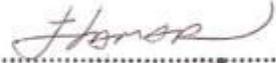


ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR SYME REGINA SOUZA
QUEIRÓZ E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 19.1.07.12


ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Syme Regina Souza Queiróz

**Propriedades Mecânicas e Micromecanismos de
Fratura de Corpos-de-prova Usinados de Rodas
Ferroviárias Fundidas e Forjadas**

Campinas, 2012

Syme Regina Souza Queiróz

Propriedades Mecânicas e Micromecanismos de Fratura de Corpos-de-prova Usinados de Rodas Ferroviárias Fundidas e Forjadas

Tese de doutorado apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Doutora em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Itamar Ferreira

Campinas
2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Queiróz, Syme Regina Souza

Q108p Propriedades mecânicas e micromecanismos de fratura de corpos-de-prova usinados de rodas ferroviárias fundidas e forjadas / Syme Regina Souza Queiróz. --Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientador: Itamar Ferreira.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas,
Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Rodas de vagões. 2. Metais - Propriedades mecânicas. 3. Forjamento. 4. Metais - Fadiga. 5. Materiais - Fadiga. I. Ferreira, Itamar, 1952-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Propriedades mecânicas e micromecanismos de fratura de corpos-de-prova usinados de rodas ferroviárias fundidas e forjadas.

Título em Inglês: Mechanical properties and fracture micromechanisms of machined specimens from the cast and forged railway wheels.

Palavras-chave em Inglês: Wagon Wheels, Metals - Mechanical properties, Forging, Metals - Fatigue, Materials - Fatigue

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Titulação: Doutora em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Célia Marina de Alvarenga Freire, Maria Clara Filippini Ierardi, Otávio Fernandes Lima da Rocha, Ruis Camargo Tokimatsu

Data da defesa: 19-07-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

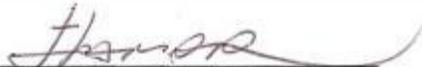
TESE DE DOUTORADO

**Propriedades Mecânicas e Micromecanismos de Fratura de
Corpos-de-prova Usinados de Rodas Ferroviárias Fundidas e
Forjadas**

Autor: Syme Regina Souza Queiróz

Orientador: Itamar Ferreira

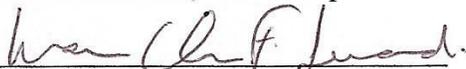
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:



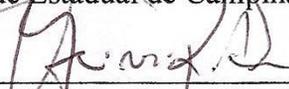
Prof. Dr. Itamar Ferreira, Presidente
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP



Prof. Dra. Célia Marina de Alvarenga Freire
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP



Prof. Dra. Maria Clara Filippini Ierardi
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP



Prof. Dr. Otávio Fernandes Lima da Rocha
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará – IFPA



Prof. Dr. Ruis Camargo Tokimatsu
Universidade Estadual de São Paulo - UNESP

Campinas, 19 de julho de 2012

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha avó Olivia Balieiro de Deus.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao IFPA, UNICAMP, CAPES, e, especial, ao Projeto de Doutorado Interinstitucional – DINTER (IFPA/UNICAMP) pelos apoio, incentivo e oportunidade que garante a qualificação de professores e a expansão da pesquisa em nosso País.

Ao Prof. Dr. Itamar Ferreira, que aceitou a orientação deste trabalho e mesmo com todas as dificuldades que enfrentamos conseguiu bravamente colaborar para minha formação.

Aos Professores, Amauri, Rodnei, Cecília, Celia, Maria Clara - UNICAMP e Otávio - IFPA pelo apoio nos momentos em que a continuidade do trabalho podia não ter acontecido.

Aos dedicados amigos, Expedito, Laercio, Sandra, Sabina, Fernando, Daniel, Célio, Rythney, Edson, Bianca, Lygia, Gisele, Talita que me encorajaram nas horas mais difíceis, especialmente, Emanuelle pelo dedicado carinho nos momentos mais inesperados.

A MWL Brasil, representada pelo Diretor Renato Lyra Villas Boas pelo apoio técnico e informações primordiais para a realização deste trabalho.

Ao técnico José Luiz, representante do Laboratório de Propriedades Mecânicas da FEM/UNICAMP, pela amizade e apoio constante nos ensaios.

As funcionárias da FEM/UNICAMP, Alice, Patrícia, Aparecida e Maria pelo companheirismo e apoio diário.

Aos meus pais Bianor e Maria, pela minha vida e princípios que me ensinaram a respeitar, principalmente, a minha mãe, incansável guerreira, que me trouxe até aqui para mais essa conquista.

A todos meus irmãos, parentes e amigos carinhosamente representados por minha irmã Elaine Souza que literalmente me acompanhou em todos os momentos.

Aos meus adorados filhos, Emerson, Elison e Liz e marido Cesar Queiroz que são as pessoas que mais amo na vida e minhas inspirações em tudo que faço.

A Deus, por tanto amor e alegria e por estar sempre em meu coração.

EPÍGRAFE

Nunca permita que uma solicitação externa cause uma irreparável fratura em algo que você solidificou com amor.

Syme Queiróz

Resumo

QUEIRÓZ, Syme Regina Souza, *Propriedades mecânicas e micromecanismos de fratura de corpos-de-prova usinados de rodas ferroviárias fundidas e forjadas*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2012. 115p. Tese (Doutorado)

A tendência mundial das estradas de ferro é utilizar carga elevada por vagão no transporte de produtos e alta velocidade no setor de passageiros. Em ambas as situações, as rodas ferroviárias são muito solicitadas mecanicamente e, em função disso, as propriedades mecânicas dessas rodas devem ser rigorosamente controladas, tendo em vista que as principais causas de acidentes envolvendo trincas nas rodas, ou a retirada da roda antes do final de sua vida, estão direta ou indiretamente associadas a baixos níveis de resistência mecânica, resistência à fadiga e tenacidade à fratura. O conhecimento do comportamento mecânico das rodas ferroviárias com base nas suas propriedades mecânicas é imprescindível para o projeto de rodas ferroviárias e para o aprimoramento de seu processo de fabricação. Este trabalho tem como objetivo caracterizar e analisar a microestrutura, as propriedades mecânicas e os micromecanismos de fratura de cinco rodas ferroviárias, duas fundidas e três forjadas, a partir de corpos-de-prova usinados dos aros e discos dessas rodas. As propriedades mecânicas analisadas são as básicas (limite de escoamento, limite de resistência à tração, alongamento específico até à fratura, redução de área, dureza e energia de impacto Charpy), a resistência à fadiga e a tenacidade à fratura, de corpos-de-prova usinados das rodas ferroviárias. Além das microestruturas e das propriedades mecânicas, foram também caracterizados e analisados os micromecanismos de fratura dos corpos-de-prova dos ensaios de fadiga e impacto, por meio de microscopia eletrônica de varredura. Os resultados dos ensaios indicam, em relação aos limites de escoamento e de resistência à tração, que não houve diferenças significativas entre as rodas fundidas e forjadas analisadas. Quanto à dureza (HRC), ductilidade (alongamento específico e redução de área) e tenacidade à fratura, as rodas forjadas apresentaram valores superiores. Em relação à resistência à fadiga, uma propriedade importante no caso de rodas ferroviárias, os corpos-de-prova usinados das rodas forjadas apresentaram melhores resultados em relação às rodas fundidas. Pode-se também concluir que, tanto para as propriedades mecânicas básicas e nobres como também para os micromecanismos de fratura, os resultados obtidos são compatíveis aos encontrados na literatura especializada, validando e comprovando que a metodologia de análise pode ser utilizada para melhorar os projetos e os processos de fabricação de rodas ferroviárias de aço fundidas e forjadas.

Palavras Chave: Roda ferroviária fundida, Roda ferroviária forjada, Propriedades mecânicas, Fratura, Fadiga.

Abstract

QUEIROZ, Syme Regina Souza, *Mechanical properties and fracture micromechanisms of machined specimens from the cast and forged railway wheels*. Campinas: Faculty of Mechanical Engineering, University of Campinas, São Paulo State, Brazil, 2012, 115p. Doctoral Thesis

The world wide tendency of railroads is to use high load per wagon in cargo transport and high-speed in passenger sector. In both situations, the railway wheels are very mechanically required, and as a result, the mechanical properties of these wheels should be controlled strictly in order that the main causes of accidents involving wheels cracks, or withdrawal of the wheel before end of its life, are directly or indirectly associated with low levels of strength, fatigue resistance and fracture toughness. Knowledge of the mechanical behavior of railway wheels based on their mechanical properties is essential for the design of railway wheels and the improvement of its manufacturing process. This work aims to characterize and analyze the microstructure, mechanical properties and fracture micromechanisms of five railway wheels, two cast and three forged, from the machined specimens of the rim and web of these wheels. The analyzed mechanical properties are the basics (yield strength, tensile strength, elongation, reduction in area, hardness and Charpy impact energy) the fatigue resistance and the fracture toughness, from the specimens machined of railway wheels. In addition to the microstructures and mechanical properties were characterized and analyzed the micromechanisms of fracture of the specimens of fatigue and impact tests, using scanning electron microscopy. The test results indicate, with respect to the yield strength and tensile strength, there were no significant differences between cast and forged wheels analyzed. The hardness (HRC), ductility (elongation and reduction in area) and fracture toughness of the forged wheels showed higher values. Regarding resistance to fatigue, an important property in the case of railway wheels, the forged wheels machined specimens shown better results compared to cast wheels. One can also conclude that, for both the basic and noble mechanical properties as well as for the micromechanisms of fracture, the results are compatible with those found in the literature, validating and verifying that the method of analysis can be used to improve the castings and forgings steel railway wheels and manufacturing processes and projects.

Keywords: Cast railway wheel, forged railway wheel, Mechanical Properties, Fracture, Fatigue.

Lista de Ilustrações

Figura 2.1 Curva tensão-deformação (a) região de deformação elástica e início da região de deformação plástica, limite de proporcionalidade P e a tensão limite de escoamento σ_e . (b) esquema representando o fenômeno do patamar de escoamento, encontrado em alguns aços [CALLISTER, 2009].	6
Figura 2.2 Comportamento tensão-deformação em tração para materiais frágeis e materiais dúcteis carregados até a fratura [Callister, 2009].	8
Figura 2.3 Representação esquemática mostrando como o módulo de resiliência (que corresponde a área sombreada) é determinado a partir do comportamento tensão-deformação em tração de um material [CALLISTER, 2009].	10
Figura 2.4 Obtenção da pré-trinca de fadiga nos ensaios de tenacidade à fratura [FERREIRA, 2009].	13
Figura 2.5 Dependência da energia de impacto Charpy com entalhe em “V” (curva A) e do percentual de fratura de cisalhamento (curva B) em relação à temperatura para um aço A283. (Reimpresso do Welding Journal. Usado com permissão da American Welding Society.) [CALLISTER, 2009].	14
Figura 2.6 Representação esquemática dos regimes de comportamento na fratura, mostrando os campos de aplicação da mecânica de fratura elástica linear e elasto-plástica [FERREIRA, 2009].	15
Figura 2.7 Várias definições físicas do CTOD: a) primeira idealização; b) forma mais realista; c) interface elasto-plástica; d) CTOD tangente; e) CTOD na posição da ponta da trinca original; f) CTOD formando um ângulo de 90° com a ponta da trinca [FERREIRA, 2009].	15
Figura 2.8 Formação e definições da zona esticada. a) e d) formação da zona esticada com o aumento da carga; e) definições dos parâmetros da zona esticada; f) e g) efeito do ângulo de observação da amostra sobre as dimensões da zona esticada [FERREIRA, 2009].	16
Figura 2.9 Ciclos típicos de tensão por fadiga. (a) tensão invertida; (b) tensão repetida; (c) ciclo de tensão irregular segundo [DIETER, 1988].	19
Figura 2.10 Curvas S-N (a) material que apresenta um limite de resistência à fadiga e (b) um material que não apresenta limite de resistência à fadiga [CALLISTER, 2009].	21
Figura 2.11 Comprimento da trinca em função do número de ciclos, para três níveis de tensões, de acordo com SHINGLEY [SHINGLEY, 2004 apud CARNIO, 2009].	22
Figura 2.12 Diagrama típico da/dN - ΔK , conforme SHINGLEY [SHINGLEY, 2004 apud CARNIO, 2009].	23

Figura 2.13 Momento do vazamento do aço líquido do forno para a panela. [GALERIA DE FOTOS DA AMSTED MAXION, 2011].....	26
Figura 2.14 Roda fundida saindo do forno. [GALERIA DE FOTOS DA AMSTED MAXION, 2011].....	27
Figura 2.15 Forno elétrico e panela com revestimento refratário. Uso gentilmente concedido pela empresa MWL do Brasil [SYME QUEIROZ, 2011].	30
Figura 2.16 Tanque de vácuo com o aço líquido desgaseificado antes do vazamento na lingoteira. Foto gentilmente cedida pela empresa MWL Brasil [VILLAS BOAS, 2009].....	30
Figura 2.17 Lingotes no momento do corte. Foto gentilmente cedida pela empresa MWL Brasil [VILLAS BOAS, 2009].....	31
Figura 2.18 (a) Lingote na prensa hidráulica; (b) Lingote moldado em forma de roda saindo da prensa hidráulica. Uso gentilmente concedido pela empresa MWL do Brasil [SYME QUEIROZ, 2011].....	32
Figura 2.19 Operação de usinagem do disco interno de uma roda ferroviária forjada. Uso gentilmente concedido pela empresa MWL do Brasil [SYME QUEIROZ, 2011].	33
Figura 2.20 (a) Roda ferroviária forjada entrando no aparelho de ultra-som, (b) Roda ferroviária forjada durante o procedimento de ultra-som. Uso gentilmente concedido pela empresa MWL do Brasil [SYME QUEIROZ, 2011].	34
Figura 2.21 Esquema dos defeitos mais frequentes em rodas ferroviárias e sua relação com a profundidade de fadiga na pista de rolamento [MINICUCCI, 2011].....	35
Figura 2.22 Parte de uma roda ferroviária com defeito de Escamação localizada – Spalling [MINICUCCI, 2011].	36
Figura 2.23 Parte de uma roda ferroviária com defeito de Escamação – Shelling [CLARKE, 2008].....	37
Figura 2.24 Parte de uma roda ferroviária com defeito Shattered Rim [MINICUCCI, 2011].....	37
Figura 2.25 Parte de uma roda com defeito causado por trincas térmicas [MINICUCCI, 2011].	38
Figura 2.26 Roda ferroviária com defeito causado por concentração de tensões [MINICUCCI, 2011].....	39
Figura 2.27 Desenho sem escala de parte de uma roda ferroviária com defeito causado por trinca circunferencial [MINICUCCI, 2011].	39
Figura 2.28 Parte de uma roda ferroviária com defeito causado por calo [MINICUCCI, 2011]. .	40
Figura 2.29 Curvas típicas do efeito do percentual de carbono nas propriedades mecânicas de um aço carbono [KALPAKJIAN, 2007].	41

Figura 2.30 Propriedades mecânicas de um aço fundido temperado em água [ASM, 1992].....	42
Figura 2.31 Variação da dureza da martensita revenida em relação ao teor de carbono do aço [DIETER, 1988].	43
Figura 2.32 Temperatura – energia livre dos aspectos termodinâmicos da formação da martensita [SILVA, 2010].....	44
Figura 2.33 Micrografia típica martensítica com ataque de Nital [COLPAERT, 2008].....	45
Figura 2.34 Curva típica do ensaio da energia de impacto Charpy [GARCIA, 2012].....	49
Figura 2.35 Fractografias típicas de uma mola de aço AISI 1070, MEV (a) 1000x e (b) 5000x. Presença de nitretos nos contornos dos grãos [ASM, 1987].	52
Figura 2.36 Fractografias típicas de um trilho de aço (a) e (b) Região de propagação de fadiga; (c) Clivagem transgranular (esquerda) com a clivagem intergranular (direita), MET 5000x [ASM, 1987].....	52
Figura 2.37 Fractografias típicas de um aço AISI 4130 de engates de eixos (a) Superfície de fratura-frágil próximo do centro do eixo; (b) Região próximo da superfície do eixo – ruptura por dimple, MEV 100x [ASM, 1987].....	52
Figura 3.1 Perfil e nomenclatura de uma roda ferroviária com disco em “S” semelhante à roda utilizada neste trabalho [Minicucci, 2011].	53
Figura 3.2 Fluxogramas dos processos de fabricação das rodas ferroviárias de aço fundidas e forjadas.	55
Figura 3.3 Desenho sem escala da localização da retirada dos corpos-de-prova dos ensaios de tração e de impacto Charpy nos aros e discos das rodas [Desenho gentilmente cedido pela empresa MWL Brasil].	56
Figura 3.4 Desenho sem escala da localização de retirada dos corpos-de-prova dos ensaios de fadiga no aro das rodas [Desenho gentilmente cedido pela empresa MWL Brasil].....	56
Figura 3.5 Desenho sem escala da localização da retirada dos corpos-de-prova dos ensaios de tenacidade à fratura no aro das rodas com orientação do plano da trinca C - L [Desenho gentilmente cedido pela empresa MWL Brasil].	57
Figura 3.6 Perfil de uma roda ferroviária com disco em “S” e representação do posicionamento da retirada dos corpos-de-prova dos ensaios de tração.....	57
Figura 3.7 Microscópio óptico Neophot 32, do Laboratório de Engenharia de Materiais da Unicamp, utilizado na análise metalográfica [SYME QUEIROZ, 2011].	59
Figura 3.8 Corpos-de-prova embutidos em baquelite utilizados nas análises metalográficas (E – Extremidade esquerda, C – Centro e D –Extremidade direita) [SYME QUEIROZ, 2011].	60

Figura 3.9 Durômetro Pantec RBS utilizado nos ensaios de dureza Rockwell C [SYME QUEIROZ, 2011].	60
Figura 3.10 Corpo de prova utilizado nos ensaios de fadiga após o ensaio de dureza Rockwell C [SYME QUEIROZ, 2011].	61
Figura 3.11 Desenho sem escala do corpo-de-prova utilizado nos ensaios de tração. Dimensões em mm.	61
Figura 3.12 Montagem experimental da máquina de ensaios MTS, do Laboratório de Engenharia de Materiais da Unicamp, durante os ensaios: (a) geral e (b) corpo-de-prova fixado nas duas extremidades e o extensômetro [SYME QUEIROZ, 2011].	62
Figura 3.13 (a) Desenho sem escala do corpo-de-prova utilizado nos ensaios de impacto Charpy. Dimensões em mm. (b) Corpo-de-prova utilizado nos ensaios de impacto Charpy [SYME QUEIROZ, 2011].	63
Figura 3.14 Equipamento do tipo Pêndulo de Impacto LOS, do laboratório de ensaios da empresa MWL Brasil, utilizado nos ensaios de impacto – Charpy. Foto gentilmente cedida pela empresa MWL Brasil.	63
Figura 3.15 Desenho sem escala dos corpos-de-prova de tenacidade à fratura, orientação do plano da trinca C - L. Dimensões em mm.	64
Figura 3.16 Corpo-de-prova de tenacidade à fratura fixado na máquina MTS durante o ensaio. (b) Superfície de fratura de três corpos-de-prova de tenacidade à fratura após os ensaios.	65
Figura 3.17 Curva típica da carga em função do deslocamento da abertura da boca da trinca – CTOD (mm) obtida do ensaio de tenacidade à fratura de um corpo-de-prova da roda RF1.	65
Figura 3.18 Desenho sem escala do corpo-de-prova de fadiga. Dimensões em mm.	66
Figura 3.19 Desenho dos corpos-de-prova de flexão e fadiga e da fixação dos corpos-de-prova no dispositivo de ensaio.	67
Figura 3.20 (a) Montagem experimental da MTS durante o ensaio de fadiga e (b) Corpo-de-prova de fadiga na MTS mostrando os três pontos do corpo-de-prova em flexão durante o ensaio [SYME QUEIROZ, 2011].	67
Figura 3.21 Superfície de fratura de um corpo-de-prova da Roda RFo5, após o ensaio de fadiga [SYME QUEIROZ, 2011].	68
Figura 3.22 Máquina EVO MA – 15, CARL ZEISS SMT – Nano Technology Systems Division utilizada para obter fractografias dos corpos-de-prova das rodas ferroviárias RF4 e RFo5 [SYME QUEIROZ, 2011].	69

Figura 4.1 Micrografias dos corpos-de-prova 3, 5 e 11, dos ensaios de fadiga, usinados da Roda RF4. (a) Região centro da amostra e (b) Região da extremidade esquerda da amostra. CP 4.3 significa roda 4, corpo-de-prova nº 3, e assim sucessivamente.....	71
Figura 4.2 Micrografias dos corpos-de-prova 3, 5 e 11, dos ensaios de fadiga, usinados da Roda RFo5 (a) Região centro da amostra e (b) Região da extremidade esquerda da amostra.	72
Figura 4.3 Curvas carga-deslocamento obtidas nos ensaios de flexão para definição das cargas utilizadas nos ensaios de fadiga (a) rodas RF1 e RF4 e (b) rodas RFo2, RFo3 e RFo5.	81
Figura 4.4 Ajuste linear dos resultados dos ensaios de fadiga da roda RF1. Papel probabilístico de Weibull.	84
Figura 4.5 Ajuste Linear dos resultados dos ensaios de fadiga da roda RFo2, sem desgaseificação. Papel probabilístico de Weibull.....	85
Figura 4.6 Ajuste linear dos resultados dos ensaios de fadiga da roda RFo3, com desgaseificação. Papel probabilístico de Weibull.....	85
Figura 4.7 Ajuste linear dos resultados dos ensaios de fadiga da roda RF4. Papel probabilístico de Weibull.	86
Figura 4.8 Ajuste linear dos resultados dos ensaios de fadiga da roda RFo5, com desgaseificação. Papel probabilístico de Weibull.....	86
Figura 4.9 Resultados dos ensaios de fadiga das rodas fundidas RF1 e RF4, forjada sem desgaseificação RFo2 e forjada com desgaseificação RFo3 e RFo5. Papel probabilístico de Weibull.	87
Figura 4.10 Fratografias dos corpos-de-prova B e C da roda RFo3. (a) Superfície de fratura, (b) Zona de fratura final-clivagem.	89
Figura 4.11 Fratografias dos corpos-de-prova 7 e 11 da roda RF1 (1-7, 1-11): (a) Interface fadiga-fratura, (b) Zona de fadiga e (c) Zona de fratura final-clivagem. CP 1-7 significa roda 1, corpo-de-prova nº 7, e assim sucessivamente.	90
Figura 4.12 Fratografias dos corpos-de-prova 3 da roda RFo2 (2-3) a esquerda e da roda RFo3 (3-6) a direita. (a) Interface fadiga-fratura, (b) Zona de fadiga e (c) Zona de fratura final-clivagem.	91
Figura 4.13 Fratografias dos corpos-de-prova 3 e 11 da roda RF4 (4-3, 4-11). (a) Interface fadiga-fratura, (b) Zona de fadiga e (c) Zona de fratura final-clivagem.....	92
Figura 4.14 Fratografias dos corpos-de-prova 3 e 11 da roda RFo5 (5-3, 5-11). (a) Interface fadiga-fratura, (b) Zona de fadiga e (c) Zona de fratura final-clivagem.	93

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Propriedades Mecânicas (em tração) para Ligas Metálicas à Temperatura Ambiente [CALLISTER, 2009].	9
Tabela 2.2 Valores do limite de escoamento e tenacidade à fratura em deformação plana para materiais metálicos.	12
Tabela 2.3 Classes das rodas ferroviárias da AAR M – 107, suas aplicações e o teor de carbono, em percentual, presente em cada roda.	46
Tabela 2.4 Classes das rodas e valores mínimos e máximos de durezas Brinell e Rockwell recomendados pela AAR [AAR M – 107, 2007] para o aro de rodas ferroviárias fundidas e forjadas.	46
Tabela 2.5 Classificação e aplicações de rodas ferroviárias de acordo com as normas da AAR M – 107 e BS EN 13262.	47
Tabela 2.6 Limites de resistência, escoamento e estrição de rodas ferroviárias recomendadas pela BS EN 13262 para os ensaios de tração.	48
Tabela 2.7 Valores médios, para três corpos-de-prova de uma roda por corrida, e mínimos característicos das energias de impacto de corpos-de-prova de rodas ferroviárias recomendadas pela norma BS EN 13262.	49
Tabela 2.8 Valores mínimos (individual e média) para os ensaios de tenacidade à fratura em deformação plana - K_{IC} de rodas ferroviárias recomendadas pelas normas AAR M – 107 e BS EN 13262.	50
Tabela 3.1 Composição química das rodas analisadas neste trabalho e da roda Classe C da AAR M – 107.	54
Tabela 3.2 Ensaios realizados e quantidade de corpos-de-prova (usinados de rodas ferroviárias fundidas e forjadas) utilizados nessa pesquisa.	58
Tabela 4.1 Valores médios dos resultados obtidos nos ensaios de dureza Rockwell (HRC).	73
Tabela 4.2 Resultado dos ensaios de tração com CPs do aro das rodas RF1, RFo2 e RFo3.	74
Tabela 4.3 Resultado dos ensaios de tração com CPs do disco das rodas RF1, RFo2 e RFo3.	75
Tabela 4.4 Resultados dos ensaios de impacto Charpy no aro das rodas RF1, RFo2 e RFo3.	79
Tabela 4.5 Resultado dos ensaios de tenacidade à fratura das rodas RF1, RFo2 e RFo3	80
Tabela 4.6 Resultados dos ensaios de fadiga dos corpos-de-prova das rodas fundidas e forjadas.	82
Tabela 4.7 Resultados da distribuição de Weibull, para um intervalo de confiança de 95%, em termos do coeficiente de correlação dos pontos (R2), da inclinação de Weibull (b) e da vida	

característica (θ) - correspondente a 63,2% de probabilidade de falha, para os ensaios de fadiga das cinco rodas ferroviárias.....	87
---	----

Lista de Abreviaturas e Siglas

Letras Latinas

A	Corpo-de-prova do ensaio de tenacidade à fratura	
AL	Alongamento específico até a fratura	[%]
A ₀	Área original da seção reta	[m ²]
A _f	Área da seção reta no ponto de fratura	[m ²]
b	Coefficiente angular da inclinação de Weibull	[graus]
B	Corpo-de-prova do ensaio de tenacidade à fratura	
C	Corpo-de-prova do ensaio de tenacidade à fratura	
C _m	Carga máxima	[mm]
CTOD	Deslocamento de abertura da boca da trinca	[mm]
CTOD _c	Deslocamento de abertura da ponta da trinca crítico	[mm]
da/d _N	Taxa de propagação da trinca por fadiga	[mm/ciclo]
E	Módulo de elasticidade ou módulo de Young	[MPa]
F	Probabilidade de falha	[%]
F _e	Quociente de carga de escoamento	[N]
F _m	Quociente da carga máxima	[N]
G _I	Força de extensão da trinca	[N]
J _{IC}	Parâmetro crítico em termos da integral J	[J/m ²]
K _I	Fator de intensidade de tensão	[MPa \sqrt{m}]
K _{IC}	Tenacidade à fratura em deformação plana	[MPa \sqrt{m}]
LE	Limite de escoamento	[MPa]
l _f	Comprimento no momento da fratura	[mm]
l _o	Comprimento útil original	[mm]

LR	Limite de resistência à tração	[MPa]
N	Vida (em número de ciclos até a fratura)	[ciclos]
N_f	Vida em fadiga (número de ciclos até a fratura)	[ciclos]
R	Razão de carga	
R^2	Coeficiente de correlação dos pontos	
RA	Redução de área	[%]
RF1	Roda fundida N° 1	
RF4	Roda fundida N° 4	
RFo2	Roda forjada N° 2	
RFo3	Roda forjada N° 3	
RFo5	Roda forjada N° 5	
S_t	Área da seção transversal inicial do corpo-de-prova	[mm ²]
S_0	Área da seção inicial	[mm ²]
S-N	Curva da tensão em relação ao número de ciclos	
U_e	Módulo de resiliência	[N.mm/mm ³]

Letras Gregas

ΔK	Variação do fator de intensidade de tensão	[MPa \sqrt{m}]
λ	Fator que depende da determinação de CTOD	
θ	Vida característica em fadiga	[ciclos]
σ	Amplitude de tensão em função do logaritmo do número de ciclos até a falha por fadiga	[MPa]
σ_e	Limite de escoamento	[MPa]
σ_t	Limite de resistência à tração	[MPa]
σ_N	Tensão nominal	[MPa]

Abreviações

CP	Corpo-de-prova
CPs	Corpos-de-prova
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
MET	Microscópio eletrônico de transmissão
MTS	Materials testing sistem

Siglas

ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
AAR	<i>Association of American Railroad</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ASM	<i>American Society for Metals</i>
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
FEM	<i>Faculdade de Engenharia Mecânica</i>
BS EN	<i>British Standard Europäische Norm</i>
NBR	<i>Norma Brasileira</i>
UNICAMP	<i>Universidade Estadual de Campinas</i>

Sumário

Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1. Objetivos	2
Capítulo 2	4
Revisão Bibliográfica	4
2.1. Propriedades mecânicas dos metais	4
2.1.1. Propriedades obtidas no ensaio de tração	5
2.1.2. Tenacidade à fratura.....	10
2.1.3. Propriedades de fadiga.....	17
2.1.4. Distribuição de Weibull	24
2.2. Fundição de metais	25
2.2.1. Processos de fundição	25
2.2.2. Processo de fundição de rodas ferroviárias.....	26
2.3. Forjamento de metais	28
2.3.1. Processos de forjamento	28
2.3.2. Processo de forjamento de rodas ferroviárias	29
2.3.3. Defeitos frequentes em rodas ferroviárias	34
2.3.4. Propriedades mecânicas de rodas ferroviárias de aço fundidas e forjadas	40
Capítulo 3	53
Materiais e Procedimentos Experimentais	53
3.1. Materiais	53
3.2. Procedimentos Experimentais.....	58
3.2.1. Análise metalográfica	59
3.2.2. Ensaio de dureza Rockwell	60
3.2.3. Ensaio de tração	61
3.2.4. Ensaio de impacto Charpy.....	62

3.2.5. Ensaio de tenacidade à fratura.....	64
3.2.6. Ensaio de fadiga	66
3.2.7. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	68
Capítulo 4	70
Resultados e Discussão.....	70
4.1. Análise metalográfica	70
4.2. Ensaio de dureza Rockwell	70
4.3. Ensaio de tração	73
4.4. Ensaio de impacto Charpy.....	78
4.5. Ensaio de tenacidade à fratura.....	79
4.6. Ensaio de fadiga	80
4.7. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	88
Capítulo 5	94
Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos.....	94
5.1 Conclusões.....	94
5.2 – Sugestões para Próximos Trabalhos	97
Capítulo 6	98
Referências Bibliográficas.....	98
Anexos	107

Capítulo 1

Introdução

O maior problema que pode ocorrer com uma roda ferroviária em serviço, é a fratura. Isto causa em geral descarrilamento. Condições extremas, principalmente depois da passagem por muitos declives, mostram que a roda inteira é susceptível à fratura. Muitas fraturas de rodas ferroviárias são por fadiga e algumas falhas são associadas com algum tipo de falha metalúrgica ou devido alguma descontinuidade geométrica (entalhes, trincas, etc.) [FERREIRA, 2009; HELMAN, 2005].

A identificação da causa raiz das falhas de rodas ferroviárias e outros componentes estruturais, passa pela caracterização dos micromecanismos de fratura e metodologia da mecânica da fratura. A tenacidade à fratura é também uma propriedade mecânica nobre, sendo a base da mecânica da fratura, que, por sua vez, é uma ferramenta poderosa utilizada na avaliação da confiabilidade e vida das estruturas e na seleção de materiais [FERREIRA, 2009; DIETER, 1988]. As propriedades mecânicas básicas (limite de escoamento, limite de resistência à tração, alongamento específico até à fratura e outras) e as propriedades de fadiga e tenacidade à fratura são imprescindíveis para o projeto de rodas ferroviárias [FERREIRA, 2009].

As propriedades mecânicas dos materiais utilizados na fabricação de rodas ferroviárias dependem basicamente da composição química e da condição metalúrgica do aço e a condição metalúrgica, do processo de fabricação da roda [FERREIRA, 2009; CHIAVERINI, 2008]. Segundo a norma técnica AAR [AAR M-107, 2007], que padroniza o processo de fabricação e a composição química de rodas ferroviárias, existem dois tipos básicos de rodas ferroviárias: as rodas forjadas e as rodas fundidas. Ainda segundo a AAR [AAR M-107, 2007], as rodas ferroviárias forjadas e fundidas, de acordo com a finalidade são divididas em classes, sendo que as utilizadas nesta pesquisa obedecem a classe C desta norma. No geral, as rodas ferroviárias forjadas e fundidas da classe C possuem composição química praticamente igual e microestruturas diferentes.

1.1. Objetivos

Para ampliar os conhecimentos sobre o comportamento mecânico de rodas ferroviárias, este trabalho tem como objetivo caracterizar e analisar as microestruturas e as propriedades mecânicas e os micromecanismos de fratura obtidos a partir de corpos-de-prova usinados de cinco rodas ferroviárias, duas fundidas e três forjadas. Serão analisadas as propriedades mecânicas básicas ((limite de escoamento, limite de resistência à tração, alongamento específico até à fratura e outras) e as propriedades de fadiga e tenacidade à fratura. Além das propriedades mecânicas serão caracterizados e analisados também os micromecanismos de fratura da superfície de fratura dos corpos-de-prova de fadiga das cinco rodas (RF1, RFo2, RFo3, RF4 e RFo5) e corpos-de-prova do ensaio de impacto Charpy da roda forjada desgaseificada RF3. Com isso, este objetivo será alcançado por meio da caracterização e análise:

1. Da Microestrutura de uma roda fundida e de uma forjada utilizadas nos ensaios de fadiga;
2. Da Dureza Rockwell C de uma roda fundida e uma forjada utilizadas nos ensaios de fadiga;
3. Dos Limites de resistência à tração e de escoamento, alongamento específico até a fratura e redução de área de corpos-de-prova usinados de três rodas, uma fundida, uma forjada sem desgaseificação e uma forjada com desgaseificação;
4. Da Energia de impacto Charpy em corpos-de-prova usinados de três rodas, uma fundida, uma forjada sem desgaseificação e uma forjada com desgaseificação;
5. Da Tenacidade à fratura a partir de corpos-de-prova usinados de três rodas, uma fundida, uma forjada sem desgaseificação e uma forjada com desgaseificação;

6. Da Análise estatística, utilizando a distribuição de Weibull, dos resultados dos ensaios de fadiga de corpos-de-prova das cinco rodas;
7. Da Análise, por microscopia eletrônica de varredura, das superfícies de fratura de corpos-de-prova de cinco rodas, duas fundidas e três forjadas utilizadas nos ensaios de fadiga, e de corpos-de-prova de uma roda forjada utilizados nos ensaios de impacto Charpy.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Desde a Segunda Guerra Mundial houve uma grande evolução no entendimento dos mecanismos envolvidos na fratura de materiais. A mecânica da fratura tem se mostrado essencial para melhorar a formulação desse entendimento por meio de estudos das propriedades mecânicas dos materiais [JANSSEN, 2005]. George Irwin foi o “Pai da Mecânica da Fratura” [Anon, 1999 apud POOK, 2010]. Desde então, estudos por meios da Mecânica da Fratura tem auxiliado no conhecimento do comportamento mecânico de materiais, como rodas ferroviárias, visando minimizar acidentes de componentes diversos quando em serviços.

Através dos princípios da Mecânica da fratura, podemos analisar o comportamento mecânico de materiais como aços fundidos e forjados. No atual mercado da indústria ferroviária predominam dois tipos de rodas, as rodas ferroviárias fundidas e as forjadas. Este capítulo aborda conceitos necessários ao desenvolvimento de procedimentos experimentais adotados para caracterizar e analisar as propriedades mecânicas e os micromecanismos de fratura de corpos-de-prova usinados de rodas ferroviárias tanto fundidas quanto forjadas.

2.1. Propriedades mecânicas dos metais

Os metais são materiais amplamente utilizados em diversos setores, como indústrias automobilísticas, náuticas, entre outras, devido a sua capacidade de executar determinadas funções, resistir a diversas condições, intempéries, como ao fogo e ainda não serem prejudiciais à saúde [MARTINS, 2008]. Alguns materiais, quando em serviço, estão sujeitos à ação de forças ou cargas. O comportamento mecânico desses materiais reflete a relação entre a resposta ou deformação a uma carga ou força que esteja sendo aplicada [CALLISTER, 2009].

Os metais são compostos de combinação de elementos metálicos com grande quantidade de elétrons livres, não ligados a qualquer átomo em particular. As propriedades dos materiais dependem da composição química, do processo de fabricação e da microestrutura. A composição,

a natureza das ligações, a estrutura cristalina e os defeitos influenciam na resistência mecânica e ductilidade dos materiais metálicos [IBRACON, 2007; ASKELAND, 2008].

As propriedades mecânicas dos materiais são verificadas por meio da realização de experimentos de laboratório que reproduzem o mais fielmente possível as condições de serviço [CALLISTER, 2009]. O conhecimento das propriedades mecânicas dos metais deve garantir, em sua utilização, confiabilidade e segurança e podem ser determinadas por meio de ensaios experimentais.

Ensaio mecânicos permitem a determinação de propriedades que se referem ao comportamento do material quando sob a ação de esforços externos que atuam sobre uma determinada área em um corpo [GARCIA, 2012].

A deformação elástica da maioria dos materiais metálicos é uma propriedade segundo a qual a deformação que ocorre em função da aplicação de tensão desaparece quando a tensão é retirada. Se a carga aplicada continuar, o material passa para a região de deslizamento de discordâncias, ou seja, o início da deformação plástica. Desse modo, uma deformação reversível de um material resultante de uma tensão aplicada é uma deformação elástica e uma deformação permanente quando a tensão é removida é uma deformação plástica. A Figura 2.1 (a) e (b) mostra os gráficos do comportamento tensão-deformação característico de um metal para os regimes elástico e plástico [ASKELAND, 2008; CALLISTER, 2009; GARCIA, 2012].

2.1.1. Propriedades obtidas no ensaio de tração

(a) Escoamento e Limite de Escoamento

Nos metais que sofrem a transição elastoplástica (deformação elástica para a plástica), o fenômeno do escoamento ocorre no ponto (P), ponto de escoamento ou limite de proporcionalidade, que pode ser definido como o ponto onde ocorre o afastamento inicial da linearidade na curva tensão-deformação apresentada na Figura 2.1 (a) [CALLISTER, 2006].

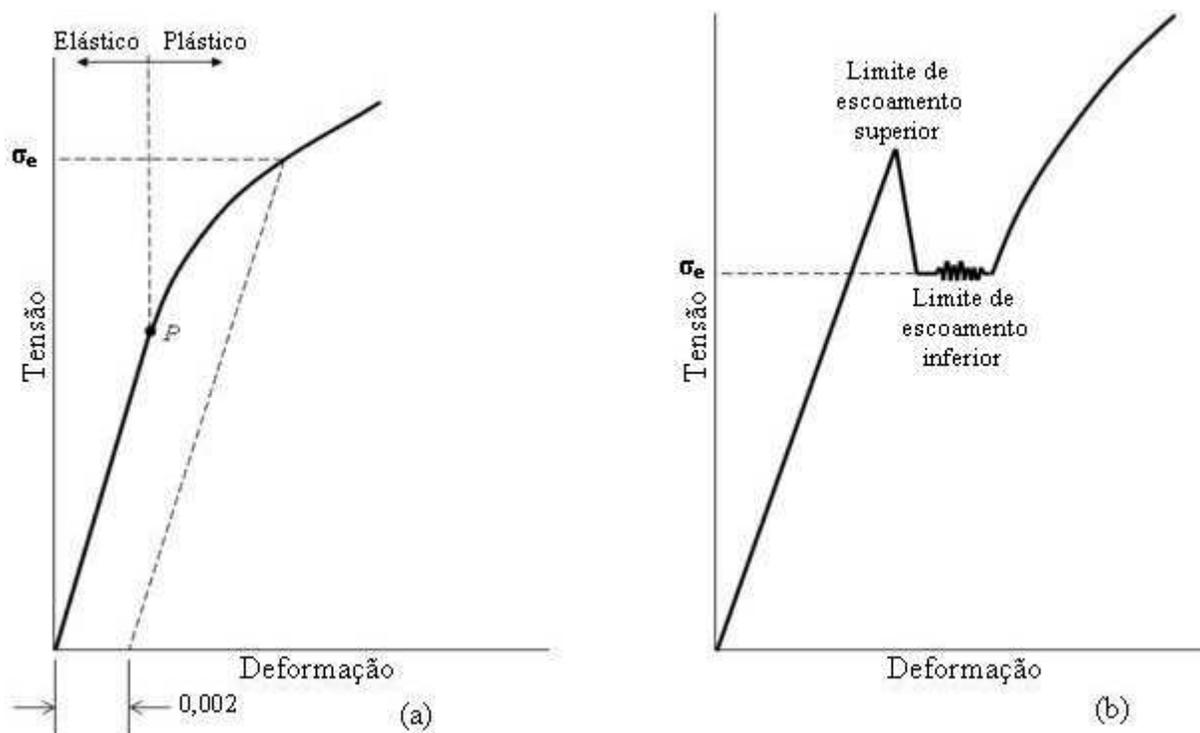


Figura 2.1 Curva tensão-deformação (a) região de deformação elástica e início da região de deformação plástica, limite de proporcionalidade P e a tensão limite de escoamento σ_e . (b) esquema representando o fenômeno do patamar de escoamento, encontrado em alguns aços [CALLISTER, 2009].

Askeland e Callister [Askeland, 2008 e Callister, 2009] definem escoamento como a tensão acima da qual a relação entre tensão e deformação deixa de ser linear e o limite de escoamento como o valor de tensão correspondente à interseção da reta paralela ao trecho inicial da curva tensão-deformação de engenharia. A deformação plástica tem seu início com uma diminuição real na tensão, depois, a deformação segue com um valor constante conhecido como limite de escoamento inferior, em seguida a tensão aumenta com o aumento da deformação como mostra a Figura 2.1 (b). A NBR 6892 [NBR 6892, 2002 apud Ferreira, 2009] define o Limite de escoamento (σ_e) ou (LE) como o quociente da carga de escoamento (F_e) pela área da seção inicial (S_0), de acordo com a equação 2.1.

$$\sigma_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (2.1)$$

(b) Limite de Resistência à Tração

De acordo com Askeland e Callister [Askeland, 2008 e Callister, 2009], o Limite de Resistência à Tração é o ponto máximo da curva tensão-deformação de engenharia, que corresponde à tensão máxima que pode ser suportada por uma estrutura sob tração. Se a tensão for mantida, o resultado será uma fratura.

Garcia [Garcia, 2012] define o Limite de Resistência à Tração como tensão máxima que o material suporta sem apresentar nenhum traço de fratura interna ou externa no corpo-de-prova. Após esse nível de tensão, o material iniciará o processo de fratura.

Segundo a NBR 6892 [NBR 6892, 2002 apud Ferreira, 2009], o Limite de resistência à tração (σ_t) ou (LR) é o quociente da carga máxima (F_m) pela área da seção transversal inicial do corpo-de-prova (S_0), conforme equação 2.2.

$$\sigma_t = \frac{F_m}{S_0} \quad (2.2)$$

(c) Ductilidade

De acordo com Callister e Martins [Martins, 2008; Callister, 2009], a ductilidade representa o grau de deformação plástica suportado por um material sem fraturar. A capacidade de absorção de energia sem que haja fratura, está intimamente ligada a propriedade de um material de se deixar deformar sem perder resistência significativa. Um material com deformação plástica pequena ou nenhuma deformação plástica antes da fratura é chamado frágil.

A ductilidade pode ser expressa quantitativamente como um *alongamento específico até a fratura* (AL%) ou uma *redução na área* (RA%) (equações 2.3 e 2.4) [ASKELAND, 2008; FERREIRA, 2009].

$$AL\% = \left(\frac{l_f - l_0}{l_0}\right) \times 100 \quad (2.3)$$

Na qual, l_f representa o comprimento no momento da fratura e o l_0 comprimento útil original.

$$RA\% = \left(\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \times 100 \quad (2.4)$$

Na qual, A_0 representa a área original da seção reta e A_f a área da seção reta no ponto de fratura.

Podemos observar na Figura 2.2 o comportamento tensão-deformação em tração para materiais dúcteis e frágeis e na Tabela 2.1 alguns valores típicos para (limites de escoamento, de resistência à tração e ductilidade) as propriedades mecânicas em tração de ligas metálicas à temperatura ambiente.

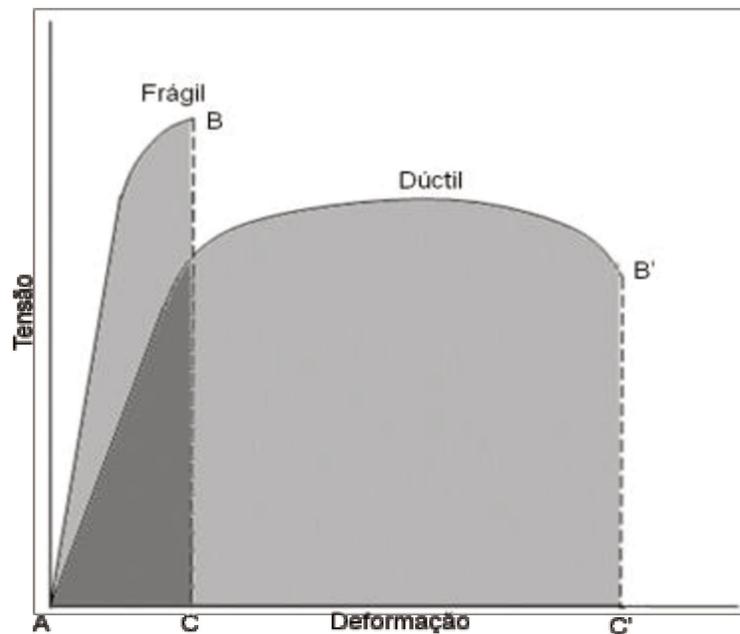


Figura 2.2 Comportamento tensão-deformação em tração para materiais frágeis e materiais dúcteis carregados até a fratura [Callister, 2009].

Tabela 2.1 Propriedades Mecânicas (em tração) para Ligas Metálicas à Temperatura Ambiente [CALLISTER, 2009].

Material	Limite de Escoamento		Limite de Resistência à Tração		Ductilidade, A1%
	<i>MPa</i>	<i>Ksi</i>	<i>MPa</i>	<i>ksi</i>	[em 50 mm(2 pol.)]
Molibdênio	565	82	655	95	35
Titânio	450	65	520	75	25
Aço (1020)	180	26	380	55	25
Níquel	138	20	480	70	40
Ferro	130	19	262	38	45
Latão (70 Cu-30 Zn)	75	11	300	44	68
Cobre	69	10	200	29	45
Alumínio	35	5	90	13	40

(d) Resiliência

Observou-se em Callister e Garcia [Callister, 2009; Garcia, 2012] que resiliência é a capacidade de absorção de energia de um material quando deformado elasticamente e recuperação da energia, quando retirada a carga. Materiais resilientes possuem limites de escoamento elevados e módulos de elasticidade pequenos.

De acordo com a NBR 6892 [NBR 6892, 2002 apud Ferreira, 2009], resiliência é a habilidade de um material absorver energia quando deformado elasticamente. É normalmente medido pelo módulo de resiliência, que é a energia por unidade de volume necessária para tracionar o material da tensão zero até o limite de escoamento (σ_e). Para o ensaio de tração, o módulo de resiliência é dado pela equação 2.5.

Observou-se ainda em Callister e Garcia [CALLISTER, 2009; GARCIA, 2012] que em termos computacionais, o módulo de resiliência para um corpo de prova submetido a um ensaio de tração uniaxial é tão somente a área sob a curva tensão – deformação de engenharia, computada até o escoamento como mostra a Figura 2.3.

$$U_e = \frac{\sigma_e^2}{2E} \quad (2.5)$$

Na qual: E é o módulo de elasticidade ou módulo de Young.

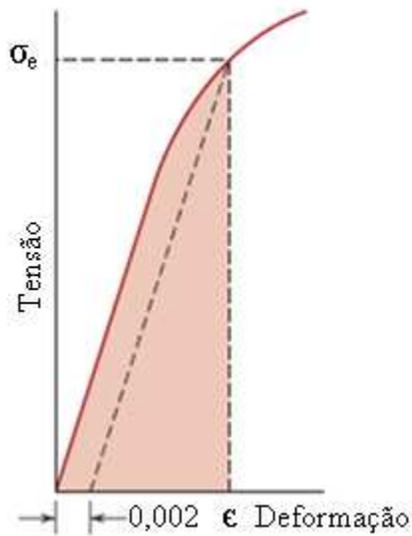


Figura 2.3 Representação esquemática mostrando como o módulo de resiliência (que corresponde a área sombreada) é determinado a partir do comportamento tensão-deformação em tração de um material [CALLISTER, 2009].

e) Tenacidade

De acordo com Callister [Callister, 2009], a tenacidade é um termo mecânico usado em vários contextos; genericamente, representa uma medida da habilidade de um material em absorver energia até sua fratura. Para Askeland e Garcia [Askeland, 2008; Garcia, 2012], tenacidade de um material é a capacidade de resistir à propagação da fratura quando uma carga é aplicada e reflete a energia total necessária para provocar a fratura do material, desde sua condição de tensão nula.

2.1.2. Tenacidade à fratura

Os materiais sólidos possuem baixa resistência à fratura em relação a sua capacidade teórica, devido à deformação plástica, o que pode causar danos irreversíveis ao material [HERTZBERG, 1996]. Além disso, os materiais contêm defeitos que estão na origem da microestrutura ou introduzidos durante o processo de fabricação. Outros microconstituintes,

como inclusões, partículas frágeis da segunda fase, e filmes de contorno de grãos, podem levar a formação de fratura se o nível de tensão aplicada excede um nível crítico [HERTZBERG, 1996; FERREIRA, 2009].

Segundo Dieter [Dieter, 1988], fratura é a separação, ou fragmentação, de um corpo sólido em duas ou mais partes sob a ação de tensão. Para Callister [Callister, 2009], uma fratura simples consiste na separação de um corpo em dois ou mais pedaços em resposta a uma tensão imposta.

A ASTM 1823 [ASTM 1823, 2010] define tenacidade à fratura como um termo genérico para medida da resistência a extensão de uma fratura. Em Callister [Callister, 2009] tenacidade à fratura é uma propriedade indicativa da resistência de um material à fratura quando uma trinca está presente. Para Askeland [Askeland, 2008] tenacidade à fratura mede a capacidade de uma estrutura com trincas suportar uma tensão aplicada.

De acordo com Ferreira [Ferreira, 2009], a tenacidade de um material pode ser avaliada por meio de diversos parâmetros, sendo que os principais são: a energia absorvida em um ensaio de impacto, a tenacidade à fratura em tensão plana (K_C), a tenacidade à fratura em deformação plana (K_{IC}), o deslocamento de abertura da ponta da trinca crítico ($CTOD_c$) e o parâmetro crítico em termos da integral J (J_{IC}).

(a) Tenacidade à fratura em deformação plana (K_{IC})

A ASTM 399 [ASTM 399, 2008] define tenacidade à fratura em deformação plana, K_{IC} , como a resistência a extensão da fratura sob as condições de tensão plana na ponta da trinca. O fator de intensidade de tensão, K_{IC} , é medido usando um procedimento operacional que prevê a medição da resistência à extensão de fratura no início (2% ou menos) da extensão da fratura.

A tenacidade à fratura em deformação plana K_{IC} é uma propriedade fundamental dos materiais que depende de muitos fatores, dos quais, os de maior influência são: a temperatura, a taxa de deformação e a microestrutura [CALLISTER, 2009].

Observou-se ainda em Callister [Callister, 2006] que a magnitude de K_{IC} diminui com o aumento da taxa de deformação, diminuição da temperatura e melhoria no limite de escoamento causado pela formação de solução sólida ou por adições de dispersão ou por encruamento. A Tabela 2.2 mostra valores da variação do limite de escoamento e tenacidade à fratura em deformação plana para materiais metálicos.

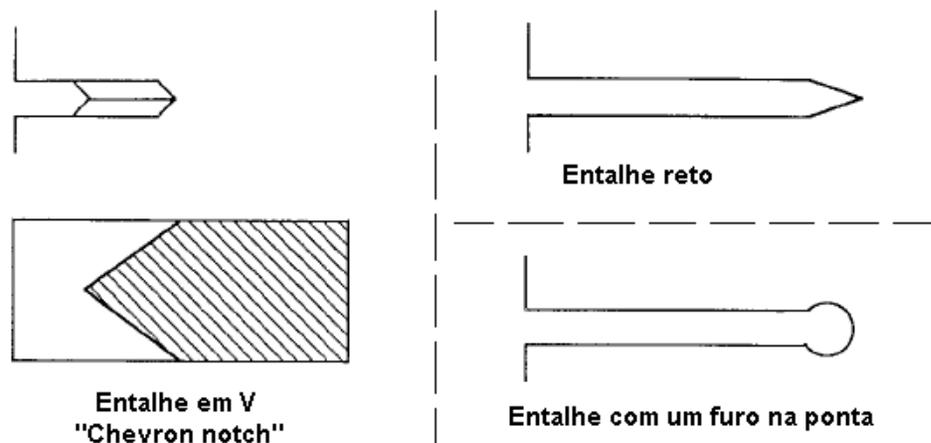
Tabela 2.2 Valores do limite de escoamento e tenacidade à fratura em deformação plana para materiais metálicos.

<i>Material</i>	<i>Limite de Escoamento</i>		<i>K_{IC}</i>	
	<i>MPa</i>	<i>ksi</i>	<i>MPa√m</i>	<i>ksi√pol.</i>
Liga de Alumínio ^a (7075-T651)	495	72	24	22
Liga de Alumínio ^a (2024-T3)	345	50	44	40
Liga de Titânio ^a (Ti-6Al-4V)	910	132	55	50
Aço-liga ^a (4340 revenido a 260 ^o C)	1640	238	50	45,8
Aço-liga ^a (4340 revenido a 425 ^o C)	1420	206	87,4	80

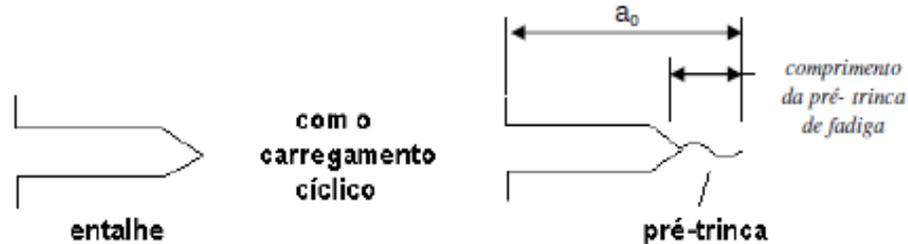
^a**Fonte:** Reimpresso sob permissão, advanced Materials and Processes, ASM International, 1990. [CALLISTER, 2009]

O ensaio de K_{IC} , como outros ensaios de tenacidade à fratura, é realizado em corpos de prova com uma trinca aguda (obtida por fadiga na raiz de um entalhe previamente usinado) com carregamento monotônico e taxa de aumento do fator de intensidade de tensão entre 0,5 e 3,0 $MPa^{1/2}/s$ durante a deformação elástica inicial [FERREIRA, 2009]. A Figura 2.4 mostra um esquema das condições de carregamento para a obtenção da pré-trinca de fadiga.

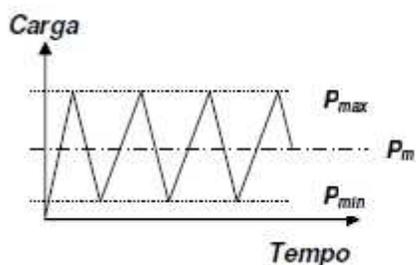
Tanto a tenacidade à fratura em deformação plana (K_{IC}) quanto os ensaios de impacto como o ensaio Charpy determinam as propriedades de fratura dos materiais. O ensaio de impacto Charpy determina, por exemplo, se o material experimenta uma transição de dúctil para frágil que ocorre com as variações da temperatura e queda da energia de impacto durante o experimento [CALLISTER, 2009]. A Figura 2.5 mostra essa transição para um aço.



(a) Geometria da ponta do entalhe para a nucleação da pré-trinca de fadiga [ASTM E 1820-01].



(b) Esquema da pré-trinca. Comprimento da trinca inicial a_0 : 0,45 a 0,7 de W (largura do corpo de prova) para os ensaios J e CTOD e de 0,45 a 0,55 de W para o ensaio KIC. Comprimento da pré-trinca de fadiga: no mínimo 1,3 mm [ASTM E 1820-01].



$$(K_f)_{\max} \leq 0,6 \cdot K_{IC}$$

$$-1 \leq R = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} = \frac{(K_f)_{\min}}{(K_f)_{\max}} < +0,1$$

(c) Condições do carregamento cíclico para a obtenção da pré-trinca de fadiga [ASTM E 399-08].

Figura 2.4 Obtenção da pré-trinca de fadiga nos ensaios de tenacidade à fratura [FERREIRA, 2009].

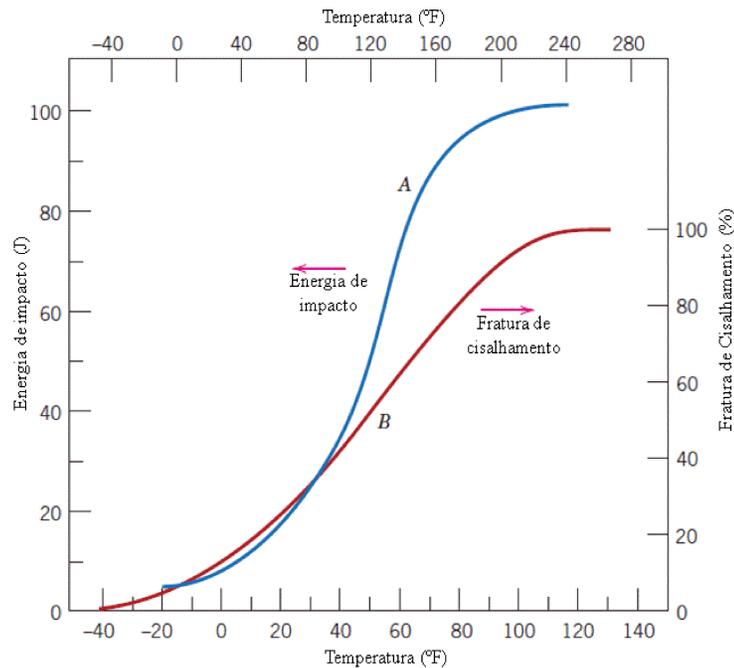


Figura 2.5 Dependência da energia de impacto Charpy com entalhe em “V” (curva A) e do percentual de fratura de cisalhamento (curva B) em relação à temperatura para um aço A283. (Reimpresso do Welding Journal. Usado com permissão da American Welding Society.) [CALLISTER, 2009].

(b) Tenacidade à fratura em condições elasto-plásticas ($CTOD_c$ e J_{IC})

A mecânica da fratura elástica linear é aplicada a materiais que possuem baixa tenacidade, o que representa uma séria restrição. Por esse motivo, foram desenvolvidos critérios de prevenção de fratura em situações de escoamento em pequena e grande escala, com isso surgiu a mecânica de fratura com escoamento ou mecânica de fratura elasto-plástica [ASM, 2000; FERREIRA, 2009].

Observou-se ainda em ASM e Ferreira [ASM, 2000; Ferreira, 2009] que foi estabelecido que também existe um único campo de tensão e deformação na ponta da trinca quando a fratura ocorre com escoamento em grande escala e que este campo pode ser caracterizado pelo deslocamento de abertura da ponta da trinca ($CTOD$) na interface com a zona plástica, criando, com isso, a mecânica de fratura com escoamento. A Figura 2.6 apresenta uma representação esquemática dos regimes de comportamento na fratura do campo de aplicação da mecânica de

fratura elasto-plástica e a Figura 2.7 mostra várias definições físicas do deslocamento de abertura da ponta da trinca.

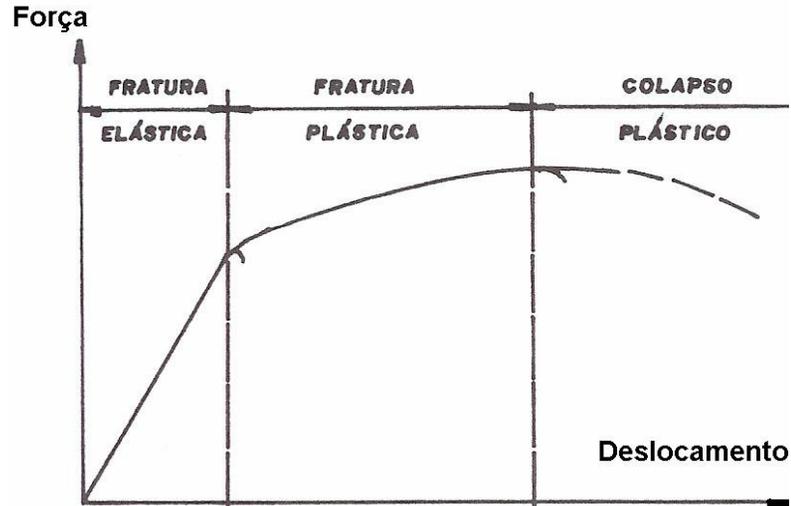


Figura 2.6 Representação esquemática dos regimes de comportamento na fratura, mostrando os campos de aplicação da mecânica de fratura elástica linear e elasto-plástica [FERREIRA, 2009].

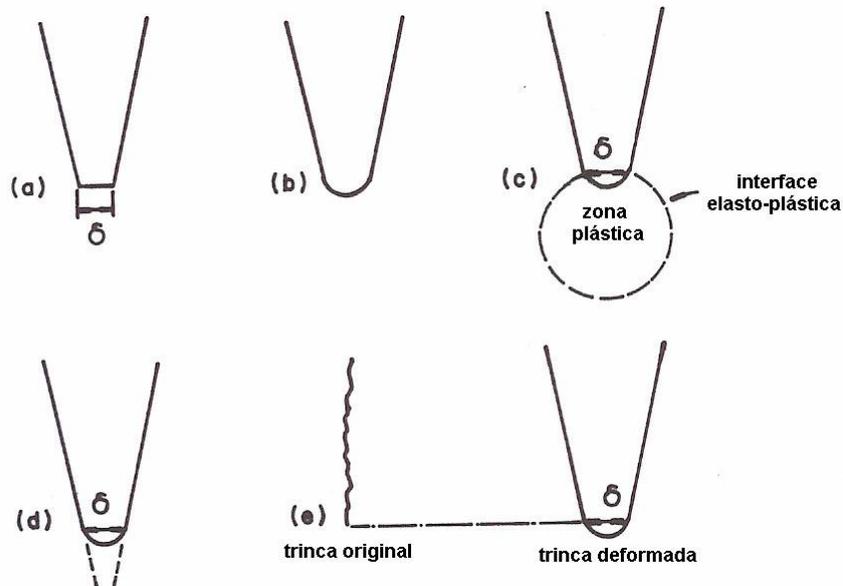


Figura 2.7 Várias definições físicas do CTOD: a) primeira idealização; b) forma mais realista; c) interface elasto-plástica; d) CTOD tangente; e) CTOD na posição da ponta da trinca original; f) CTOD formando um ângulo de 90° com a ponta da trinca [FERREIRA, 2009].

Observou-se também em Hertzberg, ASM e Ferreira [Hertzberg, 1996; ASM, 2000; Ferreira, 2009] que o ensaio de tenacidade à fratura para a determinação do CTOD crítico do movimento da ponta da trinca pode ser identificado na região entre a pré-trinca de fadiga e o posterior crescimento da trinca instável ou estável, sendo que esta região é conhecida por zona esticada (“stretched zone”), como mostra a Figura 2.8. Esta região, na superfície de fratura, corresponde então ao arredondamento da ponta da trinca e o deslocamento medido em uma posição que forma um triângulo retângulo com a ponta da trinca, proposto por Rice [Rice apud Ferreira, 2009] e ilustrado na Figura 2.8.f.

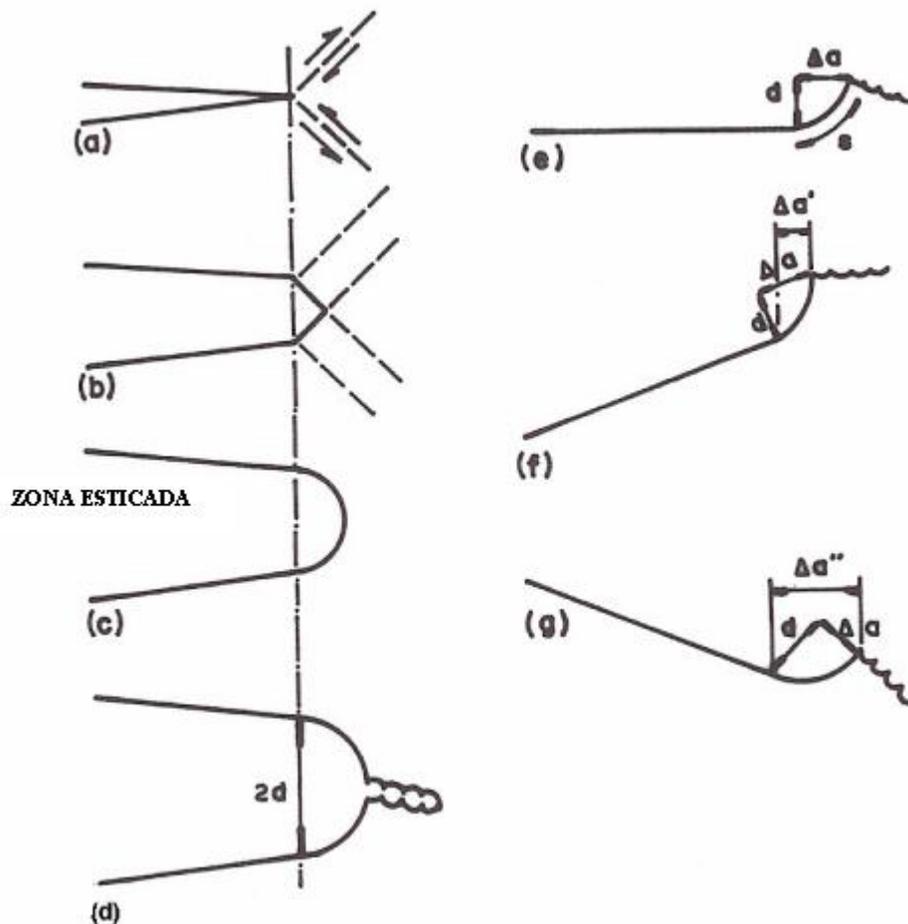


Figura 2.8 Formação e definições da zona esticada. a) e d) formação da zona esticada com o aumento da carga; e) definições dos parâmetros da zona esticada; f) e g) efeito do ângulo de observação da amostra sobre as dimensões da zona esticada [FERREIRA, 2009].

O CTOD relaciona-se com G_I (força de extensão da trinca) e com K_I de acordo com a Equação (2.6) na qual λ é um fator que depende do local exato onde CTOD é determinado, ou seja, do local que está sendo considerado como ponta da trinca.

$$CTOD = \frac{G_I}{\lambda \sigma_e} = \frac{K_I^2}{\lambda E \sigma_e} (1 - \nu) \quad (2.6)$$

Na qual λ é um fator que depende do local exato onde CTOD é determinado, ou seja, o local que está sendo considerado como ponta da trinca. De acordo com Hertzberg, ASM e Ferreira [Hertzberg, 1996; ASM, 2000; Ferreira, 2009] em mecânica da fratura elástica linear o critério de fratura estabelece que a trinca começa a se propagar quando o fator de intensidade de tensão (K_I) atinge um valor crítico que define a tenacidade à fratura em deformação plana (K_{IC}). A Equação (2.6) mostra que quando K_I atinge o valor crítico K_{IC} , o CTOD também atinge um valor crítico, o que faz com que o CTOD seja também um critério de fratura. A medição experimental do CTOD é praticamente impossível; o que se faz, nos ensaios de tenacidade à fratura, é medir o valor do CTOD - deslocamento de abertura da boca da trinca e correlacioná-lo com o CTOD - deslocamento de abertura da ponta da trinca.

2.1.3. Propriedades de fadiga

O fenômeno da fadiga é conceituado pela ASTM E 1823 [ASTM E 1823, 2010], como o processo progressivo e localizado de modificações estruturais permanentes ocorridas em um material submetido a condições que produzam tensões e deformações cíclicas em um ou mais pontos do material e que possam culminar em trincas ou fratura após certo número de ciclos.

Atribui-se a WÖHLER [WÖHLER, 1860 apud Carnio, 2009], o início do desenvolvimento dos estudos sobre o comportamento à fadiga dos materiais. Seus estudos incluíram testes em grande escala para uma variedade de componentes estruturais usando máquinas por ele desenvolvidas para solicitações de flexão, torção e axial.

De acordo com Garcia e Shigley's [Garcia, 2012; Shigley's, 2006], os materiais metálicos, quando submetidos a tensões flutuantes ou repetitivas, isto é, quando sob a ação de esforços cíclicos, rompem-se a tensões muito inferiores àquelas determinadas nos ensaios estáticos de tração, compressão e torção. A ruptura que ocorre nessas condições dinâmicas de aplicação de esforços é conhecida como ruptura por fadiga. Uma falha por fadiga tem uma aparência semelhante a uma ruptura frágil e as superfícies de fratura são superfícies planas e perpendiculares ao eixo de tensão.

Segundo Callister e Chan [Callister, 2009; Chan, 2010], a fadiga é uma forma de falha que ocorre em estruturas sujeitas a tensões dinâmicas e oscilantes. Ela ocorre normalmente após um longo período de tensões ou ciclos de deformação que se repetem. O processo da fadiga é a maior causa de falha em metais contabilizando aproximadamente 90% de todas as falhas metálicas.

Em Ferreira [Ferreira, 2009], a fadiga é o processo de “alteração estrutural” permanente, localizada e progressiva, que ocorre em um material solicitado com tensões e deformações cíclicas e que pode culminar em trincas ou fratura.

Para compreender os fenômenos de limites em fadiga é importante entender, que o início de uma fratura por fadiga é na realidade uma fase de extensão microestrutural da fratura a uma taxa de crescimento que diminui com o aumento do tamanho da trinca [ZERBST, 2005].

Para Dieter [Dieter, 1988], a fadiga resulta em uma fratura aparentemente frágil, sem deformação grosseira na fratura. Em uma escala macroscópica a superfície fraturada é geralmente normal à direção da tensão de tração principal.

Observou-se ainda em Dieter [Dieter, 1988] que três fatores básicos são necessários para o surgimento de falhas por fadiga. São eles (1) a tensão interna resistente à tração máxima de valor suficientemente alto, (2) uma grande variação ou oscilação na tensão aplicada, e (3) um grande número de ciclos aplicados.

De acordo com Zerbst [Zerbst, 2005], componentes ferroviários, como rodas, são geralmente projetados para uma longa vida baseada no limite de resistência a fadiga do material, teoria também introduzida por Wöhler. Enquanto esta filosofia é suficiente no geral, um número comparativamente pequeno de falhas ocorre na prática despertando o interesse cada vez maior de estudos sobre fadiga em rodas ferroviárias. A Figura (2.9) mostra os ciclos típicos de tensão por fadiga.

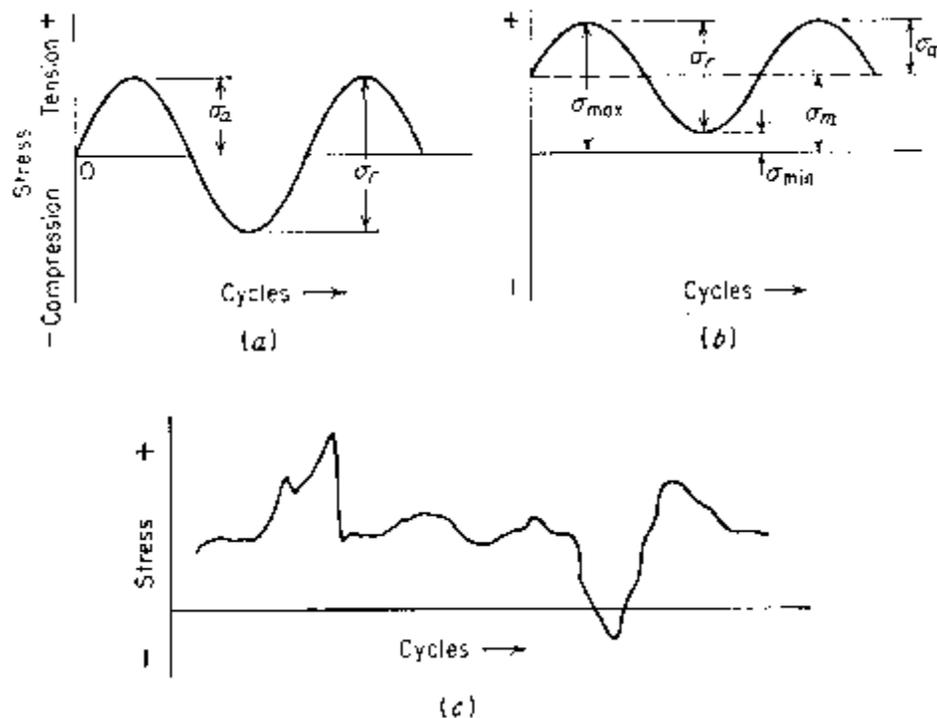


Figura 2.9 Ciclos típicos de tensão por fadiga. (a) tensão invertida; (b) tensão repetida; (c) ciclo de tensão irregular segundo [DIETER, 1988].

De acordo com Hertzberg, ASM e Ferreira [Hertzberg, 1996; ASM, 2000; Ferreira, 2009], o estudo da fadiga pode ser dividido em três partes: Fadiga em alto ciclo, Fadiga em baixo ciclo e Propagação de trinca por fadiga.

- (a) Propriedades de fadiga em alto ciclo

Nos últimos anos a fadiga de alto ciclo ou fadiga controlada por tensões cíclicas de aços de alta resistência tornou-se uma questão de crescente preocupação devido a fratura ocorrer na sub-superfície do material em regime de longa vida, ou seja, alto ciclo compreendido entre $10^7 - 10^8$ [NAKAMURA, 2010].

As principais características de componentes mecânicos quando solicitados ciclicamente são dadas pelas equações (2.7) e (2.8).

$$\sigma_N < \sigma_e \quad 2.7$$

$$N_f > 10^3 \text{ ou } 10^4 \text{ ciclos} \quad 2.8$$

Onde σ_N é a tensão nominal (tensão aplicada no componente mecânico ou espécime), σ_e é o limite de escoamento do material do componente mecânico ou espécime e N_f é a vida em fadiga (número de ciclos até a fratura).

As Curvas S-N também conhecidas como Curvas de Wöhler (curvas da tensão em função do número de ciclos até a fratura) são as curvas características da fadiga de alto ciclo [POLÁK, 2007; FERREIRA, 2009]. A Figura 2.10 apresenta gráficos de curvas típicas S-N de dois tipos de materiais, onde (σ) é a amplitude de tensão em função do logaritmo do número de ciclos até a falha por fadiga.

(b) Propriedades de fadiga em baixo ciclo

Na fadiga em baixo ciclo ou fadiga controlada por deformações cíclicas. Nesse enfoque os níveis da tensão nominal são superiores ao limite de escoamento e o número de ciclos até a fratura inferior a 10^3 , como mostra a equação (2.10).

$$\sigma_N > \sigma_e \quad 2.9$$

$$N_f < 10^3 \text{ ciclos} \quad 2.10$$

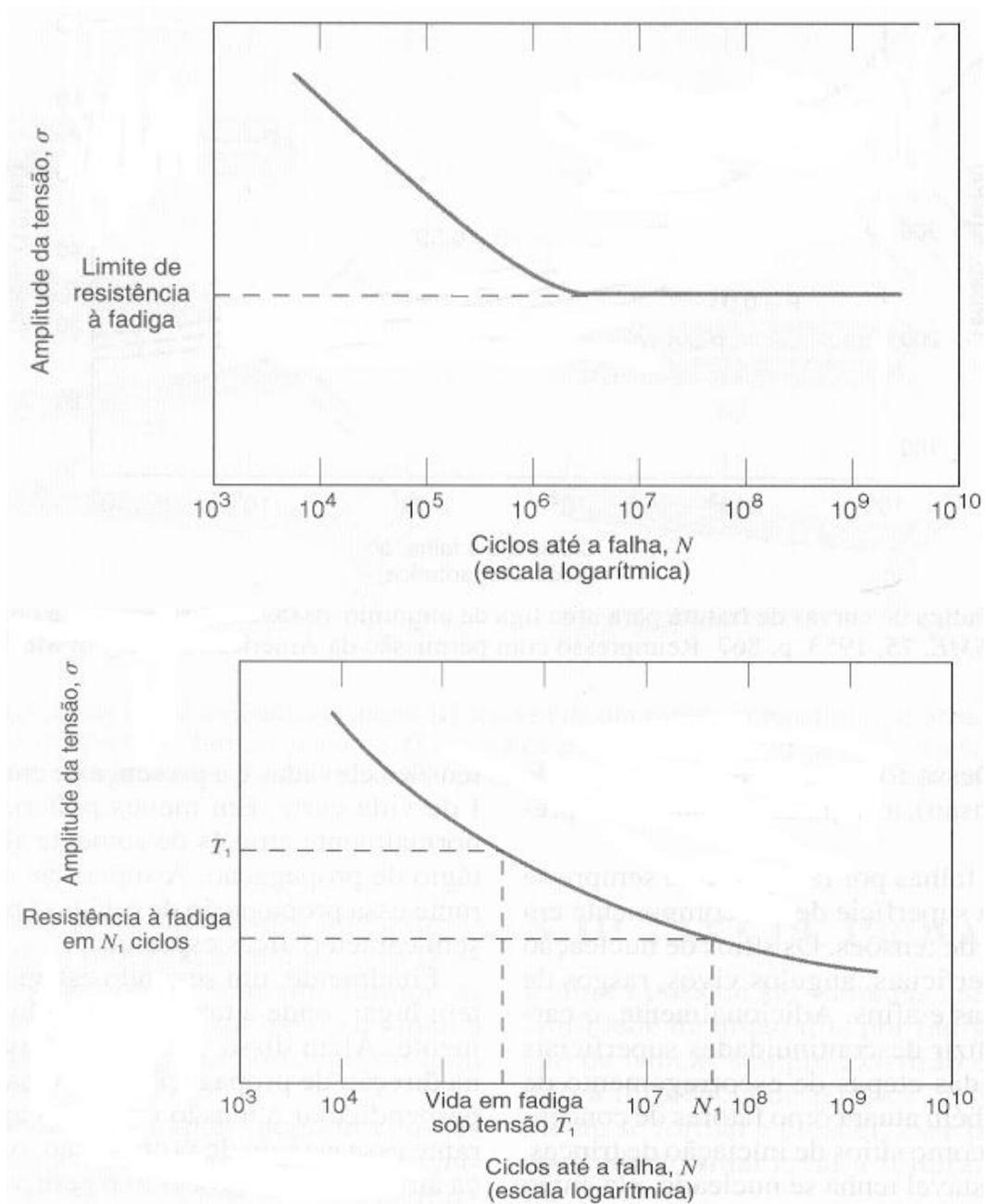


Figura 2.10 Curvas S-N (a) material que apresenta um limite de resistência à fadiga e (b) um material que não apresenta limite de resistência à fadiga [CALLISTER, 2009].

(c) Propriedades de propagação de trinca por fadiga

Observou-se em Hertzberg, ASM e Ferreira [Hertzberg, 1996; ASM, 2000; Ferreira, 2009] que a propagação de trinca por fadiga tem por base a metodologia da Mecânica da Fratura. No estudo de propagação de trincas por fadiga é de fundamental importância determinar a relação entre a taxa de propagação da trinca em função das tensões cíclicas, nas quais o corpo-de-prova está sendo solicitado, e do comprimento da trinca de fadiga.

A curva característica, na propagação de trinca por fadiga, é a taxa de propagação da trinca por fadiga (da/dN) em função da variação do fator de intensidade de tensão (ΔK). As Figuras 2.11 e 2.12 mostram o gráfico do comprimento da trinca em função do número de ciclos e o diagrama típico $da/dN - \Delta K$ em coordenadas logarítmicas.

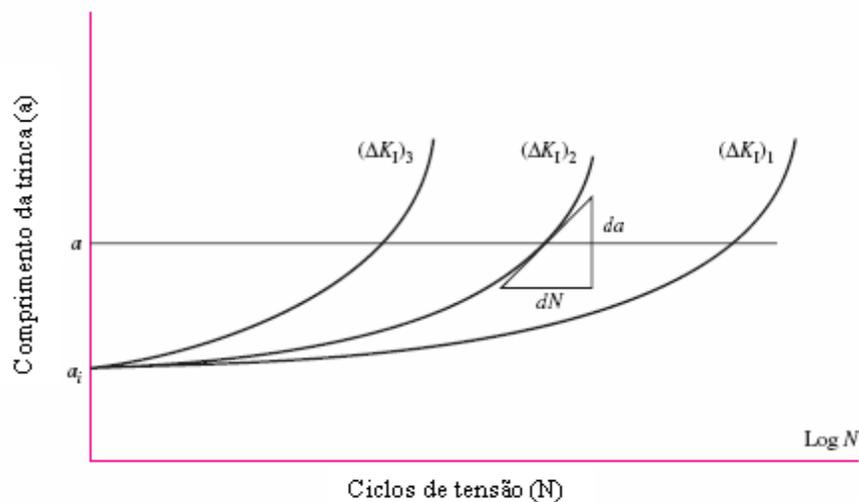


Figura 2.11 Comprimento da trinca em função do número de ciclos, para três níveis de tensões, de acordo com SHINGLEY [SHINGLEY, 2004 apud CARNIO, 2009].

Observa-se na Figura 2.11 que, à medida que a trinca cresce, as taxas de propagação aumentam rapidamente, encurtando a vida do componente. Desse modo, conclui-se que a maior parte dos ciclos de carregamento na fase de propagação da trinca por fadiga é consumida durante a fase inicial da propagação da trinca.

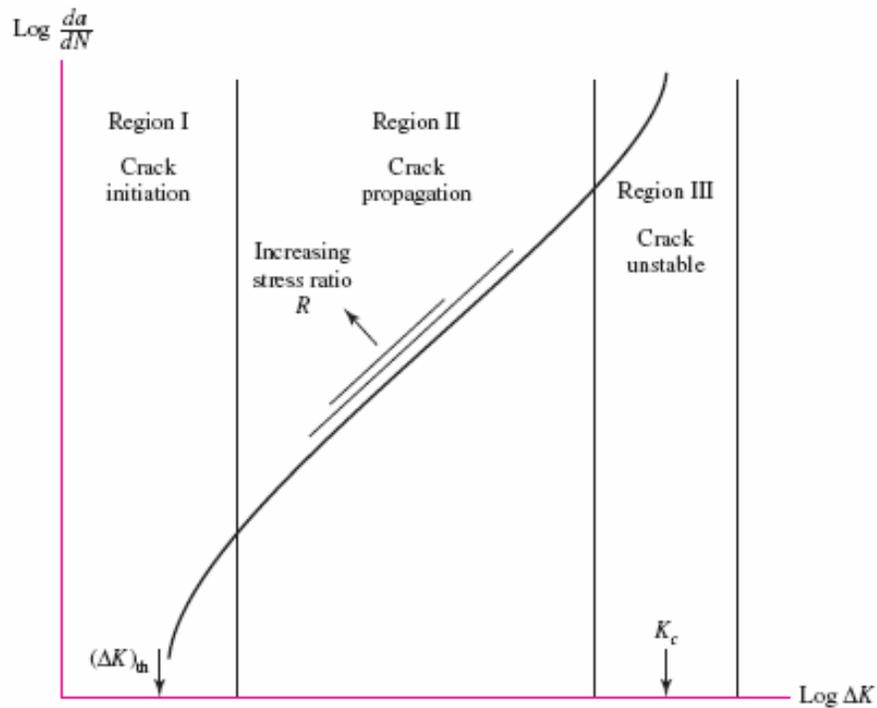


Figura 2.12 Diagrama típico $da/dN - \Delta K$, conforme SHINGLEY [SHINGLEY, 2004 apud CARNIO, 2009].

Paris [Paris, 1964 apud Ferreira, 2009] postulou que o fator de intensidade de tensão K , que depende do comprimento da trinca e do nível de tensão, conforme a equação 2.11, controla o processo de propagação da trinca por fadiga. Paris [Paris, 1964 apud Ferreira, 2009] propôs a Equação 2.12 para descrever a propagação da trinca por fadiga.

$$K_I = y\sigma\sqrt{\pi a}$$

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^m \quad 2.12$$

nas quais K_I é o fator de intensidade de tensão; y é um fator que depende da geometria do corpo-de-prova e da trinca; a é o comprimento da trinca; $\Delta K = (K_{max} - K_{min})$ - fatores de intensidade de tensão associados ao carregamento cíclico; A e m são funções que dependem do material, meio ambiente, frequência, temperatura e razão de carga (R) ($R = K_{min}/K_{max}$). Na grande

maioria dos metais e ligas metálicas a taxa de propagação da trinca por fadiga correlaciona-se com o fator de intensidade de tensão.

2.1.4. Distribuição de Weibull

A Distribuição de Weibull é utilizada para interpretação dos ensaios de durabilidade por fadiga para representar o comportamento de uma população com confiabilidade prefixada através da aplicação de um tratamento estatístico baseado na função de distribuição de probabilidade de Weibull a determinado número de amostras ensaiadas. A Distribuição de Weibull é aplicada, na interpretação de ensaios de durabilidade por fadiga, para diferentes tipos de componentes como materiais de uso dentário, aeroespacial, rodas ferroviárias, entre outros [NBR 6742, 1987; SCHIJVE, 2005; BEDI, 2009; QUINN, 2010; SHIRANI, 2011].

As condições gerais, ainda segundo a NBR 6742 [NBR 6742, 1987], que tratam do relacionamento entre as partes que não falharam “p” e a durabilidade por fadiga “N” para estas partes sobreviventes são expressas pela equação 2.13:

$$p = e^{-\left[\frac{N}{\theta}\right]^b} \quad 2.13$$

Na qual: θ é a durabilidade característica, b é a inclinação de Weibull ou coeficiente angular e p é criteriorizado como um teor percentual das partes que não falharam. θ e b são constantes.

Se chamarmos de “F” o teor das partes que não falharam em “N” ciclos, tem-se:

$$F = 1 - p \quad 2.14$$

Se substituirmos 2.14 na equação 2.13, obtem-se a probabilidade de uma falha em “N” ciclos ou menos, conhecida como Função de Distribuição de Falhas expressa pela equação 2.15.

$$F = 1 - e^{-\left[\frac{N}{\theta}\right]^b} \quad 2.15$$

Tomando os logaritmos naturais e fazendo as manipulações necessárias, chega-se à expressão 2.16:

$$\ln \left[\ln \frac{1}{1-F} \right] = b \cdot \ln N - b \cdot \ln \theta \quad 2.16$$

que indica uma relação linear entre \ln (durabilidade) e $\ln \left[\ln \frac{1}{1-F} \right]$ e a distribuição de Weibull se torna uma linha reta de inclinação b .

Desse modo, de acordo com a NBR 6742 [NBR 6742, 1987], um papel de coordenadas especiais, chamado Papel Probabilístico de Weibull (PPW), permite a representação gráfica da percentagem de falhas em função da durabilidade. Quando $N = \theta$ na equação 2.15, obtém-se um percentual de falhas correspondente, igual a 0,632. Então, a vida característica θ representa o número de ciclos de vida para os quais 63,2% de todas as amostras falharão.

2.2. Fundição de metais

Fundição de metais é, por definição, qualquer processo de fusão de metais e vazamento dos mesmos em moldes, com a finalidade de produzir formas sólidas requeridas [MARIOTTO, 1973]. Um aço fundido é aquele que é geralmente vazado em moldes de areia ou metálicos, onde adquire a forma exata da cavidade do molde. Para peças fundidas, os moldes definem as formas antes de operações de usinagem [CHIAVERINI, 2008].

2.2.1. Processos de fundição

No processo de fundição, um material sólido é primeiramente fundido, aquecido em temperatura apropriada, e algumas vezes tratado para modificar sua composição química [DEGARMO, 1997]. O material fundido, geralmente metal, é então vazado dentro de uma cavidade ou molde de uma forma desejada. A resistência a tensões admissíveis pode ser otimizada, propriedades direcionais podem ser controladas e a aparência agradável pode ser produzida [DEGARMO, 1997].

2.2.2. Processo de fundição de rodas ferroviárias

a – Fabricação do aço

O processo de fabricação das rodas ferroviárias fundidas inicia com a produção do aço líquido, a sucata selecionada é fundida, em forno elétrico a arco trifásico em temperatura de aproximadamente 1700° C. Durante esse processo é realizado controle da composição química do aço com um espectrômetro de emissão ótica. Após o controle da composição química, o aço líquido é vazado em uma panela refratária [ALVES, 2000; AAR M – 107, 2009; PADOVANI, 2011]. A Figura 2.13 mostra o vazamento do aço líquido do forno elétrico para a panela após a fusão da sucata.



Figura 2.13 Momento do vazamento do aço líquido do forno para a panela. [GALERIA DE FOTOS DA AMSTED MAXION, 2011].

b – Fundição

Nessa etapa, a panela contendo o aço líquido é colocada dentro de uma estação ou tanque, de onde será processado o vazamento para os moldes [ALVES, 2000]. O aço líquido é vazado em moldes de grafite previamente usinados de acordo com o perfil de cada roda. A próxima etapa é a abertura do molde superior para em seguida a roda ser desmoldada [PADOVANI, 2011].

c – Tratamento térmico

Após o desmolde, as rodas são colocadas em um túnel para resfriamento controlado até a temperatura de corte dos massalotes que são realizados por oxi-gás (acetileno ou gás liquefeito de petróleo). Após o corte dos massalotes, as rodas são tratadas termicamente em temperatura acima de 800° C, em seguida elas passam por um resfriamento brusco com água em temperatura ambiente (25° a 35° C) somente na pista de rolamento. Após o resfriamento brusco, as rodas entram no forno de revenimento para consequente alívio de tensões [ALVES, 2000 e PADOVANI, 2011]. A Figura 2.14 mostra uma roda saindo do forno após tratamento térmico. De acordo com Seo [Seo, 2009] no processo de fabricação de rodas ferroviárias, o tratamento térmico é realizado para reduzir a taxa de desgaste aumentando a dureza da superfície das rodas.



Figura 2.14 Roda fundida saindo do forno. [GALERIA DE FOTOS DA AMSTED MAXION, 2011].

d – Usinagem da roda

Nesta etapa, as rodas são decapadas (jateadas com granalha, esmerilhadas e novamente jateadas - shot peening). Após serem decapadas, de acordo com as recomendações da AAR- M 107, as rodas são inspecionadas por ensaios de partículas magnéticas e ultrassom. Em seguida, o furo do cubo é usinado para as medidas finais de montagem [ALVES, 2000; AAR- M 107, 2009 e PADOVANI, 2011].

e – Inspeção Final

Após a usinagem e para avaliar o tratamento térmico, as rodas são inspecionadas por ensaios destrutivos por corte de serra e ensaios de dureza, resistência à tração e análise metalográfica antes do embarque [ALVES, 2000 e PADOVANI, 2011].

2.3. Forjamento de metais

A norma ASTM A 788 [ASTM A 788, 2011] define como aço forjado um produto de uma substancial operação de compressão plástica, que consolida o material e produz a forma desejada. O trabalho plástico pode ser realizado por uma prensa, um martelo, uma máquina de forjamento que deve deformar o material até produzir a essencial estrutura forjada. Para Dieter e Helman [Dieter, 1988; Helman, 2005], o forjamento de um metal, é a mais antiga operação de conformação mecânica que consiste na deformação do metal por martelamento ou prensagem. É uma atividade dos tempos bíblicos e somente no início da Revolução Industrial surgiram às primeiras máquinas para substituir o braço dos ferreiros. Atualmente, a grande variedade de máquinas é capaz de fabricar desde um pequeno parafuso de rotor de turbina até uma asa inteira de um avião.

2.3.1. Processos de forjamento

Durante o processo de forjamento são utilizadas peças chamadas de matrizes que entram em contato com o metal durante o forjamento e geralmente são de aço-ferramenta [HELMAN, 2005]. Desse modo, a operação de forjamento é classificada em matrizes abertas e fechadas. No forjamento em matrizes abertas a geometria das matrizes é bem simples e ocorre restrição ao movimento lateral do metal. Esse tipo de forjamento é usado em geral em pequenas produções de peças de grande tamanho. Para o forjamento em matrizes fechadas, o metal deve adotar a forma esculpida previamente em duas matrizes [ASM, 1988; HELMAN, 2005].

2.3.2. Processo de forjamento de rodas ferroviárias

O processo de fabricação de rodas ferroviárias forjadas consiste do forjamento a quente, de blocos de aço que são tratados termicamente e usinados para alcançar o nível correto das propriedades mecânicas para ser utilizados em ferrovias [SANTOS, 2009]. As etapas do processo de fabricação de rodas ferroviárias forjadas estão detalhadas a seguir:

a) Fabricação do aço

O processo de forjamento de rodas ferroviárias inicia com a fusão de sucatas metálicas por eletrodos de grafite através da passagem de energia elétrica em um forno com temperatura de aproximadamente 1700°C [VILLAS BOAS, 2009; REVISTA FERROVIARIA, 2011]. Em seguida o aço líquido proveniente da fusão de sucatas é transferido a uma panela com revestimento refratário para adição de elementos de liga que irão constituir a composição química do material [VILLAS BOAS, 2009].

A primeira verificação da composição química do aço é realizada na análise de amostras, retiradas durante os processos de fusão e refino do aço, em um espectrômetro de emissão óptica [VILLAS BOAS, 2009]. Se a composição química estiver correta, o aço líquido passa pelo processo de desgaseificação a vácuo para redução de gases como o hidrogênio e para reduzir inclusões. A Figura 2.15 mostra o vazamento do aço líquido do forno elétrico para a panela com revestimento refratário e a Figura 2.16 mostra uma fotografia de um tanque a vácuo com aço líquido sendo desgaseificado.

Em seguida a etapa de desgaseificação, é realizada nova análise química e se necessário nova adição de elementos de liga. Tanto no processo de adição de elementos de liga como no processo de desgaseificação, para garantir boa homogeneidade no aço, é realizada a injeção de argônio [VILLAS BOAS, 2009].



Figura 2.15 Forno elétrico e panela com revestimento refratário. Uso gentilmente concedido pela empresa MWL do Brasil [SYME QUEIROZ, 2011].



Figura 2.16 Tanque de vácuo com o aço líquido desgaseificado antes do vazamento na lingoteira. Foto gentilmente cedida pela empresa MWL Brasil [VILLAS BOAS, 2009].

b) Vazamento do lingote

Nessa etapa, o aço é vazado em lingoteiras para solidificação e em seguida é colocado em fossas refratárias para resfriamento lento por 18 horas [REVISTA FERROVIARIA, 2011].

c) Operação de corte dos lingotes em blocos

Nessa etapa é realizado o corte dos lingotes. O corte a quente é feito por oxicorte. Os lingotes são cortados em blocos e cada bloco é proporcional ao peso da roda acabada [MINICUCCI, 2003]. A Figura 2.17 mostra uma fotografia do momento do corte dos lingotes.



Figura 2.17 Lingotes no momento do corte. Foto gentilmente cedida pela empresa MWL Brasil [VILLAS BOAS, 2009].

d) Aquecimento dos blocos

Nessa etapa, ocorre o primeiro processo do forjamento. Os blocos são aquecidos, em temperatura de 1.250°C em forno rotativo para encharque e após aquecimento recebem um jateamento de água de 200 kgf/cm^2 para remover a carepa, pele formada durante o aquecimento.

e) Forjamento e laminação

Primeiramente, a roda é forjada pelo processo de prensamento realizado em uma prensa hidráulica com capacidade de 6000 toneladas como mostra a Figura 2.18 (a) e (b) [VILLAS BOAS, 2009; REVISTA FERROVIARIA, 2011].



Figura 2.18 (a) Lingote na prensa hidráulica; (b) Lingote moldado em forma de roda saindo da prensa hidráulica. Uso gentilmente concedido pela empresa MWL do Brasil [SYME QUEIROZ, 2011].

Após o prensamento hidráulico, com sua forma já bem definida, a roda passa pelos processos de laminação, onde é formada a superfície de rolamento da roda juntamente com o friso, por meio de transferência de material do disco da roda para a pista. Em seguida a roda passa pelo processo de prensagem final para conformar o disco e obter o furo central. Depois seguem para resfriamento lento e controlado durante 12 horas em fossas refratárias [VILLAS BOAS, 2009].

f) Tratamento térmico

Após removidas das fossas, as rodas são aquecidas em forno elétrico com temperatura de 860° C, em seguida são temperadas em água sob pressão em temperatura de 25 a 35° C antes do processo de revenimento em fornos elétricos com temperatura variando entre 450 e 500° C. É nessa etapa que se determina a dureza da roda que somada a composição químicas define, automaticamente, a classe da roda. A próxima etapa é a usinagem da roda [VILLAS BOAS, 2009; REVISTA FERROVIARIA, 2011].

g) Usinagem das rodas

A usinabilidade de um metal é uma propriedade relacionada com a facilidade com que um metal pode ser cortado, de acordo com as dimensões, forma e acabamento superficial requeridos comercialmente [CHIAVERINI, 2008].

As rodas ferroviárias de aço forjado passam pelas seguintes seqüências de usinagem: usinagem do aro interno, do furo central, da pista de rolamento, aro e cubo externo, do disco externo e do disco interno [VILLAS BOAS, 2009]. A Figura 2.19 mostra uma das etapas da operação de usinagem de rodas ferroviárias forjadas.



Figura 2.19 Operação de usinagem do disco interno de uma roda ferroviária forjada. Uso gentilmente concedido pela empresa MWL do Brasil [SYME QUEIROZ, 2011].

h) Inspeção final

A última etapa do processo é a inspeção final das rodas por ultra-som e partículas magnéticas. Antes da inspeção final, as rodas são jateadas com granalha (shot peening), em seguida são realizados o ensaio de dureza e inspeção dimensional da roda antes do embarque [MINICUCCI, 2007; VILLAS BOAS, 2009]. A Figura 2.20 (a) e (b) mostra a roda durante o procedimento de inspeção por ultra-som.



Figura 2.20 (a) Roda ferroviária forjada entrando no aparelho de ultra-som, (b) Roda ferroviária forjada durante o procedimento de ultra-som. Uso gentilmente concedido pela empresa MWL do Brasil [SYME QUEIROZ, 2011].

2.3.3. Defeitos frequentes em rodas ferroviárias

As rodas ferroviárias são projetadas e fabricadas para serem substituídas somente por desgaste e não por algum tipo de defeito que possa ocorrer inesperadamente. As rodas ferroviárias são componentes chave no transporte ferroviário cuja falha resulta, muitas vezes, em consequências catastróficas [Zhang, 2008].

Os processos de fabricação e os diversos fatores de uso propiciam alguns dos defeitos mais frequentes em rodas ferroviárias. Os defeitos mais frequentes em rodas ferroviárias ocorrem na

região da pista de rolamento e são normalmente originados pelo processo de fadiga na roda. O tipo de defeito pode ser determinado conhecendo a profundidade com que o processo de fadiga se desenvolve [VILLAS BOAS, 2009; HANDA, 2010; MINICUCCI, 2011]. A Figura 2.21 mostra um esquema dos defeitos mais frequentes em rodas ferroviárias e o tipo da fadiga na pista de rolamento.

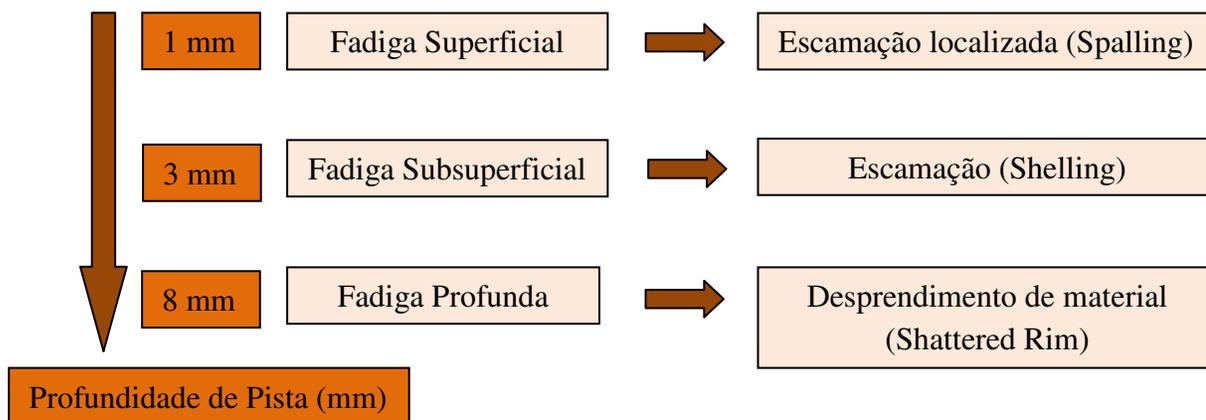


Figura 2.21 Esquema dos defeitos mais frequentes em rodas ferroviárias e sua relação com a profundidade de fadiga na pista de rolamento [MINICUCCI, 2011].

a) Escamação localizada (Spalling)

De acordo com Villas Boas [Villas Boas, 2009], spalling é um dos tipos típicos de defeito de rodas ferroviárias. A norma AAR em sua seção GII do capítulo RP-631 [AAR M-107, 2007] define spalling como o resultado de pequenas lascas que acontecem na pista de rolamento da roda entre ou adjacentes a finas trincas térmicas causadas por pequenos escorregamentos.

Observou-se também em Minicucci e Kato Spalling [Minicucci, 2011; Kato, 2011] que spalling é um tipo de defeito típico de origem termo-mecânica que ocorre quando a roda desliza com intensidade sobre o trilho durante a frenagem, portanto ocorre à alta temperatura. A Figura 2.22 apresenta uma fotografia de parte de uma roda ferroviária com esse tipo de defeito (Spalling).



Figura 2.22 Parte de uma roda ferroviária com defeito de Escamação localizada – Spalling [MINICUCCI, 2011].

a) Escamação (Shelling)

A norma AAR em sua seção GII do capítulo RP-631 [AAR M-107, 2007 apud Villas Boas, 2009] define Shelling (escamação) como pedaços de material que se destacam da pista da roda em várias posições, de forma mais ou menos contínua.

O Shelling é um tipo de defeito típico normalmente associado à fadiga subsuperficial na pista de rolamento da roda provocando perda de pequenas partes das rodas ferroviárias. Este tipo de fadiga gera trincas que se propagam de forma circunferencial paralela à pista de rolamento da roda à baixa temperatura [MINICUCCI, 2011; MAKINO, 2012].

De acordo com Gallagher et al, Kigawa, Muttow & Dudek, Kumagai et al apud Alves [Alves, 2000], Shelling é o defeito que ocorre devido a ação combinada de fadiga de contato e cargas térmicas sendo portanto um processo de fadiga termomecânica. Esses esforços combinados criam trincas que levam ao destacamento de material ao longo de toda superfície de rolamento da roda. A Figura 2.23 mostra uma fotografia de uma roda com a presença de Escamação (Shelling).



Figura 2.23 Parte de uma roda ferroviária com defeito de Escamação – Shelling [CLARKE, 2008].

b) Destacamento de material (Shattered Rim)

É o defeito mais grave em rodas ferroviárias, inicia no interior do aro e se propaga rapidamente para a superfície em condições normais de carga. A profundidade típica de início deste defeito é de 4 mm a 8 mm da pista de rolamento, propagando-se paralela à pista de rolamento [MINICUCCI, 2011]. A Figura 2.24 mostra uma fotografia de uma roda com Shattered Rim.



Figura 2.24 Parte de uma roda ferroviária com defeito Shattered Rim [MINICUCCI, 2011].

c) Trincas térmicas (Thermal cracks)

Segundo Minicucci [Minicucci, 2011], as trincas térmicas estão relacionadas com a introdução de um grande fluxo de calor em uma pequena seção do material do aro da roda por fricção e se localizam em uma camada fina na superfície da roda que é mais sensível ao calor. A Figura 2.25 mostra uma roda com defeito causado por trincas térmicas.

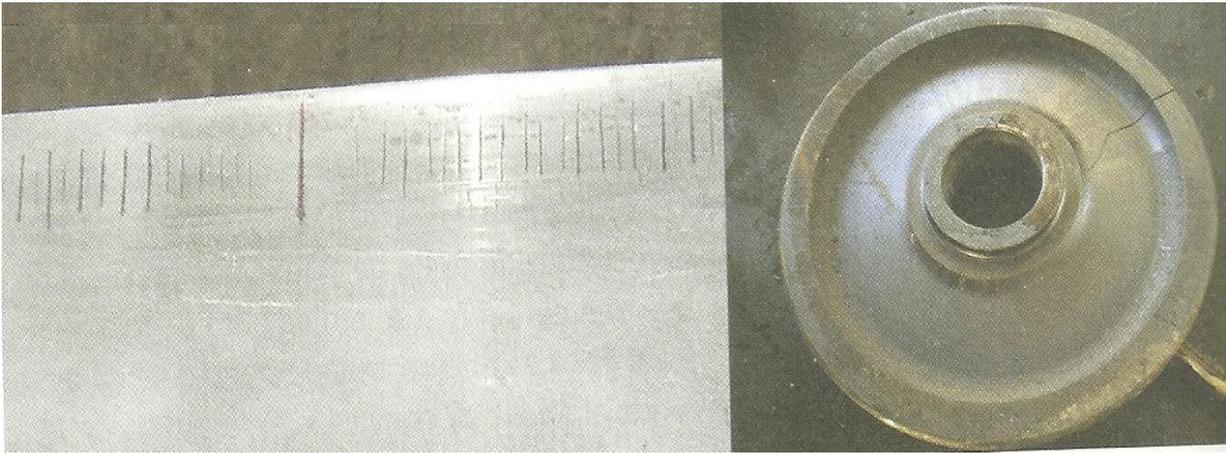


Figura 2.25 Parte de uma roda com defeito causado por trincas térmicas [MINICUCCI, 2011].

d) Trinca por concentração de tensões

Todo entalhe seja por queda no manuseio ou marcação a quente no aro pode gerar concentração de tensões que podem levar as rodas a desenvolverem trincas. A Figura 2.26 apresenta uma fotografia de uma roda com trinca por concentração de tensões [MINICUCCI, 2011].

e) Trinca circunferencial (Circunferential crack)

Esse tipo de defeito é localizado na região do disco interno ou externo das rodas e pode ser causado por cargas térmicas (inversão de tensões) ou concentração de tensões na região do disco [MINICUCCI, 2011]. A Figura 2.27 mostra uma roda com defeito causado por trinca circunferencial.



Figura 2.26 Roda ferroviária com defeito causado por concentração de tensões [MINICUCCI, 2011].

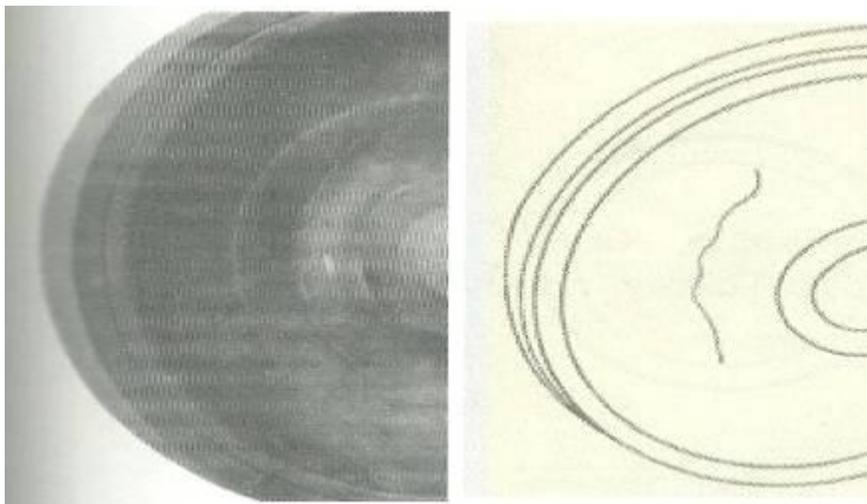


Figura 2.27 Desenho sem escala de parte de uma roda ferroviária com defeito causado por trinca circunferencial [MINICUCCI, 2011].

f) Calo

De acordo com Minicucci [Minicucci, 2011], esse defeito é causado por travamento da roda durante a frenagem e pode gerar um aquecimento localizado na região do travamento e gerar trincas em torno da área afetada. A Figura 2.28 mostra uma fotografia de uma roda com calo.



Figura 2.28 Parte de uma roda ferroviária com defeito causado por calo [MINICUCCI, 2011].

2.3.4. Propriedades mecânicas de rodas ferroviárias de aço fundidas e forjadas

De acordo com Kalpakjian [Kalpakjian, 2007], os aços carbono e os aços liga são comumente utilizados na fabricação de componentes diversos devido a praticidade de seu manuseio. A composição e o processamento desses aços são controlados de maneira a torna-los adequados para uma grande variedade de aplicações, como por exemplo, componentes de aço fundidos e forjados.

Aços carbono são geralmente classificados como alto (mais que 0,60% C), médio (0,30 a 0,60% C) e baixo (menos que 0,30% C) carbono [KALPAKJIAN, 2007]. A Figura 2.29 mostra as curvas típicas do percentual de carbono relação às propriedades mecânicas de um aço carbono.

A maioria dos componentes de aço carbono fundidos são produzidos com variações em suas propriedades mecânicas devido ao ajuste da composição e ao tratamento térmico aplicado durante o processo de fabricação. Desse modo, esses componentes podem obter propriedades específicas, incluindo a dureza, a resistência, a ductilidade, fadiga e tenacidade que explicam o comportamento mecânico desses materiais. É importante reconhecer a inter-relação entre essas

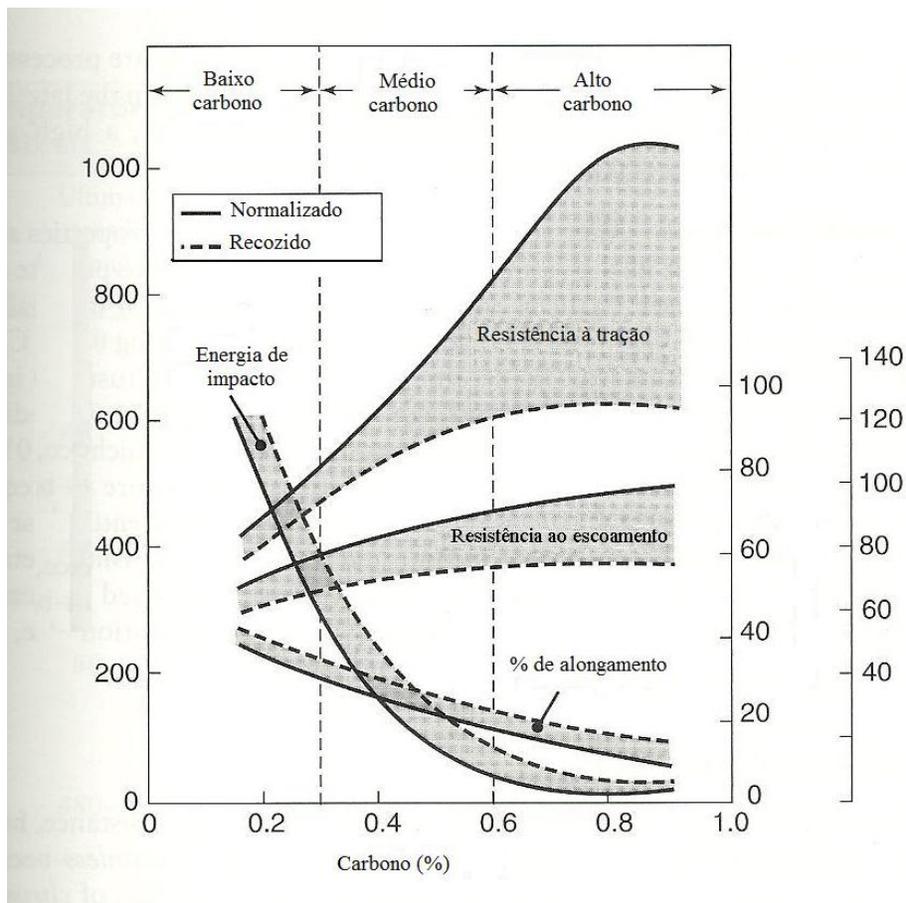


Figura 2.29 Curvas típicas do efeito do percentual de carbono nas propriedades mecânicas de um aço carbono [KALPAKJIAN, 2007].

propriedades, como por exemplo, maior dureza, menor resistência, e valores mais baixos de ductilidade que são associados aos maiores valores de força [ASM, 1992; GARCIA, 2012]. A Figura 2.30 mostra o gráfico da inter-relação das propriedades mecânicas de um aço fundido temperado em água.

Aços carbono e aços ligas são materiais que podem ser forjados e facilmente fabricados em uma ampla variedade de formas utilizando processos de forjamento a quente ou a frio. Os materiais nesta categoria apresentam essencialmente as mesmas características do processo de forjamento [ASM, 1992].

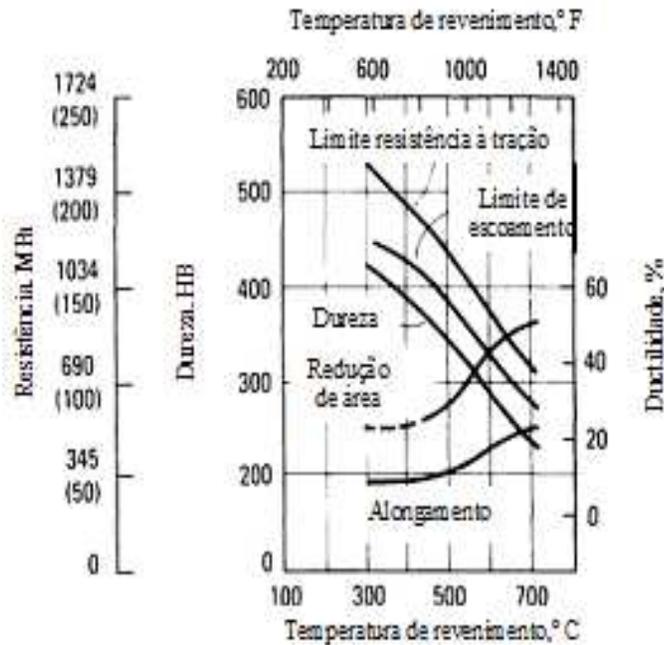


Figura 2.30 Propriedades mecânicas de um aço fundido temperado em água [ASM, 1992].

O processo de forjamento de um metal tem pouco efeito sobre a dureza e resistência do aço, mas certas propriedades mecânicas, tais como ductilidade, resistência ao impacto, e resistência à fadiga, são melhoradas. As rodas ferroviárias de aço fundidas e forjadas possuem as características típicas de suas composições e processos de fabricação que definem suas propriedades mecânicas.

a) Microestrutura das rodas ferroviárias

As microestruturas dos metais e ligas são determinadas pela composição química, processos de solidificação e tratamentos termodinâmicos. Estas variáveis determinam, em laboratório e ambientes de serviço, o comportamento dos metais e ligas. Devido à relação entre a estrutura e a propriedade dos materiais, a caracterização metalográfica é utilizada na especificação de materiais, controle de qualidade, garantia de qualidade, controle de processos e análise de falhas [ASM, 1992; COLPAERT, 2008].

A microestrutura de característica martensita em aços e outras ligas metálicas foi descoberta no final do século XIX e tornou-se importante para a interpretação das propriedades mecânicas desses materiais utilizados, desde então, para a fabricação de ferramentas artesanais, espadas e mais recentemente aviões e rodas ferroviárias [KRAUSS, 1999; WALTHER, 2004; YUE-JUN, 2006; POINTNER, 2008]. Rodas ferroviárias são fabricadas por forjamento ou fundição, a maior parte das rodas são submetidas a um tratamento térmico em que, após a austenização, fase que ocorre entre as temperaturas de 727 e 1495° C, a pista de rolamento é submetida a resfriamento acelerado, por jatos de água [COLPAERT, 2008; SILVA, 2010]. De acordo com Dieter e Silva [Dieter, 1988 e Silva, 2010], a martensita é uma fase metaestável que aparece com o resfriamento brusco da austenita. A transformação da austenita em martensita pelo revenimento do aço é um dos processos de reforço mais comuns na engenharia de materiais. A Figura 2.31 mostra como a dureza da martensita varia com o aumento do teor de carbono no aço.

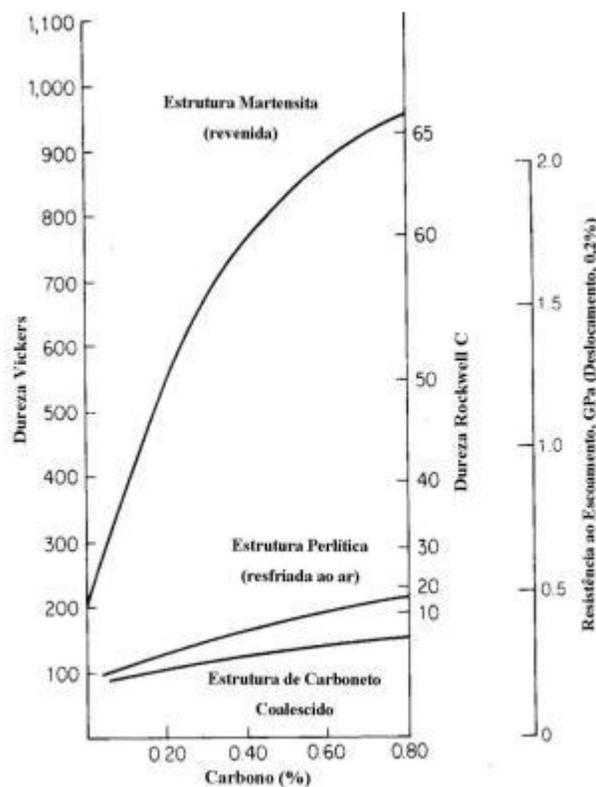


Figura 2.31 Variação da dureza da martensita revenida em relação ao teor de carbono do aço [DIETER, 1988].

A norma AAR M – 107 [AAR M – 107, 2007] recomenda a análise da microestrutura de rodas ferroviárias, durante o processo de fabricação, para classificação do material. Silva [Silva, 2010] apresenta na Figura 2.32 o aspecto termodinâmico da formação da martensita. Nas quais T_{MI} = temperatura de início da formação martensítica; T_{MF} = temperatura de fim da formação martensítica; T_{MIR} = temperatura de início da formação martensítica, usando deformação plástica para auxiliar; G_{γ} = energia livre da austenita e G_m = energia livre da martensita. A Figura 2.32 mostra que para temperatura menores que T_e , a austenita torna-se instável, favorecendo a formação da perlita, que tem menor energia livre total (as reações espontâneas ocorrem para $\Delta G < 0$, ou seja, quando se vai atingir um nível de energia livre total menor).

Conforme Silva [Silva, 2010], ainda observando a Figura 2.32, se o abaixamento da temperatura for lento, haverá tempo para difusão e a estrutura formada será perlítica. Porém se o abaixamento de temperatura for brusco, para abaixo de T_0 , haverá uma tendência a formar uma fase metaestável, a martensita. A Figura 2.33 mostra uma micrografia típica martensítica de um aço com 0,55% C e 0,65% Mn resfriado rapidamente.

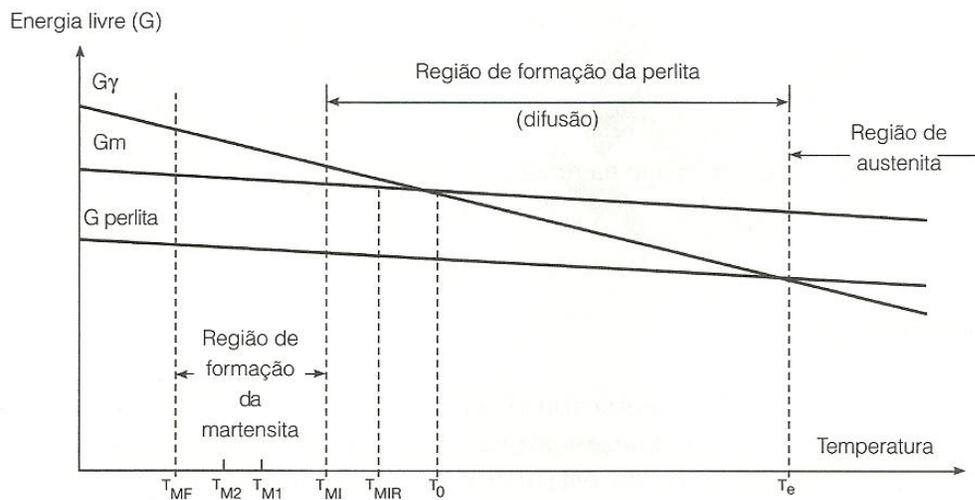


Figura 2.32 Temperatura – energia livre dos aspectos termodinâmicos da formação da martensita [SILVA, 2010].

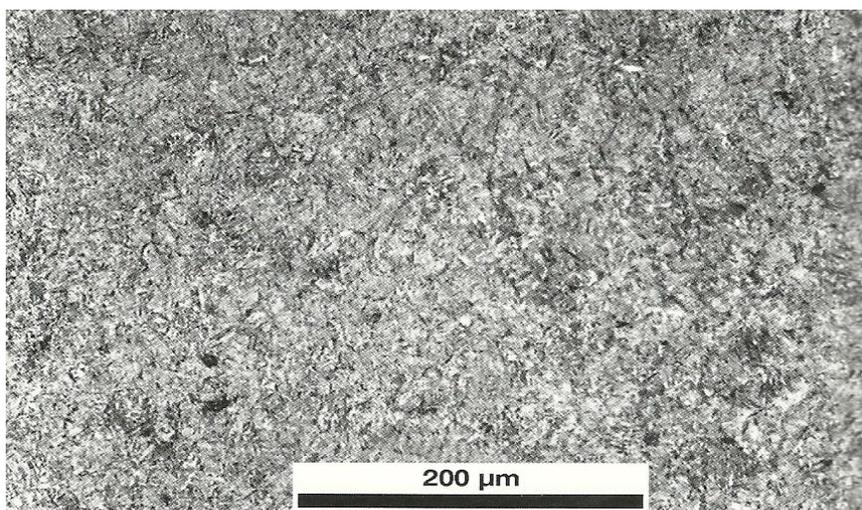


Figura 2.33 Micrografia típica martensítica com ataque de Nital [COLPAERT, 2008].

a) Propriedade de dureza de rodas ferroviárias

A dureza de um material é uma propriedade mecânica cujo conceito se segue à resistência que um material, quando pressionado por outro material ou por marcadores padronizados, apresenta ao risco ou à formação de uma marca permanente [GARCIA, 2012].

As características da dureza de um componente ferroviário, como as rodas ferroviárias, em serviço são muito importantes para o seu desempenho. Porém, em muitos casos, as propriedades desses componentes mudam com as condições reais de serviço, essa mudança ocorre de uma forma muito mais complicada e múltipla do que se espera [POINTNER, 2008]. Para Alves [Alves, 2000], aumentos de dureza em componentes ferroviários obtidos por meio de redução de temperatura de revenido para microestruturas martensíticas afetam o comportamento do desgaste, gerando maiores taxas de desgaste.

Vale ressaltar que a norma AAR [AAR M – 107, 2007] divide as rodas de aço carbono que podem ser fundidas e forjadas, conforme sua aplicação, em classes (L, A, B e C). A classe de rodas utilizada neste trabalho é a Classe C desta norma. A Tabela 2.3 apresenta as Classes das rodas, conforme a AAR M - 107, suas aplicações e o teor de carbono presente em cada roda.

Tabela 2.3 Classes das rodas ferroviárias da AAR M – 107, suas aplicações e o teor de carbono, em percentual, presente em cada roda.

Classe da roda	Aplicação	Carbono (%)
L	Altas velocidades e condições severas de frenagem.	0,47 Máx.
A	Altas velocidades com condições severas de frenagem com cargas moderadas.	0,47 – 0,57
B	Altas velocidades com condições severas de frenagem e altas cargas.	0,57 – 0,67
C	Baixas velocidades, condições leves de frenagem e altas cargas.	0,67 – 0,77

A norma AAR [AAR M – 107, 2007] recomenda a realização do ensaio de dureza Brinell, de acordo com os procedimentos da norma ASTM E – 10 [ASTM E – 10, 2010], no aro de rodas ferroviárias, de aço fundidas e forjadas, durante o processo de fabricação das rodas.

Desse modo, a Tabela 2.4 apresenta os valores mínimos e máximos de dureza Brinell recomendados pela AAR para a região do aro de rodas ferroviárias e valores mínimos e máximos de dureza Rockwell C, convertidos a partir dos valores de dureza Brinell conforme a ASTM E 140 [ASTM E 140, 2007].

Tabela 2.4 Classes das rodas e valores mínimos e máximos de durezas Brinell e Rockwell recomendados pela AAR [AAR M – 107, 2007] para o aro de rodas ferroviárias fundidas e forjadas.

Classe da roda	Dureza Brinell		Dureza Rockwell C	
	mínima	máxima	mínima	máxima
L	197 BHN	277 BHN	-	28,8 HRC
A	255 BHN	321 BHN	25,2 HRC	34,3 HRC
B	302 BHN	341 BHN	32,1 HRC	36,6 HRC
C	321 BHN	363 BHN	34,3 HRC	39,1 HRC

b) Propriedades de tração de rodas ferroviárias

O ensaio de tração, devido a sua aplicabilidade, é um dos ensaios mais utilizados para a avaliação das propriedades mecânicas de materiais. Esse tipo de ensaio fornece importantes e primordiais informações para a execução de projetos e fabricação de peças e componentes [GARCIA, 2012].

Os ensaios laboratoriais para obtenção das propriedades de tração de rodas ferroviárias são realizados de acordo com as recomendações das normas da ASTM E - 8 e BS EN 13262 [ASTM E – 8, 2011 e BS EN 13262, 2011].

A norma BS EN 13262 [BS EN 13262, 2011] classifica as rodas ferroviárias em graus (R1 até R9) conforme sua aplicação. Desse modo, as rodas da Classe C da norma da AAR são as rodas R7 designadas pela norma BS EN 13262. Adotou-se essa classificação, mostrada nas tabelas 2.5 e 2.6, para utilização e entendimento da Tabela 2.6. Desse modo, observa-se que a Tabela 2.5 apresenta a o grau de classificação das rodas e suas aplicações recomendadas pela BS EN 13262 e sua relação com a AAR M - 107.

Tabela 2.5 Classificação e aplicações de rodas ferroviárias de acordo com as normas da AAR M – 107 e BS EN 13262.

Tipo de carro	Grau (BS EN 13262)	AAR M – 107
Vagão de carga	R7	
Carros com sapata de freio	R6 e R7	Classe C
Carros com disco de freio	R7	
Locomotivas	R7	

A norma BS EN 13262 [BS EN 13262, 2011] recomenda que sejam adotadas para as rodas ferroviárias temperadas e revenidas os valores expressos na Tabela 2.6 para os limites de resistência, limite de escoamento e redução de área (estricção) obtidos a partir de ensaios de tração realizados com corpos-de-prova usinados dos aro e disco de rodas ferroviárias.

Tabela 2.6 Limites de resistência, escoamento e estrição de rodas ferroviárias recomendadas pela BS EN 13262 para os ensaios de tração.

Grau	Aro			Disco	
	LE (MPa)	LR(MPa)	Estricção (%)	LR(MPa)	Estricção (%)
R6	≥ 500	780/900	≥ 15	≥ 100	≥ 16
R7	≥ 520	820/940	≥ 14	≥ 110	≥ 16
R8	≥ 540	860/980	≥ 13	≥ 120	≥ 16
R9	≥ 580	900/1050	≥ 12	≥ 130	≥ 14

LE – Limite de escoamento e LR – Limite de resistência à tração.

a) Propriedades de impacto Charpy de rodas ferroviárias

Em muitas operações de fabricação, bem como durante a sua vida em serviço, vários componentes estão sujeitos a impacto de carga. Um teste de impacto típico consiste em colocar uma amostra entalhada em um testador de impacto e quebrá-la com um pêndulo. A partir da altura do pêndulo, a energia dissipada na quebra do espécime é obtida, esta energia é a resistência ao impacto do material. Ensaio de impacto são ensaios dinâmicos geralmente empregados para a análise de fratura frágil de materiais, o comportamento dúctil-frágil de diversos materiais, como o aço, podem ser caracterizados por esse ensaio. Os materiais que são dúcteis em temperaturas ambientes, geralmente, estão sujeitos a fatores, como existência de um estado triaxial de tensões, baixas temperaturas e velocidade de deformação elevada, que contribuem para o aparecimento de fratura frágil. Quanto mais baixa a temperatura, por exemplo, menor a energia de impacto Charpy. O resultado do ensaio de impacto é simplesmente representado por uma medida de energia absorvida pelo corpo-de-prova, não fornecendo indicações seguras sobre o comportamento de toda a estrutura em condições de serviço. Geralmente materiais que tem alta resistência ao impacto são aqueles que têm também altas resistência e ductilidade. A determinação da energia de impacto Charpy contribui para calculos mais precisos e confiáveis para a fabricação de rodas ferroviárias de aço. A Figura 2.34 apresenta uma curva típica da energia de impacto Charpy onde observa-se a transição da região de fratura frágil para dúctil com o aumento da temperatura [GARCIA, 2012; FERREIRA, 2009; KALPAKJIAN, 2008; STRNADEL, 2008; ZHANG, 2008].

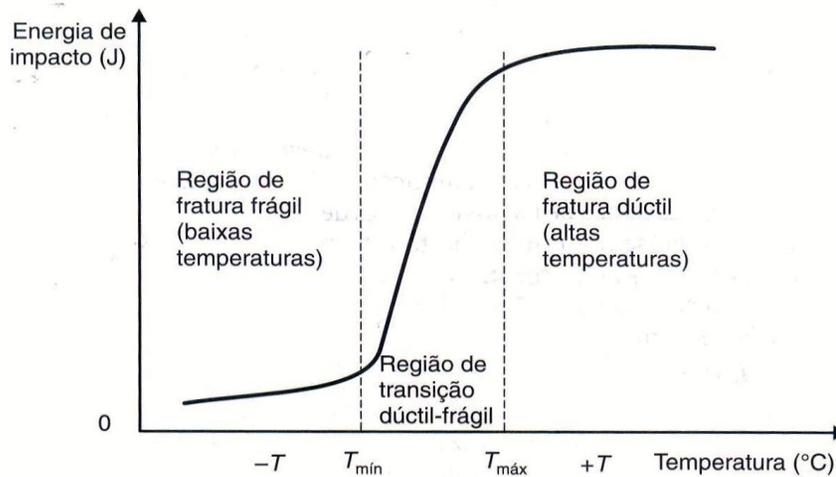


Figura 2.34 Curva típica do ensaio da energia de impacto Charpy [GARCIA, 2012].

A norma da BS EN 13262 [BS EN 13262, 2011] recomenda que sejam adotados os valores apresentados na Tabela 2.7 para os ensaios de impacto Charpy em corpos-de-prova usinados de rodas ferroviárias. A norma solicita ainda, que os ensaios sejam realizados em três corpos-de-prova extraídos de uma roda por corrida, ou seja, uma roda de cada quantidade de rodas que foi fabricada a partir da quantidade de aço líquido existente na panela refratária. A Tabela 2.7 mostra os valores médios e mínimos de acordo com a temperatura utilizada durante os ensaios. Para temperaturas acima de 20° C, deverá ser usado corpos-de-prova com entalhe em forma de “U” e para temperaturas abaixo de 20° C com entalhe em “V”.

Tabela 2.7 Valores médios, para três corpos-de-prova de uma roda por corrida, e mínimos característicos das energias de impacto de corpos-de-prova de rodas ferroviárias recomendadas pela norma BS EN 13262.

Grau	KU(Joules) temp. + 20°C		KU(Joules) temp. - 20°C	
	Valores médios	Valores mínimos	Valores médios	Valores mínimos
R6	≥17	≥12	≥12	≥8
R7	≥17	≥12	≥10	≥7
R8	≥17	≥12	≥10	≥5
R9	≥13	≥9	≥8	≥5

b) Propriedades de tenacidade à fratura de rodas ferroviárias

A tenacidade à fratura é uma medida de resistência à fratura do material onde devemos considerar para o projeto de um determinado componente e a escolha do material, a máxima tensão de trabalho que o material deverá suportar e o máximo tamanho de trinca admissível, ou ainda, para a avaliação da integridade estrutural de materiais como rodas ferroviárias, o conhecimento do comportamento desses materiais contendo trincas ou outros defeitos internos de pequenas dimensões pode ser compreendido por meio de ensaios de tenacidade à fratura [FERREIRA, 2009; GARCIA, 2012; KAIJALAINEN, 2012].

No caso das rodas ferroviárias, esse tipo de ensaio é requisito a ser cumprido pelos fabricantes para garantir a qualidade e segurança de seu produto [MINICUCCI, 2011]. A tenacidade à fratura, K_{IC} , é usada para prever o crescimento de trincas no contato roda-trilho [POINTNER, 2008]. A Tabela 2.8 apresenta os valores, mínimo individual para cada corpo-de-prova e mínimo para a média aritmética de todos os corpos-de-prova ensaiados, recomendados pelas normas AAR M – 107 e BS EN 13262 [AAR M – 107, 2007; BS EN 13262, 2011] para os ensaios tenacidade à fratura em deformação plana - K_{IC} em rodas ferroviárias.

Tabela 2.8 Valores mínimos (individual e média) para os ensaios de tenacidade à fratura em deformação plana - K_{IC} de rodas ferroviárias recomendadas pelas normas AAR M – 107 e BS EN 13262.

Norma	Classe	K_{IC} (individual)	K_{IC} (média)
AAR	A	$> 58 \text{ (MPa } \sqrt{m} \text{)}$	$> 68 \text{ (MPa } \sqrt{m} \text{)}$
AAR	B	$> 55 \text{ (MPa } \sqrt{m} \text{)}$	$> 60 \text{ (MPa } \sqrt{m} \text{)}$
AAR	C	$> 33 \text{ (MPa } \sqrt{m} \text{)}$	$> 40 \text{ (MPa } \sqrt{m} \text{)}$
BS EN 13262	-	$> 70 \text{ (MPa } \sqrt{m} \text{)}$	$> 80 \text{ (MPa } \sqrt{m} \text{)}$

c) Propriedades de fadiga de rodas ferroviárias

Nas últimas décadas o carregamento sobre rodas ferroviárias tem aumentado significativamente e tem como resultado uma mudança no modo de falha das rodas que geralmente são desgastes relacionados com processos de fadiga [HERNÁNDEZ, 2011]. O ensaio de fadiga é capaz de

fornecer dados quantitativos relativos às características de um material ou componente ao suportar cargas repetitivas ou cíclicas, por longos períodos, sem se romper [GARCIA, 2012]. O fenômeno da fadiga em rodas ferroviárias, devido à natureza da solicitação do componente, é conhecido como fadiga de alto ciclo. A fadiga pode reduzir o limite de resistência à tração de aços carbono martensíticos em média 75%, o que pode levar a fratura do mesmo [MINICUCCI, 2011]. Abertura de trincas em rodas ferroviárias pode levar a perda de uma parte da roda (escamação) ou uma extensão por abertura radial com consequente liberação dos acessórios de montagem existentes entre a roda e o eixo [ZERBST, 2005]. Os fabricantes de rodas ferroviárias utilizam como requisito em seus processos de fabricação, de acordo com as recomendações da norma BS EN 13262, a realização de ensaios de fadiga antes da entrega das rodas aos clientes. Diversos autores, como Zerbst, Ekberg, Tarafder e Diener [Zerbst, 2005; Ekberg, 2005; Tarafder, 2007 e Diener, 2007], entre outros, realizaram estudos experimentais por meio de ensaios de fadiga para contribuir com a precaução e minimização de defeitos, em rodas ferroviárias fundidas e forjadas, e conhecimento específico das propriedades mecânicas dos materiais das rodas analisadas.

g) Microscopia eletrônica de varredura

A caracterização de materiais por Microscopia eletrônica de varredura – MEV é uma análise experimental que permite obter informações mais detalhadas sobre a superfície de fratura de diversos componentes. Esse tipo de estudo é conhecido como análise fractográfica. A fractografia (ciência que estuda a superfície de fratura) utiliza duas técnicas de microscopia eletrônica: a de transmissão e a de varredura [FERREIRA, 2009]. A microscopia eletrônica de varredura foi a técnica utilizada neste estudo para obtenção das informações sobre o modo de fratura, o estado de tensão e o ponto onde a trinca teve seu início [CALLISTER, 2009]. Do ponto de vista microscópico a fratura pode ser: clivagem, quase-clivagem, alveolar, escorregamento ou corte dúctil, separação intergranular e fadiga [ASM, 1987, FERREIRA, 2009]. A Figura 2.35 mostra uma fractografia típica da superfície de fratura por fadiga de uma mola de aço AISI 1070 com dureza de 54 HRC. A Figura 2.36 apresenta fractografias típicas de propagação de trincas por fadiga em corpos-de-prova de trilhos de aço (0,69 – 0,82% C) de ensaios de tração e a Figura

2.37 mostra fractografias típicas de fraturas frágeis, de um aço AISI 4130 de engates de eixos, devido a tensões térmicas de soldagem aplicada indevidamente na região tratada termicamente. No caso de rodas ferroviárias é possível analisar a microestrutura da superfície de fratura após determinados ensaios mecânicos ou, ainda, em casos extremos de análises de defeitos ocorridos em rodas.

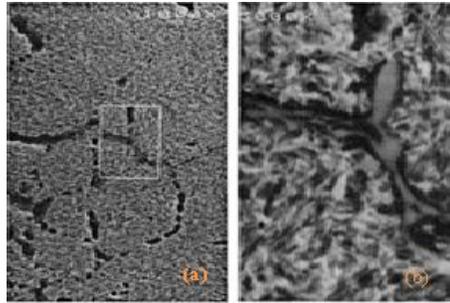


Figura 2.35 Fractografias típicas de uma mola de aço AISI 1070, MEV (a) 1000x e (b) 5000x. Presença de nítretos nos contornos dos grãos [ASM, 1987].

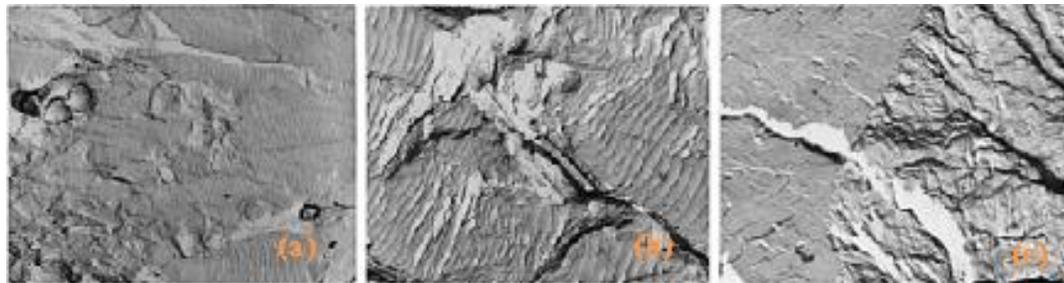


Figura 2.36 Fractografias típicas de um trilho de aço (a) e (b) Região de propagação de fadiga; (c) Clivagem transgranular (esquerda) com a clivagem intergranular (direita), MET 5000x [ASM, 1987].

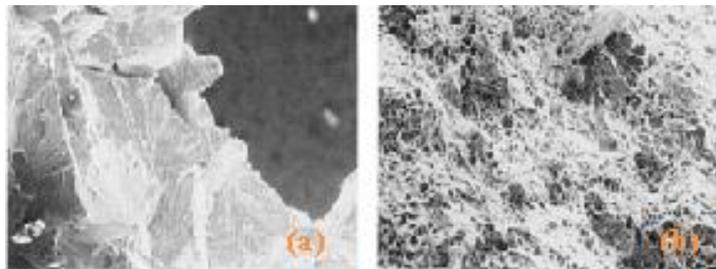


Figura 2.37 Fractografias típicas de um aço AISI 4130 de engates de eixos (a) Superfície de fratura-frágil próximo do centro do eixo; (b) Região próximo da superfície do eixo – ruptura por dimple, MEV 100x [ASM, 1987].

Capítulo 3

Materiais e Procedimentos Experimentais

3.1. Materiais

Os materiais utilizados para essa pesquisa foram corpos-de-prova usinados, cedidos pela empresa MWL Brasil Rodas & Eixos Ltda, de cinco rodas ferroviárias duas de aço fundido (RF1 e RF4) e três de aço forjado (RFo2, RFo3 e RFo5), com mesma classe de composição química e processos de fabricação especificados pelas normas da Association of American Railroad - AAR. A Figura 3.1 mostra o perfil de uma roda ferroviária com disco em “S”, semelhante à roda utilizada nesta pesquisa, e sua nomenclatura específica.

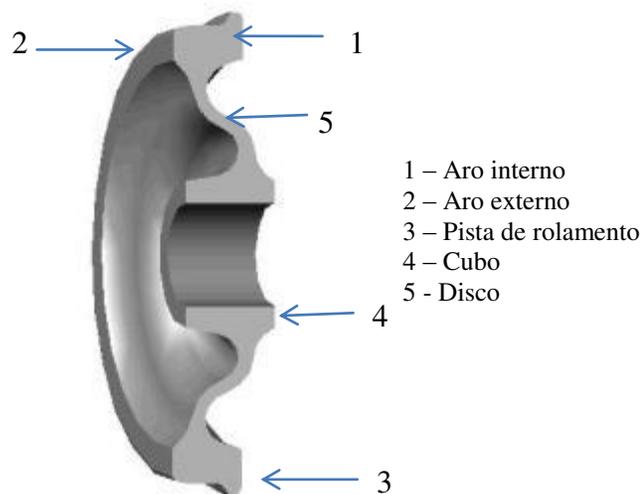


Figura 3.1 Perfil e nomenclatura de uma roda ferroviária com disco em “S” semelhante à roda utilizada neste trabalho [Minicucci, 2011].

As composições químicas das rodas utilizadas nesta pesquisa obedecem à classe C da AAR [AAR M-107, 2007]. A Tabela 3.1, a seguir, mostra a composição química das rodas fundidas e forjadas utilizadas nesta pesquisa e a especificação da composição química da roda Classe C recomendada pela norma AAR [AAR M-107, 2007]. Os dados das análises das composições químicas das rodas RF1, RFo2 e RFo3 foram fornecidos pela empresa MWL Brasil e os dados

das rodas RF4 e RFo5 foram obtidos por meio de análise da composição química realizado pelo laboratório Labmat Ltda.

Tabela 3.1 Composição química das rodas analisadas neste trabalho e da roda Classe C da AAR M – 107.

Elementos Químicos das Rodas de aço		C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr
Rodas Fundidas	RF1	0,74	0,643	0,016	0,008	0,593	0,02	0,287
	RF4	0,67	0,70	0,015	0,029	0,69	0,01	0,02
Rodas Forjadas	RFo2	0,73	0,72	0,009	0,014	0,32	0,07	0,011
	RFo3	0,73	0,75	0,013	0,019	0,31	0,014	0,015
	RFo5	0,74	0,79	0,010	0,046	0,29	0,07	0,24
Especificação da roda Classe C da AAR		0,67-0,77	0,60-0,90	0,030 max.	0,005-0,040	0,15-1,00	0,25 max. ^a	0,25max. ^a

Elementos Químicos das Rodas de aço		Mo	V	Cu	Al	Ti	Nb	N	H
Rodas Fundidas	RF1	0,007	0,002	0,21	0,01	0,002	0,001	58,17	-
	RF4	0,01	0,001	0,02	0,009	0,001	-	-	-
Rodas Forjadas	RFo2	0,024	0,002	0,13	0,01	0,009	0,0012	60,31	5,8
	RFo3	0,031	0,003	0,12	0,017	0,001	0,0026	26,36	0,5
	RFo5	0,02	0,001	0,13	0,004	-	-	-	-
Especificação da roda Classe C da AAR		0,10 max. ^a	0,040 max. ^a	0,35 max.	0,060 max.	0,03 max.	0,05 max.		

NOTAS: Rodas RF1 e RF4: Rodas de aço fundido

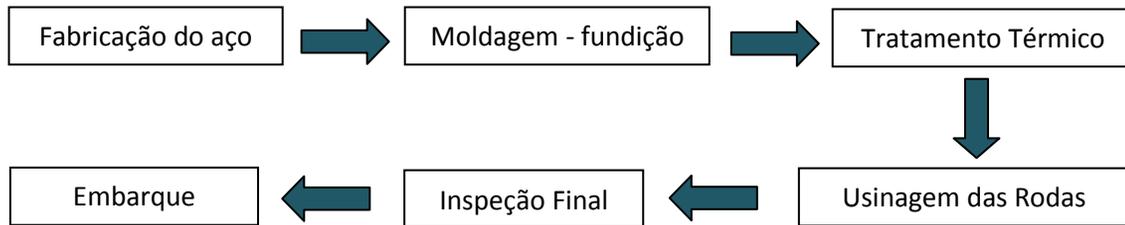
Roda RFo2: Roda de aço forjado sem desgaseificação

Roda RFo3 e RFo5: Rodas de aço forjado com desgaseificação

^a: O fabricante que optar por variar os limites acima descritos para os elementos níquel, crômio, molibdênio e vanádio, deverão utilizar a fórmula de ajuste de percentuais indicada na norma AAR M – 107. [AAR M – 107, 2009]

As rodas ferroviárias fabricadas pelos processos de fundição e forjamento, como apresentado no capítulo 2, possuem diferenças em seus processos de fabricação. A Figura 3.2 mostra os fluxogramas dos processos de fabricação das rodas fundidas e forjadas utilizadas neste trabalho:

- Roda Fundida



- Roda Forjada

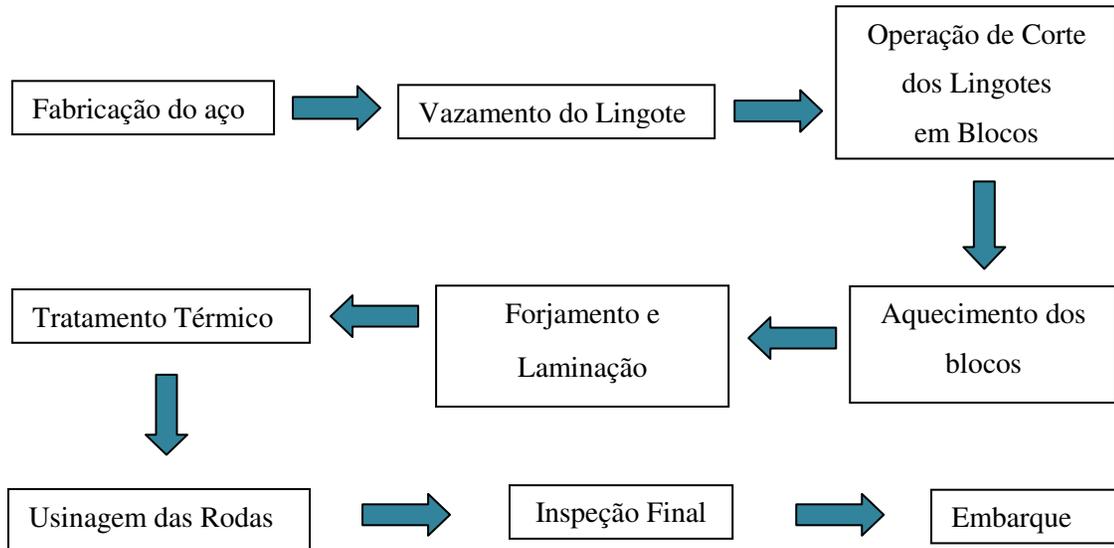


Figura 3.2 Fluxogramas dos processos de fabricação das rodas ferroviárias de aço fundidas e forjadas.

Para este estudo, os corpos-de-prova foram retirados da mesma posição dos aros e discos das cinco rodas. As Figuras 3.3 a 3.5 apresentam um desenho sem escala da posição de retirada dos corpos-de-prova e a Figura 3.6 mostra um perfil da roda ferroviária com disco em “S” detalhando a posição de retirada dos corpos-de-prova dos ensaios de tração, Impacto Charpy e fadiga. Os corpos-de-prova foram retirados das rodas nos modelos e dimensões requeridos pelas normas específicas de cada ensaio e antes dos ensaios, primeiramente, medidos com um paquímetro para confirmação das dimensões.

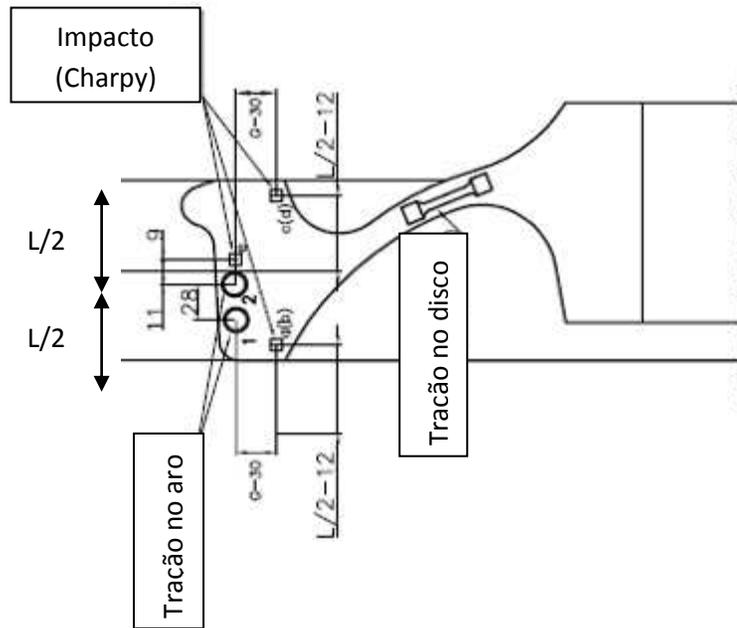


Figura 3.3 Desenho sem escala da localização da retirada dos corpos-de-prova dos ensaios de tração e de impacto Charpy nos aros e discos das rodas [Desenho gentilmente cedido pela empresa MWL Brasil].

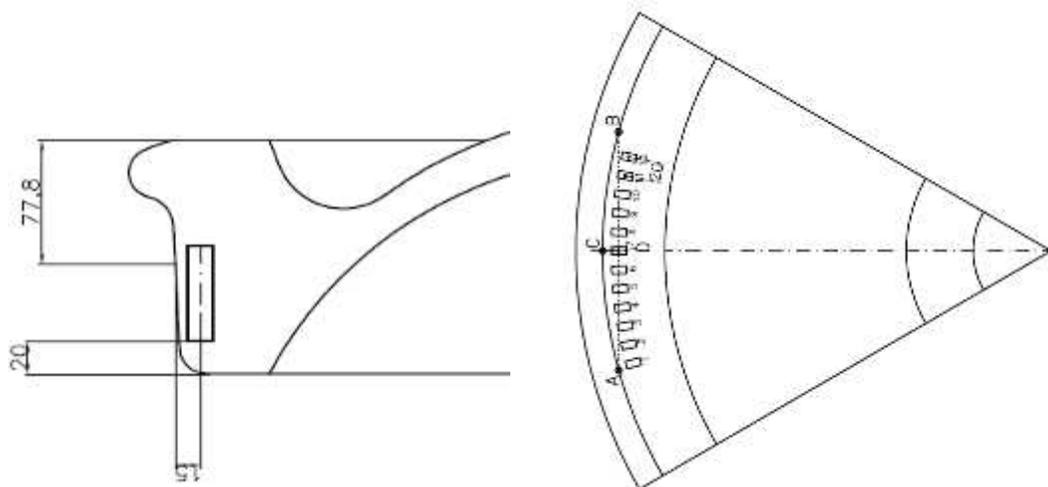


Figura 3.4 Desenho sem escala da localização de retirada dos corpos-de-prova dos ensaios de fadiga no aro das rodas [Desenho gentilmente cedido pela empresa MWL Brasil].

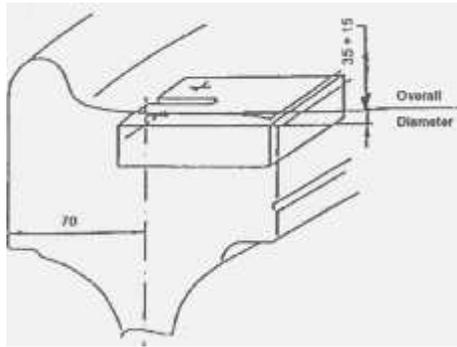


Figura 3.5 Desenho sem escala da localização da retirada dos corpos-de-prova dos ensaios de tenacidade à fratura no aro das rodas com orientação do plano da trinca C - L [Desenho gentilmente cedido pela empresa MWL Brasil].

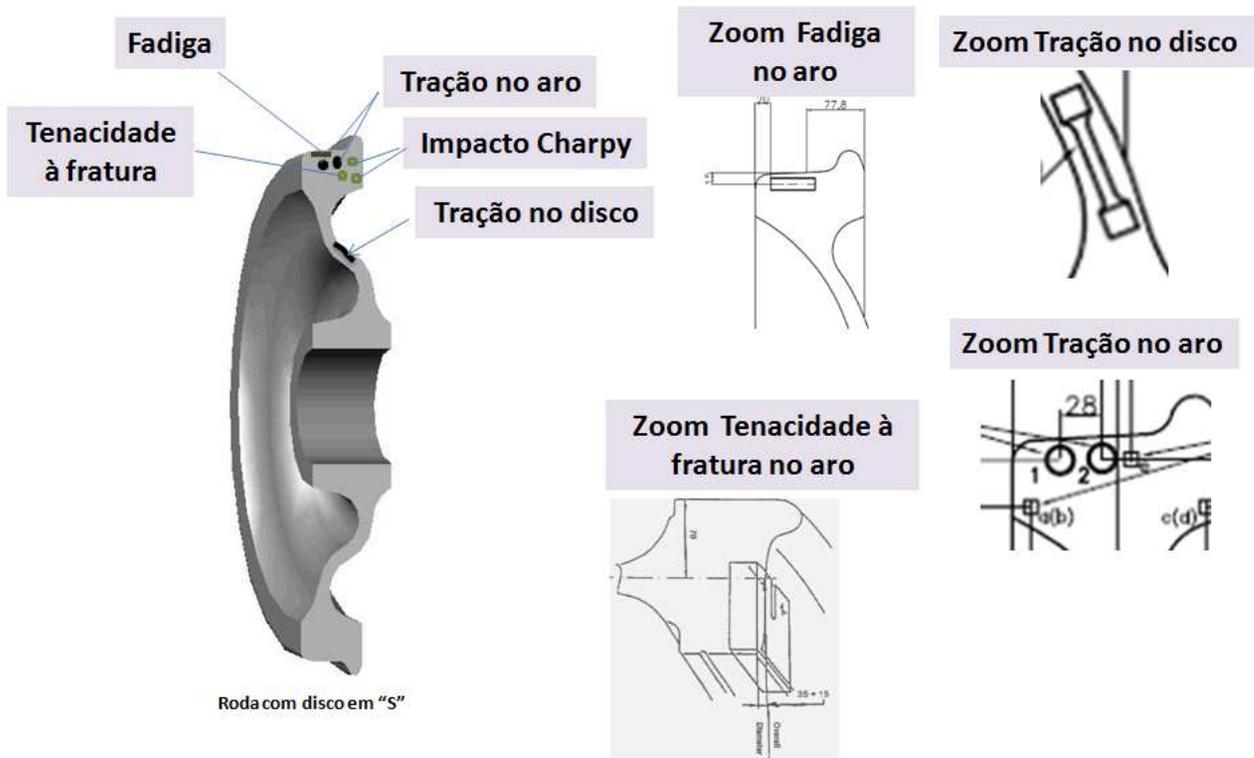


Figura 3.6 Perfil de uma roda ferroviária com disco em “S” e representação do posicionamento da retirada dos corpos-de-prova dos ensaios de tração.

3.2. Procedimentos Experimentais

A análise das propriedades mecânicas e dos micromecanismos de fratura dos corpos-de-prova usinados de rodas ferroviárias fundidas e forjadas foi realizada da seguinte forma: A análise da composição química, os ensaios de fadiga e a microscopia eletrônica de varredura foram realizados em corpos-de-prova das cinco rodas. Os ensaios de tração, de impacto Charpy, de tenacidade à fratura foram realizados em corpos-de-prova das rodas RF1, RFo2 e RFo3. A análise metalográfica e os ensaios de dureza foram realizados em corpos-de-prova das rodas RF4 e RFo5. A sequência dos ensaios obedeceu aos critérios de disponibilidade de corpos-de-prova e equipamentos. Todos os ensaios foram realizados em temperatura ambiente ($20\pm 2^\circ\text{C}$) e umidade de aproximadamente 60%. A Tabela 3.2 mostra a quantidade de corpos-de-prova utilizados em cada ensaio.

Tabela 3.2 Ensaios realizados e quantidade de corpos-de-prova (usinados de rodas ferroviárias fundidas e forjadas) utilizados nessa pesquisa.

Descrição dos ensaios		Rodas fundidas		Rodas forjadas		
		RF1	RF4	RFo2	RFo3	RFo5
Análise química		1 ^(a)	1 ^(b)	1 ^(a)	1 ^(a)	1 ^(b)
Análise metalográfica		-	3	-	-	3
Ensaio de dureza Rockwell		-	12	-	-	12
Ensaio de tração	Aro	4	-	4	4	-
	Disco	4	-	4	4	-
Ensaio de impacto Charpy		12	-	12	12	-
Ensaio de tenacidade à fratura		3	-	3	3	-
Ensaio de fadiga		12	12	12	12	12
Microscopia eletrônica de varredura nos corpos de prova de fadiga		2	3	2	2	3

(a) análise química fornecida pela empresa MWL Brasil;

(b) análise realizada pelo laboratório Labmat Ltda.

3.2.1. Análise metalográfica

Três amostras retiradas das proximidades das superfícies de fratura dos corpos-de-prova 3, 5 e 11 dos ensaios de fadiga, usinados das rodas RF4 e RFo5, foram preparados para análise metalográfica de acordo com a norma técnica ASTM E 3 [ASTM E 3 – 11, 2011]. Para essa análise foi utilizado um microscópio óptico Neophot 32 como mostra a Figura 3.7.

As micrografias foram obtidas em três regiões das amostras (centro e extremidades esquerda e direita) após serem embutidas em baquelite, lixadas, polidas e atacadas com Nital 2% por 10 segundos.

Com relação à roda forjada, a orientação das superfícies das amostras analisadas por microscopia óptica está na transversal (seção transversal); no caso das rodas fundidas, utilizou-se a mesma orientação das rodas forjadas – ver na Figura 3.3 a posição de retiradas das amostras das rodas. Além disso, essa superfície analisada é paralela à superfície de fratura dos corpos-de-prova dos ensaios de fadiga, distante aproximadamente 3 mm dessa superfície. A Figura 3.8 apresenta uma fotografia de três corpos-de-prova utilizados nessa análise.



Figura 3.7 Microscópio óptico Neophot 32, do Laboratório de Engenharia de Materiais da Unicamp, utilizado na análise metalográfica [SYME QUEIROZ, 2011].

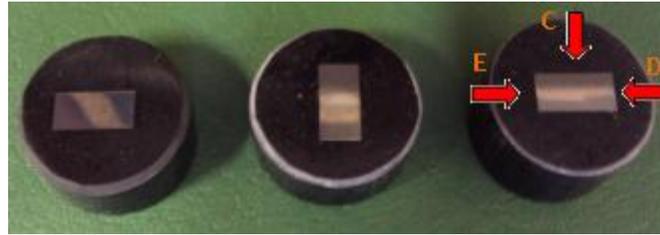


Figura 3.8 Corpos-de-prova embutidos em baquelite utilizados nas análises metalográficas (E – Extremidade esquerda, C – Centro e D –Extremidade direita) [SYME QUEIROZ, 2011].

3.2.2. Ensaio de dureza Rockwell

Os ensaios de dureza Rockwell foram realizados em onze amostras da roda RF4 e onze da RFo5 dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de fadiga. As medidas de dureza foram realizadas em um Durômetro Pantec RBS, do Laboratório de Engenharia de Materiais da Unicamp, com penetrador de diamante no centro e nas duas extremidades da seção plana perpendicular a superfície de fratura das amostras de fadiga. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma técnica ASTM E 18 [ASTM E 18 - 08b, 2008] com carga aplicada de 150 kgf e pré-carga de 10 kgf. A Figura 3.9 apresenta o equipamento utilizado durante o ensaio e a Figura 3.10 mostra um corpo de prova após o ensaio de dureza Rockwell C.



Figura 3.9 Durômetro Pantec RBS utilizado nos ensaios de dureza Rockwell C [SYME QUEIROZ, 2011].

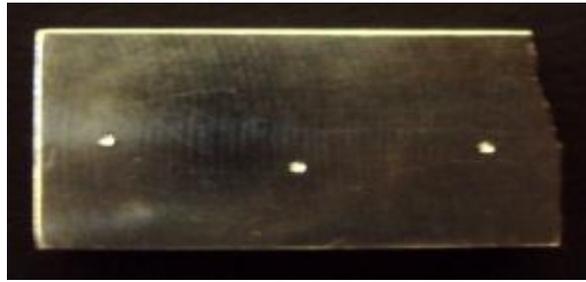


Figura 3.10 Corpo de prova utilizado nos ensaios de fadiga após o ensaio de dureza Rockwell C [SYME QUEIROZ, 2011].

3.2.3. Ensaio de tração

Para a realização dos ensaios de tração, os corpos-de-prova foram usinados da seção plana dos aros paralela à pista de rolamento e da seção longitudinal dos discos das rodas RF1 e RFo2 e RFo3, de acordo com a Figura 3.3, nos modelo e dimensões especificados na norma técnica ASTM E8 [ASTM E8/E8M, 2011] conforme ilustra a Figura 3.11.

Nesses ensaios, especificamente, foram obtidos o limite de escoamento (LE), o limite de resistência à tração (LR), o alongamento específico até a fratura (AL) e a redução de área (RA) de acordo com as especificações da norma ASTM E8 [ASTM E8/E8M, 2011]. Para estes ensaios foram utilizados quatro corpos-de-prova usinados do aro e quatro do disco de cada roda. Os ensaios de tração foram conduzidos em uma máquina do tipo MTS (Materials Testing System) servo-hidráulica, modelo TestStar II, com capacidade de carga de 10 toneladas e velocidade de deslocamento do pistão da máquina de 1,2 mm/minuto. A Figura 3.12 mostra a montagem experimental de um corpo-de-prova na MTS e do extensômetro utilizados nos ensaios de tração.

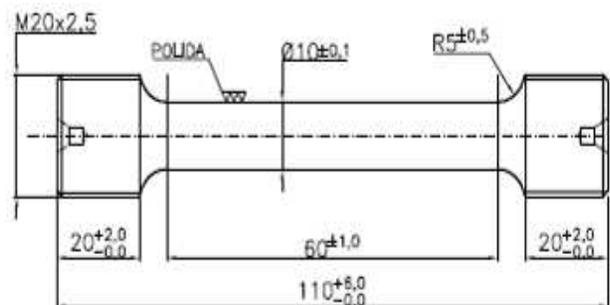


Figura 3.11 Desenho sem escala do corpo-de-prova utilizado nos ensaios de tração. Dimensões em mm.



Figura 3.12 Montagem experimental da máquina de ensaios MTS, do Laboratório de Engenharia de Materiais da Unicamp, durante os ensaios: (a) geral e (b) corpo-de-prova fixado nas duas extremidades e o extensômetro [SYME QUEIROZ, 2011].

3.2.4. Ensaios de impacto Charpy

Os ensaios de impacto foram realizados com corpos-de-prova do tipo Charpy com entalhe em “U” e usinados da seção plana central dos aros paralela à pista de rolamento e da seção plana paralela aos aros das rodas RF1 e RFo2 e RFo3, como mostra a Figura 3.3. Para os ensaios de impacto 12 corpos-de-prova foram retiradas do aro das rodas fundida R1 e forjadas R2 e R3 e divididos em 4 grupos com 3 corpos-de-prova por grupo. A Figura 3.13 (a) apresenta um desenho sem escala do corpo-de-prova dos ensaios de impacto Charpy, de acordo com as recomendações específicas das normas ASTM E - 23 e ASTM A 370 [ASTM E – 23, 2007; ASTM A 370-11, 2011] utilizadas para a realização desses ensaios.

Observa-se também na Figura 3.13 (b) uma imagem da superfície de fratura de um corpo-de-prova após o ensaio de impacto Charpy. Os ensaios foram realizados em um equipamento do tipo Pêndulo de Impacto LOS, modelo PSW com capacidade de 300 J, como ilustra a Figura 3.14, no Laboratório de Análises da Empresa MWL Brasil.

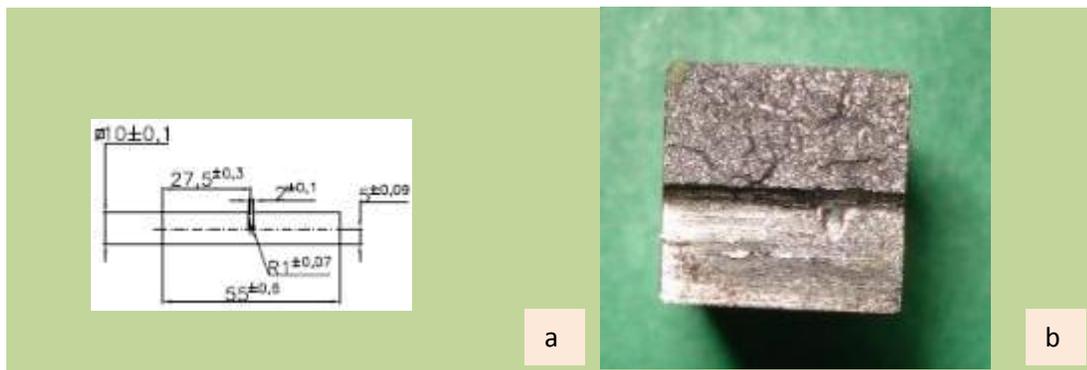


Figura 3.13 (a) Desenho sem escala do corpo-de-prova utilizado nos ensaios de impacto Charpy. Dimensões em mm. (b) Corpo-de-prova utilizado nos ensaios de impacto Charpy [SYME QUEIROZ, 2011].



Figura 3.14 Equipamento do tipo Pêndulo de Impacto LOS, do laboratório de ensaios da empresa MWL Brasil, utilizado nos ensaios de impacto – Charpy. Foto gentilmente cedida pela empresa MWL Brasil.

3.2.5. Ensaio de tenacidade à fratura

Nos ensaios de tenacidade à fratura, os corpos-de-prova foram usinados da seção longitudinal dos aros perpendicular à pista de rolamento das rodas, como mostra a Figura 3.5, nos modelo e dimensões mostrados na Figura 3.15.

Nesse ensaio foram utilizados três corpos-de-prova por cada tipo de roda, previamente confeccionados com uma pré-trinca obtida por fadiga de acordo com as normas técnicas ASTM E 399 e ASTM E 1820 [ASTM E 399, 2009; ASTM E 1820, 2009] que padronizam esse ensaio. A máquina utilizada foi a MTS do tipo servo-hidráulica com capacidade de carga de 10 toneladas. A Figura 3.16 (a) mostra uma fotografia do corpo-de-prova de tenacidade à fratura fixado na MTS durante o ensaio e (b) uma fotografia da superfície de fratura do corpo-de-prova após o ensaio.

A frequência utilizada na obtenção da pré-trinca dos ensaios de tenacidade à fratura foi 20 Hz e os valor de K_{max} final nas pré-trincas foi no máximo $24 \text{ MPa}\sqrt{m}$. Os ensaios foram realizados para todos os corpos-de-prova de todas as rodas com velocidade de 0,03 mm/s e razão de carga de 0,1. A Figura 3.17 mostra uma curva típica, carga em função do deslocamento de abertura da boca da trinca, obtida do ensaio de tenacidade à fratura de um corpo-de-prova da roda RF1.

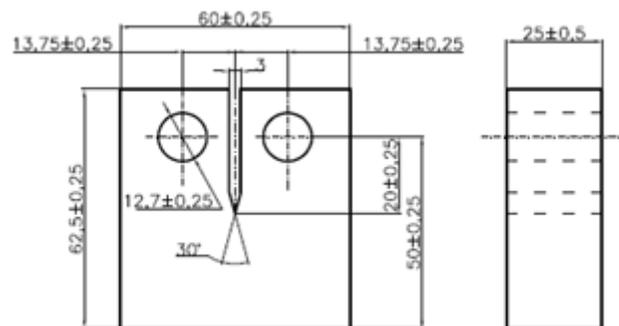


Figura 3.15 Desenho sem escala dos corpos-de-prova de tenacidade à fratura, orientação do plano da trinca C - L. Dimensões em mm.

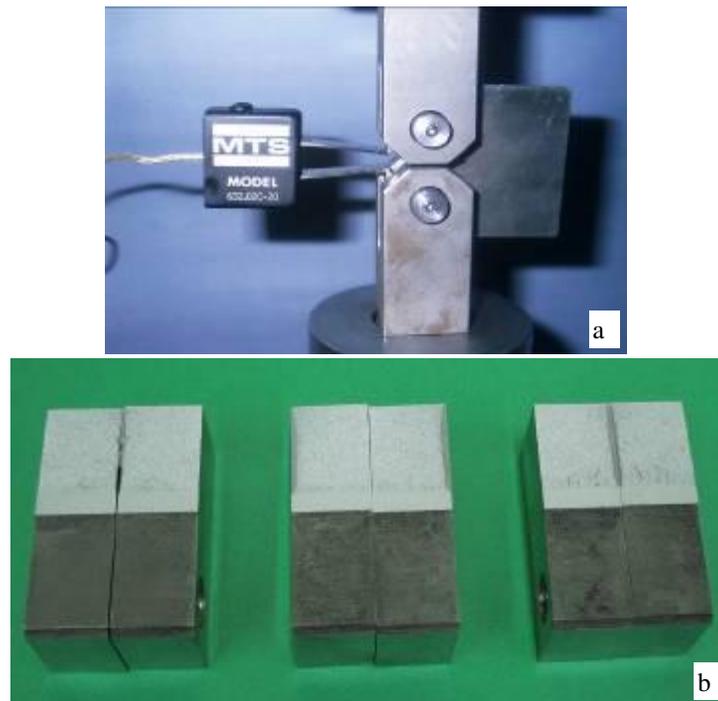


Figura 3.16 Corpo-de-prova de tenacidade à fratura fixado na máquina MTS durante o ensaio. (b) Superfície de fratura de três corpos-de-prova de tenacidade à fratura após os ensaios.

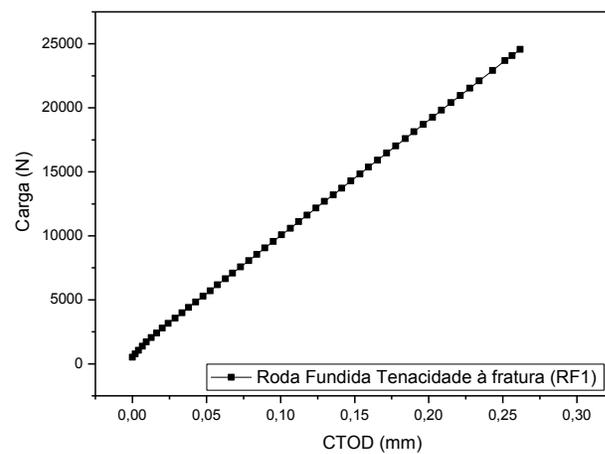


Figura 3.17 Curva típica da carga em função do deslocamento da abertura da boca da trinca – CTOD (mm) obtida do ensaio de tenacidade à fratura de um corpo-de-prova da roda RF1.

3.2.6. Ensaios de fadiga

Os corpos-de-prova dos ensaios de fadiga foram usinados da seção longitudinal dos aros perpendicular à pista de rolamento das rodas, de acordo com a Figura 3.4, nos modelo e dimensões conforme apresentado na Figura 3.18.

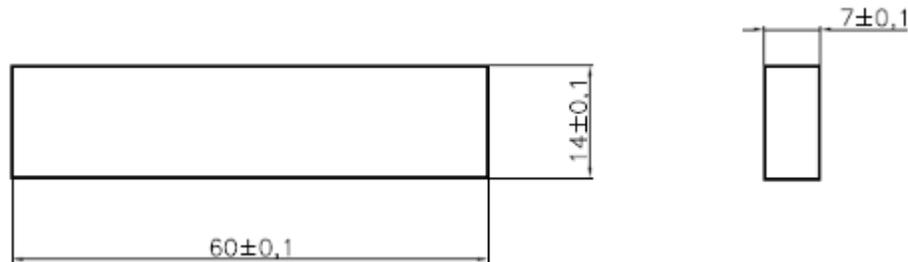


Figura 3.18 Desenho sem escala do corpo-de-prova de fadiga. Dimensões em mm.

Nesses ensaios foram utilizados doze corpos-de-prova por cada tipo de roda. Os ensaios foram realizados de acordo com as recomendações da norma técnica ASTM E 1823 [ASTM E 1823, 2009], os ensaios foram conduzidos em uma máquina do tipo servo-hidráulica MTS, modelo TestStar II, com capacidade de carga de 10 toneladas.

Os ensaios de fadiga foram realizados em três pontos do corpo-de-prova em flexão, como mostra a Figura 3.19, por meio de testes com razão de carga 0,1, carga máxima de 15kN (corpos-de-prova das rodas fundidas) e 18kN (corpos-de-prova das rodas forjadas) pré-determinadas pelos ensaios de flexão no primeiro corpo-de-prova de cada roda, onda senoidal e ambiente neutro [QUEIROZ, 2011].

Observa-se na Figura 3.20 (a) a montagem experimental, do corpo-de-prova de fadiga na máquina MTS, utilizada nos ensaios de fadiga e em (b) Corpo-de-prova de fadiga na máquina MTS indicando os três pontos em flexão durante os ensaios. A Figura 3.21 mostra a superfície de fratura de um corpo-de-prova, utilizado nos ensaios de fadiga, após o ensaio.

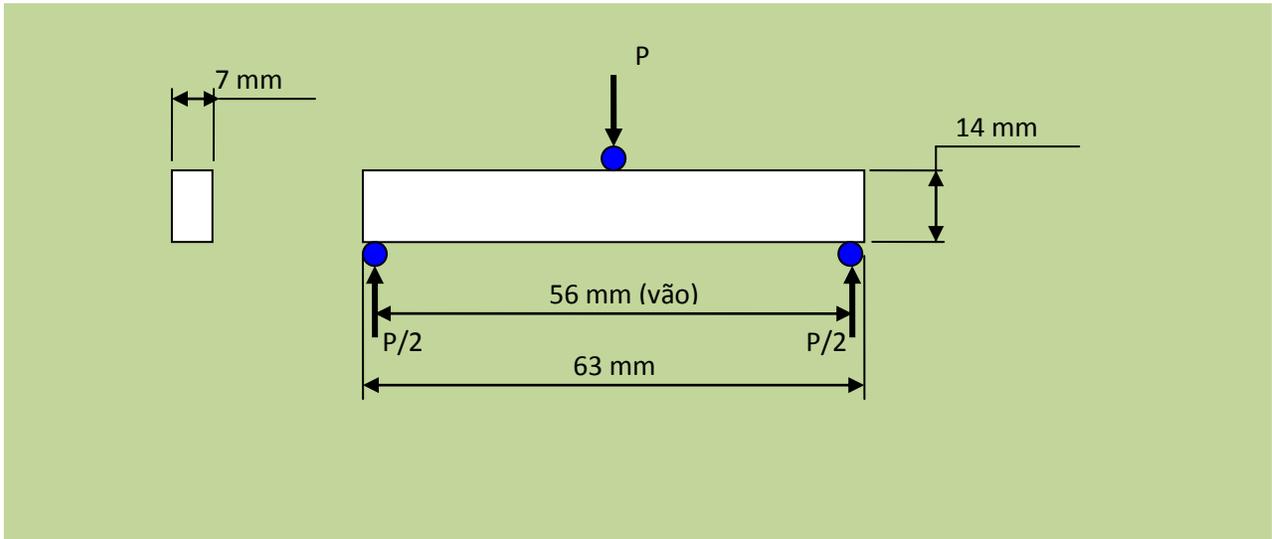


Figura 3.19 Desenho dos corpos-de-prova de flexão e fadiga e da fixação dos corpos-de-prova no dispositivo de ensaio.

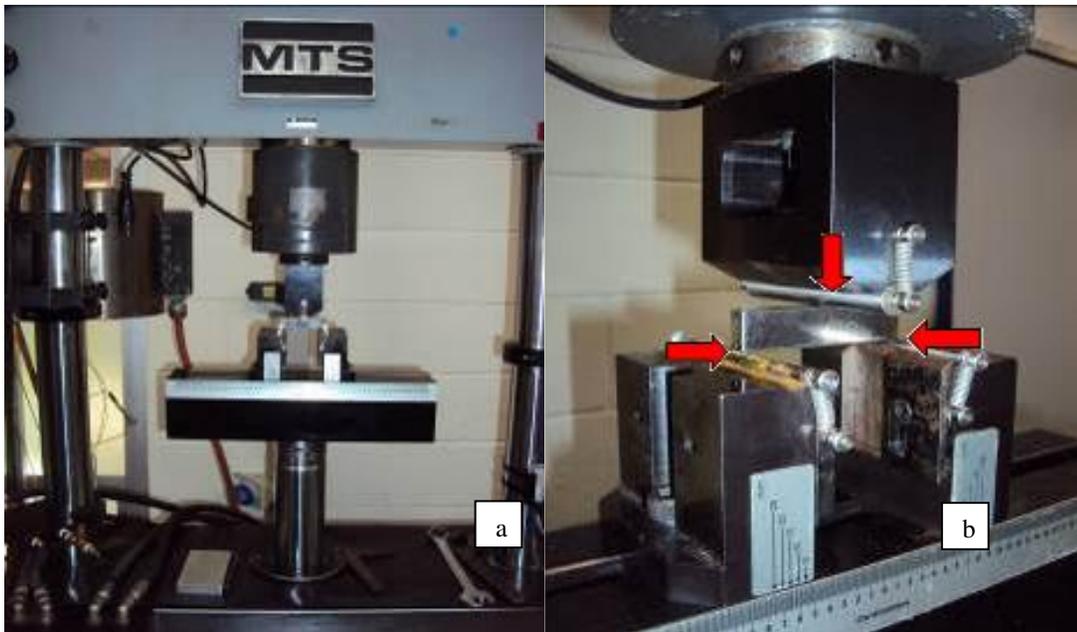


Figura 3.20 (a) Montagem experimental da MTS durante o ensaio de fadiga e (b) Corpo-de-prova de fadiga na MTS mostrando os três pontos do corpo-de-prova em flexão durante o ensaio [SYME QUEIROZ, 2011].



Figura 3.21 Superfície de fratura de um corpo-de-prova da Roda RFo5, após o ensaio de fadiga [SYME QUEIROZ, 2011].

3.2.7. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para a caracterização do material, amostras dos corpos-de-prova das rodas ferroviárias utilizadas nos ensaios de fadiga e impacto Charpy foram analisadas. As amostras foram devidamente higienizadas pelos processos água-sabão e álcool-ultrassom.

Nesses ensaios foram utilizadas três amostras dos corpos-de-prova das rodas RF1 e RF4 e RFo5, duas das rodas RFo2 e RFo3 dos corpos-de-prova dos ensaios de fadiga e três amostras dos corpos-de-prova da roda RFo3 do ensaio de impacto Charpy. A microscopia eletrônica de varredura com amostras dos corpos-de-prova das rodas RF1, RFo2 e RFo3 obtidas dos ensaios de fadiga e as amostras da roda RFo3 dos ensaios de impacto Charpy foi realizada em um microscópio eletrônico de varredura modelo Leo 440i. Enquanto que a microscopia eletrônica de varredura para as amostras dos corpos-de-prova das rodas RF4 e RFo5 dos ensaios de fadiga foi realizada em uma máquina do tipo EVO MA – 15, CARL ZEISS SMT – Nano Technology Systems Division. Nessa análise foram obtidas fractografias da superfície de fratura, ver Figura 3.21, das interfaces de fadiga-fratura final, da zona de fadiga e zona de fratura final-clivagem das amostras dos corpos-de-prova dos ensaios de fadiga e imagens da superfície de fratura, ver Figura 3.13 (b), e clivagem de amostras dos corpos-de-prova dos ensaios de impacto Charpy. A Figura 3.22 mostra um dos equipamentos utilizados durante os ensaios.

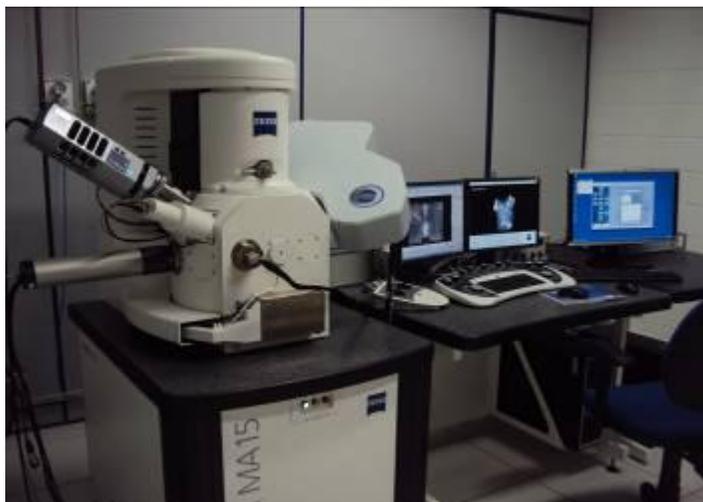


Figura 3.22 Máquina EVO MA – 15, CARL ZEISS SMT – Nano Technology Systems Division utilizada para obter fractografias dos corpos-de-prova das rodas ferroviárias RF4 e RFo5 [SYME QUEIROZ, 2011].

Capítulo 4

Resultados e Discussão

Os resultados apresentados neste capítulo seguem a descrição estabelecida na Tabela 3.2 do Capítulo 3. Primeiramente, serão apresentados os resultados da análise metalográfica, seguidos dos ensaios de dureza, tração, impacto Charpy, tenacidade à fratura, fadiga, finalizando com a microscopia eletrônica de varredura. Os resultados serão discutidos à medida que forem apresentados.

4.1. Análise metalográfica

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam as micrografias obtidas da análise metalográfica dos corpos-de-prova, dos ensaios de fadiga, usinados das rodas RF4 e RFo5.

As micrografias observadas nas Figuras 4.1 e 4.2 são microestruturas características de martensita revenida, o que está de acordo com o processo de fabricação das rodas, pois os corpos-de-prova foram retirados dos aros das rodas. Como citado nos itens 2.2.2 (c) e 2.3.2 (f) as rodas são temperadas (em água, a partir de 860° C) e revenidas (entre 450 e 500° C) na região do aro. Em rodas ferroviárias, o tratamento de revenimento, durante o processo de fabricação das rodas, é realizado para alívio das tensões residuais e controle da dureza das rodas.

4.2. Ensaios de dureza Rockwell

A Tabela 4.1 apresenta os valores médios, de três medições em cada amostra, obtidos dos ensaios de dureza Rockwell C (HRC) para amostras dos corpos-de-prova (CPS) 2 a 12 dos ensaios de fadiga das rodas RF4 e RFo5 e os valores mínimos e máximos recomendados pela AAR obtidos a partir da conversão dos valores de dureza Brinell apresentados na Tabela 2.4. Como mostra a Tabela 4.1, existe uma diferença significativa entre os valores de dureza dos dois tipos de material (Rodas fundida e forjada). Desse modo, observa-se que a roda RFo5 apresenta valores de dureza Rockwell C da ordem de 21% maior que a roda RF4 e ainda que os valores de

dureza e a média desses valores para a roda RFo5 são próximos aos valores apresentados na Tabela 2.4, conversão de valores de durezas para rodas da Classe C.

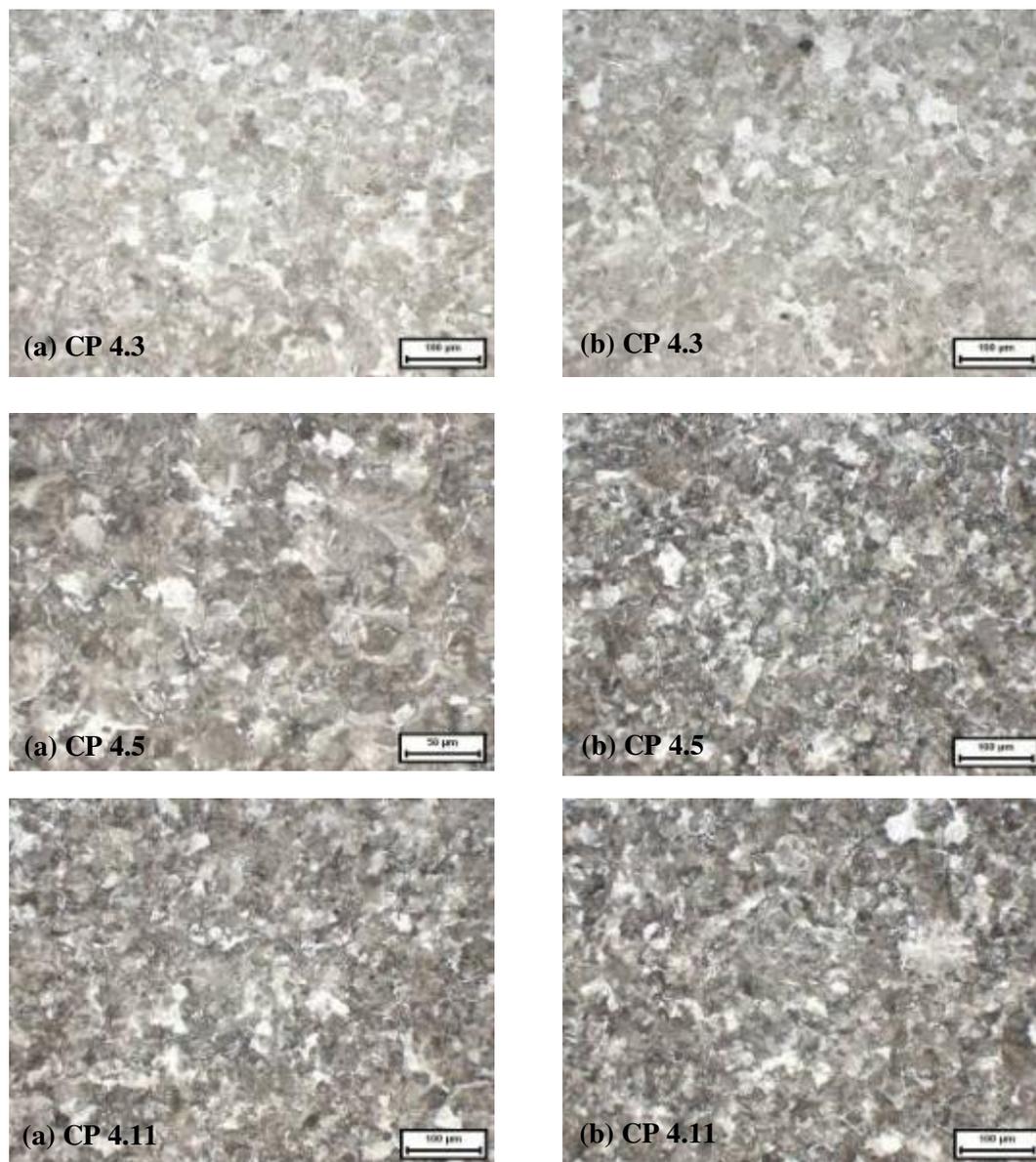


Figura 4.1 Micrografias dos corpos-de-prova 3, 5 e 11, dos ensaios de fadiga, usinados da Roda RF4. (a) Região centro da amostra e (b) Região da extremidade esquerda da amostra. CP 4.3 significa roda 4, corpo-de-prova nº 3, e assim sucessivamente.

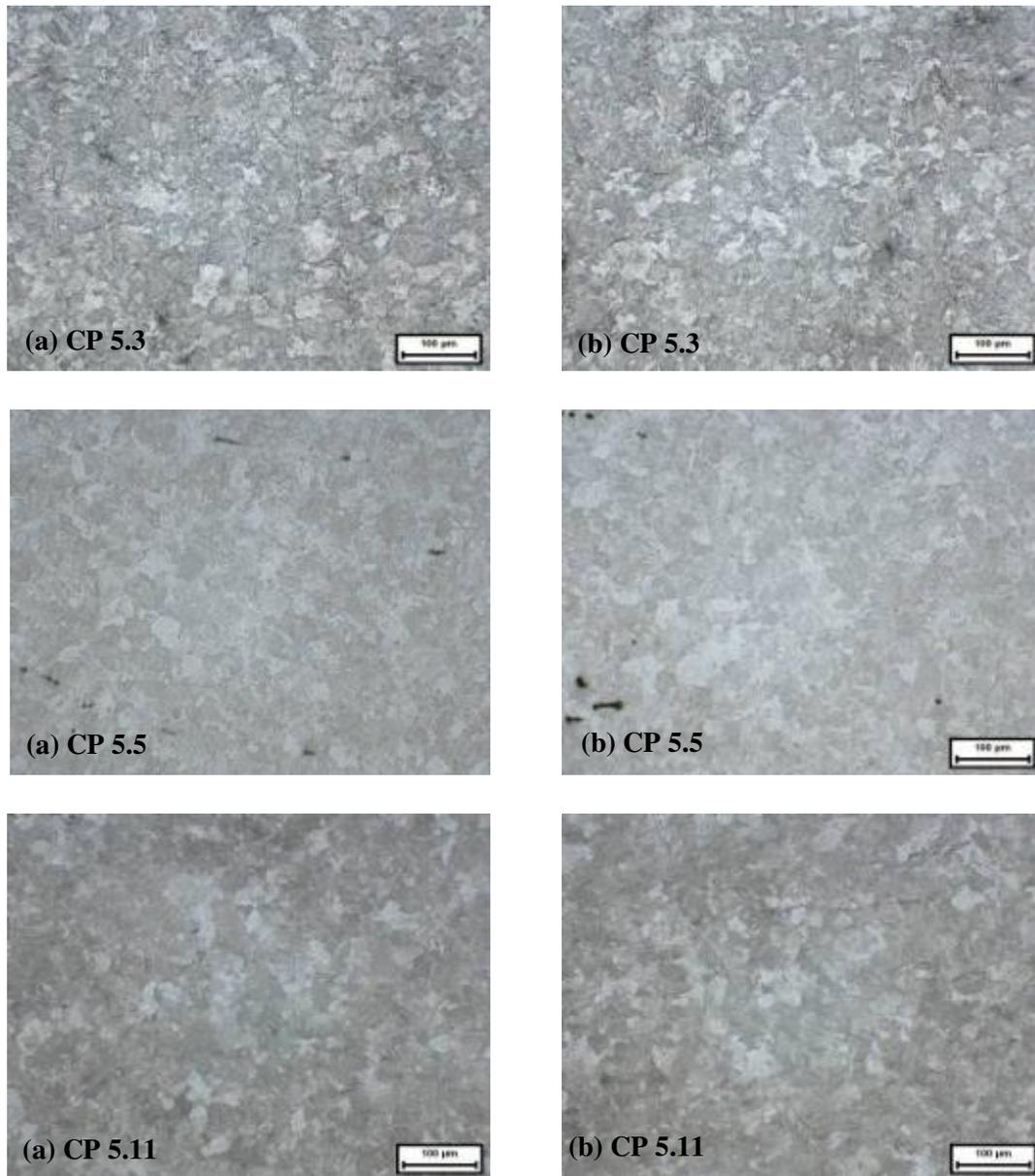


Figura 4.2 Micrografias dos corpos-de-prova 3, 5 e 11, dos ensaios de fadiga, usinados da Roda RFo5 (a) Região centro da amostra e (b) Região da extremidade esquerda da amostra.

Quanto à roda RF4, os valores da dureza e a média dos valores, em sua maioria, estão inferiores aos valores apresentados na mesma tabela. De acordo com as recomendações da norma AAR M – 107 [AAR M – 107, 2007] ensaios de dureza em rodas ferroviárias devem ser realizados durante o processo de fabricação das rodas para confirmação e validação dessa propriedade mecânica. A roda RF4 possui teor de carbono igual a 0,67 que é o valor mínimo especificado pela norma AAR M – 107 [AAR M – 107, 2007] para rodas ferroviárias da Classe C e o valor máximo para rodas da Classe B desta norma, ver tabela 2.3. Como os ensaios foram realizados a partir de corpos-de-prova usinados dos aros das rodas ferroviárias que possui microestrutura de característica martensita revenida e materiais com essa característica o aumento da dureza ocorre com o aumento do teor de carbono. Podemos atribuir os valores de dureza, inferiores aos valores mínimos recomendados pela AAR M – 107 [AAR M – 107, 2007], encontrados para a roda RF4 a essa relação dureza - teor de carbono.

Tabela 4.1 Valores médios dos resultados obtidos nos ensaios de dureza Rockwell (HRC).

CPS HRC	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Roda RF4	32,0	32,0	32,3	31,2	30,6	30,5	31,2	31,5	30,9	31,0	31,1
Roda RFo5	36,7	39,3	39,9	39,9	40,2	39,8	39,8	39,6	39,7	39,8	40,1
Média	Roda RF4 - 31,3					Roda RFo5 – 39,5					
Desvio padrão	Roda RF4 – 0,56					Roda RFo5 – 0,92					
Roda da Classe C da AAR	Dureza mínima – 34,3 HRC					Dureza Máxima – 39,1 HRC					

4.3. Ensaio de tração

Os resultados dos ensaios de tração estão apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.3. Para cada tipo de roda analisada os seguintes dados foram coletados: limite de escoamento (LE), limite de resistência à tração (LR), Alongamento específico até a fratura (AL) e redução de área - estricção (RA). Os resultados apresentam os valores médios e o desvio padrão obtidos durante os ensaios de tração de corpos-de-prova (CPs) retirados do aro e disco das rodas RF1 e RFo2 e RFo3 e os valores recomendados pela norma BS EN 13262 [BS EN 13262, 2011] para os limites de

escoamento, limites de resistência à tração e Redução de área – estrição para ensaios realizados com corpos-de-prova usinados do aro de rodas ferroviárias e limite de tração e redução de área – estrição para ensaios realizados com corpos-de-prova usinados do disco de rodas ferroviárias.

Tabela 4.2 Resultado dos ensaios de tração com CPs do aro das rodas RF1, RFo2 e RFo3.

Características	RF1	RFo2	RFo3	BS EN 13262
LE 1 (MPa)	806,0	814,0	807,0	
LE 2 (MPa)	776,3	777,4	779,2	>520
LE 3 (MPa)	814,5	809,8	797,8	
LE 4 (MPa)	774,2	778,6	767,7	
Média (MPa)	793,0	795,0	788,0	
Desvio Padrão	20,5	19,6	17,7	
LR 1 (MPa)	1196,8	1210,6	1205,5	
LR 2 (MPa)	1165,6	1182,6	1188,5	820-940
LR 3 (MPa)	1206,2	1199,1	1198,3	
LR 4 (MPa)	1164,3	1179,9	1177,4	
Média (MPa)	1183,2	1193,1	1192,4	
Desvio Padrão	21,4	14,4	12,2	
AL 1(%)	9,1	12,2	12,1	
AL 2(%)	6,0	11,7	13,5	
AL 3(%)	8,4	12,6	13,6	
AL 4(%)	4,8	11,6	12,2	
Média (%)	7,0	12,0	13,0	
Desvio Padrão	2,0	0,5	0,8	
RA 1 (%)	11,4	25,3	31,5	
RA 2 (%)	5,5	25,2	34,6	≥14
RA 3 (%)	14,1	25,5	33,6	
RA 4 (%)	5,5	27,0	34,9	
Média (%)	9,1	25,7	33,6	
Desvio Padrão	4,3	0,8	1,5	

Tabela 4.3 Resultado dos ensaios de tração com CPs do disco das rodas RF1, RFo2 e RFo3.

Características	RF1	RFo2	RFo3	BS EN 13262
LE 1 (MPa)	466,2	448,9	446,4	
LE 2 (MPa)	472,2	444,0	443,8	
LE 3 (MPa)	472,9	457,3	451,5	
LE 4 (MPa)	471,3	443,8	460,3	
Média (MPa)	470,6	448,5	450,5	
Desvio Padrão	3,0	6,3	7,3	
LR 1 (MPa)	890,8	904,5	911,0	
LR 2 (MPa)	890,5	903,9	907,8	≥110
LR 3 (MPa)	900,5	910,5	916,7	
LR 4 (MPa)	935,1	901,5	920,6	
Média (MPa)	904,2	905,1	914,0	
Desvio Padrão	21,1	3,8	5,7	
AL 1 (%)	4,2	12,9	14,6	
AL 2 (%)	5,0	13,0	14,3	
AL 3 (%)	4,7	12,6	14,6	
AL 4 (%)	7,4	13,9	12,0	
Média (%)	5,3	13,1	13,8	
Desvio Padrão	1,4	0,5	1,3	
RA 1 (%)	5,1	23,9	27,6	
RA 2 (%)	5,8	24,2	26,1	≥16
RA 3 (%)	5,7	24,2	26,9	
RA 4 (%)	11,0	25,0	24,7	
Média (%)	6,9	24,3	26,2	
Desvio Padrão	2,7	0,5	1,2	

Por meio dos valores médios e desvios padrões dos resultados obtidos nos ensaios de tração para análise comparativa com os valores especificados pela norma BS EN 13262 [BS EN 13262, 2011] e outras referências, observa-se que:

- 4.3.1 Os resultados dos ensaios de tração com corpos-de-prova usinados dos aros das três rodas RF1, RFo2 e RFo3, quanto aos limites de escoamento estão de acordo com os valores estabelecidos pela norma BS EN 13262 indicados na Tabela 2.6, a média e o desvio padrão das três rodas apresentaram valores praticamente iguais.
- 4.3.2 Os valores dos limites de resistência à tração, com corpos-de-prova usinados dos aros das três rodas, ultrapassaram em média 26% o valor estabelecido pela norma e a média das três rodas também apresentou valores praticamente iguais, porém, o desvio padrão da roda RF1 apresentou valor superior aos das rodas RFo2 e RFo3.
- 4.3.3 A média dos valores do alongamento específico até a fratura, com corpos-de-prova usinados dos aros das três rodas, das rodas RFo2 e RFo3 foi em média 44% maior que o da roda RF1 e o desvio padrão das rodas RFo2 e RFo3 apresentou valores, em média, 35% menor que o da roda RF1.
- 4.3.4 O valores médios da redução de área, com corpos-de-prova usinados dos aros das três rodas, RFo2 e RFo3 estão de acordo com o estabelecido pela norma, porém, o valor médio da roda RF1 foi inferior ao estabelecido pela norma BS EN 13262. Os valores médios das rodas RFo2 e RFo3 foram em média 69% maiores que o valor médio da roda RF1, mas, o desvio padrão da roda RF1 foi em média 73% maior que o das rodas RFo2 e RFo3.
- 4.3.5 Os resultados dos limites de escoamento, assim como a média dos resultados, dos corpos-de-prova usinados dos discos das três rodas apresentaram valores muito próximos, porém, a média dos valores da roda RF1 foi superior a média dos valores das rodas RFo2 e RFo3 e a média dos desvios padrões das rodas RFo2 e RFo3 foi 56% superior ao da roda RF1.
- 4.3.6 Os resultados e a média desses resultados dos limites de resistência à tração, dos corpos-de-prova usinados dos discos das três rodas, foram praticamente iguais e

estão de acordo com o recomendado pela norma BS EN 13262, o desvio padrão da roda RF1 foi aproximadamente 77% maior que a média dos valores dos desvios padrões das rodas RF02 e RF03.

- 4.3.7 Os valores dos alongamentos específicos até a fratura e da média desses valores, dos corpos-de-prova usinados dos discos das três rodas, mostrou comportamento superior das rodas RF02 e RF03 em relação a roda RF1, mas, o valor do desvio padrão da roda RF1 foi superior aos das rodas RF2 e RF3.
- 4.3.8 Os valores das reduções de área e a média desses valores, dos corpos-de-prova usinados dos discos das três rodas, das rodas RF02 e RF03 estão de acordo com a recomendação da norma BS EN 13262 e foram superiores aos valores da roda RF1. O desvio padrão da roda RF1 também mostrou superioridade em relação aos das rodas RF02 e RF03.
- 4.3.9 Comportamento semelhante aos encontrados nesse estudo, foram verificados por Tarafder et al. (2007) ao comparar dados obtidos em ensaios com corpos-de-prova de rodas ferroviárias fundidas e forjadas, em estudos das propriedades de tração, onde os dois tipos de rodas mostraram valores de propriedades de resistência mais altos na região do aro em comparação com a região do disco.
- 4.3.10 Sivaprasad et al. (831007), observou, em seu estudo experimental com rodas fundidas e forjadas, que as rodas fundidas geralmente apresentam propriedades de resistência altas e ductilidade baixa em comparação as rodas forjadas e também apresentam propriedades de resistência mais altas na região do aro em relação a região do disco das rodas.

4.4. Ensaio de impacto Charpy

Os resultados dos ensaios de impacto Charpy estão apresentados Tabela 4.4. A tabela apresenta os resultados das energias de impacto Charpy obtidas para as três rodas RF1, RFo2 e RFo3, a média e do desvio padrão desses resultados. Por meio dos resultados observa-se que:

- 4.4.1 Os resultados do ensaio de impacto mostram que os valores obtidos para a roda RF1 são em média aproximadamente 53% inferiores aos valores da roda RFo2 e aproximadamente 63% inferiores aos valores obtidos para a roda RFo3.
- 4.4.2 Os resultados dos ensaios de impacto mostram também que os valores obtidos, tanto para a média quanto para o valor mínimo, da roda RF1 são inferiores aos valores recomendados pela norma BS EN 13262 [BS EN 13262, 2011].
- 4.4.3 Quanto à roda RFo2, os valores estão próximos do valor mínimo estabelecido pela norma e os valores obtidos para a roda RFo3 são compatíveis aos valores mínimo e médio recomendados pela norma.
- 4.4.4 Observou-se ainda por meio dos resultados obtidos nos ensaios de impacto Charpy que o comportamento das rodas forjadas quanto à absorção de energia até a fratura, ou seja, a tenacidade ao impacto é superior aos resultados obtidos para a roda fundida.
- 4.4.5 Parida [Parida, 2009] em seus ensaios de impacto, obteve resultados semelhantes aos da roda RF1 em ensaios com três corpos-de-prova de rodas ferroviárias danificadas ainda em serviço.

Tabela 4.4 Resultados dos ensaios de impacto Charpy no aro das rodas RF1, RFo2 e RFo3.

Corpos-de-prova	RF1(J)	RFo2(J)	RFo3(J)	BS EN 13262(J)
A 1	4	14	17	
A2	4	11	18	
A3	6	11	16	
B1	6	*	16	
B2	6	10	11	
B3	6	12	14	
C1	6	13	16	Mínimo \geq 12
C2	6	10	16	
C3	7	12	12	
D1	6	15	16	
D2	6	14	18	
D3	5	11	15	
Média	5,6	12,0	15,4	\geq17
Desvio Padrão	0,9	1,7	2,2	

*Teste invalido

4.5. Ensaio de tenacidade à fratura

Os ensaios de tenacidade à fratura foram realizados em três corpos-de-prova de cada tipo de roda (RF1, RFo2 e RFo3). Os resultados obtidos durante os ensaios estão apresentados na Tabela 4.5, a tabela mostra a média e o desvio padrão dos valores dos resultados dos ensaios e os valores recomendados pelas normas AAR M-107 e BS EN 13262 [AAR M-107, 2007; BS EN 13262, 2011].

Os resultados obtidos tanto para a roda RF1 quanto para as rodas RFo2 e RFo3 estão de acordo com os valores recomendados pela norma da AAR para rodas ferroviárias da Classe C. Entretanto, os mesmos valores são inferiores aos valores especificados pela norma BS EN 13262 [BS EN 13262, 2011]. A média dos valores de tenacidade à fratura obtidos para a roda RF1 é aproximadamente 8% menor que os valores das rodas RFo2 e RFo3. Em estudo comparativo com rodas fundidas e forjadas, Tarafder [Tarafder, 2007] observou comportamento superior das rodas

forjadas em relação as fundidas ao analisar os valores obtidos em ensaios de tenacidade à fratura para os dois tipos de rodas. Sivaprasad [Sivaprasad, 2007] ao analisar os resultados dos ensaios de tenacidade à fratura de rodas fundidas e forjadas constatou que no geral rodas forjadas mostram comportamento superior as rodas fundidas. Em estudos sobre as características mecânicas de rodas ferroviárias para reforço da padronização, Kwon [Kwon, 2007] observou que valores altos de tenacidade à fratura na região da pista de rolamento das rodas ferroviárias são causados pelo tratamento térmico, isso causa também um considerável aumento nas propriedades de dureza e resistência ao desgaste, mas, não tanto na resistência à fratura.

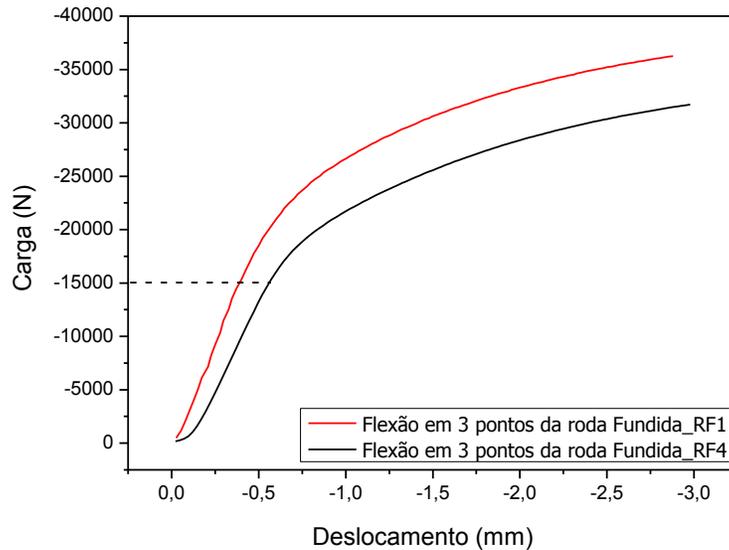
Tabela 4.5 Resultado dos ensaios de tenacidade à fratura das rodas RF1, RFo2 e RFo3

Corpos-de-prova	RF1	RFo2	RFo3	Roda Classe C	BS EN 13262
A ($\text{MPa}\sqrt{m}$)	43,6	48,3	45,0		
B ($\text{MPa}\sqrt{m}$)	43,7	49,1	44,4	> 33 ($\text{MPa}\sqrt{m}$)	> 70 ($\text{MPa}\sqrt{m}$)
C ($\text{MPa}\sqrt{m}$)	42,2	43,5	45,0		
Média ($\text{MPa}\sqrt{m}$)	43,2	46,9	44,8	>40 ($\text{MPa}\sqrt{m}$)	>80 ($\text{MPa}\sqrt{m}$)
Desvio Padrão	0,8	3,0	0,3		

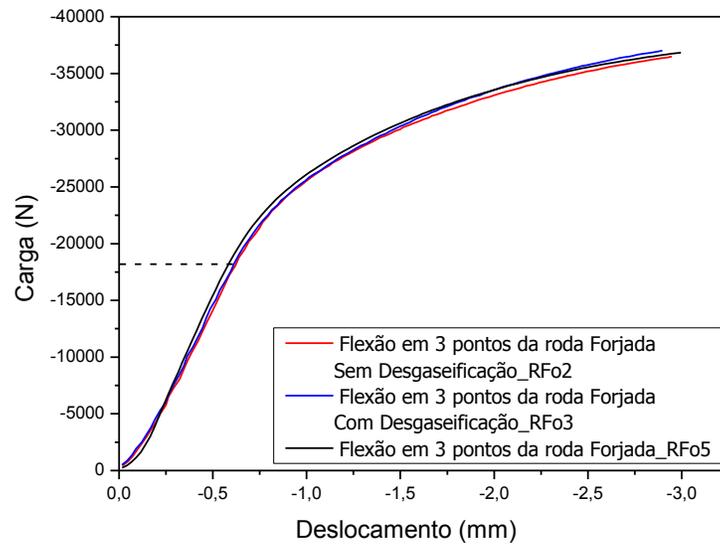
4.6. Ensaio de fadiga

Para a definição das cargas máximas a serem utilizadas nos ensaios de fadiga, foram realizados ensaios de flexão em um corpo-de-prova do ensaio de fadiga de cada roda. A Figura 4.3 (a e b) mostra os resultados dos ensaios de flexão.

Importante salientar que os resultados dos ensaios de flexão como nos ensaios de fadiga foram realizados flexão em três pontos, como mostra a Figura 3.18, com razão de carga (R) igual a 0,1. Com base nessas figuras é possível observar que as cargas máximas (Cm) de 15 kN e 18 kN aplicadas aos corpos-de-prova usinados das rodas fundidas e forjadas, respectivamente, estão dentro da região elástica.



(a) Curvas carga-deslocamento obtidas nos ensaios de flexão das rodas RF1 e RF4.



(b) Curvas carga-deslocamento obtidas nos ensaios de flexão das rodas RFo2, RFo3 e RFo5.

Figura 4.3 Curvas carga-deslocamento obtidas nos ensaios de flexão para definição das cargas utilizadas nos ensaios de fadiga (a) rodas RF1 e RF4 e (b) rodas RFo2, RFo3 e RFo5.

Os resultados dos ensaios de fadiga para das cinco rodas estão apresentados na Tabela 4.6, a tabela mostra o Grau médio ou porcentagem de falha, de acordo com a distribuição

probabilística de Weibull [NBR 6742, 1987], a Vida em fadiga (número de ciclos até a fratura), a Média e o Desvio padrão alcançados a partir do número de ciclos até a fadiga. Os primeiros ensaios de fadiga foram realizados para as rodas RF1, RFo2 e RFo3 onde as médias e os desvios padrões, calculados a partir dos resultados obtidos da vida em fadiga das três rodas, apresentam valores basicamente iguais.

Tabela 4.6 Resultados dos ensaios de fadiga dos corpos-de-prova das rodas fundidas e forjadas.

Rodas Fundidas – Cm = 15 kN, R = 0,1				Rodas Forjadas Cm = 18 kN, R = 0,1						Grau médio* Porcentagem de falha (F) (%)
CP RF1	RF1 Vida em fadiga (N) (ciclos)	CP RF4	RF4 Vida em fadiga (N) (ciclos)	CP RFo2	RFo2 Vida em fadiga (N) (ciclos)	CP RFo3	RFo3 Vida em fadiga (N) (ciclos)	CP RFo5	RFo5 Vida em fadiga (N) (ciclos)	
1-3	83297	4-3	137915	2-3	77644	3-3	75221	5-3	78582	6,697
1-4	84268	4-4	141109	2-4	80795	3-4	76982	5-4	85369	16,226
1-5	85346	4-5	141223	2-5	81387	3-5	78293	5-5	99558	25,857
1-6	88716	4-6	158477	2-6	83766	3-6	83060	5-6	101525	35,510
1-7	90384	4-7	162326	2-7	91036	3-7	89379	5-7	102958	45,169
1-8	101153	4-8	175053	2-8	91279	3-8	90012	5-8	117550	54,831
1-9	108464	4-9	187234	2-9	113166	3-9	94136	5-9	126504	64,490
1-10	109783	4-10	188940	2-10	132007	3-10	95543	5-10	129104	74,142
1-11	115277	4-11	193873	2-11	139598	3-11	104507	5-11	138770	83,774
1-12	116213	4-12	253834	2-12	163797	3-12	134370	5-12	148573	93,303
Média	98290	Média	173998	Média	105448	Média	92150	Média	112849	-
Desvio Padrão	13319	Desvio Padrão	34965	Desvio Padrão	30137	Desvio Padrão	17493	Desvio Padrão	22980	-

* - Grau médio de acordo com a norma ABNT NBR 6742 (Janeiro / 1987)

Posteriormente foram realizados ensaios de fadiga com as rodas RF4 e RFo5, os resultados das médias e desvios padrões das duas rodas mostram uma superioridade nos dados da roda RF4 em relação a roda RFo5. A vida em fadiga da roda RF4 foi aproximadamente 35% superior a da roda RFo5, porém, vale ressaltar que a carga máxima nos ensaios foi de 15 kN para a roda RF4 e 18 kN para a roda RFo5. O comportamento superior, da vida em fadiga, da roda RF4 em relação

a roda RFo5, não foi analisado em outras literaturas, que, geralmente, apresentam valores para ensaios de fadiga de rodas forjadas superiores aos de rodas fundidas.

Ao analisar os dados obtidos nos ensaios de fadiga entre as duas rodas fundidas RF1 e RF4, onde ambas foram ensaiadas com carga máxima de 15 kN, observa-se que a vida em fadiga da roda RF4 é aproximadamente 44% maior que a roda RF1. Quanto ao comportamento da vida em fadiga das três rodas forjadas, com carga máxima nos ensaios de 18 kN, os valores obtidos foram aproximados, mesmo a roda RFo2 sendo uma roda fabricada sem o processo de desgaseificação, pois as rodas forjadas desgaseificadas, em sua maioria, apresentam melhor resistência à fadiga pela redução de gases como o hidrogênio, que conseqüentemente, reduz inclusões e aumenta a pureza dos aços.

Tarafder e Silvaprasad [Tarafder 2007; Silvaprasad, 2007] ao analisarem o comportamento mecânico da resistência a fadiga de corpos-de-prova de rodas ferroviárias fundidas e forjadas observaram que os resultados dos ensaios da resistência ao crescimento da trinca em fadiga dos dois tipos de rodas são muito próximos e que, corpos-de-prova usinados da região do aro das rodas apresentam comportamento superior aos dos corpos-de-prova usinados da região do disco para os mesmos ensaios.

Os procedimentos para obtenção e manuseio dos dados para interpretação dos ensaios de fadiga, foram realizados baseados na distribuição probabilística de Weibull [NBR 6742, 1987]. As Figuras 4.4 a 4.9 apresentam os gráficos dos ajustes lineares dos ensaios de fadiga das cinco rodas segundo o papel probabilístico de Weibull.

A Tabela 4.7 mostra os resultados da distribuição de Weibull para um intervalo de confiança de 95%, em termos do coeficiente de correlação dos pontos (R^2), da inclinação de Weibull (b) e da vida característica (θ) - correspondente a 63,2% de probabilidade de falha. As vidas características foram 104454, 117453, 98801, 188630 e 122321 ciclos, respectivamente para as rodas RF1 a RFo5 e o coeficiente de correlação de aproximadamente 0,9 para as cinco rodas.

Em termos da distribuição estatística de Weibull, como apresenta a Figura 4.9, os resultados foram basicamente os mesmos para as cinco rodas RF1, RFo2, RFo3 e RFo5.

A roda RF4 apresentou resultados aproximados aos das demais rodas. Os resultados obtidos a partir da distribuição de Weibull mostraram um comportamento similar para as quatro rodas (RF1, RFo2, RFo3 e RFo5). Entretanto, como a carga máxima no caso da roda RF1 foi 20% menor, podemos concluir que a vida em fadiga dos corpos-de-prova usinados das rodas RFo2, RFo3 e RFo5 é aproximadamente 20% maior que os corpos-de-prova da roda fundida RF1.

O comportamento da roda RF4 em termos da distribuição de Weibull, em relação as outras rodas, era esperado como consequência dos resultados da elevada vida em fadiga da roda RF4, mas, não é um comportamento típico de rodas fundidas que geralmente apresentam Vida em fadiga inferior as rodas forjadas.

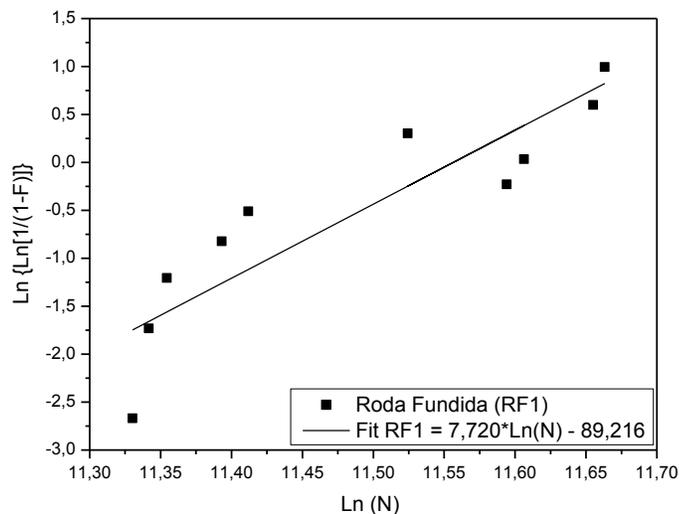


Figura 4.4 Ajuste linear dos resultados dos ensaios de fadiga da roda RF1. Papel probabilístico de Weibull.

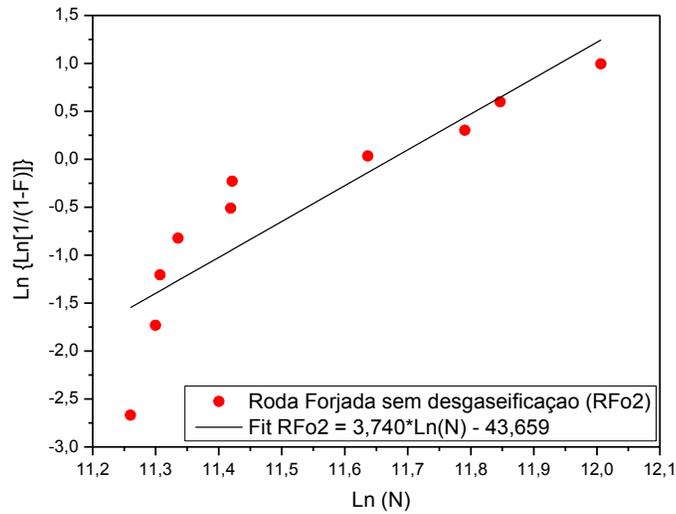


Figura 4.5 Ajuste Linear dos resultados dos ensaios de fadiga da roda RFo2, sem desgaseificação. Papel probabilístico de Weibull.

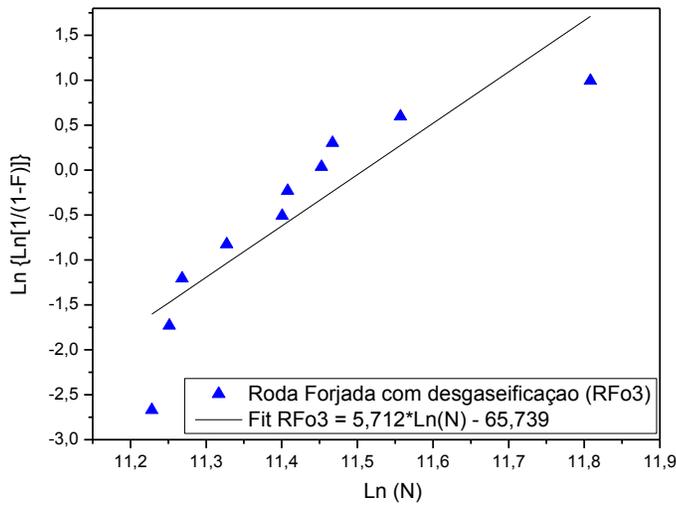


Figura 4.6 Ajuste linear dos resultados dos ensaios de fadiga da roda RFo3, com desgaseificação. Papel probabilístico de Weibull

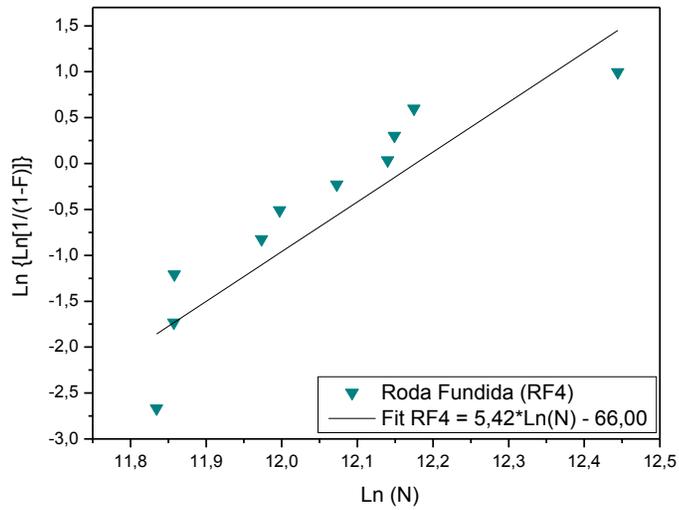


Figura 4.7 Ajuste linear dos resultados dos ensaios de fadiga da roda RF4. Papel probabilístico de Weibull.

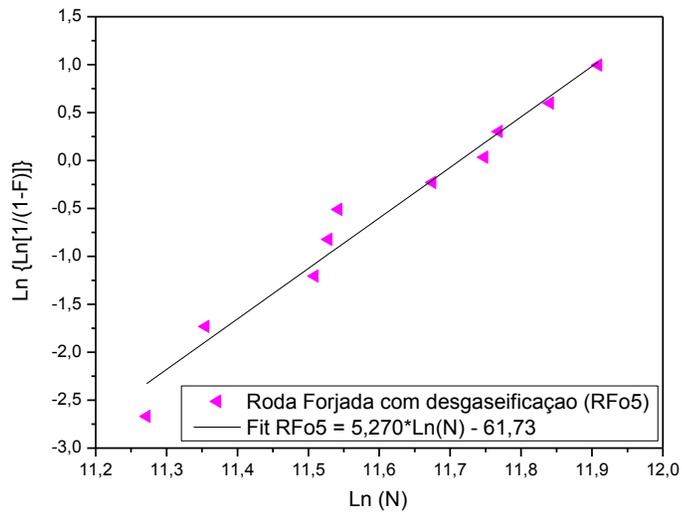


Figura 4.8 Ajuste linear dos resultados dos ensaios de fadiga da roda RFo5, com degaseificação. Papel probabilístico de Weibull.

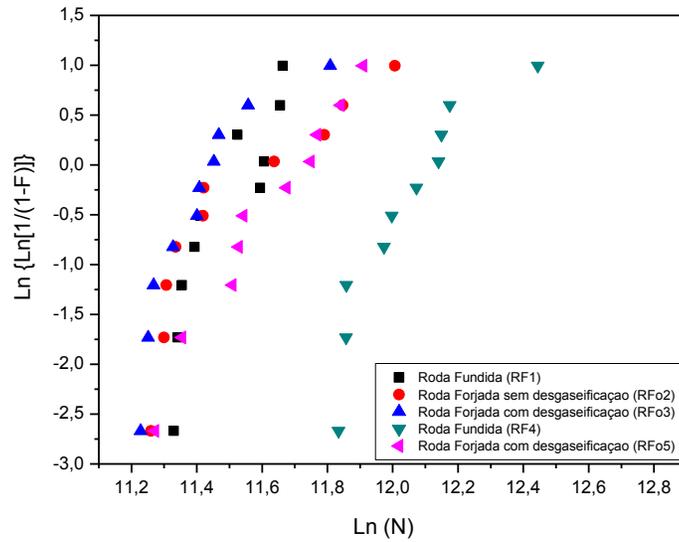


Figura 4.9 Resultados dos ensaios de fadiga das rodas fundidas RF1 e RF4, forjada sem desgaseificação RFo2 e forjada com desgaseificação RFo3 e RFo5. Papel probabilístico de Weibull.

A Tabela 4.7 apresenta os resultados da distribuição de Weibull para as rodas cinco rodas (RF1, RFo2, RFo3, RF4 e RFo5) de acordo com os parâmetros estabelecidos para os ensaios de fadiga. A tabela mostra a carga máxima de cada roda utilizada nos ensaios de fadiga, a inclinação de Weibull, a vida característica e o coeficiente de correlação dos pontos.

Tabela 4.7 Resultados da distribuição de Weibull, para um intervalo de confiança de 95%, em termos do coeficiente de correlação dos pontos (R^2), da inclinação de Weibull (b) e da vida característica (θ) - correspondente a 63,2% de probabilidade de falha, para os ensaios de fadiga das cinco rodas ferroviárias.

Rodas		Carga Máxima	b	θ (ciclos)	R^2
Fundidas	RF1	15 kN	7,72	104454	0,923
	RF4	15kN	5,42	188630	0,809
Forjadas	RFo2	18 kN	3,74	117453	0,885
	RFo3	18kN	5,71	98801	0,884
	RFo5	18 kN	5,27	122321	0,960

4.7. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A caracterização realizada por meio da microscopia eletrônica de varredura permitiu a obtenção de fractografias da superfície de fratura dos corpos-de-prova de uma roda forjada dos ensaios de impacto Charpy e corpos-de-prova das rodas fundidas e forjadas utilizados nos ensaios de fadiga, todos usinados da região do aro das rodas. Na análise das fractografias observa-se que:

As fractografias mostradas na Figura 4.10 são de corpos-de-prova dos ensaios de impacto Charpy e apresentam em (a) a superfície de fratura e em (b) a zona de fratura final-clivagem. Nos corpos-de-prova do ensaio de impacto Charpy a fratura ocorreu por clivagem que é o micromecanismo de fratura típico e esperado em análises por microscopia eletrônica de varredura realizada em corpos-de-prova utilizados nos ensaios de impacto. Parida [Parida, 2009] observou também semelhante morfologia com total presença de clivagem ao examinar três amostras de rodas ferroviárias após ensaios de impacto.

A Figura 4.11 apresenta as fractografias obtidas da superfície de fratura dos corpos-de-prova da roda RF1. Observa-se em (a), a interface fadiga-fratura. Em (b) observa-se a zona de fadiga, observada em (a), e a presença de ondas característica da zona de fadiga. Em (c) observa-se a zona de fratura final, também observada em (a), caracterizada por clivagem.

Na Figura 4.12 observa-se, superfície de fratura corpos-de-prova das rodas RFo2 e RFo3, a sequência de fractografias muito semelhantes as da roda RF1. (a) mostra a interface fadiga-fratura, (b) a zona de fadiga observada em (a) e em (c) a zona de fratura final-clivagem.

As Figuras 4.13 e 4.14 apresentam, para os corpos-de-prova das rodas RF4 e RFo5, também uma sequência de fractografias muito semelhante as dos corpos-de-prova das rodas RF1, RFo2 e RFo3. Em (a) observa-se a interface fadiga-fratura, (b) a zona de fadiga observada em (a) e em (c) a zona de fratura final-clivagem.

As fractografias obtidas dos corpos-de-prova dos ensaios de fadiga revelam dois tipos de zonas na superfície de fratura. A primeira (parte inferior das figuras) é a zona de propagação de trinca por fadiga e a segunda (parte superior das figuras) zona de fratura final. Em (a) de todas as fractografias, dos corpos-de-prova dos ensaios de fadiga, observa-se que as dimensões das duas zonas são aproximadas o que é característico de grau médio de sobrecarga e indica também bom nível de tenacidade, como se comprovou nos resultados dos ensaios de tenacidade à fratura para as duas rodas. De acordo com Ferreira [Ferreira, 2009], quanto maior a área de fratura final, maior o nível de tensão nominal e também menor a tenacidade à fratura do material. Em (b) observa-se a presença de ondas características da zona de fadiga e em (c) uma zona de clivagem ou zona de fratura final.

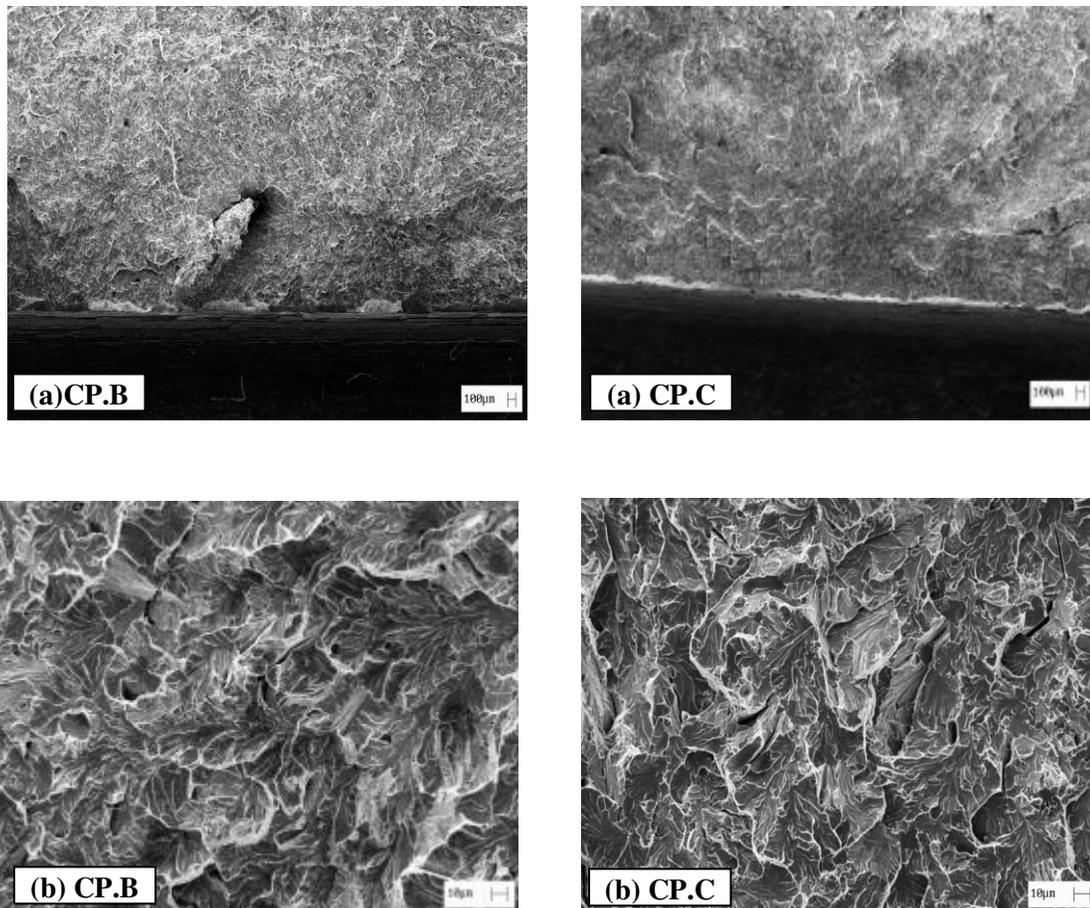


Figura 4.10 Fractografias dos corpos-de-prova B e C da roda RFo3. (a) Superfície de fratura, (b) Zona de fratura final-clivagem.

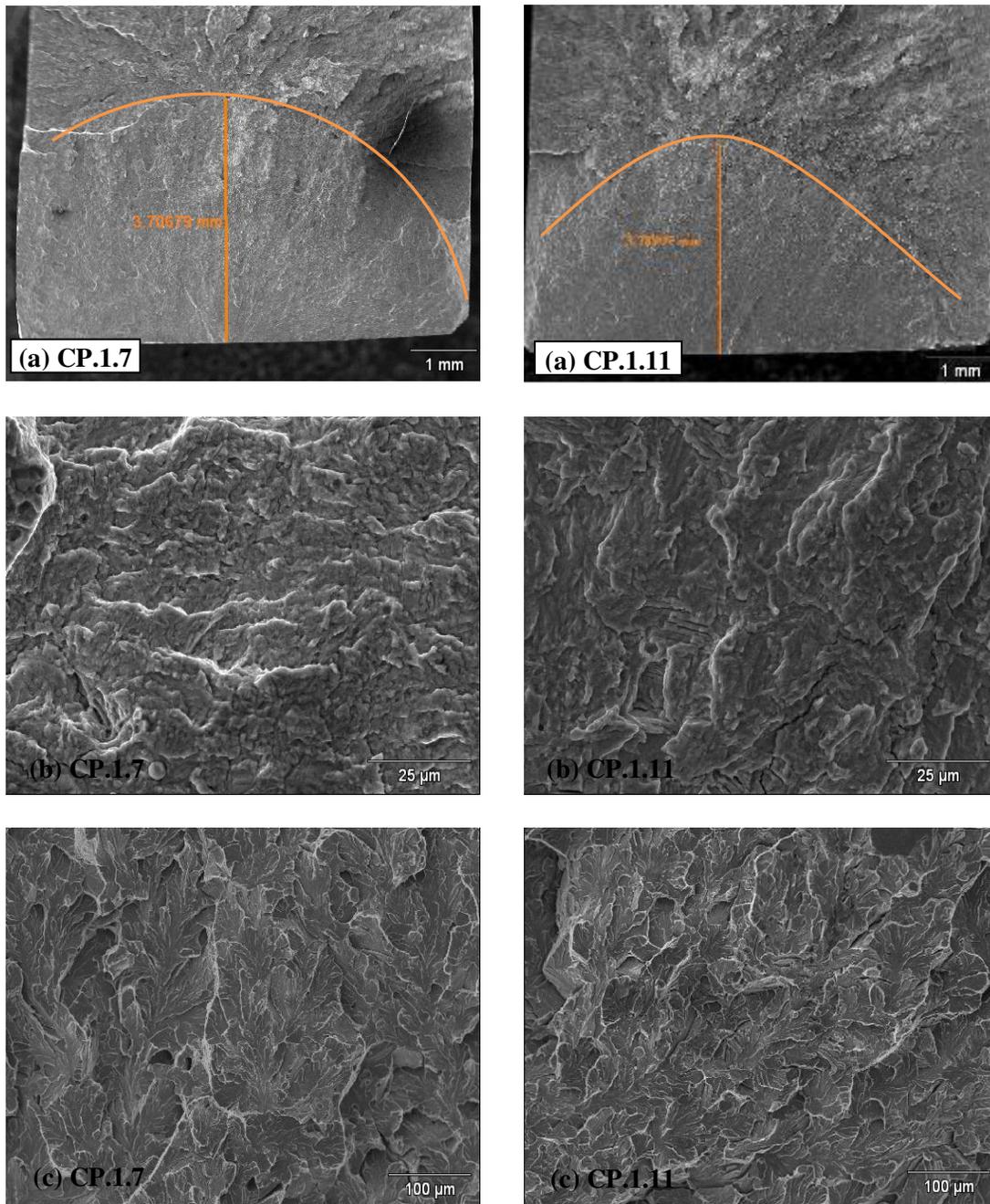


Figura 4.11 Fratografias dos corpos-de-prova 7 e 11 da roda RF1 (1-7, 1-11): (a) Interface fadiga-fratura, (b) Zona de fadiga e (c) Zona de fratura final-clivagem. CP 1-7 significa roda 1, corpo-de-prova nº 7, e assim sucessivamente.

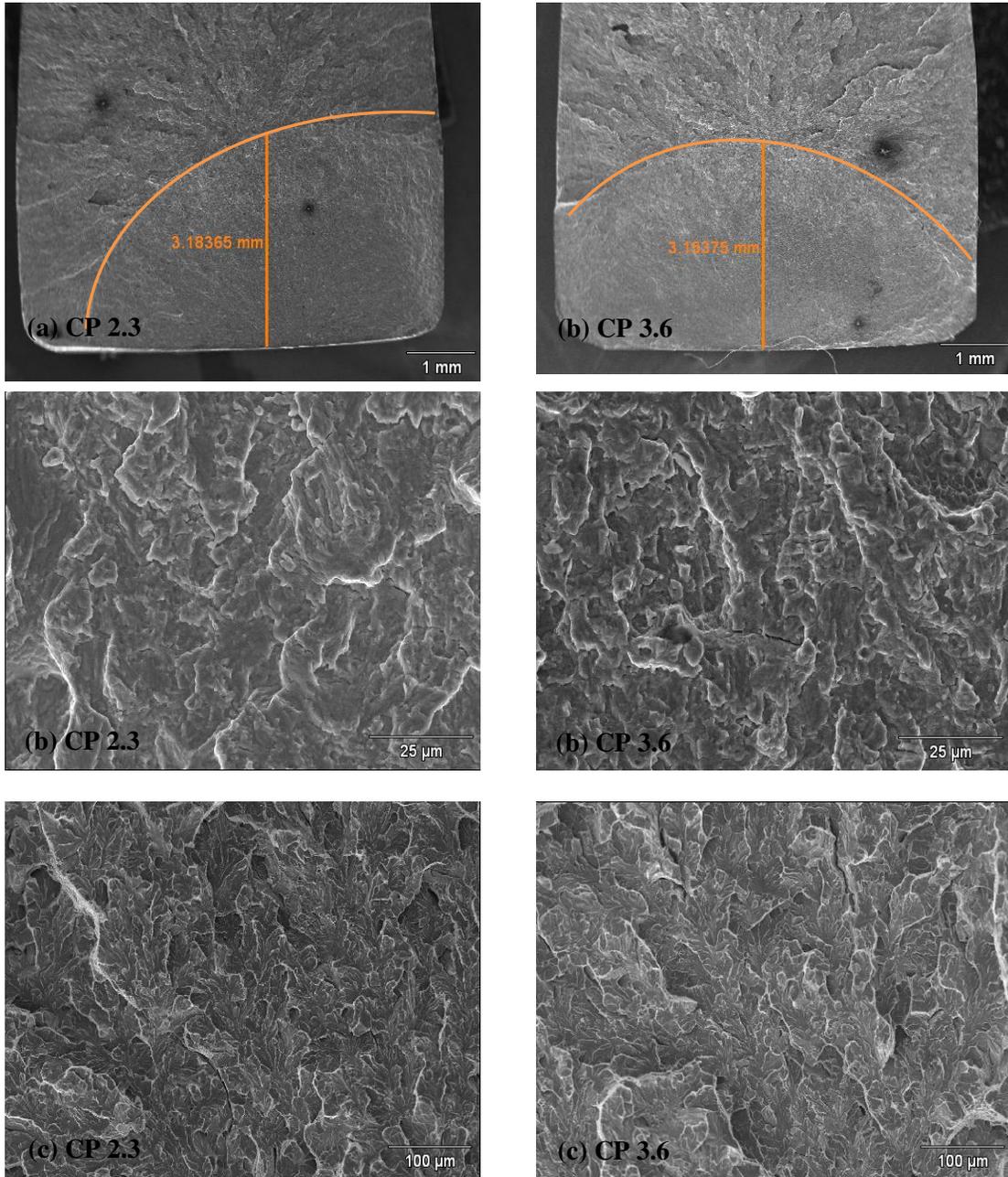


Figura 4.12 Fratografias dos corpos-de-prova 3 da roda RFo2 (2-3) a esquerda e da roda RFo3 (3-6) a direita. (a) Interface fadiga-fratura, (b) Zona de fadiga e (c) Zona de fratura final-clivagem.

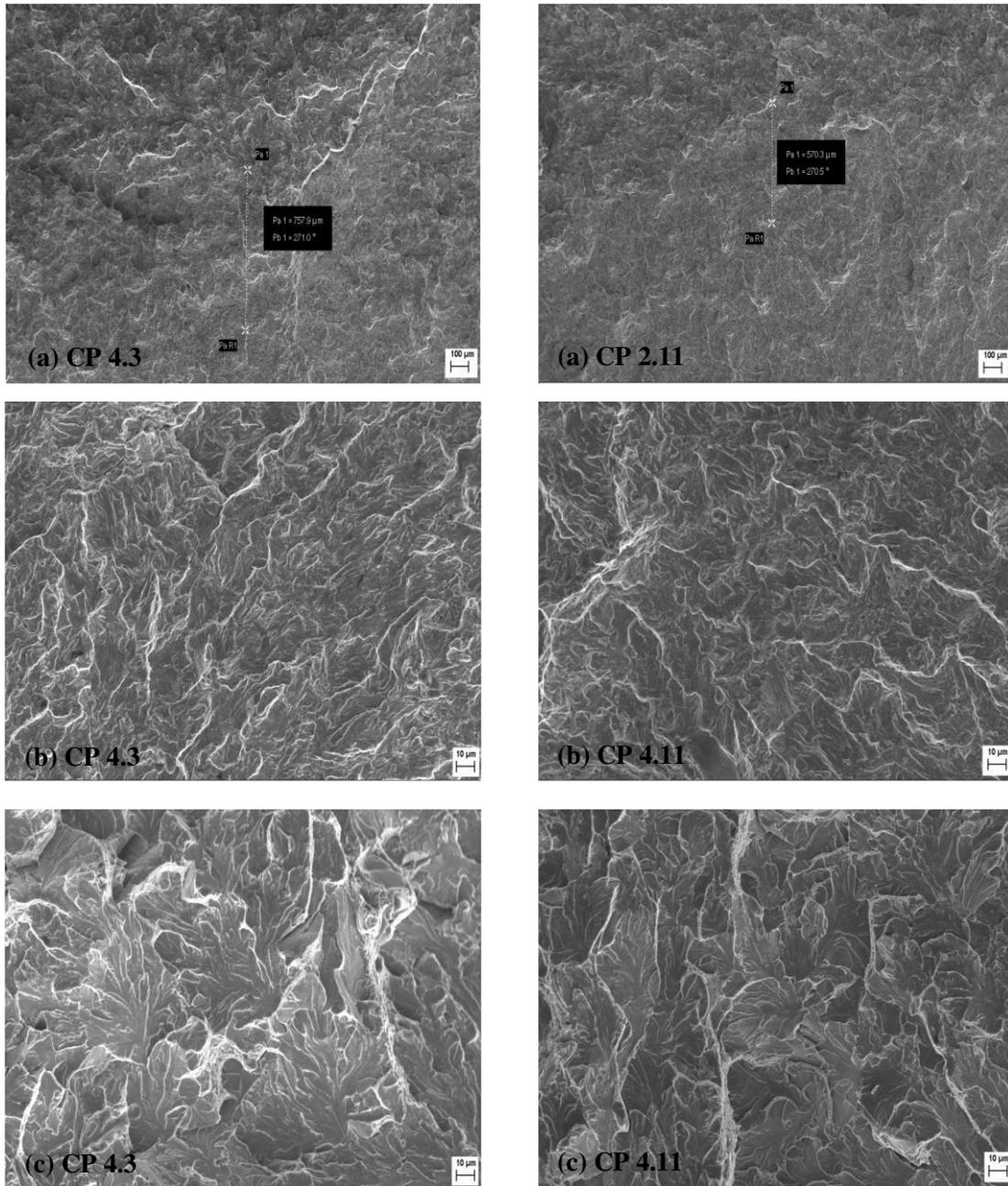


Figura 4.13 Fratografias dos corpos-de-prova 3 e 11 da roda RF4 (4-3, 4-11). (a) Interface fadiga-fratura, (b) Zona de fadiga e (c) Zona de fratura final-clivagem.

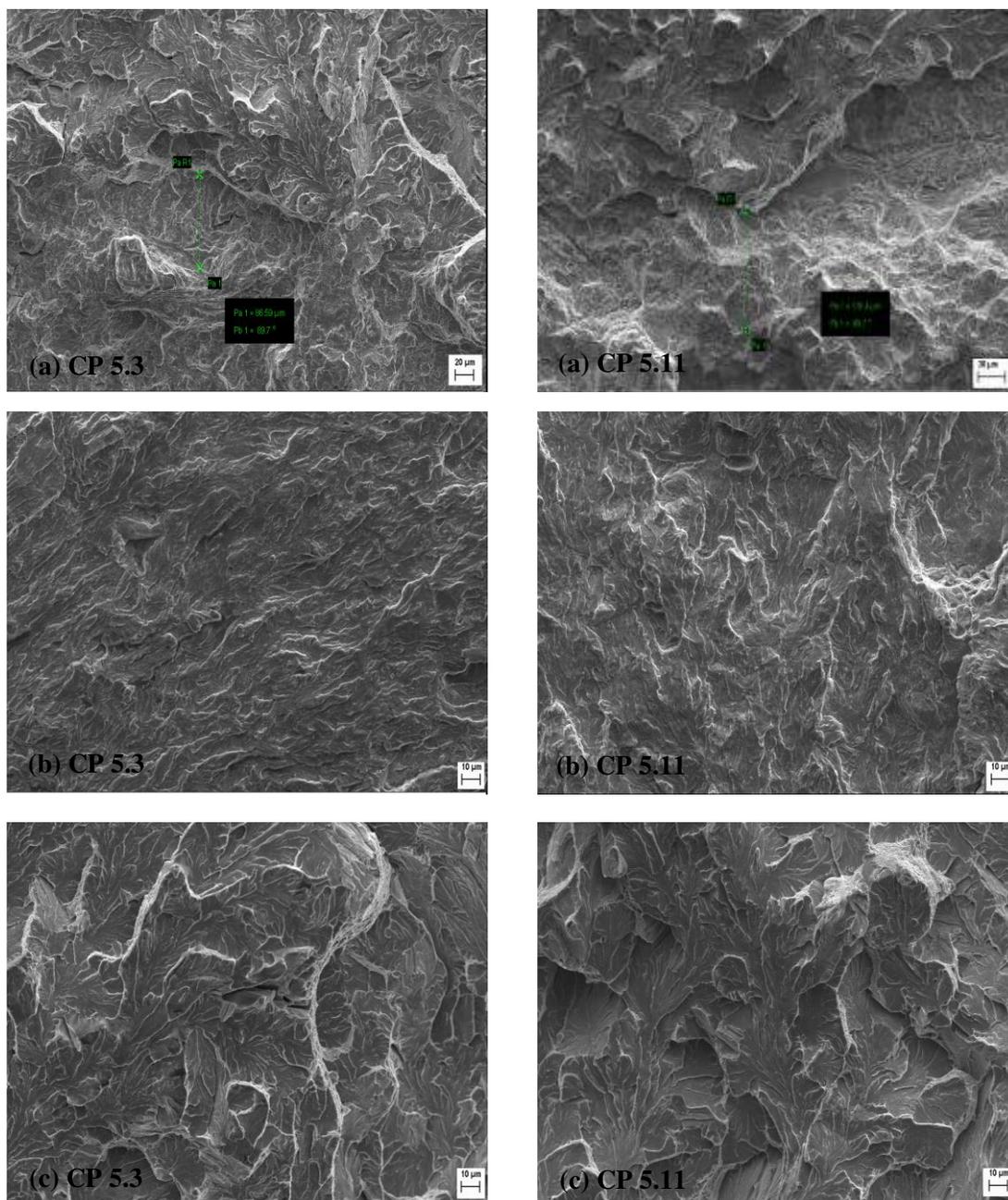


Figura 4.14 Fratografias dos corpos-de-prova 3 e 11 da roda RFo5 (5-3, 5-11). (a) Interface fadiga-fratura, (b) Zona de fadiga e (c) Zona de fratura final-clivagem.

Capítulo 5

Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos

5.1 Conclusões

A partir das análises teóricas e experimentais desenvolvidas neste trabalho para um melhor conhecimento sobre as propriedades mecânicas e os micromecanismos de fratura de corpo-de-prova de rodas ferroviárias de aço fundidas e forjadas, associadas às comparações realizadas e as referências de estudos semelhantes contidas na literatura do assunto, podem ser extraídas as seguintes conclusões:

- 5.1.1 A microestrutura característica dos aços das duas rodas RF4 e RFo5, na região do aro, é martensita revenida estando de acordo com o esperado.
- 5.1.2 Os níveis de Dureza Rockwell C das rodas RF4 e RFo5, na região do aro, são diferentes. A roda RF4 apresenta níveis um pouco abaixo do mínimo estabelecido pela norma AAR M – 107 para as rodas da Classe C, enquanto os níveis da roda RFo5 estão, em sua maioria, de acordo com o estabelecido pela mesma norma AAR M - 107.
- 5.1.3 Os Limites de escoamento, dos corpos-de-prova usinados dos aros das rodas RF1 e RFo2 e RFo3, estão de acordo com o esperado e estabelecido pela norma BS EN 13262.
- 5.1.4 Os Limites de resistência à tração, dos corpos-de-prova usinados dos aros das três rodas RF1 e RFo2 e RFo3, são superiores aos valores estabelecidos pela norma BS EN 13262.
- 5.1.5 A Redução de área, dos corpos-de-prova usinados do aro das três rodas RF1 e RFo2 e RFo3, apresentou nível inferior ao esperado e estabelecido pela norma BS EN 13262 para a roda RF1 e nível de acordo com o esperado e estabelecido na norma para as rodas RFo2 e RFo3.

- 5.1.6 O Limite de resistência à tração, dos corpos-de-prova do disco das três rodas RF1 e RFo2 e RFo3, estão de acordo com o esperado e estabelecido pela norma BS EN 13262.
- 5.1.7 A Redução de área, dos corpos-de-prova dos discos das três rodas RF1 e RFo2 e RFo3, apresentou valores inferiores ao estabelecido pela norma BS EN 13262 para a roda RF1 e valores de acordo com o esperado e estabelecido pela mesma norma para as roda RFo2 e RFo3.
- 5.1.8 O Limite de escoamento, dos corpos-de-prova dos discos das três rodas RF1 e RFo2 e RFo3 e o alongamento específico até a fratura dos corpos-de-prova dos aros e discos das três rodas RF1 e RFo2 e RFo3 não são especificados pelas normas utilizadas nesta pesquisa. Portanto não houve comparação de valores com normas, somente com trabalhos semelhantes.
- 5.1.9 Os Limites de escoamento e de resistência à tração da região dos aros das três rodas RF1 e RFo2 e RFo3, são superiores aos das regiões dos discos. Assim como, os valores de ductilidade da roda RF1 são inferiores aos das rodas RFo2 e RFo3, de acordo com o esperado.
- 5.1.10 Nos ensaios de Impacto, as rodas RFo2 e RFo3 apresentaram melhor desempenho em relação à roda RF1, de acordo com o esperado. Porém, os valores dos ensaios de impacto da roda RF1 foram inferiores ao esperado e previsto na norma BS EN 13262. Os valores da roda RFo2 foram aproximados aos esperados e previsto na norma. Enquanto que os valores da roda RFo3 estão de acordo com o esperado e estabelecido pela norma.
- 5.1.12 Os valores de tenacidade à fratura tanto para a roda RF1 quanto para as rodas RFo2 e RFo3 estão de acordo com os valores esperados e recomendados pela norma da AAR M – 107. Entretanto, os mesmos valores são inferiores aos valores especificados pela norma BS EN 13262.

- 5.1.13 A média dos valores de tenacidade à fratura obtidos para a roda RF1 é inferior aos valores das rodas RFo2 e RFo3 estando de acordo com o esperado, pois geralmente rodas ferroviárias forjadas apresentam tenacidade à fratura superior em comparação as rodas fundidas.
- 5.1.14 As vidas em fadiga das rodas RF1 e RFo2, RFo3 e RFo5 apresentam valores basicamente iguais. Comparando esses valores com os valores da roda RF4, observa-se a superioridade da roda RF4. O comportamento superior da roda RF4 não era esperado e não foi encontrado em outras literaturas um comportamento semelhante. Visto que, rodas forjadas geralmente apresentam melhor desempenho em relação a rodas fundidas.
- 5.1.15 Os resultados obtidos a partir da distribuição de Weibull para as vidas em fadiga das cinco rodas, apresentam comportamento similar para as quatro rodas RF1, RFo2, RFo3 e RFo5. Entretanto, como a carga máxima no caso da roda RF1 foi 20% menor, podemos concluir que a vida em fadiga dos corpos-de-prova usinados das rodas RFo2, RFo3 e RFo5 é aproximadamente 20% maior que os corpos-de-prova da roda RF1.
- 5.1.16 O comportamento diferente da roda RF4, em termos da distribuição de Weibull, em relação às outras quatro rodas RF1, RFo2, RFo3 e RFo5 era esperado como consequência dos resultados elevados vida em fadiga da roda RF4.
- 5.1.17 O comportamento superior apresentado pelas rodas RFo3 e RFo5, em quase todos os ensaios, em relação à roda RFo2, ocorre devido ao processo de desgaseificação durante o processo de fabricação que tende a melhorar as propriedades mecânicas de rodas ferroviárias forjadas.
- 5.1.18 As fractografias, dos corpos-de-prova dos ensaios de fadiga das cinco rodas RF1, Rfo2, RFo3, RF4 e RFo5, apresentam zonas de fadiga e fratura com dimensões aproximadas. Comportamento característico de grau médio de sobrecarga e bom

nível de tenacidade. As fractografias estão de acordo com o esperado para os dois tipos (fundidas e forjadas) de rodas.

5.1.19 As fractografias dos corpos-de-prova da roda RFo3 do ensaio de impacto Charpy apresenta fratura por clivagem que é a morfologia típica esperada nesse tipo de ensaio.

5.2 – Sugestões para Próximos Trabalhos

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, são sugeridas as seguintes linhas de pesquisa para a realização de trabalhos futuros:

5.2.1 Desenvolver um estudo das propriedades mecânicas de rodas ferroviárias fundidas e forjadas com variação de temperaturas que permitam avaliar possíveis semelhanças no comportamento mecânico das rodas em altas e baixas temperaturas e temperatura ambiente.

5.2.2 Desenvolver estudos das propriedades mecânicas de rodas ferroviárias fundidas e forjadas submetidas a estados de corrosão.

5.2.3 Desenvolver estudos das propriedades mecânicas de rodas ferroviárias fundidas e forjadas para fins de normatização dos dados obtidos.

Capítulo 6

Referências Bibliográficas

BEDI, R.; CHANDRA, R. **Fatigue-life distributions and failure probability for glass-fiber reinforced polymeric composites.** Composites Science and Technology. India. 7p. 2009.

CHAN, K. S. **Roles of microstructure in fatigue crack initiation.** International Journal of Fatigue. United States. 19p. 2010.

CLARKE, M. **Wheel rolling contact fatigue and rim defects investigation.** In: Wheel steel handbook, Rail Safety & Standards Boards (RSSB). London, 22p. 2008.

DIENER, M.; ROBERTI, R.; FORCELA, R.; GHIDINI, A. **Development of testing methodologies according to fracture mechanics criteria applied to railways solid wheels.** 15 International Wheelset Congress Praha. 2007.

EKBERG, A.; KABO, E. **Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading – an overview.** Science direct journal. 13p. 2005.

FERREIRA, I. **Propriedades Mecânicas dos Materiais e Mecanismos de Fratura- parte B.** Campinas: FEM, UNICAMP, 2009.

GALERIA DE FOTOS DA AMSTED MAXION. Disponível em http://www.amsted.maxion.com.br/conteudo/negocio_ferrovuario_rodas_vazamento.html. Acesso em julho de 2011.

HANDA, K.; KIMURA, Y.; MISHIMA, Y. **Surface cracks initiation on carbon steel railway wheels under concurrent load of continuous rolling contact and cyclic frictional heat.** Wear. Japan. 9p. 2010.

HERNÁNDEZ, F. C. R.; CUMMINGS, S.; KALAY, S.; STONE, D. **Properties and microstructure of high performance wheels.** Wear, USA, 8p. 2011.

KAIJALAINEN, A. J.; SUIKKANEN, P. P.; LIMNELL, T. J.; KARJALAINEN, L. P.; KÖMI, J. I.; PORTER, D. A. **Effect of austenite grain structure on the strength and toughness of direct-quenched martensite.** Journal of Alloys and Compounds. Finland. 7p. 2012.

KATO, T.; SUGETA, A.; NAKAYAMA, E. **Investigation of influence of white layer geometry on spalling property in railway wheel steel.** Wear. Japan. 8p. 2011.

KRAUSS, G. **Martensite in steel: strength and structure.** Materials Science and Engineering. USA. 18p. 1999.

KWON, S-J.; LEE, D-H.; SEO, J-W.; HUR, H-M. **Mechanical properties of Railway Wheel for Standard Reinforcement.** Advanced Materials Research Vols. 26-28. Korea. pp. 1247-1250. 2007.

MAKINO, T.; KATO, T.; HIRAKAWA, K. **The effect of slip ratio on the rolling contact fatigue property of railway wheel steel.** International Journal of Fatigue. Japan. 12p. 2012.

MINICUCCI, DOMINGOS JOSÉ. **Rodas e Eixos Ferroviários – Conceitos Básicos.** MWL Brasil Rodas & Eixos Ltda. 143p. 2011.

MINICUCCI, D. J.; SANTOS JUNIOR, A. A.; ANDRINO, M. H.; SANTOS, F. C. **Stress Evaluation of Railroad Forged Wheels by Ultrasonic Testing.** Journal of Testing and Evaluation. 9p. 2007.

NAKAMURA, T., OGUMA, H., SHINOHARA, Y. **The effect of vacuum-like environment inside sub-surface fatigue crack on the formation of ODA fracture surface in high strength steel.** Science Direct. Elsevier Ltda. 9p. 2010.

PADOVANI, JOSÉ GAUDÊNCIO MACHADO. **Rodas Ferroviárias Amsted Maxion.** Revista ALAF formato digital. Disponível em <http://www.alaf.int.ar/?pag=revista&id=68>. Acesso em setembro de 2011.

PARIDA, N.; DAS, S.K.; TARAFDER, S. **Failure analysis of railroad wheels.** Engineering Failure analysis. 7p. 2009.

- POLÁK, J. **Fatigue of steels.** Comprehensive Structural Integrity, vol. 4. pp. 504-537. 2007.
- POINTNER, P. **High strength rail steels – The importance of material properties in contact mechanics problems.** Wear. Austria. 7p. 2008.
- POOK, L. P. **Five decades of crack path research.** Engineering Fracture Mechanics. London. 11p. 2010.
- QUINN, J. B.; QUINN, G. D. **A practical and systematic review of Weibull statistics for reporting strengths of dental materials.** Dental Materials. USA. 13p. 2010.
- QUEIROZ, SYME REGINA SOUZA et al. **Fatigue properties of machined specimens from cast and forged railroad steel wheels.** X Brazilian MRS Meeting, <http://www.sbpmat.org.br/10encontro/procedigs/portuguese/search/index.html>, 2011.
- REVISTA FERROVIÁRIA. **Rodas Forjadas da MWL.** Disponível em <http://www.youtube.com/watch?v=cJoUXIVk9VM>. Acesso em julho de 2011.
- SANTOS, A. A., SANTOS, G. F. M., SANTOS, F. C., ANDRINO, M. H., ROSÁRIO, J. M. **Application of L_{cr} Waves to Evaluate Residual Stresses in the Rim of Railroad Forged Wheels.** Springer Science + Business Media, LLC. 10p. 2009.
- SCHIJVE, J. **Statistical distribution functions and fatigue of structures.** International Journal of Fatigue. Netherlands. 9p. 2005.
- SHIRANI, M.; HARKEGARD, G. **Fatigue life distribution and size effect in ductile cast iron for wind turbine components.** Engineering Failure Analysis. Norway. 13p. 2011.
- SEO, J. W., KWON, S.J., JUN, H. K., LEE, D. H. **Effects of residual stress and shape of web plate on the fatigue life of railway wheels.** Engineering Failure Analysis. 15p. 2009.
- SHIGLEY'S MECHANICAL ENGINEERING. **Mechanical Engineering.** 8ª edition. USA. Mc Graw-Hill, 1050p. 2006.
- SILVA. ANDRÉ LUIZ V. da COSTA. **Aços e ligas especiais.** 3ª edição revista. São Paulo. Edgard Blucher, 637p. 2010.

SIVAPRASAD, S.; TARAFDER, S.; RANGANATH, V. R.; PARIDA, N. **Fatigue and fracture behaviour of forged and cast railway wheels.** National metallurgical laboratory. Jamshedpur. India. 6p. 831007.

STRNADEL, B.; HAUSILD, P.. **Statistical scatter in the fracture toughness and Charpy impact energy of pearlitic steel.** Materials Science and Engineering. 7p. 2008.

TARAFDER, S.; SIVAPRASAD, S.; RANGANATH, V. R. **Comparative assessment of fatigue and fracture behavior of cast and forged railway wheels.** National metallurgical laboratory. Jamshedpur. India. 831007. National Aerospace Laboratories. Bangalore 560017, 14p. 2007.

WALTHER, F.; EIFLER, D. **Local cyclic deformation behavior and microstructure of railway wheel materials.** Materials Science and Engineering. Germany. 5p. 2004.

YUE-JUN, L.; YI-MIN, L.; YU-HUA, T.; BO-YUN, H. **Apparent Morphologies and Nature of Packet Martensite in High Carbon Steels.** Journal of Iron and Steel Research. China. 7p. 2006.

ZHANG, M.; GU, H. **Microstructure and mechanical properties of railway wheels manufactured with low-medium carbon Si-Mn-V steel.** Journal of University of Science and Technology Beijing, China, 7p. 2008.

ZHANG, M.; GU, H. **Fracture toughness of nanostructured railway wheels.** Engineering Fracture Mechanics, China, 9p. 2008.

ZERBST, U.; MÄDLER, K.; HINTZE, H. **Fracture Mechanics in Railway applications – An Overview.** In: Engineering Fracture Mechanics, n. 72, Germany, 32p. 2005.

Livros

ASM HANDBOOK. **Casting.** 2^a Ed. USA: ASM International, 1992. Vol. 15, p. 1568.

ASM HANDBOOK. **Forming and Forging**. 9ª Ed. USA: ASM International, 1988. Vol. 14, p. 2110.

ASM HANDBOOK. **Fractography**. 9ª Ed. USA: ASM International, 1987. Vol. 12, p. 514.

ASM HANDBOOK. **Materials characterization**. 3ª Ed. USA: ASM International, 1992. Vol. 10, p. 624.

ASM HANDBOOK. **Mechanical Testing and Evaluation**. USA: ASM International, 2000. Vol. 8, p. 2235.

ASM HANDBOOK. **Metallography and microstructure**. USA: ASM International, 2004. Vol. 9, p. 421.

ASKELAND, DONALD R., PHULÉ PRADEEP P. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. Tradução Vertice Translate e All Tasks. São Paulo: Cengage Learning, 2008. 579p.

CALLISTER, Jr., WILLIAM D. **Materials science and engineering: an introduction**. U.S.A. 8th Ed. p. c. 2009. 1000p.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7ª Ed. São Paulo. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008. 583p.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. Revisão técnica André Luis V. da Costa e Silva. 4ª edição. São Paulo. Edgard Blucher, 2008. 639p.

DEGARMO, E. P., BLACK, J. T., KOHSER, R. A., **Materials and Processes in manufacturing**. 8th Ed. Prentice-Hall, USA, 1997. 1241p.

DIETER, G. E. **Mechanical metallurgy**. SI Metric Edition. McGraw-Hill, 1988. 739p.

GARCIA, AMAURI.; SPIN, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio de materiais**. 2ª Ed., Rio de Janeiro, LTC, 2012. 361p.

HELMAN, H., CETLIN, P. R., **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais**, 2ª Edição ,São Paulo, Ed. Artliber, , 2005. 261p.

HERTZBERG, RICHARD W., **Deformation and Fracture mechanics of Engineering materials**, John Wiley & Sons, 4th Edition, 1996. 781p.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO. **MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo. Ed. G. C. Isaia.: IBRACON, 2007. 2v. 1699p.

JANSEN, M., ZUIDERMA, J., WANHILL, R. **Fracture Mechanics**. Taylor & Francis e-Library, 2nd, 2005. 378p.

KALPAKJIAN, SEROPE; SCHMID, S.R. **Manufacturing processes for engineering materials**. Prentice Hall. 5th ed. USA. 2008. 993p.

MARIOTTO, C. L.; GOUVEA, J. A.; PAPALEO, R.; HABESH, R. **Princípios Metalúrgicos de Fundição**. Editora Polígono. São Paulo. 1973. 333p.

MARTINS, J. G.; PEREIRA, A. M. **Materiais de construção: metais**. Série materiais. UFP. 4ª Ed. 2008. 186 p.

Teses e Dissertações

ALVES, LUIS HENRIQUE DIAS. 2000. 121p. **Mecanismos de Desgastes de Rodas Ferroviárias**. Dissertação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, São Paulo.

CARNIO, MARCO ANTONIO. 2009. 167p. **Propagação de Trinca por Fadiga do Concreto Reforçado com Baixos Teores de Fibra**. Tese de Doutorado da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas.

MINICUCCI, DOMINGOS JOSÉ. **Avaliação de Tensões por Ultra-Som no Aro das Rodas Ferroviárias Forjadas Novas – Classe C.** 2003. 119p. Dissertação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas.

VILLAS BÔAS, RENATO LYRA. **Desenvolvimento de Aço Microligado para Rodas Ferroviárias.** 2010. 104p Dissertação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas.

Normas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 6892: **Materiais metálicos: ensaio de tração à temperatura ambiente.** Rio de Janeiro. 2002. 34p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6742: **Utilização da distribuição de Weibull para interpretação dos ensaios de durabilidade por fadiga.** 1987.18p.

ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROAD. M-107/M-208 "section G": **Manual of Standards and Recommended Practices Wheels and Axles.** USA, 2007. 34p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. A 370 – 12: **Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products.** USA, 2011. 47p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. A 788 – 788- 10: **Standart specification for steel forgings, general requeriments.** USA, 2011. 13p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E 3 – 01: **Standard guide for preparation of metallographic specimens.** USA, 2011. 13p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E 8/ E 8: **Standard test methods for tension testing of metallic materials.** USA, 2011. 27p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E 10 - 10: **Standard test methods for Brinell Hardness of metallic materials.** USA, 2010 27p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E 18 – 08b: **Standard test methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials.** USA, 2008. 37p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E 140 – 07: **Standard hardness conversion tables for metals relationship among brinell hardness, Vickers hardness, Rockwell hardness, superficial hardness, knoop hardness, and scleroscope hardness.** USA, 2007. 21p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E 399 – 08: **Standart test method for linear-elastic plane-strain fracture toughness K_{Ic} of metallic materials.** USA, 2009. 33p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E 1820 08a: **Standard test methods for measurement of fracture toughness.** USA, 2009. 48p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E 1823 – 05: **Standart terminology relating to fatigue and fracture testing.** USA, 2010. 33p.

BRITISH STANDARDS. EN 13262. Railway applications – Wheelset and Bogies – Axles – Product requeriments. 2011. 49p.

Artigos Publicados

Queiroz, S. R. S.; Boas, R. L. V.; Minicucci, D. J.; Uehara, A. Y.; Vasconcelos, R. E.; Guimarães, V. A.; Ferreira, I. Fatigue properties of machined specimens from cast and forged railroad steel whells. X Brazilian MRS Meeting,
<http://www.sbpmat.org.br/10encontro/procedigs/portuguese/search/index.html>, 2011

Queiroz, S. R. S.; Boas, R. L. V.; Minicucci, D. J.; Guimarães, V. A.; Ferreira, I. Fatigue properties of machined specimens from cast and forged railroad steel whells. 15th International Conference on Experimental Mechanics, Book em impressão ,2011

Queiroz, S. R. S.; Boas, R. L. V.; Minicucci, D. J.; Uehara, A. Y.; Vasconcelos, R. E.; Guimarães, V. A.; Ferreira, I. Propriedades de fadiga de espécimes usinadas de rodas de aço ferroviárias forjadas e fundidas. VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Livro em impressão ,2012.

Vasconcelos, R. E.; Queiroz, S. R. S.; Uehara, A. Y.; Ferreira, I. Toughness factor of polypropylene fiber reinforced concrete in aggressive media. 15th International Conference on Experimental Mechanics, Book em impressão, 2011.

Vasconcelos, R. E.; Queiroz, S. R. S.; Uehara, A. Y.; Ferreira, I. Fator de tenacidade do concreto reforçado com fibra de polipropileno em meio agressivo. VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Livro em impressão, 2011.

Anexos

1) Laudo da Composição Química da Roda Ferroviária Fundida (R4)

	RELATÓRIO DE ENSAIO/ANÁLISE Nº 14495.12910-12M-I VIA ORIGINAL	 CRL 0194
	<i>"Laboratório pertencente à Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaios"</i>	

Empresa Solicitante: OTÁVIO FERNANDES LIMA DA ROCHA
Endereço: RUA MENDELEIWI, 200 – CEP: 13083-860 – CAMPINAS/SP

Informações fornecidas pelo solicitante:

Material: Aço Fundido
Amostra: 2 – 7 x 14 x 30 mm (Roda Fundida)
Documentos: Orçamento: 002989/12/A
Fornecedor Declarado: ---
Natureza do ensaio/análise: Químico

RESULTADOS OBTIDOS

1. Análise Química (% massa/massa):

Elementos	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
Obtido	0,67	0,69	0,70	0,015	0,029	0,02	0,01	0,01	0,02
*U	± 0,01	± 0,02	± 0,02	± 0,004	± 0,003	± 0,02	± 0,03	± 0,03	± 0,009

Elementos	Al	V	Nb	Ti	W	Pb	Sn	B	Fe
Obtido	0,009	0,001	ND	0,001	ND	ND	0,001	0,0004	Base
*U	± 0,005	± 0,018	± 0,002	NC	± 0,008	± 0,005	NC	± 0,001	NC

Nota:

NA = Não Analisado
ND = Não Detectado
NC = Não considerado – Valor da incerteza não considerado devido à baixa concentração do elemento resultar em valores de incerteza próximos ao valor da concentração.

Interpretações:

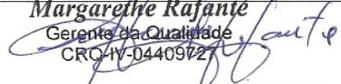
Equipamentos Utilizados: LBM-007 – Espectrômetro de Emissão Óptica – Calibração Interna conforme PO-01 Rev.H.
Procedimentos: PT-01 – Rev. L – Análise Química Via Espectrometria de Emissão Óptica por Centelha.
PO-01 – Rev. H – Instrução de Operação para a Calibração do Espectrômetro Óptico ARL 3460.
Norma Referencia: ASTM A 751: 2008/ ASTM E 415: 2008/ ASTM E 1086: 2008
Condições Ambientais: Temperatura: 22 °C – Umidade: 64 %.
Local de Análises / Ensaios: Labmat – Matriz.

*A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos (veff) corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

Data do recebimento da amostra: 18/05/2012 **Data da conclusão do ensaio/análise:** 18/05/2012

Observação: As interpretações descritas neste relatório, não fazem parte do escopo de serviços acreditados pelo INMETRO/ANVISA.

Piracicaba, 23 de Maio de 2012.

 Msc. Honorio A. Canchieri Diretor de Pesquisa e Desenvolvimento	 Margarete Rafante Gerente de Qualidade CRC IV-0440972
---	---

Signatário Autorizado

Carimbo e Assinatura

Os resultados apresentados no presente relatório têm significação restrita e se aplicam apenas às amostras ensaiadas/analizadas.

As amostragens enviadas para análise são realizadas pelo próprio cliente.

Este documento tem sua marca de autenticidade gravada. Este Relatório de Ensaio/Análise só deve ser reproduzido completo. Reprodução de partes requer aprovação escrita do Laboratório.

Este Relatório atende aos requisitos de Acreditação pela Cgcre/Inmetro, a qual avaliou a competência do laboratório.

A Cgcre é signatário do Acordo de Reconhecimento Mútuo da ILAC – International Laboratory Accreditation Cooperation e de Acordo Bilateral de Reconhecimento Mútuo com a EA – European Cooperation for Accreditation.

Fim do Relatório

LABMAT ANÁLISES E ENSAIOS DE MATERIAIS LTDA.

MATRIZ: Rua João Leonardo Fustalino, 201 – Distrito Industrial Uninorte – Piracicaba/SP – CEP: 13413-102 Tel./ Fax: (19) 3917-1670/ 3433-1091
UNIDADE GRANDE SÃO PAULO: Rua Águia, 208 – Itapegica – Guarulhos/SP – CEP: 07043-040 – Tel./Fax: (11) 2086-9090
www.grupolabmat.com.br sac@grupolabmat.com.br

2) Laudo da Composição Química da Roda Ferroviária Forjada (R5)

	RELATÓRIO DE ENSAIO/ANÁLISE Nº 14495.12912-12M-I VIA ORIGINAL	
	<i>"Laboratório pertencente à Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaio"</i>	

Empresa Solicitante: OTÁVIO FERNANDES LIMA DA ROCHA
Endereço: RUA MENDELEIIV, 200 – CEP: 13083-860 – CAMPINAS/SP

Informações fornecidas pelo solicitante:
Material: Aço Forjado
Amostra: 3 – 7 x 14 x 32 mm (Roda Forjada)
Documentos: Orçamento: 002989/12/A
Fornecedor Declarado: ---
Natureza do ensaio/análise: Químico

RESULTADOS OBTIDOS

1. Análise Química (% massa/massa):

Elementos	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
Obtido	0,74	0,29	0,79	0,010	0,046	0,24	0,07	0,02	0,13
*U	± 0,01	± 0,02	± 0,02	± 0,004	± 0,003	± 0,02	± 0,03	± 0,03	± 0,009

Elementos	Al	V	Nb	Ti	W	Pb	Sn	B	Fe
Obtido	0,004	0,001	ND	ND	ND	ND	0,005	0,0009	Base
*U	± 0,005	± 0,018	± 0,002	NC	± 0,008	± 0,005	NC	± 0,001	NC

Nota:

NA = Não Analisado
 ND = Não Detectado
 NC = Não considerado – Valor da incerteza não considerado devido à baixa concentração do elemento resultar em valores de incerteza próximos ao valor da concentração.

Interpretações:

Equipamentos Utilizados: LBM-007 – Espectrômetro de Emissão Óptica – Calibração Interna conforme PO-01 Rev.H.
Procedimentos: PT-01 – Rev. L – Análise Química Via Espectrometria de Emissão Óptica por Centelha.
 PO-01 – Rev. H – Instrução de Operação para a Calibração do Espectrômetro Óptico ARL 3460.
 ASTM A 751: 2008/ ASTM E 415: 2008/ ASTM E 1086: 2008
Norma Referencia:
Condições Ambientais: Temperatura: 22 °C – Umidade: 64 %.
Local de Análises / Ensaio: Labmat – Matriz.

*A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos (veff) corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

Data do recebimento da amostra: 18/05/2012 **Data da conclusão do ensaio/análise:** 18/05/2012

Observação: As interpretações descritas neste relatório, não fazem parte do escopo de serviços acreditados pelo INMETRO/ANVISA.

Piracicaba, 23 de Maio de 2012.

 M.Sc. Henrique Carichieri Diretor de Pesquisa e Desenvolvimento	 Margarete Rafante Gerente de Qualidade CRL N.º 04409727
---	---

Signatário Autorizado

Carimbo e Assinatura

Os resultados apresentados no presente relatório têm significação restrita e se aplicam apenas às amostras ensaiadas/analizadas. As amostras enviadas para análise são realizadas pelo próprio cliente.
 Este documento tem sua marca de autenticidade gravada. Este Relatório de Ensaio/Análise só deve ser reproduzido completo. Reprodução de partes requer aprovação escrita do Laboratório.
 Este Relatório atende aos requisitos de Acreditação pela Cgcre/Inmetro, a qual avaliou a competência do laboratório.
 A Cgcre é signatário do Acordo de Reconhecimento Mútuo da ILAC – International Laboratory Accreditation Cooperation e de Acordo Bilateral de Reconhecimento Mútuo com a EA – European Cooperation for Accreditation.

Fim do Relatório

LABMAT ANÁLISES E ENSAIOS DE MATERIAIS LTDA.

MATRIZ: Rua João Leonardo Fustaino, 201 – Distrito Industrial Uninorte – Piracicaba/SP – CEP: 13413-102 Tel./ Fax: (19) 3917-1670/ 3433-1091
UNIDADE GRANDE SÃO PAULO: Rua Águia, 208 – Itapegica – Guarulhos/SP – CEP: 07043-040 – Tel./Fax: (11) 2086-9090
www.grupolabmat.com.br sac@grupolabmat.com.br

LM-034

Elaborado Por: Roginei

Aprovado Por: Saito

Data: 09/06/2009

Rev. C

Pg. 1/1