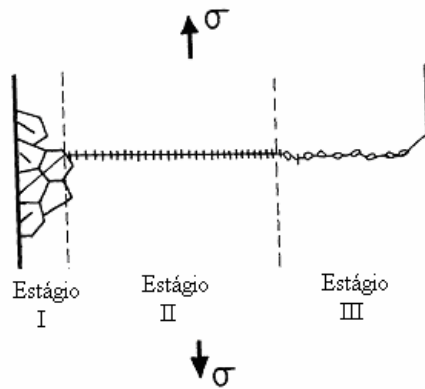


Figura 33 - Estágios de propagação de trincas por fadiga.

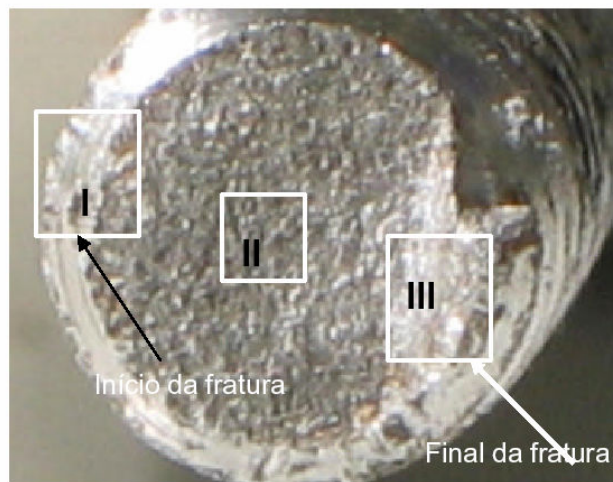


Figura 34- Seção de fratura mostrando os três estágios de propagação.

Na verificação da região do colapso final, além do perfil da superfície, deve ser analisada que área remanescente em relação à seção total, faz parte da fratura final, pois assim sendo sabe-se aproximadamente se a peça sofreu sobtensão ou subtensão, em função do percentual de área da região de fratura final, região remanescente final. Segundo Colpaert [22], os objetivos da avaliação metalográfica são: testar hipótese relacionada ao comportamento ou desempenho de um metal; Investigar as eventuais causas estruturais de um determinado comportamento ou desempenho de um item de metal.

Micrografias através de microscópio ótico e eletrônico de varredura são recursos importantes para adicionar dados para investigação e análise de fatos envolvendo desvios, falhas e fraturas

de componentes. Resultados de imagens coletadas com o microscópio ótico, com ataque e sem ataque, indicam o mapeamento de fases, corroborando com a análise comparativa em relação ao padrão esperado, presença de inclusões, percentual de cada fase presente, poros, orientação de grãos, forma e tamanho dos grãos, presença de tratamentos térmicos e superficiais, perfis de superfície, microtrincas, defeitos de preparação de amostras, dentre outros.

Em imagens de superfície de situações envolvendo falhas através de incidências de tensões cíclicas, conforme vários autores, como Ashby e Jones [7], Callister [13], Higgins [38], Affonso [1], Colpaert [22], Santos [68], dentre outros, adquirem na maioria dos casos, marcas de rio ou de garra e de catraca. A evolução destas microtrincas pode ser intragranular ou intergranular, ver figuras 35, 36, 37, 38 e 39.



Figura 35 - Marcas de rio e propagação das microtrincas [10].

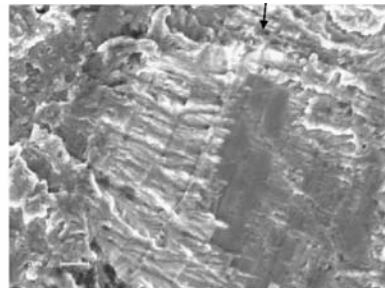


Figura 36 - Marcas de rio e propagação de micro trincas [52].



Figura 37 - Marcas de catraca [1].



Figura 38 - Trinca intergranular [13].

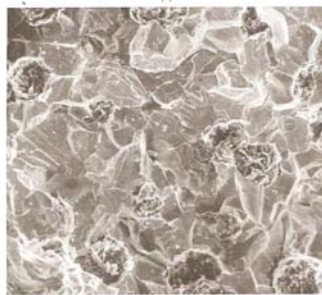


Figura 39 - Trinca intragranular [13].

Nas micrografias, as características da fratura podem ser: a) dúctil ou frágil, e b) dúctil e frágil, dependendo do material fraturado. Nas figuras 40a, 41 e 42, as micrografias mostram: *dimples* ou coalescimento de cavidades e o perfil de um material com maior ductilidade, onde antes da fratura o material sofre um alongamento. Nas figuras 40b e 43 são vistos planos de fraturas caracterizadas por clivagem, material com perfil mais frágil, menor deformação plástica antes da fratura. Na clivagem a fratura acontece em planos cristalográficos paralelos, de acordo com vários autores, dentre eles: Ashby e Jones [7], Callister [13] e Souza [71]. Conforme Ashby e Jones [7], a energia requerida para romper as ligações é bem menor por clivagem do que a absorvida por fratura dúctil.

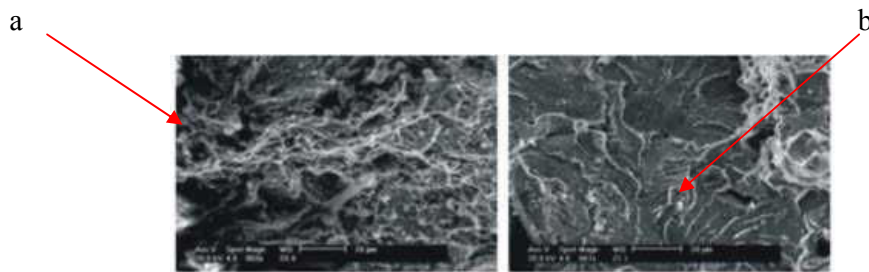


Figura 40-Fotos em MEV depois de ataque com reagente de Clark, observamos: (a) coalescimento de microcavidades na região de início da falha e (b) clivagem na região de ruptura final [48].

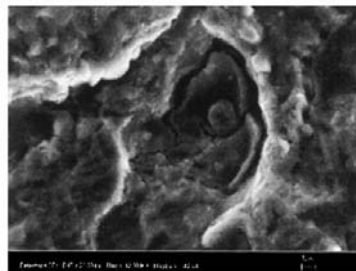


Figura 41- *Dimple* na face de fratura, material dúctil [10].

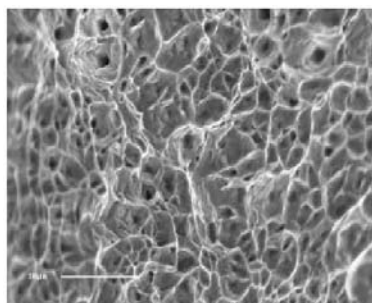


Figura 42 – *Dimple* na região III, fratura por sobrecarga [52].

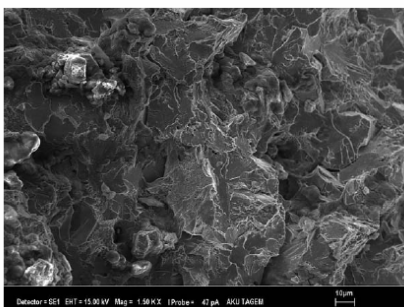


Figura 43 - Região de fratura final, clivagem [8].

4.1.7 Falhas Mecânicas Automotivas.

A indústria automotiva do MERCOSUL (Mercado Comum do Sul) sofreu transformações nos últimos anos, o parque fabril aumentou a partir de 1996. De acordo com a ANFAVEA (Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores – Brasil) existiam 12 montadoras, 26 plantas e 7 plantas *powertrain*, em 2005 passou para 19 montadoras 41 plantas e 16 plantas *powertrain*.

O mercado com grande competição interna e externa levou o parque industrial à montagem de programas de qualidade dos produtos. Aliado à globalização, o consumidor, como dito anteriormente, vem aumentando e agregando exigências no que se refere à motorização, conforto, e acessórios que há pouco tempo eram ditos como fora de linha e que hoje fazem parte da linha de montagem pela necessidade do produtor equalizar seus produtos com o concorrente e exigências legais, como o sistema de injeção eletrônica e recentemente a nova lei sancionada 11.910/09, que torna obrigatório a instalação do elemento de proteção ativa, o

airbag dianteiro, assim como também o freio ABS (sistema anti-bloqueio), gerador de maior eficiência de frenagem nos veículos automotores.

A eletrônica embarcada nos sistemas automotivos é fato corriqueiro e de convívio do consumidor com o produto; sistemas mecânicos se entrelaçam com sistemas de informática, elétrico e eletrônico, aumentando a complexidade e quantidade de componentes.

No produto automóvel até a chegada ao consumidor final, são executadas varias fases que vão desde a concepção do projeto até pesquisa de satisfação final. Dentre todas as etapas o risco potencial de falhas existe, apesar de serem utilizadas todas as metodologias e mecanismos que buscam o aumento da confiabilidade em todo o caminho como: FMEA, FTA, PDCA e SIX SIGMA. O automóvel é composto por diversos sistemas que são subdivididos basicamente por: carroceria, motor, transmissão, suspensão, direção, freios, sistema elétrico de iluminação, sistema de alimentação de injeção eletrônica, sistema de arrefecimento, sistema de escapamento, acessórios (ar condicionado, som, alarme, sistema elevação de vidros). Conforme Murad [55], aproximadamente o produto automóvel contém 15000 peças. Nos produtos em geral, como também no automóvel, as variantes do processo produtivo e de manutenção não são todas controladas, desvios de diversas espécies acontecem, fatores geradores de falhas podem ser detectadas ou não, haja vista o índice de falhas em diversos segmentos da indústria.

Fatores que funcionam como agravantes para ocorrência de falhas no campo em componentes veiculares no Brasil são citados por Souza [71]: “alta taxa de umidade, combustíveis de baixa qualidade, falta de qualificação de operadores, falta de manutenção preventiva“. Podemos agregar a isto a malha rodoviária em condições de precariedade de manutenção no país, conforme CNT (Confederação Nacional do Transporte) existem atualmente 69% da malha em condições ruins [19].

Sistemas estáticos por característica própria têm menor probabilidade de desvios. Sistemas dinâmicos e de contato são itens de potencial maior de ocorrências de anormalidade durante sua vida. De acordo com Godec e outros [36], a incidência maior de falhas é depositada nos motores e eixos, e “a localização de nucleação de trincas usualmente coincide com os pontos de concentração de tensão e região de defeito do material”. A suspensão é um item crítico por ser um sistema dinâmico com transferência de cargas cíclicas em função da mobilidade do veículo, por executar diferentes trajetórias e fazer parte do item segurança, por ter função de ligação entre carroceria, chassi e rodas e de manter a estabilidade e dirigibilidade veicular. Sua falha pode envolver vidas humanas.

4.1.8. Ferro fundido: obtenção, falhas de fundição e moldagem, classificação, componentes químicos principais e seus efeitos e fratura.

Os materiais considerados ferros fundidos são ligas a base de ferro com percentuais de carbono próximo ao ponto eutético nos diagramas ferro carbono. O limite tradicional que separa os aços do ferro fundido remete ao percentual de carbono de 2%. Segundo Colpaert [22] e Higgins [38] a utilização de materiais em ferro fundido tem registros iniciais na China, através de uma escultura em forma de um leão; posteriormente na Europa: nas tubulações do palácio de Versailles e a ponte Coalbrookdale na Inglaterra. A aplicação com maiores solicitações por bastante tempo foi limitada pela baixa ductilidade e tenacidade, que posteriormente foram melhoradas aumentando muito a sua participação na fabricação de diversos componentes em máquinas.

O ferro fundido tem como matéria prima principal o ferro gusa que é gerado no alto forno, por isto é chamado de ferro fundido de segunda fusão. O ferro gusa é produzido pelo processamento do minério de ferro que dentre os de maior importância industrial citamos: hematita, magnetita, limonita e siderita [28].

A fusão do ferro fundido ocorre aproximadamente a 300 °C mais baixo que o aço, diminuindo os custos de produção [28]. O forno mais utilizado para a produção do ferro fundido é o Cubilô, onde a carga é feita na parte superior e composta normalmente por: gusa em pedaços, sucata de ferro fundido, aço, coque e fundentes [18, 28, 9]. O metal fundido desce para o fundo do forno por ter uma maior densidade e a escória se deposita acima do metal fundido, sendo vazado em intervalos seqüenciados de tempo.

O forno Cubilô tem características de controle do processo difícil e é utilizado normalmente para fundição contínua de um tipo único de peça e com matéria prima conhecida. Existem outros tipos de fornos utilizados como: fornos à óleo e fornos elétricos. Os fornos elétricos a arco e de indução são ideais quando é necessário obter uma maior qualidade do ferro fundido produzido por ter uma maior facilidade de controle das variáveis de processo, como: composição química, temperatura e por possibilitar a produção da tonelagem requerida não contínua.

As propriedades dos ferros fundidos a nível metalográfico dependem da sua estrutura cristalina, ou seja, de como a liga foi solidificada. A solidificação depende da nucleação e do crescimento das fases, que por sua vez dependem da composição química, do tratamento do banho e a velocidade de resfriamento [66]. Nas fundições com os controles mais difíceis das

varáveis de processo, como a temperatura e composições químicas podem resultar em propriedades diferentes do projeto, como também gerar desvios de comportamento do produto final quando submetidos às condições de trabalho. A composição química inicial da liga está atrelada ao controle de processo na fundição e à velocidade de resfriamento que por sua vez está ligada principalmente à velocidade de extração do calor do molde, à temperatura de vazamento e à variação do tamanho da peça [66, 22].

Vários defeitos podem ser gerados em função das variáveis envolvidas no vazamento para o molde e na desmoldagem, como: desvios dimensionais, inclusões, defeitos de contração, deficiência de preenchimento, alta rugosidade superficial e porosidades [66].

O ferro fundido foi muito utilizado antes do conhecimento do diagrama Fe-C e das diversas microestruturas dos materiais. Por tais razões, a sua classificação tinha relação com a informação visual da estrutura da fratura: região de fratura com coloração branca foi classificada como ferro fundido branco; com região acinzentada foi classificada como cinzento.

Os percentuais constituintes da maioria dos ferros fundidos estão entre 3,0 a 4,5 % de carbono mais alguns elementos de liga. Com estes valores de carbono, as ligas tornam-se completamente líquidas com temperaturas entre 1150° e 1300°C, fator importante, pois diminui consideravelmente o custo de produção, comparando com os aços. O ponto eutético é caracterizado pela passagem direta da fase líquida para sólida e vice-versa. Para os ferros fundidos a transformação eutetóide é caracterizada pela condição de reação estável e metaestável. Na reação eutetóide estável, a austenita (γ) se dissocia em ferrita (α) e grafita; e na metaestável ela se dissocia em ferrita (α) e cementita (Fe_3C), conforme as equações 4.1.8.1 e 4.1.8.2., de acordo com Junior [43], ver Figura 44.



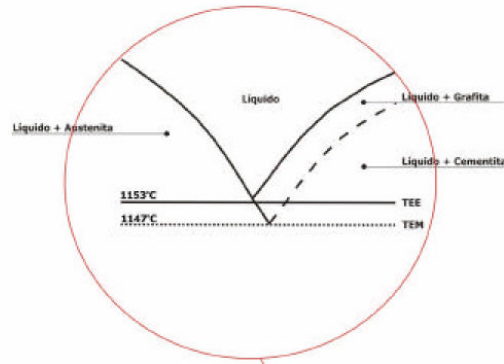


Figura 44-Temperatura do eutético estável e metaestável.

Um dos fatores que afetam os eutéticos é a presença de silício, aumentando a coexistência da austenita com a ferrita, alargando o intervalo entre os dois eutéticos, aumentando também a ocorrência da transformação estável, funcionando como elemento grafitizante. Em contrapartida outros elementos que promovem carbonetos, como o manganês (Mn), que diminuem este intervalo propiciando perlitizar à estrutura de fase, conforme: Colpaert [22], Vlack [77], Callister [13], Santos e Branco [66], Barella [9], Junior [43], dentre outros. Considerando o efeito grafitizante nas ligas Fe-C-Si (ferro fundido), foi adotado o conceito de carbono equivalente (CE), que é calculado como mostrado na equação 4.1.8.3.

$$CE = \% C + 1/3 (\% Si + \% P) \quad 4.1.8.3$$

São considerados ferros fundidos eutéticos quando percentual de CE é igual a 4,3%, hipereutéticos quando o CE é maior que 4,3% e hipoeutéticos quando CE é menor que 4,3%. Os valores de carbono e silício nos ferros fundidos devem ser controlados assim como a sua taxa de resfriamento, pois conseqüências nas suas estruturas e propriedades são advindas também destas variantes.

A Classificação dos ferros fundidos também é descrita em função da morfologia dos nódulos de grafita: grafita lamelar, nodular ou esferoidizada, vermicular ou intermediária entre nodular e lamelar. Os ferros fundidos também são classificados quanto ao tipo da matriz existente na microestrutura: ferrítica, perlítica, bainítica e martensítica, conforme Colpaert [22] e outros autores.

As propriedades dos ferros fundidos também estão intimamente ligadas às suas estruturas metalográficas como: composição, constituintes de fases, seus percentuais, sua forma dentre

outros fatores. Defeitos como: poros, segregações, presença de elementos contaminantes também afetam o quantitativo das propriedades.

As variações dos tipos de ferros fundidos produzidos têm ligação com suas propriedades exigidas na aplicação. Dentre os ferros fundidos usuais comerciais, citamos: branco, cinzento, nodular, nodular austemperado e maleável.

Nos ferros fundidos, o carbono junto com o silício são os elementos muito importantes, pois interferem nas suas propriedades finais. A taxa de resfriamento também é fator preponderante para conferir atributos técnicos. Conforme diversos autores como: Colpaert [22], Vlack [77], Callister [13], Santos e Branco [66], Barella [9], Junior [43], vários elementos de liga são utilizados para otimizar propriedades requeridas. Elementos grafitizantes possibilitam melhoria de ductilidade e tenacidade, elementos que aumentam o poder da carbonetação, aumentam a dureza e resistência ao desgaste, enfim as propriedades podem ser alteradas com adições controladas e acompanhamento das velocidades de resfriamento do metal. Elementos como: Si, Al, Ni e Cu são grafitizantes. Elementos como: Cr, Va, Mb, Mn e W possibilitam a carbonetação.

Os ferros fundidos nodulares são ligas Fe-C-Si, com propriedades de ductilidade e tenacidade, fundamentadas nos percentuais das fases presentes e na geometria da grafita que tem forma nodular, elementos de liga como Si tem papel fundamental neste processo, além da taxa de resfriamento na sua solidificação. O silício desestabiliza a cementita Fe₃C, propiciando a grafitização, o manganês (Mn) conforme Colpaert [22] e outros, dificulta a decomposição da cementita, e com teores elevados anula o efeito do Si. De acordo com Santos e Branco [60] o aumento da relação Si/C tem influência no aumento da resistência a tração, aliado também na velocidade de resfriamento. Enfim os vários elementos de liga têm suas respectivas influências, e as variações e mudanças nas taxas de resfriamento abrem muito o leque de possibilidade de adequação de propriedades.

Conforme detalhado em tópico 4.1.2, o ciclo de vida dos produtos são complexos e os controles não são totalmente dominados, os processos de fundição também fazem parte deste universo. Velocidades de resfriamento e controles dos percentuais dos componentes químicos estão intrinsecamente relacionados com as respostas dos materiais quando solicitados. Outras características como: defeitos de rede, microscópicos, de fundição, geométricos, condições de operação, podem funcionar como coeficientes que diminuem a resistência à ciclagem. Os ferros fundidos nodulares têm propriedades interessantes que se assemelham ao aço, porém sua ductilidade não é alta e seu alongamento está entre 10 e 20 %, conforme Callister [13], Vlack [77], Colpaert [22] e Barella [9] dentre outros. Nas solicitações cíclicas a energia

requerida para desagregação das ligações atômicas é menor para materiais mais frágeis comparando com materiais com maior ductilidade. As fraturas nos materiais em ferro fundido nodular têm características dúcteis ou frágeis, dependendo do seu nível de ductilidade que remete a característica particular morfológica micrografica da região de seccionamento. Conforme Colpaert [22], nas figuras 45 e 46 são mostradas duas fraturas com característica dúctil: com coalescimento de cavidades, *dimples*, e frágil sem coalescimento de cavidades.



Figura 45 – Fratura de ferro fundido nodular tipo dúctil com coalescimento de cavidades.

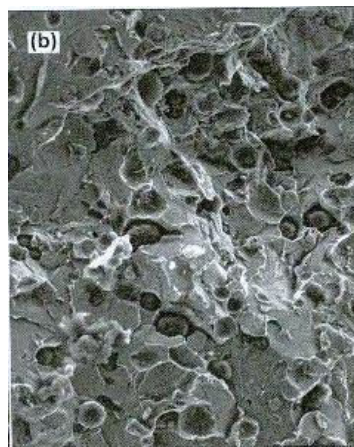


Figura 46- Fratura de ferro fundido nodular tipo frágil.

Um dos ferros fundidos nodulares no mercado é o SAE 4512 e o seu correspondente ABNT FE 42012, que são utilizados para fabricação de diversos componentes automotivos e tem algumas propriedades descritas na tabela 7, de acordo com norma NBR 6916.

Tabela 7 – Norma NBR 6916/1981

Classe	LR min (Mpa)	LE min (Mpa)	A 5dmin (%)	A título informativo	
				HB	Microestrutura Predominante
FE42012	420	280	12	150-200	ferrítica

5 MATERIAIS E MÉTODOS.

A investigação científica de situações envolvendo sistemas automotivos deve ser sistematizada, para minimizar trajeto da investigação como também creditar e otimizar resultados obtidos. Conforme Andrade e Paskocimas [2]: “Nos casos envolvendo questões da área mecânica automotiva, são nomeados peritos engenheiros reconhecidamente com ética, qualidade profissional e com experiência comprovada nesta área de conhecimento, dando o suporte técnico necessário ao MM Juiz”.

Nas publicações relacionadas com perícias o mercado dispõe de produções envolvendo principalmente os segmentos das seguintes áreas do conhecimento: criminal, dinâmica de acidentes de trânsito, contábil, médica, de avaliação, dentre outros. Nestas literaturas a linguagem utilizada é em grande parte descritiva.

A literatura relacionada com a investigação pericial judicial de engenharia mecânica que envolve descrição de metodologias sistemáticas descritivas e em diagrama de blocos é escassa. Assim, no desenvolvimento da nossa metodologia geral e específica, figuras 44 e 45 foram utilizadas os seguintes recursos: o estudo de laudos e perícias em diversas áreas do conhecimento, conhecimento prévio teórico e prático de várias metodologias de análise de problemas (RCA, FTA, FMEA, diagrama causa e efeito dentre outras) utilizado em laudos e manutenção industrial, trabalho envolvido com nossa atuação em várias perícias judiciais de engenharia mecânica automotiva e conhecimento prévio de sistemas automotivos.

5.1 FLUXOGRAMA GERAL DE DESENVOLVIMENTO DA ANÁLISE DE ENGENHARIA PERICIAL.

Considerando o fluxograma da figura 47, desenvolvido pelo autor, foi traçado o seguinte caminho: coleta dos dados iniciais, estudo e pesquisa, definição da estratégia e método de trabalho, coleta de dados, tabulação dos dados, análise dos dados e comparação com referências, análise específica da falha ou da divergência, respostas aos quesitos formulados, considerações importantes e conclusão, entrega do laudo, ocorrência de contestação, respostas aos quesitos extras e esclarecimentos, ausência de contestação e fim. A seguir detalharemos cada etapa:

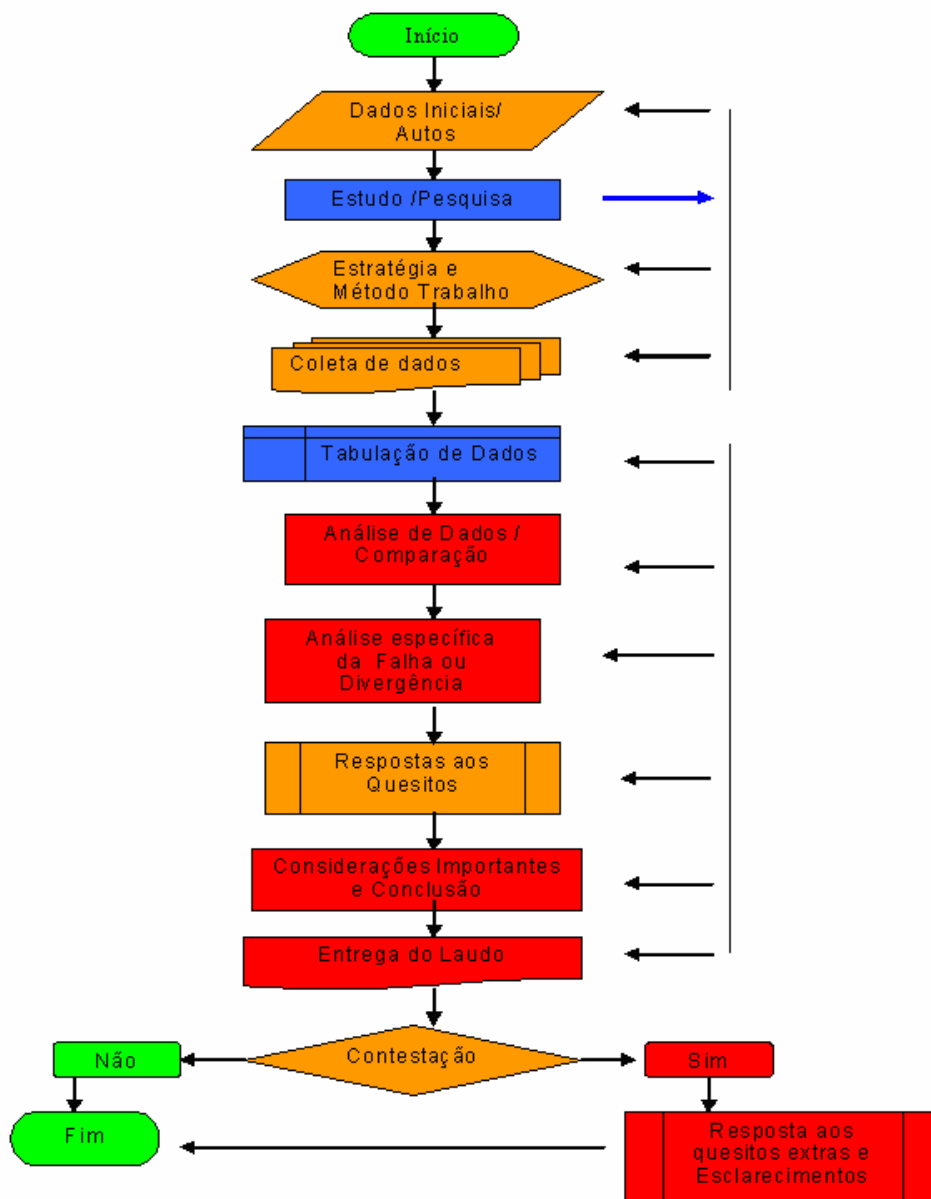


Figura 47 - Fluxograma geral de desenvolvimento de análise de engenharia pericial.

Dados iniciais

Os dados iniciais representam as informações básicas que constam nos autos do processo judicial e devem ser conhecidas, dentre as principais citamos: motivação técnica principal (falha ou divergência), nome do autor, nome do réu(s) e respectivas argumentações, nome do juiz, assistentes técnicos, prepostos das partes e os quesitos formulados pelos assistentes técnicos dos envolvidos e juiz, quando houver.

Estudo e pesquisa

Ciente das informações iniciais, o estudo e pesquisa do componente ou sistema envolvido referente à motivação técnica principal devem ser feitos aliado ao conhecimento prévio do engenheiro perito. Na maioria dos casos esta etapa se estende por todo o transcurso da investigação.

Estratégia e método de trabalho

Consideramos esta fase de grande importância, pois norteará os rumos da investigação e por envolver o planejamento das ações, minimizará possíveis probabilidades de erros no trabalho. Os planos de trabalho só devem ser analisados e traçados após o conhecimento do foco da investigação e dos quesitos formulados pelas partes envolvidas.

Nesta etapa, primeiramente são discriminados quais dados devem ser somados aos dados iniciais, para encaminhamento da investigação e laudo futuro. Devem ser definidas quais partes e instituições serão questionadas, buscando informações específicas que devem ser geradas através das respostas aos termos de diligência. Os termos de diligência são documentos emitidos que o perito nomeado tem o direito de emitir. Neste momento também, devem ser definidas quais informações serão necessárias e como devem ser executadas no momento da perícia. Também devemos definir quais análises laboratoriais são necessárias e quais recursos serão utilizados, bem como, definir o método e a seqüência de ações investigativas.

Coleta de dados

A etapa de coleta de dados é eminentemente de execução dos planos traçados na fase anterior (estratégia e método de trabalho). Todos os dados devem ser registrados.

Tabulação de dados

Nesta etapa, deve ser feita a organização e tabulação dos dados coletados, para melhor visualização do conjunto das informações, facilitando a análise na fase seguinte.

Análise dos dados e comparação

A organização e tabulação dos dados na fase anterior facilitam a análise geral das informações. O cruzamento dos dados também deve ser feito para emitir futuras observações importantes e conclusão. Nesta etapa, a análise do conjunto dos dados é feita, comparando também com informações e procedimentos de projeto.

Análise específica da falha ou divergência

Nesta fase, a análise deve ser concentrada na falha foco ou divergência descrita nos autos do processo. Para melhor entendimento e análise, somam-se aos dados específicos todas as informações coletadas e observações consideradas importantes na fase anterior.

Respostas aos quesitos

Serão respondidos e atendidos todos os questionamentos emitidos pelas partes envolvidas no processo: autor, réu(s) e juiz.

Considerações importantes e conclusão

Esta é considerada uma parte importante, pois a qualidade da emissão deste conteúdo minimizará a fase de contestação. As considerações e a conclusão é o resultado de todo o planejamento das ações, dos resultados obtidos e análises gerais e específicas. Nesta fase, a boa fundamentação científica gera otimização do laudo pericial final. Este relatório final poderá ser conclusivo, enfático ou não. Na conclusão, também poderá ser explicado de forma resumida, como a investigação foi executada para melhor entendimento do juiz e das partes envolvidas.

Entrega do laudo

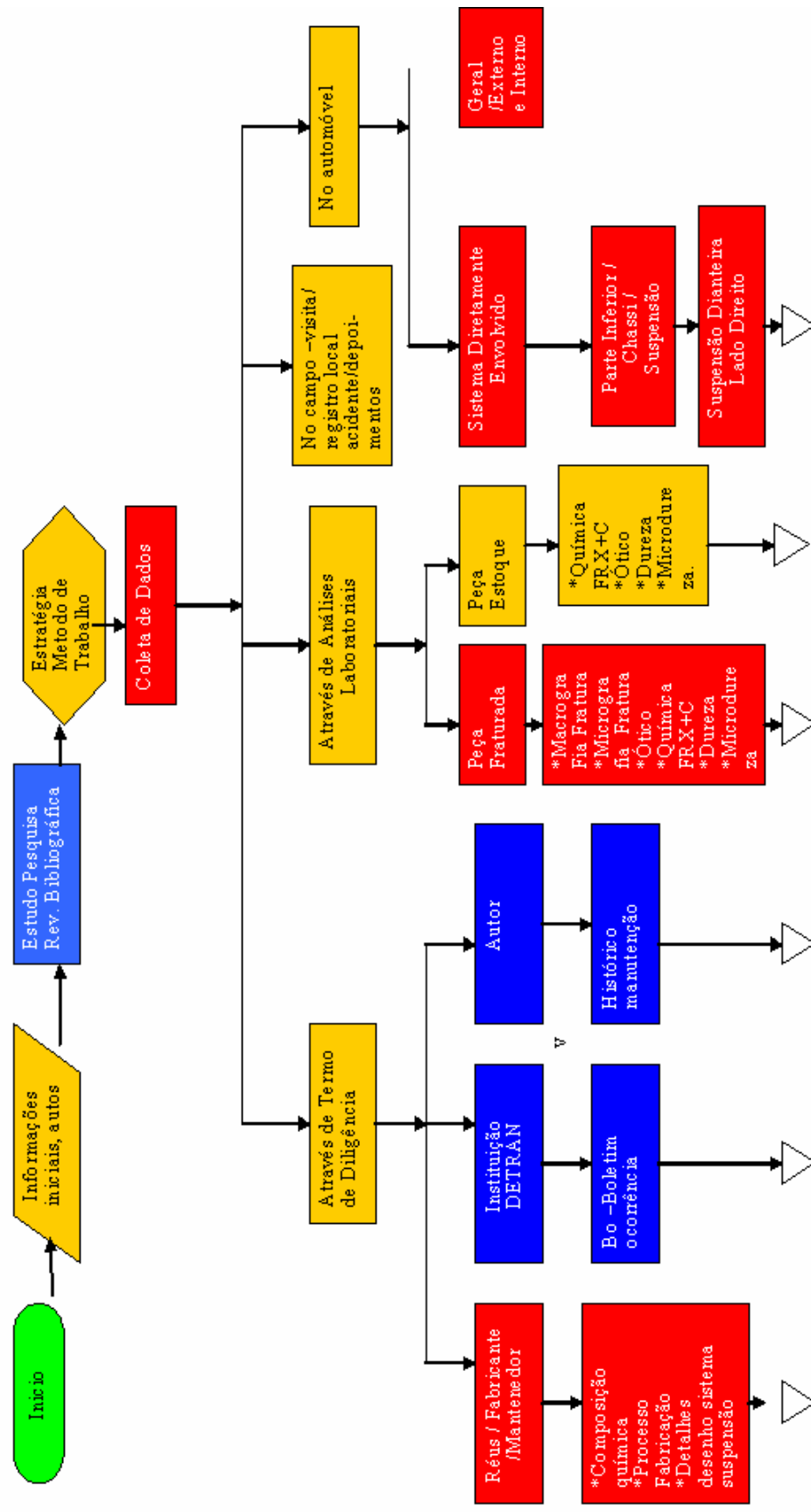
O laudo pericial é composto por todas as respostas aos questionamentos das partes, anexos dos registros no momento da perícia, anexos das análises laboratoriais, quando existentes, anexos dos termos de diligência emitidos e respectivas respostas, as considerações importantes e a conclusão gerada.

Contestação

Após entrega do laudo pericial, as partes envolvidas podem se manifestar através de uma contestação verbal em audiência, para esclarecimentos ou através de quesitos extras. O perito nomeado deve atender às necessidades das partes quanto aos quesitos extras ou esclarecimentos, finalizando o seu trabalho.

5.2 FLUXOGRAMA ESPECÍFICO DE DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE.

No nosso caso o fluxograma específico utilizado para investigação de falha em um componente da suspensão automotiva foi desenvolvido pelo autor seguindo o caminho descrito na figura 48, visando à defesa de dissertação de mestrado.



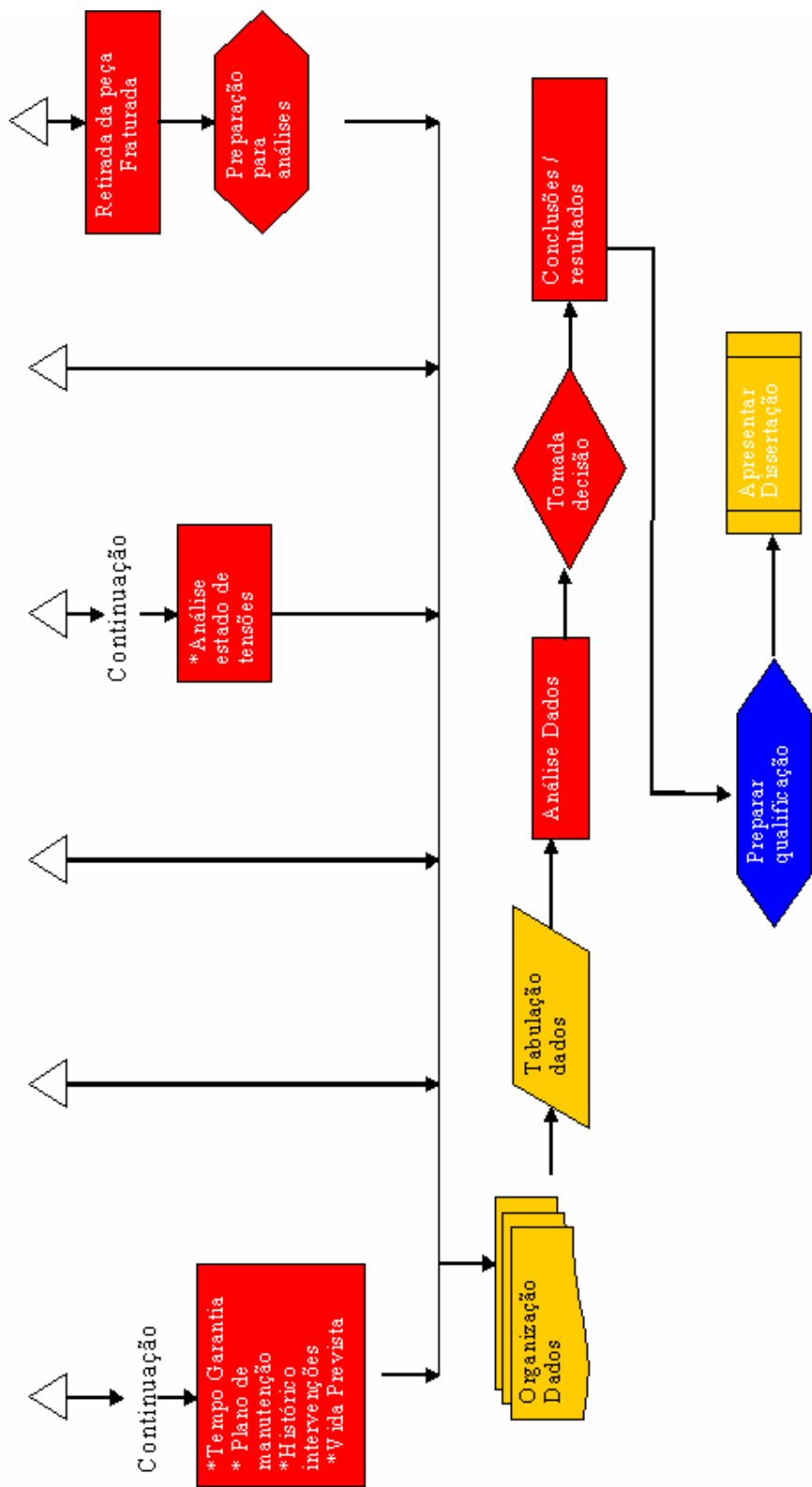


Figura 48- Fluxograma específico.

Sistemáticas periciais vivenciadas anteriormente, conhecimento prévio de componentes automotivos, estudos e pesquisas do sistema de suspensão automotivo do caso tratado foram importantes para o desenvolvimento do fluxograma mostrado na figura 48.

As fases iniciais do fluxograma específico estão mostradas na figura 48 e envolve: as informações iniciais nos autos, o estudo, pesquisa e revisão bibliográfica, estratégia e método de trabalho e a coleta dos dados que foram executados de maneira similar ao fluxograma geral mostrado na figura 47. Na fase estratégia e método de trabalho, foram planejados os dados considerados importantes e a seqüência do trabalho para a investigação da falha do componente foco da investigação: ponta de eixo lado direito da suspensão do automóvel submetidas a cargas cíclicas.

Coleta de dados

As respostas dos dados coletados devem alimentar o perito de informações para atender aos questionamentos das partes, relato das considerações importantes, conclusão e emissão do laudo pericial. Esta etapa do fluxograma, mostrado na figura 48, foi definida através do planejamento da etapa anterior (estratégia e método de trabalho) e utilizada as seguintes fontes de informações: as respostas dos termos de diligência, os resultados das análises laboratoriais, os dados coletados no campo (visita ao local do acidente) e os dados gerados na perícia no automóvel.

Dados coletados através dos termos de diligência

Os dados coletados através dos termos de diligência foram solicitados, neste caso, para os seguintes envolvidos: réus (fabricante e concessionária mantenedora do produto), as instituições DETRAN e polícia rodoviária federal e o autor.

Para os réus, foram solicitadas as seguintes informações relacionadas com a peça fraturada: composição química, processo de fabricação, desenho do sistema de suspensão, vida prevista, histórico das intervenções, plano de manutenção e tempo coberto pela garantia.

Para o DETRAN foi solicitado o histórico de proprietários do veículo envolvido. Para a polícia rodoviária federal foi solicitado o boletim de ocorrência do acidente.

Dados coletados através das análises laboratoriais

Nesta etapa foram coletadas informações da peça fraturada e peça estoque para fazer análises comparativas entre as duas peças e os dados referentes de projeto. Na peça fraturada foram coletados os seguintes dados: relevo superficial macrográfico, morfologia superficial

micrográfico da região da fratura inicial e final, fases presentes, composição química, dureza e microdureza. Na peça estoque foram executadas as seguintes análises: química, fases presentes, dureza e microdureza. Foi feita a análise de tensão qualitativa estudando a geometria da peça.

Dados coletados no campo: visita e registros no local do acidente e depoimentos

Dados no local do acidente e depoimentos de moradores ribeirinhos permitiriam o cruzamento dos dados confrontando com os relatos nos autos e boletim de ocorrência policial. Nesta etapa foi fotografado o local do acidente registrando vestígios do ocorrido.

Dados coletados na perícia do automóvel

Esta é uma fase importante, pois é o momento da perícia no automóvel com a presença dos assistentes técnicos das partes. A perícia foi precedida do *chek-list* para minimizar erros de tomada dos dados, execução de estudos e elaboração de procedimentos de desmontagem. Nesta etapa foram registradas as avarias sofridas, foi desmontada a peça foco e analisada a existência de vestígios tanto no componente quanto nas suas imediações. Após a retirada da peça foco foi analisado a viabilidade e condições de retirada das amostras e foi definida a região significativa para análises laboratoriais e continuação da investigação.

Após a tomada de todos os dados, as etapas seguintes se assemelham com o fluxograma geral (figura 47) seguindo os seguintes passos: organização dos dados, tabulação dos dados, análise dos dados e comparação, análise específica da falha da peça foco, tomada de decisão, considerações importantes e conclusão, qualificação e apresentação da dissertação.

5.3 COMPONENTES UTILIZADOS PARA INVESTIGAÇÃO.

A investigação foi trabalhada a partir de dados iniciais gerados nos autos de um processo judicial mecânico automotivo, na comarca de defesa do consumidor em Vitória da Conquista-BA. O componente que falhou foi uma peça da suspensão de uma Ranger ano fabricação 2001 e modelo 2002.

5.3.1. Peça fraturada.

De acordo com a avaliação inicial, o sistema envolvido foi a suspensão dianteira direita e tendo com foco principal a peça ponta de eixo dianteira lado direito da Ranger.

5.3.2 Peça estoque.

Foi utilizada também uma peça ponta de eixo do estoque da fábrica, para complementar a investigação, comparando dados e análises laboratoriais, enriquecendo o trabalho.

5.4 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.

Seguindo o fluxograma e o planejamento dos trabalhos, e considerando principalmente as análises laboratoriais programadas para a peça fraturada e peça estoque: macroanálise, macrografia, micrografias, microscopia ótica (fases), micrografia utilizando microscopia eletrônica de varredura (MEV), análise de dureza, microdureza, análise química qualitativa e quantitativa usando fluorescência de raio x (FRX) e espectroscopia de emissão ótica, foram utilizados diversos equipamentos que serão descritos nos tópicos a seguir.

5.4.1 Equipamento para análise macrográfica.

Na macrografia foi utilizada uma câmara digital marca Olympus, modelo D-435, com resolução de 5,1 megapixels, zoom digital de 4x.

5.4.2 Microscopia ótica.

A microscopia ótica foi realizada para analisar os constituintes de fase do metal e seus percentuais, tanto na peça fratura quanto na peça estoque. Foi utilizado o microscópio ótico Olympus GX51 aumento até 1000x, acoplado com programa de captação e registro de imagens Lumenera *Corporation*.

5.4.3 Microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Nos nossos trabalhos utilizamos a microscopia eletrônica de varredura (MEV), com o equipamento marca Shimadzu modelo SSX-550.

5.4.4 Dureza e microdureza.

O mapeamento de dureza da peça fraturada e peça estoque foram programas e realizadas com os seguintes equipamentos:

a) Dureza Brinell.

Foi feito o ensaio de dureza Brinell, com o equipamento marca alemã, Veb Werstoffprufmaschinen leipzig pressão máxima de trabalho de 35 kg/cm².

b) Microdureza – Vickers.

A microdureza vickers dos constituintes das fases foi medida com o equipamento Pantec HVS 1000.

5.4.5 Qualitativo e quantitativo químico.

Tanto na peça fraturada quanto na peça estoque foram feitas as análises químicas das amostras. Os dados coletados da composição química foram executados através da técnica fluorescência de raios-X (FRX), utilizando o equipamento da Shimadzu modelo EDX-700. Nesta técnica, por limitação do método, somente elementos entre o Na e U podem ser detectados, para o elemento carbono (C) foi utilizado a espectrometria ótica, usando o equipamento espectrômetro PDA-7000, utiliza o método PDA (*Pulse Height Analysis*), que conforme a Shimadzu melhora a exatidão e confiabilidade das análises.

5.5 MÉTODO.

Em função da quantidade grande de informações que margeiam nossa investigação científica, e objetivando também minimizar probabilidades de erro, o tratado fundamental metodológico do nosso problema foi iniciado criando um fluxograma de ações específicos para o caso, como mostrado na figura 45. Neste fluxograma consta a etapa “estratégia e método de

trabalho”, onde montamos o planejamento de como trabalharíamos o problema assim como todos os dados e análises necessárias e suas respectivas razões.

5.5.1 Metodologia.

A investigação foi paltada na análise de falha de um componente do sistema de suspensão automotivo gerado por acidente reclamado na defesa do consumidor na comarca de Vitória da Conquista-BA, e o desenvolvimento da análise foi traçado conforme fluxograma, figura 48.

Neste fluxograma os seguintes passos foram executados:

1. Foram coletadas informações iniciais nos autos do processo judicial.
2. A segunda etapa foi o estudo dos sistemas envolvidos e revisão bibliográfica relacionada com o funcionamento da parte envolvida. Esta etapa foi trabalhada ao longo de todo o processo investigativo.
3. Foi montada a estratégia de trabalho para o caso específico.
4. A etapa seguinte foi o planejamento dos dados necessários para análise particular e comparativa.
5. Os dados foram subdivididos em blocos, descritos na seção a seguir 5.5.2.
6. Para uma leitura mais efetiva e de qualidade, os dados quantitativos foram tabelados nas planilhas aqui apresentadas, que consta na seção 6 (Resultados obtidos e discussões), e em alguns casos com valores emparelhados com dados gerados por resultados de análises na peça fraturada, peça estoque e dados de projeto.
7. Com as tabelas já formatadas, foram feitas as análises dos dados, descritas as considerações importantes e conclusão da investigação com sugestões de trabalhos futuros.

5.5.2 Realização da investigação.

O fluxograma específico foi montado e executado conforme previsto. Em cada etapa de realização foram planejadas as atividades previamente, montando tabelas com *check list* correspondente, diminuindo a probabilidade de falta de algum tópico de cada fase. Os dados foram subdivididos em: dados iniciais, gerados pelas respostas aos termos de diligência, de visita ao local e depoimentos, da perícia de engenharia no automóvel, da análise qualitativa das tensões atuantes na peça fraturada e dados obtidos através de análises laboratoriais.

5.5.2.1 Dados iniciais.

Para coleta dos dados iniciais (autos do processo), foram planejadas quais informações para a execução da investigação nesta etapa eram significativas. Após esta etapa foi preparada uma planilha contendo campos considerados interessantes: natureza dos dados e informação propriamente dita. No campo natureza dos dados foi incluído: número dos autos, juiz do caso, nomes das partes envolvidas e prepostos com os respectivos endereços, dados do automóvel, descrição do fato com sua localização geográfica e temporal, pleitos do autor, argumentação do réu, dados da oficina depositária e descrição do boletim de ocorrência.

5.5.2.2 Dados importantes gerados pelas respostas aos termos de diligências.

O perito judicial nomeado pelo juiz tem a função de responder a quesitação elaborada pelas partes envolvidas (juiz, autor e réu(s)), emitir laudo técnico pericial com considerações importantes e conclusão final após a vistoria. Os resultados dos trabalhos do engenheiro perito devem ser fundamentados cientificamente. O juiz de direito envolvido dá pleno poder ao perito para o seu trabalho de investigação, de acordo como o art.429 do Código de Processo Civil (CPC), e conforme Juliano [41], o perito pode: “utilizar de todos os meios necessários na perícia, ouvindo testemunhas, obtendo informações, solicitando documentos que estejam em poder das partes ou em repartições públicas, instruir o laudo com detalhamentos, desenhos, fotografias e outras quaisquer peças”. Estas solicitações são emitidas e informadas para os envolvidos, como também para instituições e pessoas físicas direta e indiretamente ligadas ao caso relatado nos autos do processo, através dos termos de diligências. No nosso caso, elaboramos as necessidades e suas fontes na tabela 8, e emitidos os termos de diligência correspondentes para: os réus, o autor e Detran, gerando dados importantes para posterior análise.

Tabela 8 - Dados e necessidades dos termos de diligencia emitidos.

Nº	Endereçado	Dado /necessidade
01	Autor / preposto	Endereço da oficina depositária e manual do proprietário
02	Juiz	Recursos de custeio para visita ao local e análises laboratoriais
03	Réu/preposto	Histórico de manutenção, informação do fabricante da peça fraturada: material, composição química, dureza, vida estimada, tratamento superficial e plano manutenção.
04	Detran	Histórico dos proprietários do automóvel envolvido.

5.5.2.3 Dados de visita ao local e depoimentos.

A visita ao local do acidente foi feita, principalmente, para comprovação das argumentações dos envolvidos: autor e réus. A preparação prévia dos trabalhos a serem executados antes da visita foi fazer uma listagem de atividades a serem coletadas no momento da visita, otimizando o tempo e minimizarem falhas nesta etapa. Também foram coletados depoimentos de moradores ribeirinhos para cruzamentos de dados do autor, réus e boletim de ocorrência policial (BO).

5.5.2.4 Perícia de engenharia no automóvel.

A perícia física do automóvel foi executada após prévia convocação com no mínimo dez dias de antecedência, para que as partes se programassem, conforme orientações do juiz do processo. Na vistoria foram convocados os assistentes técnicos dos envolvidos. Foi executada a perícia com a presença das partes, conforme procedimento legal: preposto do autor e réus, respectivos assistentes técnicos.

5.5.2.5. Análise qualitativa do estado de tensão.

Pontos geometricamente concentradores de tensão são componentes geradores de nucleação de microtrincas, portanto na nossa investigação foi executado estudo levando em consideração a geometria da ponta de eixo, com estimativa qualitativa da solicitação para identificar pontos geométricos concentradores de tensão.

Na peça foram tomadas cotas dimensionais e identificada a localização dos pontos de solicitação de carga: na parte superior, ponto de fixação da bandeja superior, na parte inferior ponto de fixação da bandeja inferior e nos pontos de fixação do cubo da roda. O objetivo desta análise não é quantificar e sim identificar pontos de concentração de tensão pela característica geométrica da peça. Foi feita análise qualitativa de tensão para trajetória retilínea e esterçamento para esquerda, condição imediatamente anterior à fratura e ocorrência do acidente.

5.5.2.6. Análise laboratorial.

Nas análises investigativas de falhas em componentes, a estratégia de trabalho é de crucial importância para chegada ao objetivo proposto. O planejamento de retirada do componente, registros antes do manuseio e observações devem ser feitas com técnica evitando modificação do estado do item a ser estudado. Amostras significativas devem ser disponibilizadas para posterior análise, objetivas e subjetivas. Quanto maior o cruzamento de dados, menor a probabilidade de desvios de interpretação. Dentre as tomadas de dados neste nosso trabalho, planejamos também a análise utilizando recursos com equipamentos, e métodos tecnologicamente largamente usados em diversos trabalhos científicos. Foram feitas análises na peça fraturada e peça estoque para observações comparativas.

Na peça fraturada, além de análise das imediações do sistema de suspensão e automóvel como um todo, na vistoria física, foram tomados os seguintes dados: macrografias da região de fratura, micrografia utilizando MEV (microscópio eletrônico de varredura), da região de fratura inicial e final e exame de fases utilizando microscopia ótica, sem ataque e com ataque com nital 2%, percentual de nódulos de grafita, percentual de matriz ferrita, percentual de perlita, dureza Brinell, microdureza Vickers, análise química FRX (fluorescência de raio x), análise teor de carbono através de espectrômetro de emissão ótica. Na peça estoque foi executado: dureza Brinell, micro dureza Vickers, fases em microscópio ótico sem ataque e com ataque nital 2%, percentual de nódulos de grafita, percentual de perlita e percentual de matriz de ferrita, análise química FRX, análise de carbono por espectrometria ótica.

Na etapa descrita como “estratégia e métodos de trabalho”, conforme figura 48 (fluxograma específico) foram planejadas as análises seqüenciais e suas respectivas razões técnicas, ações executadas após a desmontagem da peça fraturada na etapa de perícia física no automóvel, elaboração executado pelo autor e detalhado na tabela 9.

Tabela 9 - Análises sequenciais na peça fraturada e respectivos objetivos.

ANÁLISES PLANEJADAS E REALIZADAS NA PEÇA FRATURADA		
Item	Descrição	Objetivo
01	Análise de concentração de tensão da peça,	Identificar pontos de concentração de tensão e associar com a localização da fratura real.
02	Macrografia na superfície da fratura.	Identificar regiões significativas morfologicamente a nível macro, indicando indícios da evolução e características da fratura.
03	Micrografia utilizando MEV. Regiões de evolução de fratura inicial e final.	Identificar regiões significativas morfologicamente a nível micro, indicando evolução e indícios da característica da fratura inicial e final.
04	Microscópio ótico. Identificação de fases, sem ataque e com ataque nital 2%	Sem ataque, objetivo identificar fases. Com ataque identificar todas as fases existentes: forma da grafita, perlita e matriz de ferrita.
05	Contagem do percentual das fases encontradas, com contraste de cores, escuro claro.	Associar com dureza. Ductilidade tenacidade. Comparar com padrões de projeto de dureza, comparar com a peça estoque. Análise com cruzamento de dados da morfologia da micrografia fratura inicial e final.
06	Análise química qualitativa e quantitativa utilizando FRX.	Comparar com os padrões de projeto, e associar possíveis divergências com a fratura. Comparar com valores encontrados na peça estoque.
07	Análise química do teor de carbono utilizando espectrometria de emissão ótica.	Comparar com os padrões de projeto, e associar possíveis divergências com a fratura. Comparar com valores encontrados na peça estoque.
08	Dureza Brinel	Comparar com os padrões de projeto, e associar possíveis divergências com a fratura. Comparar com valores encontrados na peça estoque.
09	Microdureza Vickers	Comparar com dureza e associar com percentuais de constituintes das fases. Associar valores com o evento fratura. Comparar com os valores encontrados na peça estoque.

Macrografia da superfície da fratura.

A superfície morfológica da fratura apresenta características próprias que podem identificar o tipo de mecanismo de falha em peças. Inicialmente foi feito à seleção, registro e análise nas proximidades da fratura e posteriormente localizada especificamente na região fraturada.

Micrografia da região da fratura inicial e final.

Dados micrográficos são coletados para registro da morfologia na região da fratura para posterior análise da sua característica, podendo explicar os processos de início de falha do material até o colapso total. Nos nossos trabalhos utilizamos à microscopia eletrônica de varredura (MEV). Foram coletados dados de imagens na região da fratura inicial e final, com aumentos: 24x, 35x, 45x, 50x, 200x, 400x, 450x, 750x, 1000x, 1500x e 1800x. A seleção da

região significativa a ser micrografada foi a primeira etapa deste processo, levamos em consideração os nossos objetivos na realização das microfotografias: estudo da região da fratura inicial e final.

O corpo de prova utilizado para análise com o MEV é mostrado na figura 61, fratura inicial. A preparação da amostra foi realizada utilizando uma limpeza com ultra-som, com o equipamento da marca Panambra modelo metason 14, em banho com solução de gasolina de petróleo, para retirada de impurezas e óxidos gerados pela corrosão, melhorando a condutividade superficial. Antes da entrada no MEV foi dado um banho de ouro superficial, também para otimizar a condutividade, requisito importante para colheita de imagens através do bombardeamento do feixe de elétrons no equipamento marca Shimadzu modelo IC-50, ver figura 49.



Figura 49 - Banho de ouro nas amostras para coleta de imagens no MEV.

Na região de fratura final foi selecionada a região para preparação do corpo de prova. O corpo de prova passou pela mesma preparação do corpo de prova da fratura inicial: limpeza com ultra-som e camada de ouro por eletrodeposição, para melhoria da condutividade superficial.

Microscopia ótica das fases e percentuais constituintes na peça fraturada.

A análise através de microscopia ótica complementa a caracterização microestrutural do material, pois existe relação entre estrutura micro e possíveis irregularidades com as propriedades, como também podem explicar razões de falhas diversas em peças de equipamentos. O nosso estudo utilizou a microscopia eletrônica de varredura como também, com bastante eficiência, a microscopia ótica para possivelmente caracterizar defeitos na estrutura de fases da peça metálica analisada.

Como o princípio da microscopia ótica é a reflexão, os corpos de prova devem ser preparados metodologicamente para realização dos registros.

O primeiro passo é a escolha do local da retirada da amostra, que deve ser significativa para o estudo. Foram feitas análises microscópicas em amostras da peça fraturada e peça estoque, para objeto futuro de comparações.

O procedimento de preparação da amostra foi iniciado com o corte manual com arco de serra com lâmina de aço rápido, que pela baixa velocidade de corte não altera a microestrutura por aumento de temperatura. Após o corte, a metodologia tradicional de preparação da superfície foi realizada com a retirada primeiramente de rebarbas maiores com lima aço cromo 66 HRC, conforme o fornecedor *Starret*, posteriormente executado lixamento manual, com lubrificação e refrigeração com água corrente, foram usadas lixas de carbetto de silício, com abrasivos seqüencialmente utilizados; 80, 100, 120, 180, 220, 240, 320, 360, 400, 500, 600 e 1200. Para cada mudança de lixa era observada a qualidade no microscópio ótico do lixamento anterior. Após o lixamento foi feito o polimento com pano de feltro novo e utilizando alumina com abrasivo de 1 μm , com operação semi automática, com a máquina modelo Montasupal, ajustada para a menor rotação, diminuindo probabilidade de erro, melhorando a qualidade do polimento.

Na peça fraturada foi feita a micrografia com ataque utilizando nital 2% e sem ataque utilizando o microscópio ótico Olympus GX 51 aumento até 1000x, acoplado com programa de captação e registro de imagens *Lumenera Corporation*.

Análise de fases no microscópio ótico e percentuais constituintes, peça estoque.

As análises macroscópicas e microscópicas fazem parte de um conjunto de dados e podem explicar propriedades e razões de falhas em componentes. Tanto na peça fraturada quanto na peça estoque foram feitas às análises microscópicas de fases utilizando o microscópio ótico. Foi retirada a amostra na peça estoque em um ponto considerado significativamente interessante geometricamente, regiões de mudança de forma e similar ao local da fratura. Na figura 50, está mostrado o ponto de retirada do corpo amostral, e na figura 51 mostramos o corpo de prova já embutido. Os procedimentos de preparação foram similares à preparação do corpo de prova da peça fraturada. Foram utilizados quatro quadros para contagem de percentuais de fases tanto na peça estoque quanto na peça fraturada.

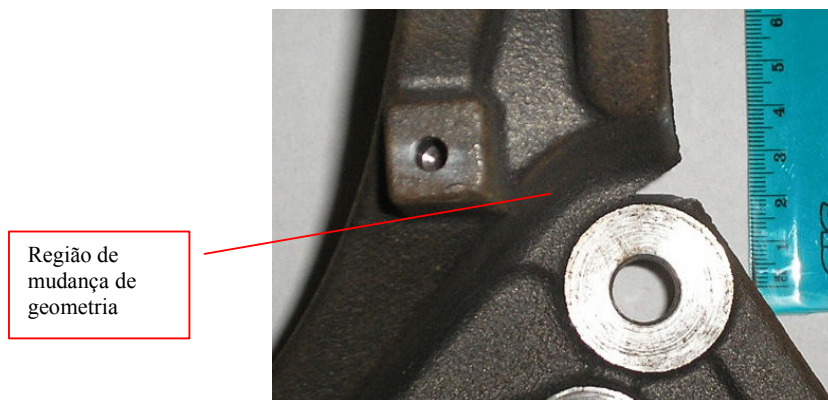


Figura 50 - Ponto de retirada de corpo de prova, peça estoque.

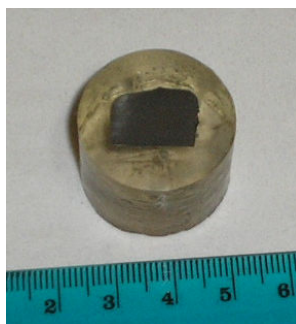


Figura 51 - Corpo de prova peça estoque.

Na peça estoque também foi registrado através do microscópio ótico, com ataque com nital 2% e sem ataque, mostrando a estrutura de fases do ferro fundido nodular.

Dureza e microdureza da peça fraturada e estoque.

Foi medida a dureza Brinell, e microdureza Vickers para análise e comparação com os dados de projeto entre a peça estoque e fraturada. A dureza é uma propriedade dos metais de importância, pois os valores maiores de dureza remetem a menores ductilidades, absorvendo menor energia nas solicitações mecânicas, fragilizando os componentes. Maiores dificuldades de movimentação de discordância interna geram menor tenacidade, energias menores gastas para aberturas de trincas, falhas sem deformação plástica (mais frágeis) [7]. As análises micrográficas da morfologia nas regiões de fratura inicial e final com presença de dimples ou coalescimento de cavidades remetem a materiais com maior ductilidade, a ausência denota

materiais com menor ductilidade. Foram tomados seis pontos de medida de dureza para cada peça e analisados limites superior, inferior e média, conforme a norma dureza de Brinell, NBRNM 187(05/1999).

A microdureza dos constituintes das fases foi medida nos grãos de grafita (C), perlita [(cementita Fe_3C mais ferrita $3Fe(\alpha)$] e matriz de ferrita [$3Fe(\alpha)$]. Foram coletadas quatro medidas em cada constituinte de fases, sendo na grafita aplicado carga de 25g, e restante 100g, ambas por 15 segundos. Consideramos o valor médio das medidas coletadas, conforme Norma microdureza Vickers NBR6672/81.

Qualitativo e quantitativo químico, peça fraturada e estoque.

Os valores qualitativos e quantitativos dos componentes constituintes químicos da peça fraturada são importantes, pois seus valores estão associados também às suas propriedades. Os dados coletados da composição química foram executados através da técnica fluorescência de raios-X (FRX). Foram utilizadas duas amostras de cada peça fraturada e estoque. Na figura 52 e 53 são vistas uma das amostras utilizadas: peça fraturada e estoque respectivamente.



Figura 52-Amostra peça fraturada.

Para os valores de carbono (C) foi utilizada a técnica espectrofotometria, utilizando o equipamento espectrômetro de emissão ótica.



Figura 53 - Corpo de prova peça estoque, para FRX.

6. RESULTADOS OBTIDOS.

Os resultados encontrados foram subdivididos em quatro partes, para melhor organização mental e cruzamento de informações da investigação:

- 1) Dados relacionados com investigação nos autos;
- 2) Dados coletados através dos termos de diligência;
- 3) Informações oriundas da visita física ao local do ocorrido do sinistro e vistoria de engenharia no automóvel;
- 4) Em outro item organizamos os dados referentes às análises laboratoriais de caracterização do material envolvido da peça fraturada e peça estoque;

E finalmente tecemos considerações que visualizamos como interessantes para o caso na seção 7.

6.1 DADOS RELACIONADOS COM A INVESTIGAÇÃO NOS AUTOS.

A nossa investigação foi gerada de um fato real contido nos autos de um processo na Vara de Defesa do Consumidor em Vitória da Conquista-BA. Conforme descrição nos autos do processo numero xxxx87-8/2006, o autor trafegava na rodovia BR 116 no sentido Medina para Divisa Alegre, região pertencente ao município de Cachoeira do Pajeú (MG), cidades a aproximadamente 650 km de Salvador, capital da Bahia, quando ao iniciar uma curva para a esquerda, o motorista perdeu o controle de direção do veículo, “direção sem funcionar”, o automóvel capotou causando pequenas lesões corporais e avarias generalizadas na carroceria, como mostrado na figura 54, e *lay-out* descrito no boletim de ocorrência, figura 55. Após análise feita pelo autor, foi alegado defeito de fabricação da peça que suporta a roda dianteira lado direito: ponta de eixo dianteira lado direito, conforme descrição do fabricante. O autor entrou com uma ação na Vara Especializada de Defesa do consumidor da Comarca de Vitória da Conquista - BA, alegando defeito de fabricação pré-existente.



Figura 54 – Visão geral do automóvel com avarias generalizadas.

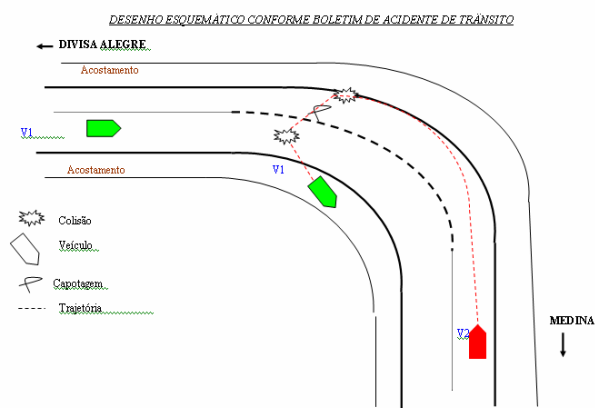


Figura 55 – Desenho de acordo com o boletim de acidente de trânsito
(V1 = outro veículo, V2= autor).

No nosso caso as informações iniciais como: número dos autos, juiz do caso, nomes das partes envolvidas com os respectivos endereços, dados do automóvel, descrição do fato com sua localização geográfica e temporal, pleitos do autor e argumentação do réu, foram coletados.

6.2 DADOS IMPORTANTES COLETADOS ATRAVÉS DOS TERMOS DE DILIGÊNCIA.

Relacionamos a seguir os dados técnicos importantes gerados pelas respostas aos termos de diligência emitidos.

1. O automóvel não cumpriu o plano de manutenção preconizado pelo manual do fabricante.

2. Informada a identificação do fabricante da peça fraturada e o tipo de material utilizado como também sua composição química, dureza e estimativa de vida em quilômetros rodados conforme projeto, conforme tabela 10.

Tabela 10 – Dados do fabricante e especificações de projeto.

Peça : Ponta de eixo dianteira Lado Direito	
Fabricante : Interxxxx Corxxxxxxxx Xxxxxxxxxxxxx xxxxxxxx by Mxxxxxxxx	
Dureza : 137 a 197 HBw	Estimativa de vida útil Km : 10anos ou 150000 milhas ou 240000 km
Sem tratamento superficial.	
Composição química	
Elemento	Especificação SAE 4512
C	3,40- 3,9 %
Si	1,90-2,8%
Mn	0,45 % max
S	0,025 % max
P	0,05 % max
Mg	0,02-0,065% Max
Ni	0,40 %Max
Cr	0,12%max
Mo	0,05 %max
Cu	0,25 % max
V	0,02 %max
Nb	0,02 % max
Sn	0,025%max
Al	0,03 %max

6.3 DADOS RELACIONADOS COM A VISITA AO LOCAL DO ACIDENTE E VISTORIA NO AUTOMÓVEL.

Nas investigações de falhas em equipamentos, as melhores situações para a tomada de dados e registro de vestígios são no momento imediatamente posterior a ocorrência da situação, pois a ação do tempo, a ação de interferência externa mudando o estado imediatamente após falha, pode dificultar ou apagar pistas e indícios do início da falha ou conseqüências desta anormalidade. O processo em questão foi periciado aproximadamente dois anos após o acidente. Apontamos esta situação como um fator que dificultaria o encaminhamento de nossa tomada de dados e a análise: da condição do acostamento da pista de rolamento de trânsito, que não era idêntica comparada com o momento do fato, o transporte do automóvel para a oficina depositária poderia mudar as posições e condições das peças próximas ao componente foco (ponta de eixo dianteira lado direito), o automóvel ficou depositado na oficina também por dois anos do ocorrido, mudando também o estado de algumas peças pela ação do tempo, alguns componentes fora da posição ou faltantes foi também detectado, outra dificuldade encontrada foi a exata localização do ocorrido pelo tempo e conseqüente dificuldade de depoimentos de moradores da região.

Na visita ao local ainda foram encontradas marcas em baixo relevo na pista de rolamento, figura 56.



Figura 56 - Local do acidente com marca, rasgo na pista.

Seguindo a metodologia específica traçada para o caso, estudamos as informações iniciais através dos autos do processo e conforme relato do autor e descrição do boletim de ocorrência policial, existe uma concordância com o relatado, com um pequeno desvio de detalhamento de *layout* no boletim de ocorrência em relação ao posicionamento preciso do local exato do

tombamento, que ocorreu logo depois da curva, aproximadamente 100 metros após. Comprovado também a coincidência de informações entre o relato do autor e visita ao local do acidente: ao iniciar uma curva para a esquerda, o motorista perdeu o controle de direção do veículo, “direção sem funcionar” o automóvel capotou, na pista de rolamento. Outras informações foram coletadas com moradores ribeirinhos próximos da pista de rolamento, confirmando também todo o relato dos autos do processo, inclusive de maneira geral, a descrição das avarias generalizadas na carroceria do automóvel.

Após convocação dos envolvidos foi executada a vistoria pericial de engenharia, com a presença de todos os assistentes técnicos envolvidos. Os trabalhos foram iniciados registrando a visão geral dos estragos no automóvel em lide, que confrontando com o relatado pelo autor coincide com a descrição das avarias: “veículo tombou, causando lesões corporais e veículo em destruição total”. Na figura 54, mostrada anteriormente constatamos a afirmação do autor. Dando segmento na vistoria física de engenharia foram registrados outros sistemas como: capotaria interna, suspensão dianteira e traseira, compartimento do motor dentre outros. O sistema de suspensão traseira, dianteira e imediações próximas da ponta de eixo não têm indicações de pancadas nem amassamentos diretos, denotando a ausência de impactos direto antes da fratura final do componente. Nas figuras 57, 58, 59 e 60 mostramos o descrito.



Figura 57 - Vista inferior suspensão dianteira direita.



Figura 58 - Vista inferior suspensão dianteira esquerda.



Figura 59 - Vista inferior suspensão dianteira direita, ponta de eixo desmontada



Figura 60 - Vista inferior suspensão dianteira esquerda.

Conforme relato do autor: “perdeu a direção do veículo, direção ficou sem funcionar”, alegando quebra abrupta da ponta de eixo. Com os trabalhos de vistoria física do automóvel, foi registrada a fratura da ponta de eixo dianteira lado direito, sem indícios ou marcas de impacto direto na peça ou imediações, na figura 61 é mostrado a peça fraturada e na figura 62 é mostrado a peça desmontada sem ranhuras em baixo relevo ou empenamentos aparentes, ratificando a descrição do autor caracterizando a perda de direção repentina sem impacto direto com outro anteparo ou corpo na pista.

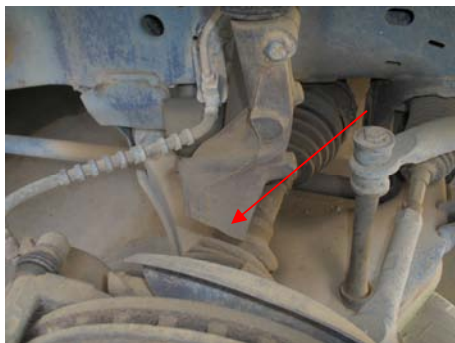


Figura 61 - Ponta de eixo fraturada, conjunto montado.



Figura 62 - Ponta de eixo desmontado.

Após desmontagem foi averiguada a originalidade da peça fraturada, comparando inscrições na peça avariada e peça original, confirmando a procedência pela similaridade das inscrições. Na figura 63 e 64, comparamos a similaridade das duas inscrições encontradas.



Figura 63 – Inscrições em alto relevo na ponta de eixo da peça estoque.



Figura 64- Incrições em alto relevo da ponta de eixo da peça fraturada.

Da vistoria pericial foram gerados dados importantes para análise dos resultados.

1. O estado das avarias externas denotou tombamento e capotamento do veículo. Figura 54.
2. O estado da suspensão, não denotou indícios de impacto direto na peça fraturada e nos componentes nas imediações, conforme figuras 57, 58, 59, e 60.
3. Constatada avaria localizada na peça Ponta de Eixo Dianteira LD. Figura 61 e 62.
4. Registrada a quilometragem no momento a vistoria pericial de 121194 km rodados.
5. A peça fraturada contém inscrições compatíveis com a original.
6. A peça fraturada tem plena condição de ser analisada conforme planejamento prévio: macroscopia, microscopia ótica e eletrônica de varredura, química, dureza e microdureza, sem comprometimento do laudo pericial.

6.4 ESTADO DE TENSÃO E DADOS DE ANÁLISES LABORATORIAIS DA PEÇA FRATURADA E PEÇA ESTOQUE.

6.4.1 Estado qualitativo de tensão.

Na peça foram tomadas as cotas dimensionais e identificada a localização dos pontos de solicitação de carga, na parte superior de fixação da bandeja superior, ponto a; na parte inferior da bandeja inferior, ponto b; nos pontos de fixação do cubo da roda, ponto c; elaborado pelo autor e mostrado na figura 65. As setas vermelhas mostram os apoios e a sua

reação (de baixo para cima). A condição em uma trajetória retilínea é mostrada na figura 65. Na figura 67, elaborada pelo autor, mostra a condição de esterçamento para a esquerda, imediatamente anterior à fratura final, situação que gera tensões de compressão melhorando a situação de tração do lado interno para externo, porém inserindo fatores de mudança de sinal muito forte no ciclo de tensão.

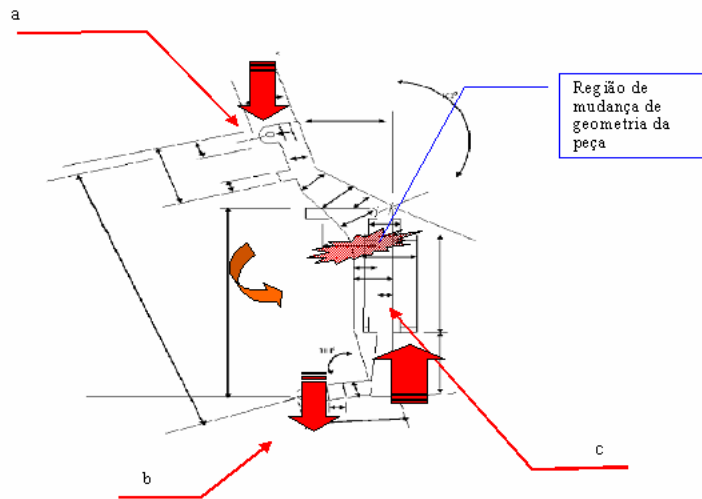


figura 65- Concentração de tensão para deslocamento retilíneo.

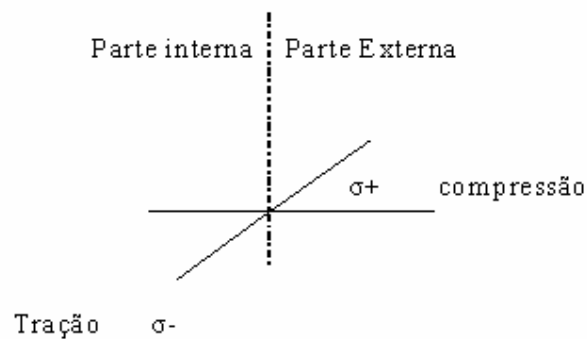


Figura 66 - Tensões preferenciais para deslocamento retilíneo na seção de mudança de geometria.

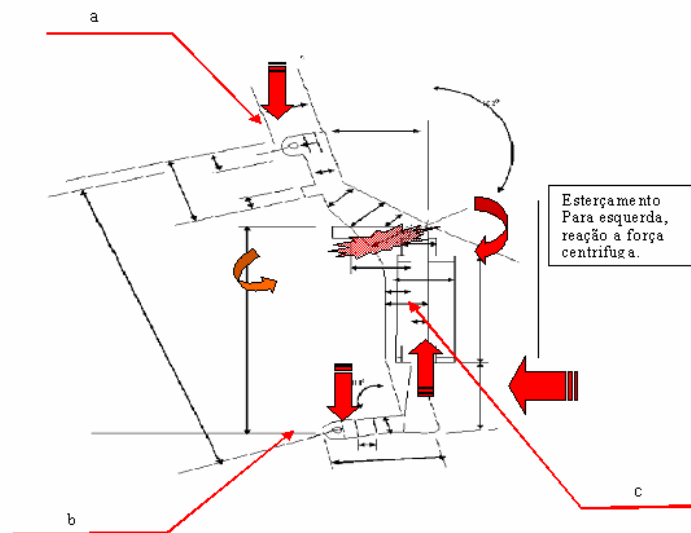


Figura 67-Concentração de tensão para esterçamento à esquerda.

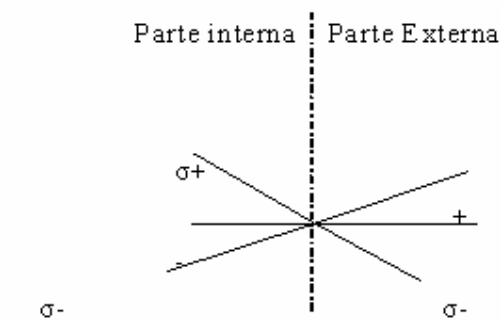


Figura 68 - Tensões preferenciais, na trajetória esterçamento para esquerda na seção de mudança de geometria.

Na situação de esterçamento para a esquerda, a transferência dinâmica de carga pela força centrífuga gerada cria tensões de compressão na parte interna da peça, favorecendo a diminuição das tensões de tração na parte interna, porém a peça momentos antes de fraturar estava com a secção abaixo da inicial de projeto.

6.5 DADOS LABORATORIAIS DA PEÇA FRATURADA.

Na peça fraturada, conforme metodologia traçada e fluxograma específico criado, figura 48, e de acordo também com a tabela 9 (análises seqüenciais na peça fraturada e respectivos objetivos), os resultados foram organizados, seguindo a seqüência:

- 1) Macrografia da superfície da fratura.
- 2) Micrografia da região de fratura inicial e final.
- 3) Microscopia ótica de fases e percentuais de constituintes, peça fraturada.
- 4) Dureza e microdureza.
- 5) Qualitativo e quantitativo químico.

6.5.1 Macrografia da superfície da fratura.

Conforme já dito, a superfície da fratura apresenta características próprias que podem identificar o tipo de mecanismo de falha em peças. A verificação inicial da superfície de toda a peça foi feita e não foram encontrados sinais de impacto diretamente na ponta de eixo, conforme mostrado nas figuras 69 e 70. Foram encontrados perfis morfológicos macrométricos, marcas de catraca, que são características de fratura por fadiga. Na figura 71 é mostrada a seleção da região de análise macrográfica, e na figura 72 detalhamos marcas de catraca através das setas vermelhas.

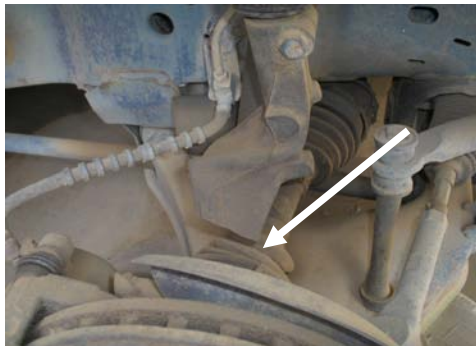


Figura 69 - Ponta de eixo montada e indicação da região da fratura.



Figura 70 - Visão geral da peça fraturada.

Na região de fratura inicial selecionamos um dos pontos de marca de catraca, para preparação do corpo de prova, na figura 71 mostramos a região selecionada. Na parte superior da figura 72, plano horizontal desta figura, vemos nucleações de varias microtrincas, marcas de catraca, conforme Affonso [1] denota área de concentração de tensão pela quantidade de nucleações de microtrincas. Na parte inferior, figura 72, é mostrada a região de fratura final instantânea, indicado através das setas inferiores azuis, com baixa área de secção.



Figura 71 – Região onde foi retirada amostra na peça fraturada.

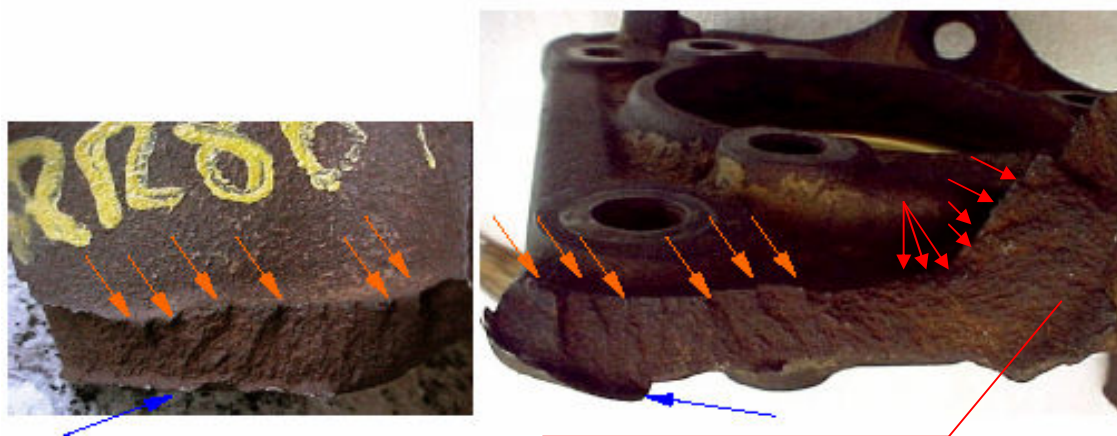
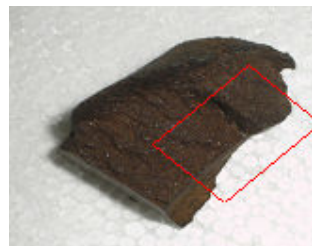


Figura 72 – Macrografias: marcas de catraca na parte inferior e superior da peça.

Na região de transição de mudança de plano geométrico, mostrado através das três setas vermelhas partindo de um ponto só, ainda na figura 72, várias nucleações de trincas na superfície são detectadas, com marcas de rio no interior da secção, evidenciando a evolução de microtrincas partindo deste mesmo local que também é um ponto de alta concentração de tensões. Marcas de catraca também são evidenciadas na superfície do plano angular da peça, também indicado na figura 72.

6.5.2 Micrografia da região de fratura inicial e final.

Com as amostras devidamente preparadas, foram coletadas imagens da fratura inicial no primeiro corpo de prova. Na figura 73 é mostrado o corpo de prova da região de fratura inicial. Nas figuras 74 e 75 são mostrados detalhes de uma das marcas de catraca, vemos nessa imagem a microtrinca e a evolução de através de marcas de rio. As marcas de rio são caracterizadas por direção preferencial de propagação, mostrado através das regiões realçadas, na figura 76.



20mm

Figura 73 - Amostra da região de fratura inicial.

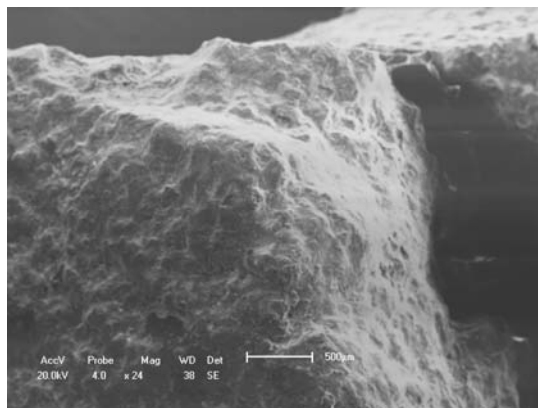


Figura 74 - Detalhe marca de catraca, topo da trinca. Fratura inicial, MEV 24x.

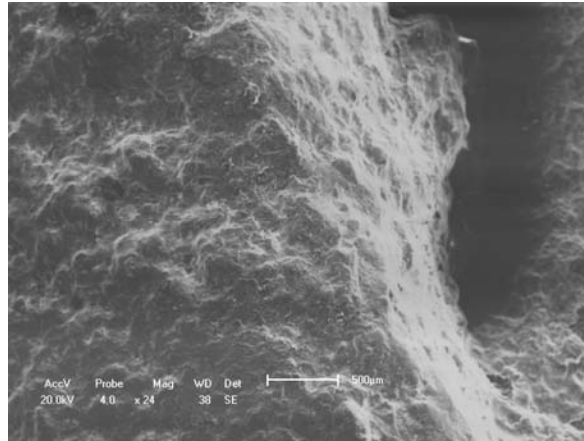


Figura 75-Detalhe da marca de catraca, meio da trinca. Fratura inicial MEV 24x.

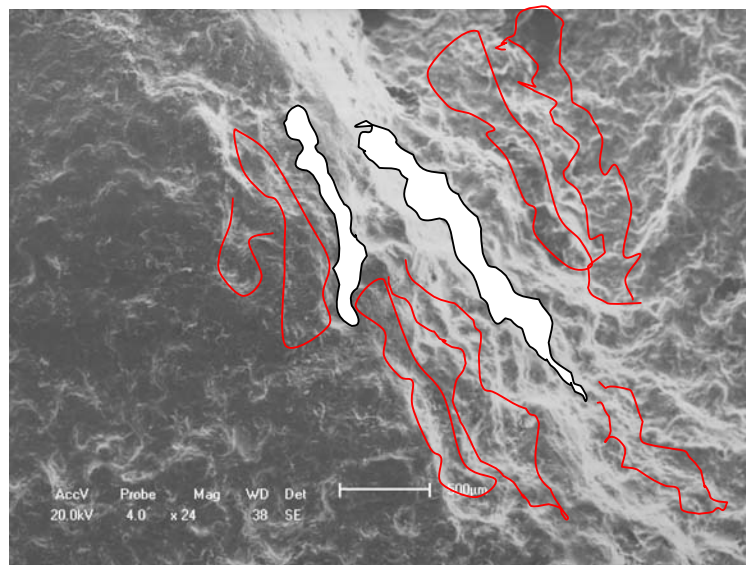


Figura 76 - Marca de catraca no final da crista da trinca, marcas de rio circundadas (estrias).Fratura inicial, MEV 24x.

Na figura 77 mostramos evolução das microtrincas, detalhando as marcas de rio, com evolução nos contornos de grãos intergranular, sem clivagem. MEV 50x.

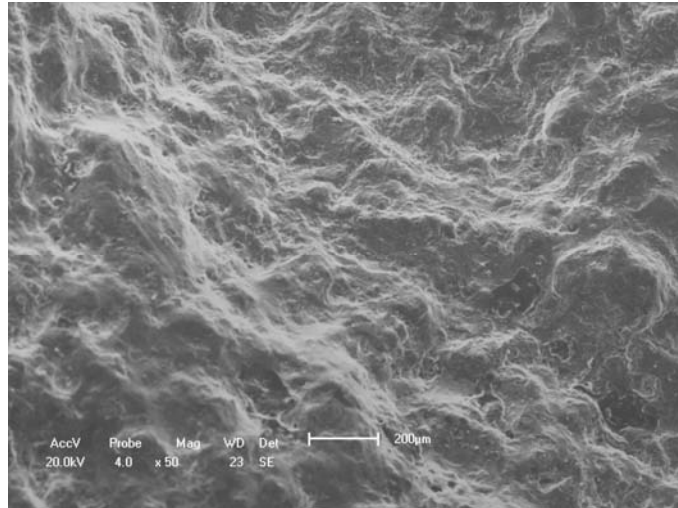


Figura 77 - Marcas de rio e evolução de trincas intergranular. Fratura inicial MEV 50x.

Na figura 78 foi detalhada uma microtrinca na superfície da face dos grãos, mostrando o comprometimento estrutural micrométrico interno da peça.

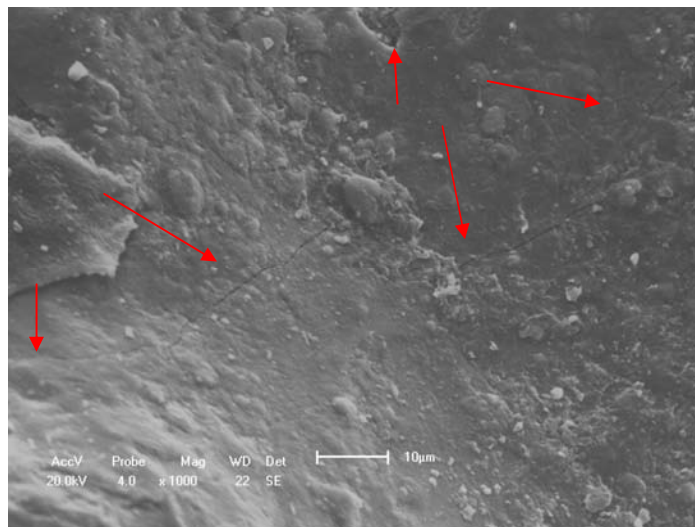


Figura 78 - Trincas na superfície dos grãos. Fratura inicial MEV 1000x.

Na figura 79, são mostrados detalhadamente grãos, e a evolução de microtrincas de forma intergranular, sem deformação plástica, sem clivagem, e sem presença de coalescência de cavidades ou *dimples*.

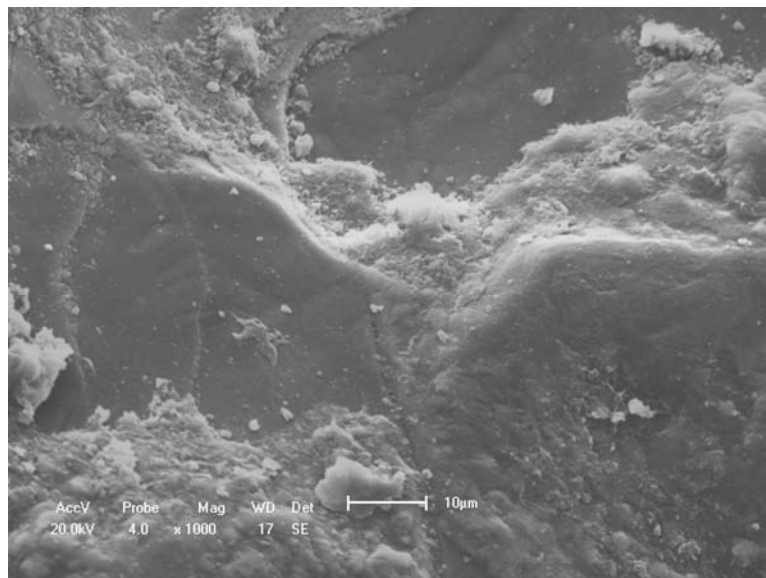


Figura 79 - Detalhe de grãos, fratura evoluiu de forma intergranular. MEV 1000x.

O seccionamento intergranular, e detalhe de um grão com seu contorno já trincado e destacamento da superfície da matriz ou outro grão, mostrado na figura 80. Não encontrado coalescência, *dimples* nestes pontos da amostra. Foi rastreado com aumento até 15000 a 18000 vezes, para procura de *dimples*, situação não encontrada.

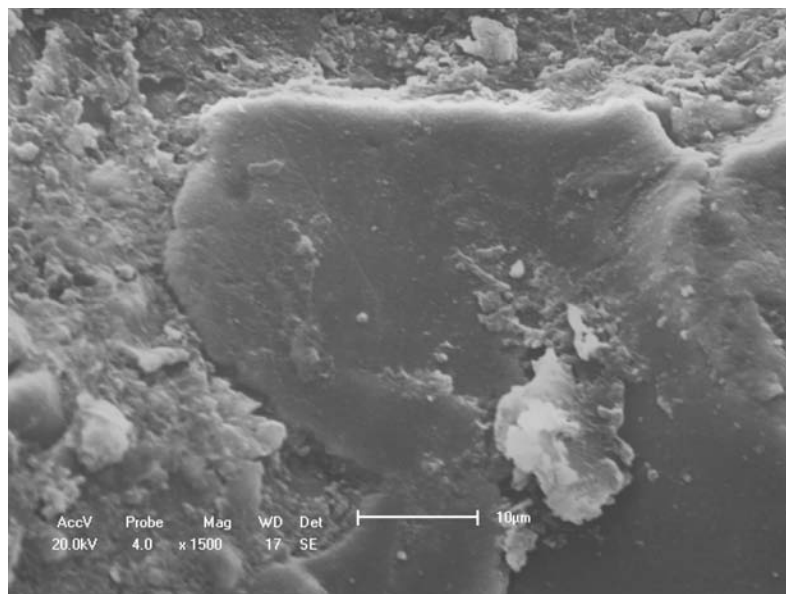


Figura 80 - Detalhe de um grão, com trinca no seu contorno. MEV 1500x.

Na região de fratura final selecionamos a região mostrada na figura 81, para preparação do corpo de prova. Na figura 82, é mostrado o corpo de prova, que passou pela mesma preparação do corpo de prova da fratura inicial: limpeza com ultra-som e camada de ouro por eletrodeposição, para melhoria da condutividade superficial.

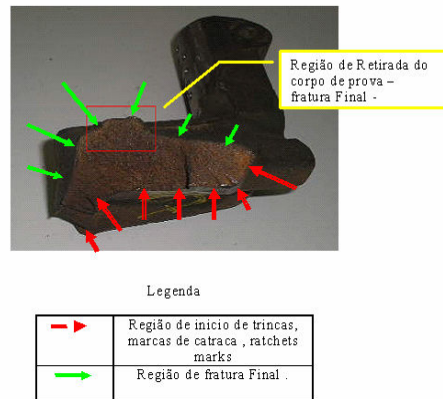


Figura 81 - Parte superior da peça fraturada, seleção da região amostral de fratura final (setas verdes) e fratura inicial (setas vermelhas).



Figura 82 – Amostra da região de fratura final.

A característica da evolução das microtrincas até fratura final, neste caso, tem semelhança com as da fratura inicial; trincas nos contornos de grãos, de forma intergranular , sem um direcionamento tendencioso, a diferença observada é a ausência das marcas de rio característica de evolução de microtrincas a medida que a peça é solicitada. Como coloca Affonso [1]: “estrias de fadiga marcam a posição da frente de propagação de cada ciclo de carga, sendo encontrado principalmente em materiais dúcteis. Uma única marca de praia pode conter milhares de estrias”. Na fratura final, a peça já com subsecção, houve a ruptura nos contornos de grãos, sem a deformação ou presença dos *dimples* ou coalescencia de vazios. Na figura 83, está mostrado o perfil morfológico da região de seccionamento final, com características de desagregação intergranular, sem deformação e sem presença de *dimples*. Nesta região não foi constatado direcionamento de evolução de trincas, como era esperado pois estamos em uma região de fratura final.

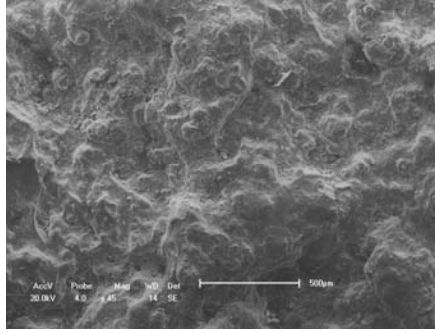


Figura 83 - Perfil morfológico da região de fratura final. MEV 45x.

Ainda na região de fratura final, na figura 84 está detalhadas trincas intragranular, e desagregação intergranular na superfície, denotando também o comprometimento estrutural da região.

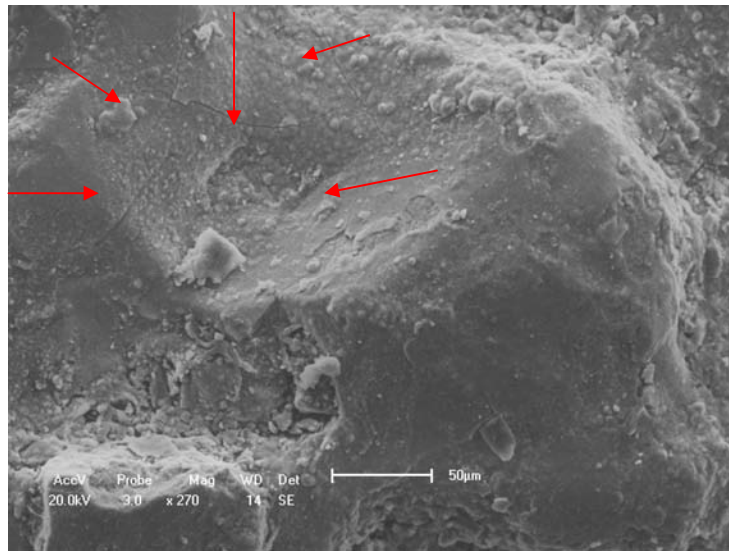


Figura 84 – Detalhe da fratura final com superfície com desagregação superficial intergranular e microtrincas intragranular, setas vermelhas. MEV 270x.

Detalhe de grão, possivelmente de perlita com trinca intragranular, na região de fratura final, figura 85.

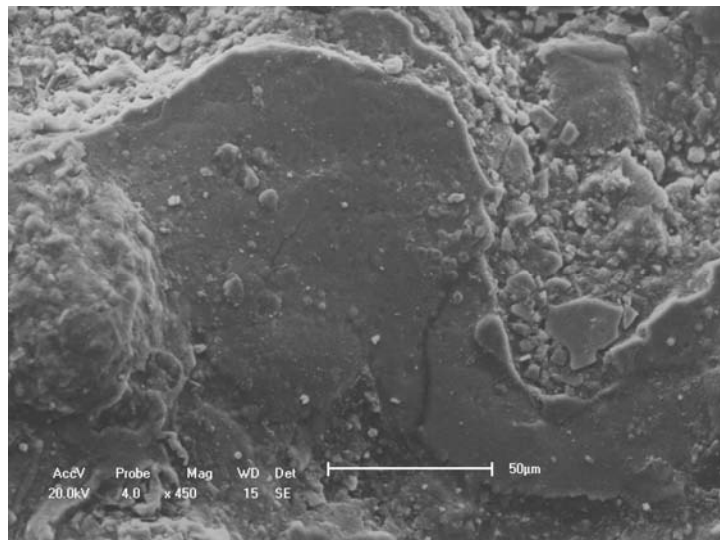


Figura 85 - Detalhe da fratura final, microtrinca intragranular. MEV 450x.

A superfície final da fratura foi registrada com trinca intergranular, intragranular sem a característica de coalescimento de cavidade ou *dimples*, mostrado na figura 86.

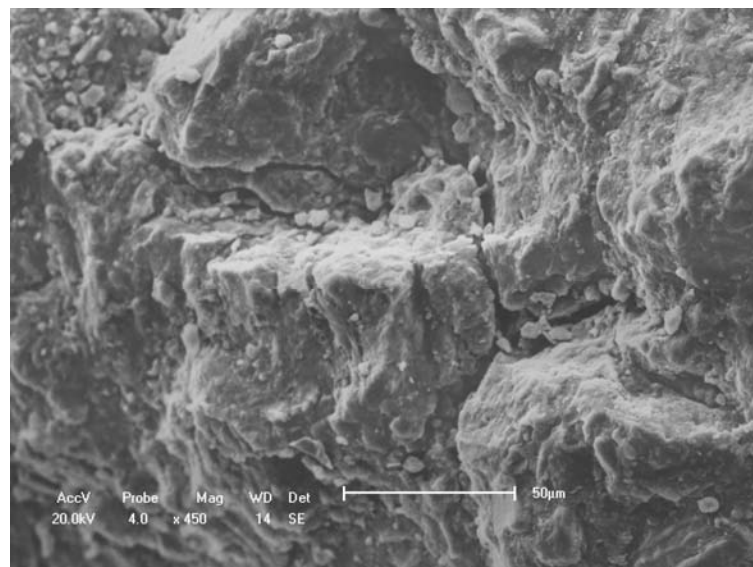


Figura 86 - Superfície de fratura na região final, sem a presença de coalescimento ou *dimples*, microtrinca intergranular. MEV 450x.

Na figura 87, está indicada a região de fratura final com superfície com desagregação intergranular, e trincas intragranular, sem coalescimento de cavidades, denotando o caráter menos dúctil, e comprometimento da estrutura mecânica a nível de fases e granular.

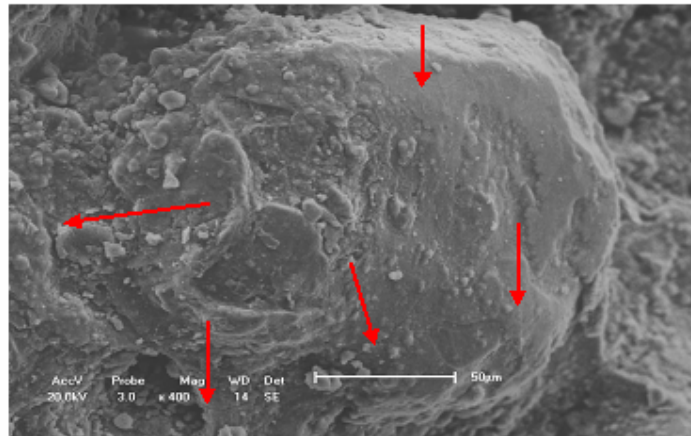


Figura 87-Grão na região de fratura final com desagregação superficial e microtrincas, setas vermelhas. MEV 400x.

6.5.3 Microscopia ótica de fases e percentuais constituintes da peça fraturada.

Existe a relação entre a caracterização microestrutural de fases e suas propriedades, podendo explicar razões de desvios ou falhas nos materiais.

Na figura 88, é mostrada a micrografia sem ataque: nódulos de grafita, confirmando a estrutura nodular e sua matriz.



Figura 88 - Peça fraturada sem ataque, nódulos de grafita e matriz.
Microscópio ótico 50x.

Na figura 89, micrografia com ataque nital 2% da peça fraturada, em uma região no meio da amostra, são observados claramente nódulos de grafita, perlita e matriz de ferrita, microscópio ótico 100x.

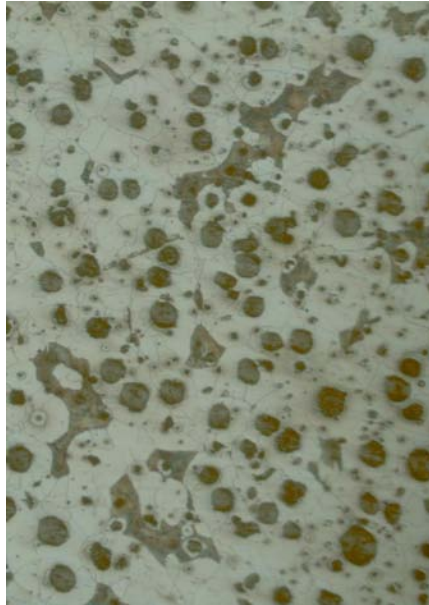


Figura 89 - Peça fraturada, microscópio ótico, com ataque nital 2%, nódulos de grafita, perlita e matriz de ferrita. 100x.

Através da microscopia ótica foram detectadas também várias trincas em veios de perlita, no conjunto de fases, mostrando o comprometimento estrutural da região da peça estudada, figuras 90, 91 e 92.

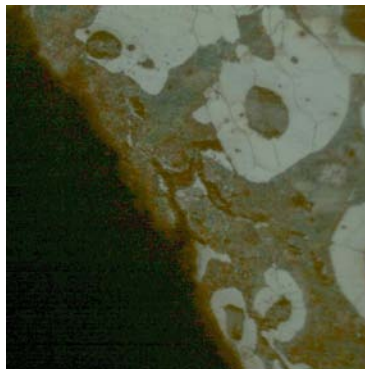


Figura 90 - Peça fraturada. Trinca perpendicular a superfície da fratura. 200x, com ataque nital 2%.

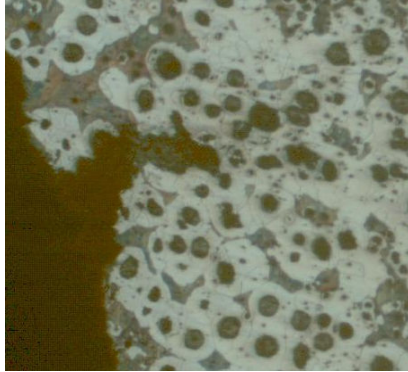


Figura 91 - Peça fraturada. Trinca perpendicular a superfície da fratura, 50x, com ataque nital 2%.

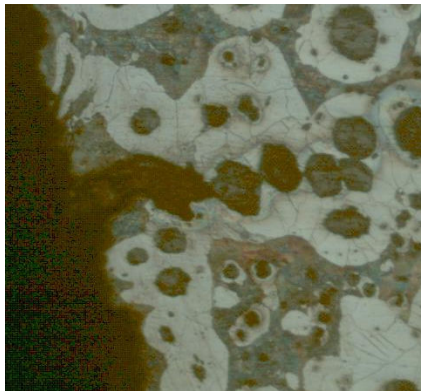


Figura 92 - Peça fraturada. Trinca perpendicular a superfície de fratura.
100x, com ataque nital 2%.

Utilizando o programa de contraste de cores, foi feita a contagem do percentual de nódulos de grafita, perlita composta por cementita (Fe_3C) mais ferrita ($3\text{Fe } \alpha$) e ferrita ($3\text{Fe } \alpha$), captando imagens de quatro regiões e considerando a média aritmética, na peça fraturada e peça estoque.

Na figura 93, é mostrada uma das imagens usando o programa de contagem percentual de constituintes das fases com destaque de cores; vermelho para nódulos de grafita e amarelo pra a matriz.

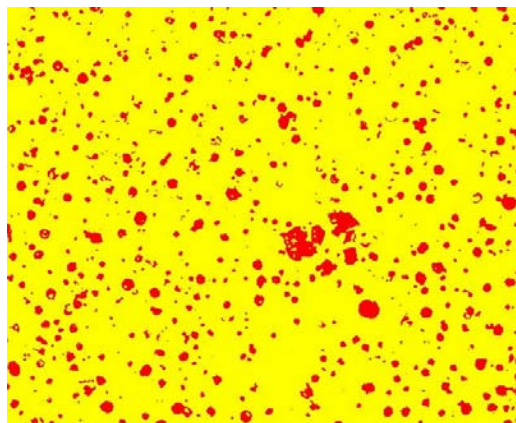


Figura 93 - Peça estoque (uma das regiões): vermelhos são nódulos de grafita e amarelo corresponde a matriz e perlita. Microscópio óptico 100x.

Na tabela 11, detalhamos os percentuais discriminados das fases na peça fraturada e peça estoque. Observamos que o percentual de perlita na peça fraturada está maior que a peça estoque em 5,11%, o valor da quantidade de nódulos de grafita da peça fraturada está maior 0,89% , e a ferrita da peça estoque está 6,01 % mais alta que a peça fraturada. Uma maior parte do ferro α , constituinte da ferrita na peça fraturada, está na perlita constituída de Cementita Fe₃C e ferrita 3Fe (α), podendo explicar as defasagens de perlita e ferrita entre as duas amostras, peça fraturada e peça estoque.

Tabela 11 - Percentual de constituintes das fases, grafita, perlita e ferrita, peça fraturada e peça estoque.

Média %		
Fase	Peça Estoque	Peça Fraturada
Nódulos grafita	13,91	14,80
Perlita	11,15	16,27
Ferrita	74,94	68,93

6.5.4. Dureza e microdureza da peça fraturada e estoque.

A ductilidade dos metais tem uma relação com a sua dureza, maiores valores de dureza têm como resultados menor ductilidade, sendo uma propriedade importante para absorção de energia.

Na tabela 12 discriminamos os resultados de dureza Brinell da peça estoque e fraturada. O padrão de projeto de tolerâncias de dureza conforme fabricante: 137 HB a 197 HB. A tendência quantitativa da peça fraturada são próximos ao valor máximo de projeto, com medidas chegando até 205HB, tendendo também para menor ductilidade da peça, apesar da média estar dentro do padrão de projeto. Na peça estoque os valores de dureza tendem a medidas menores, chegando ao limite mínimo de 128HB, abaixo do estipulado pelo projeto, e limite superior chegando a 150HB, dentro da faixa com tendência de valores menores, abaixo da média dos valores extremos do padrão. Quanto menor a resistência à penetração no ensaio de dureza mais macio é o material e menor é a sua resistência ao escoamento, conforme diversos autores: Ashby e Jones [7], Higgins [38], Souza [72], dentre outros.

Tabela 12 - Mapeamento de dureza Brinell, peça estoque e fraturada.

MEDIDAS	DUREZA BRINELL-HB	
	Peça Estoque	Peça Fraturada
1	128	175 a 190
2	131	187 a 200
3	152	176 a 190
4	146	186 a 205
5	150	181 a 183
6	150	181 a 204
Limite Superior	150	205
Limite Inferior	128	175
Média	139,5	188,15

Na tabela 13, discriminamos os valores de microdureza da peça fraturada, por fase. Os resultados corroboram com os valores de encontrados nas medidas de dureza na peça

fraturada, que teve como resultado dureza média de 188,15 HB e limite superior de 205HB, comparando com os dados encontrados de microdureza na perlita e percentual de perlita lamelar de 16,26 % , conforme tabela 14.

Tabela 13 – Resultado da microdureza HV na peça fraturada.

Local	Carga 100g, 15 seg. HV			Média HV
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	
Matriz ferrita	167	162	170	166,33
Perlita	262	279	274	271,66

Local	Carga 25g, 15 seg. HV			Média HV
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	
Grafita	25,2	28,6	24,3	26,03

Tabela14 – Resumo da microdureza da peça fraturada e percentual de área de cada fase.

Local	Médias das Microdurezas HV Peça fraturada	Média % de área de cada fase
Grafita	26,03	14,8
Matriz ferrita	166,33	68,93
Perlita	271,66	16,27

Os dados obtidos de microdureza na peça estoque estão discriminados na tabela 15 e percentual de cada constituinte na tabela 16.

Tabela 15 – Resultado da microdureza HV na peça estoque.

Local Peça estoque	Carga 100g, 15 seg.			Média
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	
Matriz Ferrita	147	129	135	137
Perlita lamelar	235	263	242	246,66

Local Peça estoque	Carga 25g, 15 seg.			Média
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	
Grafita	26,7	20,1	20,2	22,33

Tabela 16 – Resumo da microdureza da peça estoque e percentual de área de cada fase.

Local	Médias das Microdurezas HV Peça estoque	Média % de área de cada fase
Grafita	22,33	13,91
Matriz Ferrita	137	74,94
Perlita Lamelar	246,66	11,15

O percentual de perlita, que contribui para a maior dureza da formação como um todo, na peça estoque foi medido e registrado valores percentuais menores que o da peça fraturada, podendo explicar valor menor de dureza da peça estoque.

6.5.5. Quantitativo e qualitativo químico da peça fraturada.

Os resultados obtidos estão discriminados na tabela 17, para os elementos: Fe, Si, Mn, Cr, Ni, P, S e C.

Tabela 17 - Percentual quantitativo e qualitativo químico da peça fraturada.

Amostra	% em peso dos elementos							
	Fe	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	C
Fraturada	Balanço	1,85	0,21	0,17	0,04	0,03	0,02	3,302

6.6. DADOS LABORATORIAIS DA PEÇA ESTOQUE.

Na peça estoque, também conforme metodologia traçada e fluxograma específico criado, figura 48, e de acordo também com a tabela 8. Os resultados foram organizados, seguindo a seqüência:

1. Microscopia ótica de fases e percentuais de constituintes, peça estoque.
2. Dureza e microdureza, peça estoque.
3. Qualitativo e quantitativo químico, peça estoque.

6.6.1. Microscopia ótica de fases e percentuais de constituintes, da peça estoque.

As análises macroscópicas e microscópicas, conforme já comentado anteriormente, fazem parte de um conjunto de dados e podem explicar propriedades e razões de falhas em componentes.

Na peça estoque também foi registrada através do microscópio ótico (com ataque com nital 2% e sem ataque) a estrutura de fases do ferro fundido nodular. Na figura 94, sem ataque, vemos nódulos de grafita e restante dos constituintes. E na figura 95, é mostrado a micrografia com ataque nital 2%, nódulos de grafita, perlita e matriz de ferrita. A estrutura de fases registrada está conforme esperado no projeto: ferro fundido nodular.

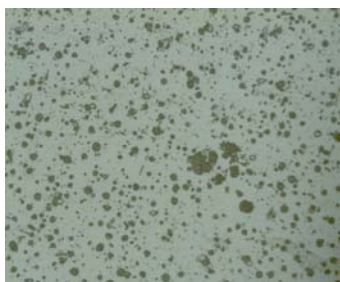


Figura 94 - Peça estoque. 100x, sem ataque. Nódulos de grafita e o restante de constituintes.

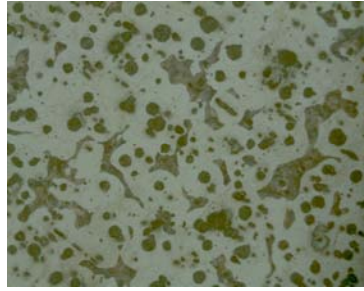


Figura 95 - Peça estoque. 200x, com ataque nital 2%. Nódulos de grafita, matriz ferrítica e perlita.

Conforme mostrado anteriormente também foi feita a contagem percentual, utilizando o programa de contraste de cores: percentual de nódulos de grafita, perlita composta por Cementita (Fe_3C) e ferrita ($3Fe \alpha$) e ferrita ($3Fe \alpha$), captando imagens de quatro regiões e considerando a média aritmética, na peça fraturada e peça estoque. Na tabela 10, foram mostrados os resultados.

6.6.2. Dureza e microdureza da peça estoque.

Assim como na peça fraturada os dados relacionados com dureza são importantes para análise da sua ductilidade e tenacidade. Os valores de dureza da peça estoque estão expostos na tabela 12, visto anteriormente. Os valores encontrados estão entre 128 HB e 150HB, com média de 139,5 HB. O valor médio está dentro da tolerância e limite inferior abaixo do valor explicitada de projeto que está entre 137 HB a 197 HB. Observamos valores com tendências menores, diferentemente da peça fraturada.

Os dados obtidos de microdureza na peça estoque estão discriminados na tabela 18 e percentual de cada constituinte na tabela 19.

Tabela 18 – Resultado da microdureza HV na peça estoque.

Local Peça estoque	Carga 100g, 15 seg. HV			Média HV
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	
Matriz ferrita	147	129	135	137
Perlita	235	263	242	246,66

Local Peça Estoque	Carga 25g, 15 seg. HV			Média HV
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	
Grafita	26,7	20,1	20,2	22,33

Tabela 19- Resumo da microdureza da peça estoque e percentual de área de cada fase.

Local	Médias das microdurezas HV Peça estoque	Média % de área de cada fase
Grafita	22,33	13,91
Matriz ferrita	137	74,94
Perlita	246,66	11,15

O percentual de perlita, que contribui para a maior dureza do conjunto total, na peça estoque foi medido e registrado valores percentuais menores que o da peça fraturada, explicando valor menor de dureza da peça estoque.

6.6.3. Qualitativo e quantitativo químico da peça estoque.

A técnica utilizada foi idêntica a aplicada na peça fraturada. Na tabela 20 são mostrados os resultados da análise química qualitativa e quantitativa da peça estoque.

Tabela 20 – Percentual quantitativo e qualitativo químico da peça estoque.

Amostra	% em peso dos elementos							
	Fe	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	C
Estoque	Balanço	1,65	0,41	0,10	0,03	0,01	0,02	3,855

A análise de carbono foi executada conforme método e procedimento da peça fraturada: técnica espectrofotometria. O silício com valores menores, pode explicar a dureza final do material, pois é um dos fatores de influencia nesta propriedade, fato que comprovamos na medida final encontrada. Os valores encontrados foram de: 3,855% de carbono e Si de 1,65% compatível com valores através de FRX.

7. ANÁLISE DOS DADOS, DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES.

Subdividimos a análise dos dados em cinco partes, para melhor organização mental e cruzamento de informações da investigação: dados relacionados com investigação dos autos, dados coletados através dos termos de diligência, informações oriundas da visita física ao local do ocorrido do sinistro e vistoria de engenharia no automóvel. Em outro item organizamos os dados referentes às análises laboratoriais de caracterização do material envolvido, peça fraturada e peça estoque, e finalmente tecemos considerações que visualizamos como interessantes para o caso.

7.1 DADOS NOS AUTOS, TERMOS DE DILIGÊNCIA, VISITA AO LOCAL E VISTORIA DE ENGENHARIA.

Seguindo a metodologia específica traçada para o caso, estudamos as informações iniciais através dos autos do processo e conforme relato do autor e descrição do boletim de ocorrência policial. Existe uma concordância com o relatado, com um pequeno desvio de detalhamento de *layout* no boletim de ocorrência em relação ao posicionamento preciso do local exato do tombamento, que ocorreu logo depois da curva, aproximadamente 100 metros após. Comprovada também a coincidência de informações entre o relato do autor e visita ao local do acidente: ao iniciar uma curva para a esquerda, o motorista perdeu o controle de direção do veículo, “direção sem funcionar”; o automóvel capotou, e na pista de rolamento foram ainda encontradas marcas em baixo relevo, após visita ao local e constatação, figura 56. Outras informações foram coletadas com moradores ribeirinhos próximos da pista de rolamento, confirmando também todo o relato dos autos do processo, inclusive de maneira geral, a descrição das avarias generalizadas na carroceria do automóvel.

7.2. DADOS LABORATORIAIS, CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E PROJETO.

Observações da macrografia da superfície da peça fraturada denotam ausência de ranhuras provocadas por agentes externos, e empenamentos a nível visual; os indícios de impacto direto em obstáculos inexistem, corroborando com a descrição nos autos pelo autor do processo de perda repentina de dirigibilidade, sem antes ter impactado em algum obstáculo.

Ainda nos estudos macrográficos, foram registradas regiões de fratura inicial e final. Na região de fratura inicial está clara a presença de marcas de catraca, característica do mecanismo de fadiga, conforme diversos autores. Na figura 72 são mostradas estas marcas características com vários pontos de início de microtrincas, como também as regiões de secção de fratura final, setas em azul.

Foram rastreadas regiões para estudo da topografia da fratura a nível micrográfico, como planejado previamente. As micrografias utilizando o MEV ratificam a característica particular de início de trincas pelo processo de fadiga. A região de nucleação foi identificada como a de maior probabilidade para acontecer, pois é uma parte da peça onde temos mudança de geometria, como consequência concentrando tensões, de acordo com diversos autores, como Ashby [7], Santos [68], Callister [13], Affonso [1]. A característica particular da região de início de nucleação de trincas denota várias marcas de catraca, com marcas de rio, também característica de fratura por fadiga. Nas micrografias das figuras 74, 75, 76 e 77 mostramos o perfil de uma das cristas de uma marca de catraca com aumentos 24 x identificado também marcas de rio. As micrografias da região de fratura inicial mostram evolução intergranular sem coalescência de vazios ou *dimples*, nas figuras 78 MEV 1000x e 79 MEV 1000x, estão registradas também trincas intragranulares. Como não detectamos *dimples*, a característica da evolução da trinca sugere um material de característica com menor ductilidade, menor tenacidade, fato que corrobora com os valores de dureza tendendo a valores de limites superior ou imediatamente maiores que o valor de projeto.

A região de fratura final, colapso final corresponde a uma área de secção pequena, caracterizando que a peça fraturada não foi submetida a altas cargas, como mostrado nas figuras 72 (setas azuis) e 81 (seta verde). Nas micrografias coletadas da região de colapso final, houve desagregação intergranular, sem deformação e sem presença de *dimples*, característica de menor ductilidade. Nesta região não foi constatado direcionamento de evolução de trincas, como era esperado, pois estamos em uma região de fratura final, o colapso final abrupto acontece em função da secção estar abaixo da requerida, perfil mostrado nas figuras 81 e 83. O comprometimento geral da estrutura foi constatado através das microtrincas inter e intragranulares, mostrado nas figuras 85, 86 e 87.

Tanto a peça fraturada quanto a peça estoque apresentaram perfis visuais de fases constituintes como esperado: nódulos de grafita, perlita lamelar e matriz de ferrita, pois os dados de projeto nos indicavam um ferro fundido nodular. Na superfície da fratura, perpendicular a aplicação da carga também foram detectadas várias trincas, conforme figuras 91 e 92.

Nas figuras 88, 89, 93, 94 e 95, mostramos o mapeamento de fases. Na tabela 10, mostramos os resultados de cada constituinte das fases encontradas. Na peça fraturada foi encontrado um percentual maior de perlita que responde pelo maior valor de dureza, comparando com projeto e peça estoque. Tal valor pode estar associado com o percentual de silício menor que o projeto. O elemento Silício, assim como a velocidade de resfriamento, são fatores importantes nos ferros fundidos nodulares, pois desestabiliza a perlita, disponibilizando o carbono para a formação de nódulos de grafita, de acordo com vários autores: Santos e Branco [66], Barella [9], Colpaert [22], dentre outros.

Os valores de microdureza foram registrados para observarmos a contribuição de cada fase para a dureza final. Na tabela 21 mostramos os valores de microdureza e respectivos percentuais das fases, visualizando comparativamente os valores. Observamos que a peça fraturada tem valores maiores de microdureza comparando com a peça estoque, e o valor percentual de perlita é maior que a da peça estoque.

Tabela 21 - Comparativo de micro dureza HV e percentual em cada fase.

Local	Peça Fraturada		Peça Estoque	
	Microdureza HV	% fases	Microdureza HV	%fases
Grafita nodular	26,03	14,8	22,33	13,91
Matriz ferrita	166,33	68,93	137	74,94
Perlita	271,66	16,27	246,66	11,15

O mapeamento de dureza final das duas peças foi registrado e mostrada na tabela 22. Vemos que os valores de dureza da peça estoque tende a valores menores chegando até abaixo do limite inferior do valor de projeto, aumentando a ductilidade. Observamos que os valores de dureza da peça fraturada tende a valores maiores que o projeto, chegando a 205 HB, tornando a peça com menor ductilidade, aumentando a sua fragilidade, como constatado pelo comportamento da evolução das microtrincas, sem coalescimento e *dimples* nas micrografias registradas. Os valores de dureza final maior podem ser resultados das composições percentuais das fases registradas, valor de perlita maior, 16, 27 % comparando com a peça estoque.

Tabela 22 - Valores comparativos de dureza: projeto, peça estoque e peça fraturada.

MEDIDAS	Dureza Brinell-HB		
	Projeto	Peça estoque	Peça fraturada
Limite superior	197	150	205
Limite inferior	137	128	175
Média	167	139,5	188,15

As propriedades dos materiais dependem também dos seus constituintes químicos. Foi feito análise utilizando dois métodos: FRX, para os elementos Fe, Si, Mn, Cr, Ni, P e S e espectroscopia de emissão ótica para o elemento carbono. Na tabela 23, registramos os valores obtidos através da FRX para as peças estoque e fraturada e comparamos com os valores de projeto.

Tabela 23 - Composição química qualitativa e quantitativa: projeto, peça estoque e peça fraturada. FRX.

Dados	% em peso dos elementos						
	Fe	Si	Mn	Cr	Ni	P	S
Projeto		1,90 a 2,80	0,45max.	0,12max.	0,40max.	0,05max.	0,025max.
Média projeto		2,35	-----	-----	-----	-----	-----
Peça estoque	Balanço	1,65FRX/ 1,64 Md 1,645	0,41	0,10	0,03	0,01	0,02
Peça fraturada	Balanço	1,92(FRX)/ 1,78(CTGAS), Md 1,85%	0,21	0,17	0,04	0,03	0,02

Os ferros fundidos se caracterizam pelo seu percentual de carbono na sua constituição, oscilando entre 2,5 a 4,6 % em peso, conforme Barella [9]. A velocidade de resfriamento, os valores de elementos de liga como Si é também de importância para definição de suas propriedades. O valor do percentual de carbono nos ferros fundidos altera suas propriedades, razão que nos levou a coletar dados de projeto e medida real de seu percentual constituinte nas peças estoque e na peça fraturada. Na tabela 24 detalhamos os valores de projeto e valores reais encontrados através de espectroscopia de emissão ótica, percentual de carbono e carbono equivalente (C.E.) calculado pela equação 4.1.8.3. A relação entre Si/C mais alta nos ferros fundidos nodulares e sua velocidade de resfriamento pode conferir valores de resistência à tração também mais alta, conforme Santos e Branco [66]. O cromo e vanádio conferem maior

resistência a abrasão mas em aplicação que não necessita ductilidade e resistência ao impacto, conforme Santos e Branco [66].

Tabela 24 - Percentual de carbono e carbono equivalente: projeto, peça estoque e peça fraturada.

Dados	% Carbono	% C.E.
Projeto	3,40 a 3,90	-----
Média projeto	3,65	4,44
Peça estoque	3,855	4,40
Peça fraturada	3,302	3,92

7.3 ANÁLISE DA METODOLOGIA ESPECÍFICA EMPREGADA.

A metodologia a ser empregada em análises de falhas, conforme dito na seção 4.1.4, depende do objetivo a ser atingido, podendo também ser usada um conjunto de técnicas. Para o nosso caso de perícia judicial mecânica, são envolvidas diversas fontes de dados: dados iniciais, dados coletados através de termos de diligência, dados de visita ao local, dados de vistoria pericial e dados laboratoriais. Foi desenvolvida a metodologia específica buscando sistematizar e enquadrar as diversas ramificações de dados, objetivando principalmente o cruzamento das informações e visando minimizar as probabilidades de desvio de diagnóstico provável. Podemos associar parte da nossa metodologia com as técnicas de análise de falhas FTA, diagrama de causa efeito ou diagrama de Ishikawa e RCFA, pois partem do evento topo, do efeito e questionamentos seguidos (5 *Why* ?), respectivamente.

Nas análises dos dados, em função do fluxograma empregado específico, figura 48, foi possível realizar cruzamentos dos dados, minimizando desvios de diagnóstico, relacionamos principalmente: descrição do ocorrido, conseqüências da falha, modo de falha, morfologia da falha, localização geométrica da fratura, propriedades mecânicas da peça, momento da falha, comparativos entre peça estoque e fraturada e causa raiz provável.

7.4 CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES.

7.4.1. Autos, dados de campo, do sistema de suspensão, imediações da peça fraturada, análises laboratoriais da peça fraturada e peça estoque.

- a. A metodologia utilizada para a investigação resultou em informações que com cruzamentos de dados permite minimizar erros de diagnósticos.
- b. A descrição nos autos é compatível com as evidencias coletadas, como: registro de avarias externas, registros da suspensão dianteira, traseira, imediações da peça fraturada, descrição no boletim de ocorrência, avaria na peça fraturada, visita ao local do ocorrido, depoimentos de testemunhas no local, análise macrográfica e análise micrográfica.
- c. Automóvel não cumpriu o plano de manutenção preconizado pelo fabricante.
- d. Pela coincidência de inscrições em alto relevo da peça fraturada é compatível com a original, figura 63 e 64.
- e. A estimativa de vida útil, dado fornecido pelo fabricante, é de 240000 km.
- f. Na peça investigada, não foi denotado impacto direto pelos motivos: relato do autor, registro de avarias externas, registros da suspensão dianteira e traseira, imediações da peça fraturada, descrição no boletim de ocorrência, avaria na peça fraturada, visita ao local do ocorrido, depoimentos de testemunhas no local, análise macrográfica e micrográfica da peça investigada.
- g. A análise da característica da fratura não mostrou indícios de sobrecarga pela assinatura morfológica na área do colapso final e evolução de várias microtrincas.
- h. A análise morfológica micrográfica da peça fraturada indicou nas regiões de fratura inicial e final características de baixa ductilidade, sem coalescimento de cavidades ou *dimples*.
- i. Dados coletados de microdureza e dureza da peça fraturada indicam valores acima de valores de projeto previsto. Velocidade de resfriamento alta pode também ter tido influencia conferindo valor limite superior de dureza mais alto que projeto, pois favorece formação de cementita.
- j. Pela evolução de microtrincas com características próprias, marcas de catraca e de rio, a peça fraturou pelo mecanismo de fadiga.
- k. Os valores de carbono e silício na peça fraturada estão abaixo do projeto. Detectado também o elemento níquel com 0,04% (valor muito abaixo do máximo valor permitido de projeto - 0,40%). Índices que comprometem a grafitização, gerando maior percentual de

cementita aumentando a dureza. Peça fraturada com o valor de cromo acima do projeto, 0,17%, e manganês com valor de 0,21 %, elementos que propiciam a carbonetação e confere maior dureza. Fatos também comprovados através das micrografias da fratura inicial e final sem *dimples* ou coalescimento de cavidades, denotando se tratar de um material com baixa ductilidade e valores limites superior de dureza da peça fraturada acima dos valores de projeto.

- l. Relação Si/C na peça fraturada igual a 0,56%, valor maior que peça estoque (0,42%).
- m. O estudo do plano de manutenção preconizado pelo fabricante não detectaria microtrincas.
- n. A quilometragem no momento da pericia foi registrada: 121194 km.
- o. Peça fraturou antes do momento preconizado pelo fabricante.
- p. Peça estoque com valores limite inferior de dureza abaixo do valor de projeto, com maior ductilidade.
- q. Peça estoque com valores de Si menor que projeto, C e Mn dentro do padrão de projeto.
- r. Peça estoque com valor de Cr dentro do valor de projeto, 0,10%.
- s. Peça estoque e fraturada com características de ferro fundido nodular como de projeto.
- t. A fratura ocorreu em uma região geométrica de concentração de tensão.
- u. A probabilidade maior de fatura na peça foi na região onde ocorreu o fato, concentração de tensão.

7.4.2 Análise comparativa e comentários - Peça fraturada x Projeto x Peça Estoque.

Nas tabelas 25 a e 25 b, estão concentradas as informações que consideramos muito relevantes e análise comparativa, entre os dados coletados da peça fratura, peça estoque e dados de projeto.

Tabela 25 a – Dados: peça fraturada, peça estoque e dados de projeto, comentários e análise comparativa (I).

Tópico	Peça fratura	Peça estoque	Projeto	Análise/ comentários
1. Originalidade	Idem peça estoque.	Idem peça fraturada.	Vide peça estoque.	Existe similaridade.
2. Impacto	Não sofreu impacto direto.	Não sofreu impacto direto.
3. Geometria	Geometria da peça com pontos de concentração de tensão.	Geometria da peça com pontos de concentração de tensão.	Idem peça estoque.	Vários pontos de nucleação de trincas, característico de concentração de tensão.
4. Macrografia da fratura	Indicações de marcas de catraca com nucleação em vários pontos.	Várias marcas de catraca (fratura por fadiga).
5. Análise de fases, microscópio ótico. Percentual de fases	Morfologia conforme esperado, ferro fundido nodular.	Morfologia conforme esperado, ferro fundido nodular.	Morfologia do ferro fundido nodular. Nódulos de grafita, matriz ferrítica e perlita.	Ferro fundido nodular. Peça fraturada: fase perlita 16,27%, peça estoque 11,15%. Peça fraturada com dureza maior na peça estoque.

Tabela 25 b – Dados: peça fraturada, peça estoque e dados de projeto, comentários e análise comparativa (II).

Tópico	Peça fratura	Peça estoque	Projeto	Análise/ comentários
6. Micrografia da fratura: região de fratura inicial e final	Na região de fatura inicial, registro de marcas de catraca com estrias ou marcas de rio. Evolução de micro- trincas de forma intergranular e intragranular nas regiões de fratura inicial e final.	Fratura inicial: direção de propagação de micro trincas tendenciosa/ sem <i>dimples</i> . Fratura final: desgarramento estrutural granular aleatório.
7. Dureza	Média de valores de 188,5 HB, com limite inferior 175 HB e limite superior de 205 HB.	Média de valores de 139,5 HB, com limite inferior 128 HB, limite superior de 150 HB.	Valores de projeto entre: 137 HB e 197 HB. Média = 167 HB	Peça fraturada: menor ductilidade ausência de <i>dimples</i> . Peça estoque: dureza menor, menor tensão resistente a ruptura.
8. Microdureza	Medidas nas fases: grafita 26.03 HV, perlita 271,66 HV e matriz de ferrita 166,33 HV.	Medidas nas fases: grafita 22,33 HV, perlita 246,66 HV e matriz de ferrita 137 HV.	...	Peça fraturada com percentual de perlita maior, conferindo maior dureza ao conjunto.
9. Análise química, qualitativa e quantitativa	Valores de constituintes de C média 3,302%, Si 1,85%, Cr 0,17%, Ni 0,04 %,baixo.	Valores de constituintes de C 3,855%, Si 1,64 e Cr 0,10%, Ni 0,03 baixo.	C 3,4 a 3,9% Si 1,9 a 2,8% Cr max 0,12% Ni max0,40%.	Peça fraturada: C e Si, menor projeto, componentes importantes para o ferro fundido. Cr, maior que projeto, elemento propicia formação carbonetos, maior dureza.

8. CONCLUSÃO.

Após a investigação, foi concluído que: a metodologia desenvolvida sistematizou a investigação e permitiu cruzamentos de dados minimizando probabilidade de erros de diagnóstico. O fluxograma geral desenvolvido, figura 47, poderá ser utilizado como metodologia de análise pericial judicial envolvendo falha ou divergência em diversas áreas do conhecimento como: mecânica, elétrica dentre outras. Nos trabalhos de investigação pericial envolvendo falhas de componentes automotivos mecânicos sujeitos às cargas cíclicas, o fluxograma específico, figura 48, poderá ser utilizado como referência para a análise de componentes da suspensão automotiva, e para outros sistemas com adaptações principalmente na etapa correspondente à coleta de dados no automóvel, relacionando as verificações dos componentes do sistema diretamente envolvido, seguindo até a etapa conclusões e resultados. A morfologia da fratura indica falha pelo mecanismo de fadiga, pela característica de relevo macrográfico com várias marcas de catraca, figuras 71 e 72, e também pelas características micrográficas com a presença de marcas de rio na região de fratura inicial, figuras 76 e 77, pela análise das micrografias da região de fratura final abrupta sem direcionamento de propagação de trincas, figura 83, e a área de secção da região de fratura final baixa, denotando que a peça foi submetida a tensões também baixas, figuras 72 e 81.

A fratura ocorreu em um local de mudança de geometria e concentrador de tensões pela característica geométrica e com várias marcas de catraca, indicada na figura 72. Material estruturalmente com grande comprometimento pela presença de microtrincas intergranular e intragranular, tanto na fratura inicial quanto na final, figura 78, 79, 84, 85, 86 e 87.

O material de fabricação da peça fraturada tem baixa ductilidade, pela característica morfológica da fratura inicial e final sem a presença de coalescimento de cavidades. O limite superior de dureza da peça fraturada com valores acima do projeto.

O componente fraturou em um momento inferior ao preconizado pelo fabricante, com 121194 km, correspondente a aproximadamente a meia vida e localizada na fase mediana da curva da banheira, figura 4.

Os percentuais de C e Si da peça fraturada estão com os valores menores de que os preconizados no projeto, elementos importantes para conferir propriedades de ductilidade. O Cr na peça fraturada com percentual maior que o valor de projeto, componente que confere maior resistência à abrasão e dureza, gerando menor ductilidade. Percentual de Ni da peça fraturada com valor muito baixo, elemento grafitizante.

Não existe uniformidade de fabricação entre peça fraturada e estoque pelos diferentes dados registrados comparados entre si e com o projeto; limites superiores e inferiores de dureza; percentual de fases grafita; ferrita e perlita e elementos químicos; principalmente o C, Si e Cr.

9. SUGESTÕES E AVANÇOS NA PESQUISA.

A geometria da peça com regiões de mudança de forma, concentra tensões propiciando a nucleação de microtrincas. Sugerimos então um estudo de reengenharia da geometria da peça. A melhoria da resistência e qualidade superficial da peça pode gerar uma dificuldade maior de nucleação de microtrincas pelo mecanismo de fadiga, por isto sugerimos esta ação para avançar na pesquisa. Um trabalho de reengenharia quanto ao controle de processo de fundição, fabricação e desenvolvimento de material, minimizando incertezas e otimizando propriedades relacionadas com ductilidade e tenacidade também podem ser executadas no futuro. Estudos voltados para simulação de ensaios na peça final fabricada quanto à resistência à fadiga podem ser efetuados, visando estimativas de vida com menor grau de incertezas. Como o plano de manutenção previsto pelo fabricante da peça fraturada não prever ensaios que poderiam detectar microtrincas, também sugerimos a reengenharia do plano de manutenção do sistema envolvido.

10. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

1. AFFONSO, L. O. A. **Análise de falhas e solução de problemas**. 2ª ed. Rio de Janeiro - RJ: Qualitymark Editora Ltda, 2006. 336 p.
2. ANDRADE, I. P. S.; PASKOCIMAS C.A.; e outros. Peritagem judicial mecânica em falhas de sistemas automotivos: análise crítica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MANUTENÇÃO, 23º, 2008, São Paulo-SP. **Anais...** São Paulo: ABRAMAN - Associação Brasileira de Manutenção, 2008. 20 p.
3. ANDRADE, I. P. S.; PASKOCIMAS C.A.; e outros. Scientific investigation of failures in automotive systems: technical report in judicial causes. In: CONGRESSO E EXPOSIÇÃO INTERNACIONAIS DA TECNOLOGIA DA MOBILIDADE, XVII, *paper* 2008-36-0004, outubro 2008. Santos - SP: SAE International, SAE Brasil, 2008, 8 p.
4. ANFAVEA. Anuário da Indústria Automobilística Brasileira. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/anuario2009/indice.pdf>>. Acessado em 12 de julho de 2009.
5. ARANTES, R. B. Direito e política: o Ministério Público e a defesa dos direitos coletivos. **Revista Brasileira de Ciências Sociais**, São Paulo, print ISSN 0102-6909, doi: 10.1590/S0102-69091999000100005, vol. 14, nº 39, fev.1999.
6. ARRUDA, M.; BOFF, L. **Globalização: desafios socioeconômicos, éticos e educativos**. 3ª ed. Petrópolis: Vozes, 2002. 207 p.
7. ASHBY, M. F.; JONES, D. R. H. **Engenharia de materiais: uma introdução a propriedades, aplicações e projeto**. 3ª ed. Rio de Janeiro - RJ: Elsevier Editora LTDA, 2007. V. 1, 371 p.
8. ASI, O. Fatigue failure of a rear axle shaft of automobile. **Engineering Failure Analysis**, London, England, 13, , p. 1293-1302, 2006.
9. BARELLA, A. **ABC do ferro cinzento**. São Paulo: Nobel, 1980. 106 p.
10. BAYRAKCEKEN, H. Failure Analysis of automobile differential pinion shaft. **Engineering Failure Analysis**, London, England, 13, p. 1422-1428, 2006.
11. BOSCHERINI, F.; POMO, L.; e outros. **Territorio, conocimiento y competitividad de las empresas: el rol de las instituciones en el espacio global**. 1ª ed. Madrid: Miño y Dávila Editores, 2000. 422 p.

12. BRASIL. PROCON – Fundação de Proteção e Defesa do Consumidor. Disponível em: <<http://www.procon.sp.gov.br/texto.asp?id=1143>>. Acessado em 10 de outubro de 2008.
13. CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 5ª ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC Livros técnicos e científicos, Editora AS, 2002. 589 p.
14. CARVALHO, A. B. **Proteção Jurídica ao consumidor no MERCOSUL**. Disponível em: <<http://www.mestrado.uniceub.br/revistamestrado/pdf/Artigo%20Andrea%20Benetti%20Carvalho.pdf>>. Acessado em 21 de outubro de 2008.
15. CHAGAS, H. N. Ensaio de Fadiga. In: SEMINÁRIO ENSAIO DE FADIGA. UNB – Departamento de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, 2009. Disponível em: <<http://www.scribd.com/doc/14496890/Monografia-Ensaio-de-Fadiga>>. Acessado em 20 de maio de 2009.
16. CHARDIN, T. **O fenômeno humano**. São Paulo: Cultriz, 1987. 187 p.
17. CHASE, R. B; e outros. **Administración de producción y operaciones**. 8ª ed. Santa Fé de Bogotá, Colômbia: McGraw-Hill Interamericana S.A., 2000. 885 p.
18. CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**: processos de fabricação e tratamento. 2ª ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1977. 315 p.
19. CNT. Pesquisa aponta necessidade de mais investimentos em transportes. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/portal/webCanalNoticiasCNT/noticia.aspx?id=9e66c32f-08bc-4d3e-a099-b15ba48d2aa1>>. Acessado em 01 novembro de 2009.
20. COLIM, G. M. **Fadiga dos materiais**. Figura turbina hidráulica - USP. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. 22 p. Disponível em: <<http://pcc5726.pcc.usp.br/Trabalhos%20dos%20alunos/FADIGA%20DOS%20>>. Acessado em 20 de maio de 2009.
21. COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 3ª ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1974. 412 p.
22. _____. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4ª ed. Revisão técnica: André Luiz V. da Costa e Silva. São Paulo: Edgard Blucher, 2008. 652 p.
23. DELEGADO, G. M. **Historia Universal de la era de las revoluciones al mundo globalizado**. 1ª ed. México: Pearson Educación, 2001. 538 p.
24. DIAS, R. Q. **Gestão de Diversidade**: o novo enfoque na gestão de pessoas. Salvador: Diversites, 2003, 297 p. Disponível em:

<<http://www.iem.efei.br/sanches/Ensino/pos%20graduacao/GPDP/artigos/Artigo%205.PDF>>. Acessado em 28 outubro de 2008.

25. DUEK C. **Análise de confiabilidade na manutenção de componente mecânico da aviação**. 118 f. Dissertação de Mestrado. UFSM - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 2005.
26. FARIA, H. F. A defesa do consumidor como princípio constitucional. **Rev. Disc. Jurídico**, Campo Mourão, v.3, n-1, jan/jul, p. 123-141, 2007.
27. FERNANDES, J. M. R. **Proposição de abordagem integrada de métodos de qualidade baseada no FMEA**. 105 f. Dissertação para obtenção do grau de mestre – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Curitiba - PR. 2005.
28. FERREIRA, T. A. **Tecnologia de materiais**. UFLA/FAEPE. Lavras - MG: Gráfica Universitária - UFLA, 1999. 258 p.
29. FILHO, G. B. **Dicionário de termos de manutenção e confiabilidade**. Rio de Janeiro - RJ: Editora Ciência Moderna LTDA., 2000. 52 p.
30. FRANCO, B. J. O. M. **Método de análise de falhas e suas aplicações em veículos aéreos não tripulados**. 22 de setembro de 2008. 205 f. Dissertação de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA, Curso de Engenharia Aeronáutica e Mecânica, São José dos Campos - SP. 2008.
31. FRANZ, L. A. S. **Análise crítica de um projeto seis sigma em uma indústria petroquímica**. 12 de dezembro de 2003. 128 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre - RS. 2003.
32. GARCIA, A.; SPIM, J. A. **Ensaaios dos materiais**. Rio de Janeiro, LTC, Livros Técnicos e Científicos, Editora S.A., 2000. 247 p.
33. GENTIL, V. **Corrosão**. 3ª ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC Livros Técnicos e Científicos, Editora S.A., 1996. 345 p.
34. GENTILI, P.; CHOMSKY, N.; e outros. (Orgs.). **Globalização excludente, desigualdade, exclusão e democracia na nova ordem mundial**. 4ª ed. Petrópolis, RJ, Editora Vozes, 2002. 251 p.
35. GIANNTI, B. F.; JUNIOR, M. F.; ALMEIDA, C. M. V. B. **Ecologia industrial: projeto para meio ambiente**. Universidade Paulista, LaFTA – Laboratório de Físico-Química Teórica e Aplicada, São Paulo. Disponível em: <<http://www.hottopos.com/regeq12/art5.htm>>. Acessado em: 05 de março de 2010.
36. GODEC, M.; MANDARINO, DJ.; JENKO, M. Investigation of the fracture of a car's drive shaft. **Engineering Failure Analysis**, London, England, 16, p. 1252-

- 1261, 2009.
37. GUIMARÃES, A. A. **Eletrônica embarcada automotiva**. 1ª ed. São Paulo: Editora Érica, 2007. 326 p.
 38. HIGGINS, R. A. **Propriedades e estruturas dos materiais em engenharia**. São Paulo, Difusão Editorial S.A. DIFEL, 1983. 472 p.
 39. ISO. **Élaboration des normes**. Disponível em: <http://www.iso.org/iso/fr/standards_development.htm>. Acessado em 07 de outubro de 2008.
 40. JORNADA, D. H. **RM 68 – Incerteza de medição: guia prático do avaliador de laboratório**. Porto Alegre: Rede Metrológica do Rio Grande do Sul, rev. 03, fevereiro 2009. 32 p.
 41. JULIANO, R. **Manual de perícias**. 2ª ed. Rio Grande do Sul - RS, 2006. 574 p.
 42. JUNIOR, E. C. A. **Caracterização do ferro fundido nodular obtido por fundição contínua**. 2003. 88 f. Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba. 2003.
 43. JUNIOR, W. D. C. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5ª ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC – Livros Técnicos e Científicos, Editora S.A, 2002. 589 p.
 44. JUSBRASIL. **Exigência de airbag em carros já é lei**. Disponível em: <<http://www.jusbrasil.com.br/noticias/956162/exigencia-de-airbag-em-carros-ja-e-lei>>. Acessado em 24 de julho de 2009.
 45. KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção função estratégica**. Rio de Janeiro - RJ: Qualitymark Editora, 1998. 285 p.
 46. KEPNER, C.H; TREGOE, B. B. **O novo administrador racional**. São Paulo: Kepner-Tregoe do Brasil: McGraw- Hill, 1986. 215 p.
 47. KINDLEIN, W. J.; PLANRCHECK, E. R.; CÂNDIDO, L. H. A. **Analogia entre as metodologias de desenvolvimento de produtos atuais, incluindo a proposta de uma metodologia com ênfase no ecodesign**. UFRGS, Porto Alegre-RS, FEEVALE, Novo Hamburgo - RS. 7 p.
 48. KLEINUBING, R.; STROHAECKER, T. R.; GRIZA, S. Análise metalográfica e de fraturas aplicadas aos acidentes de trânsito. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE CRIMES DE TRÂNSITO, IV, 2004, Cuiabá - MT. 7 p.
 49. KSAREKAR, T. A.; SADEGHI, F.; TSEREGOUNIS, S. Fretting fatigue of rough surfaces. **Wear**, Amsterdam, Holanda, 264, p. 719-730, 2008. Disponível em:<http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleListURL&_method=list&_ArticleListID=921584169&_sort=d&view=c&acct=C000037878&_version=1&_urlVersion=0&_userid=687335&md5=2afcd2e0ac970692a4bc8dab8b4bfc63>. Acessado em: 21 de maio de 2009.

50. LAFRAIA, J. R. B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro - RJ: Qualitymark Editora Ltda: Petrobrás, 2001. 374 p.
51. LANGE, K. A.; LEGGETT, S. C.; BAKER, B. **Análise de modo e efeitos de falha potência FMEA**. 3ª ed. Daimler Chrysler, Ford Motor Company, General Motors, 2001. 74 p.
52. LOURENÇO, N. J.; GRAÇA, M. L. A.; SILVA, O. M. M.; CAMPOS, P. P. Estudo da falha por fadiga de uma haste metálica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17º CBECIMat, 2006, Foz do Iguaçu - PR, 2006. P. 7633-7642.
53. MAGNOLI, D. **Globalização: estado nacional e espaço mundial**. 13ª impressão. São Paulo, SP: Editora Moderna Ltda, 2002. 96 p.
54. MENEZES, W. F. **Economia global**. Salvador: UFBA/FCE/CME, 2003. 168 p.
55. MURAD, C. A. **Extensão da garantia de veículos: aplicação para motor e transmissão**. Setembro de 2005. 145 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Automotiva – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - SP. 2005.
56. NANNINGA, N.; WHITE, C. The relationship between extrusion die line roughness and high cycle fatigue life of an AA6082 alloy. **International Journal of Fatigue**, London , England, 31, p. 1215-1224, 2009.
57. NEPOMUCENO, L. X. **Técnicas de manutenção preditiva**. São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA, 1999. v. 1 e v. 2. 952p.
58. NETO, O. N.; KLEINUBING, R. **Dinâmica dos acidentes de trânsito: análises, reconstruções e prevenção**. 2ª ed. Campinas SP: Millenium, 2006. 302 p.
59. OTANI, M.; MACHADO, W. V. A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial. **Revista Gestão Industrial**, Ponta Grossa - PR, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa - PR, ISSN 18080448/v.04, n.02, p. 01-16, 2008.
60. PEDRON, F. B. Q.; CAFFARATE, V. M. Evolução histórica do direito do consumidor. **Jus Navigandi**, Teresina, ano 4, nº 41, maio de 2000.
61. PESSOA, G. A.; PEREIRA, K. F.; ARAUJO, A. L. S. **Análise dos resultados da certificação de um sistema de gestão da qualidade na ISO 9001-2000: um estudo de caso no engarrafamento São Braz**. Maio de 2006. 15 p.
62. PIZZOLATO, M.; CATEN, C. S. T.; FOGLIATTO, F. S. Definição do prazo de garantia de um produto otimizado experimentalmente. **Revista Gestão & Produção**, São Carlos - SP, v. 12, nº 2, ISSN 0104-530X, p. 239-253,

maio/agosto 2005.

63. QUINN, R. E; e outros. **Competências gerenciais: princípios e aplicações**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004. 416 p.
64. ROTH, J. L., **Impacto da ISO 9000 sobre gestão das empresas: inferências a partir de três estudos de casos**. 1998. 121 f. Dissertação (Mestrado em Administração) – Escola de Administração, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul, 1998.
65. SALDANHA, R. C. **Sociedade da informação e mercado no Brasil: uma abordagem empírica sob a ótica das atividades econômicas**. Outubro de 2006. 222 f. Dissertação de Mestrado – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Escola Nacional de Ciências e Estatísticas – ENCE, Rio de Janeiro. Outubro de 2006. Disponível em: <http://www.ence.ibge.gov.br/pos_graduacao/mestrado/dissertacoes/pdf/2006/roberto_saldanha_TC.pdf>. Acessado em 02 de outubro de 2008.
66. SANTOS, A. B. S.; BRANCO, C. H. C. **Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares**. 3ª ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1989. 205 p.
67. SANTOS, A. J. Direitos do consumidor. **Revista IAP - Instituto dos Advogados do Paraná**, Curitiba, nº 10, p. 78-79, 1987.
68. SANTOS, L. V. **Análise de falha por fadiga em eixo de motores para sistema de arrefecimento**. 2008. 105 f. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, São Paulo. 2008.
69. SILVA, L. C. **Riscos e incertezas**. Universidade Federal do Espírito Santo, 28 de março de 2005. Disponível em: <<http://www.agais.com/risco.htm>>. Acessado em 17/03/2010.
70. SLACK, N; e outros. **Administração da produção**. 1ª ed. São Paulo: Atlas, 1997. 726 p.
71. SOUZA J. L. **Investigação das falhas do sistema de acionamento de embreagem do tipo cilindro escravo concêntrico em veículos comerciais pesados sob condições operacionais do mercado brasileiro**. 2005. 169 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Automotiva – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2005.
72. SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. 5ª ed. São Paulo – SP: Edgard Blucher Ltda, 1982. 286 p.
73. STRAZZACAPPA, C.; MONTANARI, V. **Globalização, o que é isso, afinal?** 1ª ed. São Paulo: Moderna, 2003. 72 p.

74. SURARATCHAI, M.; LIMIDO, J.; MABRU, C.; CHIERAGATTI, R. Modelling the influence of machined surface roughness on the fatigue life of aluminium alloy. **International Journal of Fatigue**, London, England, 30, p. 2119-2126, 2008.

75. SUSKI, C. A. **Estudo do efeito de tratamento e revestimentos superficiais na vida de ferramentas de conformação mecânica a frio**. 2004. 88 f. Dissertação de Mestrado – UFSC, Florianópolis. 2004.

76. TEDESCO, J. C. (Org.). **Educação e novas tecnologias**. São Paulo: Cortez Editora, 2004. 255 p.

77. VLACK, L. H. V. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**. Rio de Janeiro: Editora Campos Ltda. 1984, 567 p.

78. XUE, H. Q.; BAYRAKTAR, E.; BATHIAS, C. Damage mechanism of a nodular cast iron under the very high cycle fatigue regime. **Journal of Materials Processing Technology**, London, England, 202, p. 216-223, 2008.