

PEDRO GUILHERME SILVA PESCI

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO EM FADIGA DE RODAS FERROVIÁRIAS
FABRICADAS PELOS PROCESSOS DE FORJAMENTO E FUNDIÇÃO**

GUARATINGUETÁ
2013

PEDRO GUILHERME SILVA PESCI

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO EM FADIGA DE RODAS FERROVIÁRIAS
FABRICADAS PELOS PROCESSOS DE FORJAMENTO E FUNDIÇÃO

Trabalho de Graduação apresentado ao
conselho de Curso de Graduação em
Engenharia Mecânica da Faculdade de
Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista,
como parte dos requisitos para obtenção do
diploma de Graduação em Engenharia
Mecânica

Orientador: Prof. Livre-Docente Dr. Valdir Alves Guimarães

Guaratinguetá
2013

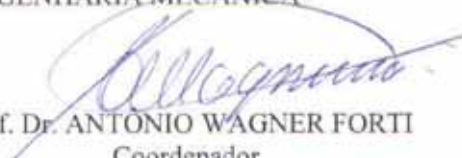
P473a	Pesci, Pedro Guilherme Silva Análise do comportamento em fadiga de rodas ferroviárias fabricadas pelos processos de forjamento e fundição / Pedro Guilherme Silva Pesci – Guaratinguetá : [s.n], 2013. 71 f : il. Bibliografia: f. 68-71 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013. Orientador: Prof. Dr. Valdir Alves Guimarães 1. Materiais – fadiga 2. Mecânica de fratura 3. Forjamento 4. Fundição I. Título CDU 620.178.3
-------	--

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO EM FADIGA DE RODAS FERROVIÁRIAS
FABRICADAS PELOS PROCESSOS DE FORJAMENTO E FUNDIÇÃO**

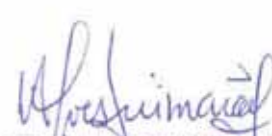
PEDRO GUILHERME SILVA PESCI

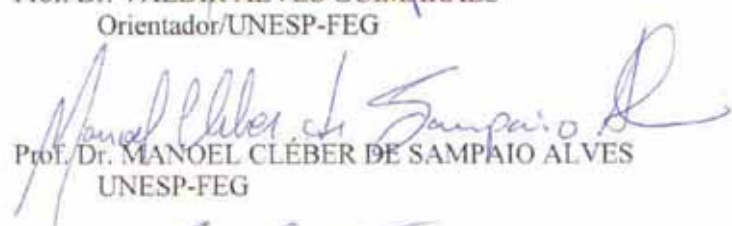
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. Dr. ANTONIO WAGNER FORTI
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. VALDIR ALVES GUIMARÃES
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. MANOEL CLÉBER DE SAMPAIO ALVES
UNESP-FEG


Msc. LUIS GUSTAVO DE OLIVEIRA
Membro Externo

Novembro de 2013

DADOS CURRICULARES

PEDRO GUILHERME SILVA PESCI

NASCIMENTO	02.08.1991 – CARAGUATATUBA / SP
FILIAÇÃO	Carlos Roberto Pesci Maria Célia de Matos Silva Pesci
2009 / 2013	Curso de Graduação Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - Universidade Estadual Paulista

aos meus pais, amigos e namorada, que tanto me incentivaram para que continuasse firme no propósito do curso e deste trabalho.

PESCI, P. G. S. **Análise do comportamento em fadiga de rodas ferroviárias fabricadas pelos processos de forjamento e fundição.** 2013. 71 p. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

RESUMO

Desde o nascimento da indústria ferroviária até os dias de hoje as rodas são componentes importantes para o bom funcionamento da ferrovia. Por ser um elemento crítico de segurança, o design e a manutenção são feitos com extremo cuidado para se evitar falhas. Apesar dos componentes ferroviários serem projetados para suportar um grande número de solicitações cíclicas durante a sua vida, alguns acidentes tem ocorrido. Esses acidentes, apesar de não tão frequentes, tem sempre conseqüências de grandes dimensões, envolvendo grandes prejuízos, perda de carga e de vidas. Atualmente as falhas nos componentes ferroviários são relativamente baixas, pois eles são projetados para trabalharem abaixo do Limite de Resistência à Fadiga dos materiais empregados, porém, com o aumento da demanda por trens mais velozes e com a necessidade de aumento da carga por eixo, a probabilidade de ocorrências de tais falhas é cada vez maior. O trabalho inclui um estudo comparativo de dois processos de fabricação (fundição e forjamento) aplicados na fabricação de rodas ferroviárias onde foram avaliadas as propriedades mecânicas de tração e fadiga. O estudo verificou através de análise de microestrutura, ensaios de dureza, tração e fadiga, análise estatística dos resultados em fadiga e análise fractográfica que a fabricação por forjamento leva à obtenção de melhores correlações entre vida em fadiga e propriedades mecânicas, propiciando maior segurança no transporte ferroviário, menor retenção de vagões para manutenção corretiva e menor custo operacional com a sua utilização.

PALAVRAS-CHAVE: Materiais - Propriedades mecânicas, Fadiga, Mecânica da fratura, Forjamento, Fundição.

PESCI, P. G. S. **Fatigue behavior analysis in rail wheels produced by forging and casting processes.** 2013. 71 p. Graduate Work (Graduate in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

ABSTRACT

Since the beginning of the railway industry until today, rail wheels are important components to the good working of a railway. For being a critical security item, design and maintenance are done with extremely care to avoid failures. Despite the fact of railway components be projected to support a big number of cyclic solicitation during its life, some accidents still occur. These accidents, despite the low frequency, always have great consequences, drawing in great financial, material, and people losses. Nowadays, railway component failure is relatively low, because it's been projected to work below the materials Fatigue Resistance Limit, however, with the growing demand of faster trains and higher load for each axle, the occurrence probability is even bigger. This work includes a comparative study of two fabrication processes (casting and forging) applied in the production of rail wheels where it was measured the mechanical properties of traction and fatigue. The study also verified through microstructural analysis, hardness, traction and fatigue tests, statistical analysis of fatigue test results and fractographic analysis that forging process lead to better correlations between fatigue life and mechanical properties, providing more security in railroads, less wagon retention caused by corrective maintenance and smaller operational cost with its use.

KEYWORDS: Material - Mechanical properties, Fatigue, Fracture Mechanics, Forging, Casting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - A Baronesa e os carros de passageiros (SETTI, 2000).....	12
Figura 2 - Partes da roda (adaptada de MINICUCCI, 2000).....	14
Figura 3 - Curva σ -N para um aço de baixo carbono (adaptada de MURAKAMI, 2002). ...	17
Figura 4 - Superfície característica de fratura por fadiga. (a) Fotografia de uma mola de controle de aceleração de aeronave que partiu por fadiga após 274 h de serviço (b) Micrografia (c) Micrografia eletrônica de varredura (SHACKELFORD, 2008).....	18
Figura 5 - Representação esquemática mostrando os estágios da propagação de trinca por fadiga (adaptado de MEYERS, CHAWLA, 1982).....	20
Figura 6 - Processo de crescimento da trinca por fadiga. (adaptada de CALLISTER, 2002).	21
Figura 7 - Aparência típica de trincas de fadiga em rodas de trem: (a) início na superfície e (b) início num defeito profundo (adaptada de EKBERG; KABO, 2005).....	22
Figura 8 - Microestrutura de uma (a) roda fundida (b) roda forjada (TARAFDER; SIVASPRASAD; RANGANATH, 2007).....	23
Figura 9 - Determinação da tensão crítica σ_{wi} , a partir de uma trinca inicial (adaptada de MURAKAMI, 2002).....	28
Figura 10 - Relação entre vida em fadiga de esferas de rolamentos e número de inclusões de óxido maiores do que 30 μ m (adaptada de MURAKAMI, 2002).	28
Figura 11 - Relação entre diâmetro médio da inclusão e fator de redução de resistência à fadiga (adaptada de MURAKAMI, 2002).....	29
Figura 12 - Probabilidade σ -N de fadiga de curvas de fratura para uma determinada liga; P representa a probabilidade de falha (adaptada de CALLISTER, 2002).	30
Figura 13 - Corpos de prova retirados da roda fundida.	36
Figura 14 - Vazamento do aço do forno elétrico para a panela durante sua preparação.	37
Figura 15 - Preparação dos moldes.....	38
Figura 16 - Vazamento de aço dos moldes.....	38
Figura 17 - Vazamento do aço na aciaria. Foto cedida pela MWL Brasil.	39
Figura 18 - Corte a quente do lingote. Foto cedida pela MWL Brasil.....	39
Figura 19 - Sequência das operações do processo de forjamento (adaptada de VILLAS BÔAS, 2009).	39

Figura 20 – Tratamento térmico. Foto cedida pela MWL Brasil.	40
Figura 21 - Usinagem da roda. Foto cedida pela MWL Brasil.	40
Figura 22 – Posicionamento da retirada de medidas de dureza Rockwell C.	43
Figura 23 - Corpos de prova utilizados nos ensaios de tração (dimensões em milímetros). .	44
Figura 24 - Posição da retirada dos corpos de prova dos ensaios de tração (dimensões em milímetros).	44
Figura 25 – Máquina de Tração na qual foram feitos os ensaios.	45
Figura 26 - Posição de retirada dos corpos de prova para ensaios de fadiga.	46
Figura 27 - Geometria do corpo de prova de ensaios de fadiga.	47
Figura 28 - Aspectos microestruturais do aço SAE-1070 da roda forjada, com ataque de Nital 2% e Microscopia óptica de 500x.	48
Figura 29 - Aspectos microestruturais do aço SAE-1070 da roda forjada, com ataque de Nital 2% e Microscopia óptica de 1000x.	49
Figura 30 - Aspectos microestruturais do aço SAE-1070 da roda fundida, com ataque de Nital 2% e Microscopia óptica de 500x.	49
Figura 31 - Aspectos microestruturais do aço SAE-1070 da roda fundida, com ataque de Nital 2% e Microscopia óptica de 1000x.	50
Figura 32 – Resultados de dureza Rockwell C na amostra retirada da roda fundida.	51
Figura 33 - Resultados de dureza Rockwell C na amostra retirada da roda forjada.	51
Figura 34 – Coleta de dados $\log \sigma \times \log N$ dos ensaios de fadiga da roda forjada.	54
Figura 35 – Coleta de dados $\log \sigma \times \log N$ dos ensaios de fadiga da roda fundida.	55
Figura 36 – Curva σ -N corrigida com intervalo de confiança de 95% obtida com os dados do ensaio de fadiga dos corpos de prova da roda forjada.	55
Figura 37 – Curva σ -N corrigida com intervalo de confiança de 95% obtida com os dados do ensaio de fadiga dos corpos de prova da roda fundida.	56
Figura 38 – Comparação dos resultados em fadiga das rodas forjada e fundida trabalhados estatisticamente.	57
Figura 39 – Início da fratura da amostra 1F da roda forjada.	58
Figura 40 – Início da fratura da amostra 2F da roda forjada.	59
Figura 41 – Início da fratura da amostra 2G da roda forjada.	59

Figura 42 – Início da fratura da amostra 2H da roda forjada.	60
Figura 43 – Início da fratura da amostra 3B da roda forjada.	60
Figura 44 – Início da fratura da amostra 2F da roda fundida.	62
Figura 45 – Início da fratura da amostra 2G da roda fundida.	62
Figura 46 – Início da fratura da amostra 3F da roda fundida.	63
Figura 47 – Início da fratura da amostra 3H da roda fundida.	63
Figura 48– Início da fratura da amostra 4E da roda fundida.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de t_p (Adaptada da ASTM E739-10).	33
Tabela 2 - Valores de F_p para 5% de significância (Adaptada da ASTM E739-10).....	34
Tabela 3 - Valores de F_p para 1% de significância (Adaptada da ASTM E739-10).....	35
Tabela 4 - Composição química do aço SAE-1070 da roda fundida	41
Tabela 5 - Composição química do aço SAE-1070 da roda forjada	42
Tabela 6 - Resultados dos ensaios de tração nas rodas forjada e fundida.....	52
Tabela 7 – Resultados dos ensaios de fadiga para o aço SAE-1070 da roda forjada.	53
Tabela 8 – Resultados dos ensaios de fadiga para o aço SAE-1070 da roda fundida.	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAR	Association of American Railroad
ASTM	American Society for Testing and Materials
EN	European Standards
ISO	International Organization for Standardization
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
SAE	Society of Automotive Engineers
UIC	União Internacional dos Caminhos-de-Ferro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
1.1 Objetivos.....	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 Rodas Ferroviárias.....	11
2.1.1 Histórico	11
2.1.2 Características das Rodas.....	13
2.2 Fadiga	15
2.2.1 Histórico	15
2.2.2 A Fadiga dos Metais.....	15
2.2.3 Características das Falhas por Fadiga	17
2.2.4 Falhas por fadiga em rodas ferroviárias	22
2.3 Efeitos do processo de fabricação.....	23
2.3.1 Comportamento dos materiais fundidos em fadiga	24
2.3.2 Comportamento dos materiais forjados em fadiga.....	24
2.4 Influências de micro-inclusões e defeitos internos na vida em fadiga	26
2.5 Análise estatística de ensaios de fadiga	30
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
3.1 Material.....	36
3.2 Etapas do processo de fabricação.....	37
3.2.1 Etapas do processo de fabricação de rodas fundidas.....	37
3.2.2 Etapas do processo de fabricação de rodas forjadas	38
3.3 Análise química	40
3.4 Tratamentos térmicos realizados.....	42
3.5 Análise microestrutural.....	42
3.6 Ensaio de dureza	43
3.7 Ensaio de tração	44

3.8 Ensaio de fadiga	46
3.9 Análise fractográfica	47
4 RESULTADOS	48
4.1 Aspectos da microestrutura	48
4.2 Resultados dos ensaios de dureza	50
4.3 Resultados dos ensaios de tração	52
4.4 Resultados dos ensaios de fadiga	53
4.5 Resultados da análise fractográfica	57
5 CONCLUSÃO.....	66
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

1 INTRODUÇÃO

O setor ferroviário atualmente se encontra em crescente busca por competitividade em seus produtos e serviços, principalmente na situação em que o Brasil se encontra. Para isto, as empresas relacionadas a este mercado buscam a redução de custo através de alguns itens como: aumento da carga transportada pelo número de eixos, aumento do tamanho do trem em si, e aumento da velocidade no trajeto. Para uma maior redução de custo, há a busca pelos três simultaneamente visto que, se somente algum destes for aplicado, os outros fatores podem ser prejudicados, o que faz com que a situação não ofereça melhorias.

Um sistema de transporte, como o próprio nome sugere, deve movimentar cargas e/ou passageiros de um local para outro, dentro de um tempo e custo que tornem o mesmo competitivo, com absoluta segurança. Para que o sistema que utiliza este meio de transporte seja bem-sucedido, deve atender perfeitamente a todos estes requisitos, mostrando vantagens econômicas que sejam comprovadamente superiores (sete ou mais vezes) ao sistema rodoviário, que hoje é o seu maior concorrente. Considerando critérios como velocidade, fatores ambientais e capacidade, o transporte ferroviário é superior a seus concorrentes existentes e, por isso, teria um papel importante na alternativa aos congestionamentos nas regiões metropolitanas do país se maiores investimentos e incentivos fossem aplicados à sua utilização.

Para que se aperfeiçoem os projetos ferroviários visando um melhor desempenho e redução de custos, muitos esforços estão sendo despendidos para o aumento de cargas por eixo e a maior velocidade dos trens, os quais por sua vez, geram maior contato entre o trilho e a roda.

Levando em consideração a segurança necessária da ferrovia como um item fundamental, a confiabilidade dos produtos deve ser considerada mais importante, não sendo afetada pela busca de redução de custos na fabricação. Por isso há uma grande necessidade e importância no desenvolvimento de novos materiais e o estudo das propriedades mecânicas de materiais já existentes produzidos por diferentes processos de fabricação em busca da otimização dos projetos. Sabe-se que prejuízos muito grandes foram gerados, além de danos ambientais irreparáveis e perdas de vidas humanas por consequência de falhas no setor

ferroviário.

No veículo ferroviário, os componentes mais críticos são as rodas, pois as falhas nas mesmas resultam freqüentemente em acidentes catastróficos. Devido a falhas nestes componentes, outros são prejudicados, como suspensão, trilhos, e conseqüentemente, descarrilamentos.

Por muitos anos o dano considerado como principal nas rodas ferroviárias foi o desgaste, porém, nota-se, com o aumento das cargas e velocidades, uma tendência de mudança do tipo de dano para falhas por fadiga. O processo de deterioração da pista da roda, no caso do desgaste, é lento, sendo possível que se aplique manutenção preventiva através de monitoramento do mesmo, já a fadiga dá origem a fraturas abruptas nas rodas ou a perda de material da pista da mesma, o que impossibilita muitas vezes a detecção do dano a tempo para que os acidentes sejam evitados.

Rodas utilizadas em trens de transporte de passageiros de alta velocidade são submetidas geralmente a um número elevado de ciclos de carregamento, chegando a atingir 5×10^9 revoluções durante sua vida em utilização. Devido a este valor, é de grande importância que haja estudos sobre o comportamento em fadiga de materiais que são empregados na fabricação de rodas ferroviárias, para que se garanta a segurança nas operações. Apesar de sua importância e do interesse com relação ao assunto, os ensaios e experimentos em escala natural são custosos e complexos, por isso têm-se realizado ensaios em corpos de prova, os quais fornecem resultados conclusivos com relação ao comportamento dos materiais utilizados.

Dentre os processos utilizados na fabricação destes componentes, os quais são aplicados mundialmente e aprovados por normas técnicas, estão o processo de forjamento à quente e o processo de fundição sob pressão em matriz de grafite. Ambos utilizam tecnologia de ponta e atendem aos requisitos das normas ferroviárias. Porém, em sua maioria, as normas resumem-se em ensaios estáticos e metalográficos, não considerando comportamentos dinâmicos do material, como o ensaio de fadiga, o que torna necessário um estudo sobre este fenômeno a fim de se garantir a confiabilidade dos produtos ferroviários.

Rodas fabricadas pelo processo de fundição têm a vantagem de serem comercializadas

por valores mais baixos por possuírem menor custo de produção, sendo que seu desempenho no transporte de cargas é satisfatório. Esta vantagem tem despertado o interesse das companhias ferroviárias em aplicar a roda fabricada pelo citado processo de produção, adotando-se um nível de segurança consideravelmente alto, tendo por objetivo minimizar o risco de falhas. Já as rodas ferroviárias forjadas possuem uma qualidade conhecida no meio de transporte ferroviário e são aplicadas tanto no transporte de carga como no transporte de passageiros. Levando em conta a ausência de conclusões com relação a comportamentos dinâmicos nas normas e estudos existentes, faz-se necessário que rodas forjadas e fundidas sejam testadas criticamente, e que se faça um estudo comparativo com relação a suas propriedades e desempenho.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho foi fazer um estudo comparativo entre rodas fundidas e forjadas utilizadas pela indústria ferroviária a fim de verificar o comportamento estático e dinâmico de um aço freqüentemente utilizado para este fim, com conteúdo de carbono de 0,70% em peso, de forma que se possibilite um melhor entendimento da variação de comportamento mecânico, em relação a mudanças na microestrutura entre os dois processos de fabricação considerados. Uma vez que a fundição apresenta vantagens econômicas que não devem afetar a qualidade e a segurança dos componentes, foi analisada a influência dos processos produtivos no comportamento em fadiga das rodas a confiabilidade das mesmas, com a finalidade de fornecer dados importantes para a aplicação dos processos de fabricação ao setor ferroviário.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o aumento da demanda por trens de alta velocidade e com a necessidade de aumento de carga por eixo, a probabilidade de ocorrência de falhas devido a essas necessidades é cada vez maior, podendo ocorrer acidentes, acarretando desastres de grandes dimensões, com conseqüentes perdas de vidas humanas, desastres ambientais e grandes prejuízos materiais (CANTINI et al., 2002; HODDINOTT, 2004). Para que haja maior compreensão sobre os assuntos em destaque, os itens a seguir fornecem um estudo mais abrangente com relação ao histórico das ferrovias, dos componentes dos veículos ferroviários e das ocorrências mais notáveis para o estudo.

2.1 Rodas Ferroviárias

Faz-se necessário uma breve revisão sobre a implementação das estradas de ferro para que a aplicação destes componentes e os resultados buscados pelo trabalho sejam observados de maneira mais conclusiva, sendo utilizado, portanto, os próximos parágrafos para este fim.

2.1.1 Histórico

Os primeiros passos para a implantação das estradas de ferro como um meio de transporte terrestre foram dados no fim do século XVIII e começo do século XIX. As ferrovias nasceram com a combinação do emprego da via dotada de trilhos de ferro com o veículo motorizado. Os romanos utilizavam guias para as rodas dos carros, tendo sido encontrados vestígios de sulcos em rocha nas antigas estradas abertas no início da era cristã. Na Europa, no século XVI já havia vagonetes com rodas flangeadas de madeira deslizando sobre trilhos também de madeira, movimentados por animais em algumas minas de carvão.

Somente em 1814, na Inglaterra, que houve êxito nas primeiras tentativas de

construção de uma máquina tratora. O inventor Jorge Stephenson, em julho de 1814, conseguiu, com sua máquina utilizando vapor d'água, arrastar alguns vagões, recebendo a mesma o nome de *The Rocket*. Em 1879, durante a realização da Exposição Industrial de Berlim, uma locomotiva elétrica, criada pelo engenheiro alemão Werner Von Siemens, circulou pela primeira vez, possibilitando a utilização da tração elétrica nas ferrovias.

A primeira tentativa para implantação de uma estrada de ferro no Brasil foi em 1835, quando o regente Diogo Antônio Feijó promulgou uma lei, favorecendo a quem quisesse construir e explorar uma estrada de ferro ligando o Rio de Janeiro às capitais dos estados de Minas Gerais, Rio Grande do Sul e Bahia. Em 1836, o Estado de São Paulo programou um “Plano de Viação” e concedeu o direito de construção e exploração a uma companhia, porém a tentativa foi frustrada. Em 1840, o governo cedeu a Thomas Cochrane, médico inglês, um novo privilégio para a construção de uma estrada de ferro ligando Rio de Janeiro a São Paulo. Em 1852, Irineu Evangelista de Souza, o Barão de Mauá, construiu a ligação entre o Porto de Mauá (no interior da Baía de Guanabara) e a Raiz da Serra (Petrópolis) quase exclusivamente por sua conta, pois conseguiu grande parte do capital necessário. Em 30 de abril de 1854, foi inaugurada a primeira Estrada de Ferro no Brasil. A mesma possuía 14,5 km de extensão, e foi percorrida em 23 minutos, com uma velocidade média de 38 km/h. O trem foi rebocado pela locomotiva Baronesa, que recebeu este nome em homenagem à esposa do Barão de Mauá. Em 1855 foi organizada a Estrada de Ferro D. Pedro II, que deu origem à Estrada de Ferro Central do Brasil (BRINA, 1988; SETTI, 2000).



Figura 1 - A Baronesa e os carros de passageiros (SETTI, 2000)

Deve-se destacar, no entanto, alguns aspectos relativos às características das dificuldades e às condições favoráveis que envolveram o ambiente no qual se desenvolveram as ferrovias pioneiras. Inicialmente, era comum que as ferrovias requeressem um volume alto de capital para os padrões da época. Aliando-se isso às incertezas futuras quanto a problemas técnicos, operacionais e comerciais, obtinha-se que a realização de investimentos no segmento ferroviário apenas por corporações e, algumas vezes, somente por serem estimulados por algum tipo de subsídio estatal.

No princípio da utilização do transporte ferroviário, muitos problemas técnicos foram enfrentados sem o conhecimento de uma solução, o que exigiu um bom tempo para que o assunto fosse estudado até que se definisse o padrão de construção ideal, bem como das estruturas; além disso, os equipamentos possuíam custos altos. Além dos problemas físicos citados anteriormente, havia ainda as dificuldades na construção das ferrovias devido às condições naturais, como relevo, clima, solo e rios. Garantiu-se o sucesso através da adequação ao transporte de cargas pesadas e perigosas a uma maior velocidade, com uma incidência de acidentes bem pequena.

Com o aumento da demanda por trens de alta velocidade e com a necessidade de aumento de carga por eixo, a probabilidade de ocorrência de falhas devido a essas necessidades é cada vez maior, podendo ocorrer acidentes, acarretando desastres de grandes dimensões, com conseqüentes perdas de vidas humanas, desastres ambientais e grandes prejuízos materiais (CANTINI et al., 2002; HODDINOTT, 2004).

O desastre de Eschede foi o acidente ferroviário de alta velocidade mais mortal do mundo. Ocorreu em 3 de junho de 1998, próximo a vila de Eschede, no distrito de Celle, em Lower Saxony, Alemanha, onde 101 pessoas morreram e estima-se que 88 pessoas ficaram feridas. O acidente foi causado por uma única trinca de fadiga em uma roda que, quando finalmente falhou, fez com que o trem descarrilasse.

2.1.2 Características das Rodas

A interação veículo-via se dá pelo contato direto das rodas metálicas do trem com os

trilhos, que também são metálicos. Isto provoca um desgaste considerável dessas partes devido a grande magnitude da carga que solicita as rodas. Apesar disto, este tipo de interação veículo-via é o mais adequado. Devido à robustez do trem, as rodas são solidárias ao eixo, não permitindo movimento relativo. Como consequência, surge o escorregamento entre as rodas e os trilhos quando o trem descreve uma trajetória curvilínea.

As rodas ferroviárias podem ser forjadas ou fundidas segundo normas internacionais de fabricação. As mais usadas são UIC e AAR. As rodas forjadas podem ser usadas em qualquer tipo de aplicação, enquanto que as fundidas não são recomendadas para uso em carros de passageiros. A Norma AAR define as cargas que devem ser aplicadas nas rodas para fins de projeto, o qual é realizado por meio de análises estruturais utilizando o método dos elementos finitos. Esta análise deve ser feita toda vez que se fabrica uma nova roda (MINICUCCI, 2000).

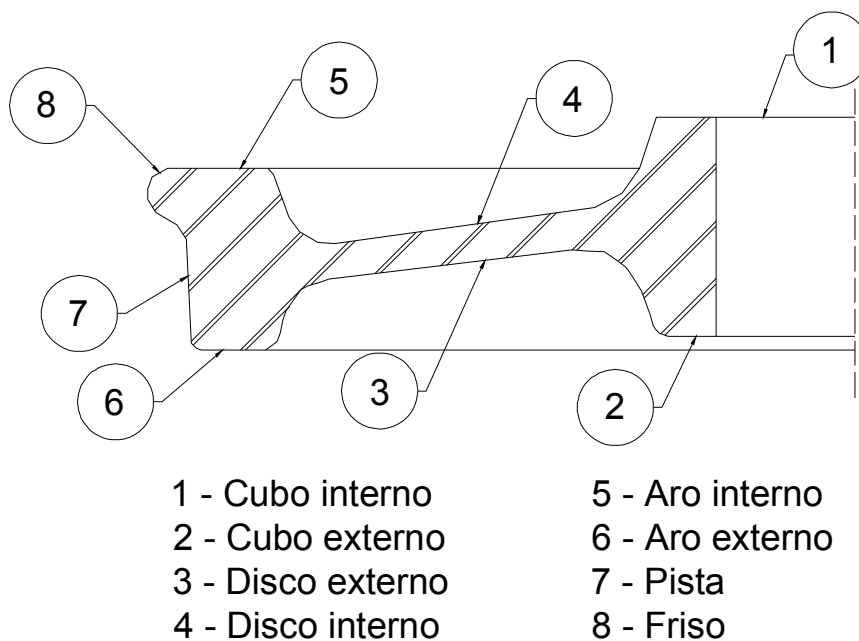


Figura 2 - Partes da roda (adaptada de MINICUCCI, 2000).

2.2 Fadiga

Acidentes ferroviários causados por rodas geram perdas enormes para o departamento ferroviário tanto direta quanto indiretamente. Na maioria destes acidentes, como mostrado no item 2.2.1, a falha é devida à materiais de qualidade inferior ou manutenção ineficiente (TARAFDER et al, 2007).

2.2.1 Histórico

O problema de fadiga nos metais tem sido investigado experimentalmente por mais de um século. Por volta de 1800, o fenômeno de falha por fadiga foi observado pela primeira vez. O trabalho de Wöhler para a Ferrovia do Estado da Prússia remonta à década de 1850 quando ele fez uma extensa série de testes de vários tipos de ferro e aço submetidos a esforços repetidos de tração direta e cargas de compressão, a repetidas cargas de flexão e repetidas cargas de torção. Até os dias de hoje o desempenho de materiais em fadiga normalmente é caracterizado pela "curva S-N", que também é conhecida como curva de Wöhler. Atualmente, a importância das propriedades em fadiga dos materiais tem aumentado, devido ao desenvolvimento de uma ampla variedade de transportes e máquinas modernas de alta velocidade. Mesmo com a grande quantidade de inspeções periódicas de componentes estruturais relativamente ao aparecimento de trincas, a falha por fadiga tem gerado muitos acidentes ocorridos em vias de alta velocidade e em aviões. A complexidade do problema é tal que os procedimentos convencionais de projeto por fadiga são difíceis de serem desenvolvidos. Por haver variações nas propriedades dos materiais, é necessária a utilização de métodos estatísticos na determinação da resistência à fadiga (UGURAL, 2009)

2.2.2 A Fadiga dos Metais

Estruturas sob circunstâncias de tensões dinâmicas e oscilantes, tais como pontes, aeronaves e componentes de máquinas podem ser sujeitas a falhas por fadiga. Fadiga é

definida como a deterioração progressiva da resistência de um material ou componente estrutural durante o serviço, falha tal que pode ocorrer em níveis muito menores de tensão do que os níveis de resistência do material. O fenômeno da fadiga é a maior causa individual de falhas em metais, compreendendo aproximadamente 90% de todas as falhas metálicas, este processo se inicia com o aparecimento de pequenas microtrincas no material ou componente e faz com que elas se tornem trincas maiores que, se não forem detectadas, podem resultar em falhas catastróficas. Frequentemente se descobre que membros de máquina falharam sob a ação de tensões repetidas ou flutuantes. Através de uma análise mais cuidadosa, nota-se que as tensões reais máximas estavam bem abaixo da tensão última do material e abaixo mesmo da resistência ao escoamento. A característica mais notável dessas falhas é que as tensões repetem ciclicamente por isso a falha é denominada “falha por fadiga” (MEGSON, 1999; CALLISTER, 2002; SHIGLEY, 2005).

Este tipo de falha ocorre por causa da existência de regiões microscópicas, geralmente na superfície do componente, onde a tensão localizada torna-se muito maior do que a tensão média que atua sobre a seção transversal. Esta tensão maior é cíclica, levando à formação de trincas. O aumento das trincas é inevitável, pois, a ocorrência das mesmas provoca aumento de tensão em suas extremidades ou fronteiras, o que, por sua vez, provoca aumento do tamanho das trincas do material à medida que a tensão continua a ser aplicada ciclicamente. A área da seção transversal, finalmente é reduzida até um momento em que a carga não pode mais ser suportada e, como resultado, ocorre a ruptura súbita, num comportamento frágil do material, mesmo que o mesmo seja dúctil (HIBBELER, 2004).

A vida por fadiga de um material é medida pelo número de repetições ou ciclos das tensões antes de ocorrer uma fratura. O número de ciclos necessário para romper um corpo de prova a um particular nível de tensão sob a carga variável entre dois valores é determinado experimentalmente através de ensaios de fadiga. Os ensaios de fadiga realizados em corpos de prova são geralmente realizados por flexão. Nestes ensaios, uma viga de teste é submetida a um esforço de flexão pura, propiciando uma alternância completa da tensão (UGURAL, 2009). A tensão aplicada nos ensaios também pode ser de natureza axial ou torcional, sendo em geral, três possíveis modalidades diferentes de tensão oscilante-tempo (CALLISTER, 2002).

A Figura 3 mostra uma relação típica de tensão aplicada e o número de ciclos até a

falha, para amostras de aço sem entalhe, ensaiadas em flexão rotativa ou em tensão de compressão. Esta relação é chamada de curva σ -N, e a abrupta mudança de inclinação é chamada de “inflexão”. A maioria dos aços apresenta claramente este ponto. A amplitude de tensão no ponto de inflexão é chamada de “limite de fadiga”, pois não há sinal de falha, mesmo após a aplicação de mais de 10^7 ciclos de tensão (MURAKAMI, 2002).

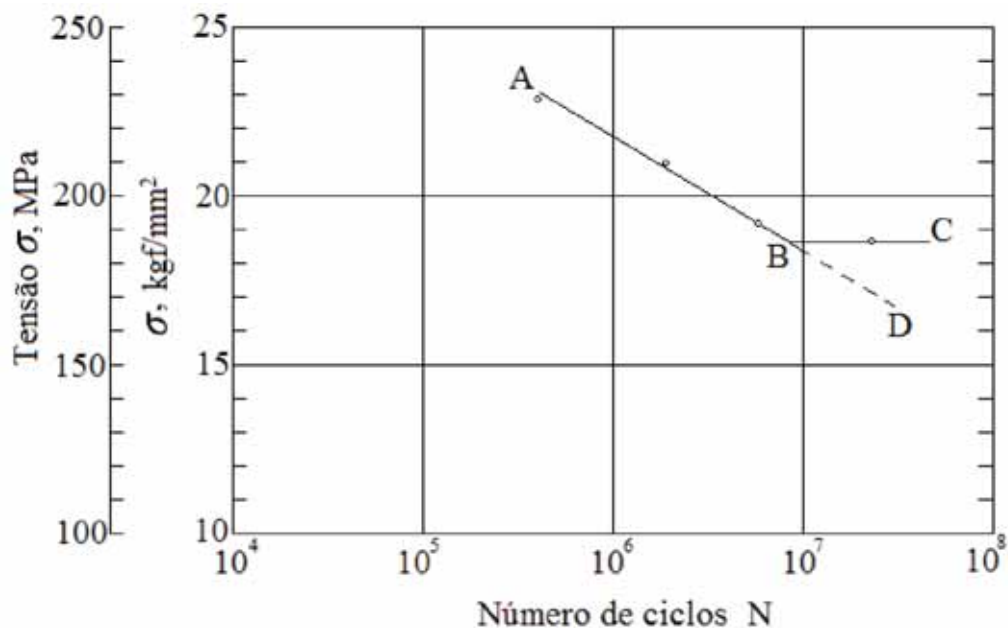


Figura 3 - Curva σ -N para um aço de baixo carbono (adaptada de MURAKAMI, 2002).

2.2.3 Características das Falhas por Fadiga

As características de fratura de uma falha por fadiga, contudo, são bem diferentes daquelas de uma fratura frágil estática. Esta falha deve-se à formação de trinca e propagação. Uma trinca de fadiga terá início, tipicamente, em uma descontinuidade no material em que a tensão cíclica é máxima. Assim, na falha surgem estágios diferentes de desenvolvimento. No estágio I se dá o início de uma ou mais microtrincas, que são causadas por deformações plásticas cíclicas seguidas de propagação cristalográfica estendendo-se por dois a cinco grãos relativamente à origem. A ocorrência dessas trincas provoca o aumento de tensão em suas extremidades ou fronteiras, o que, por sua vez, provoca aumento do tamanho

das trincas no material à medida que a tensão continua a ser aplicada ciclicamente, que é o chamado estágio II. Neste estágio ocorre a evolução de micro a macrotrincas, onde são formadas superfícies de fratura com platôs paralelos, separados por sulcos também paralelos. Estes platôs são normalmente lisos e normais na direção da máxima tensão de tração. As superfícies podem ser onduladas e escuras e ter bandas leves conhecidas como marcas de praia ou marcas de concha de ostra. Enquanto ocorre o carregamento cíclico, essas superfícies fissuradas abrem e fecham, ocorrendo o roçamento entre elas, e a aparência das marcas de praia depende das mudanças no nível e na frequência do carregamento e também da natureza corrosiva do meio. No ciclo de carga final ocorre o estágio III, onde a área da seção transversal do elemento é reduzida a um ponto em que a carga não pode mais ser suportada e, como resultado, ocorre a ruptura súbita, pois a trinca atinge um tamanho que proporciona uma propagação instável. O material, apesar de dúctil, comporta-se como se fosse frágil. Com bastante frequência, as marcas de praia, caso existentes, e os padrões possíveis na fratura de estágio II, denominados linhas de divisa, apontam para a origem das trincas iniciais (CALLISTER, 2002; HIBBELER, 2004; SHIGLEY, 2005).

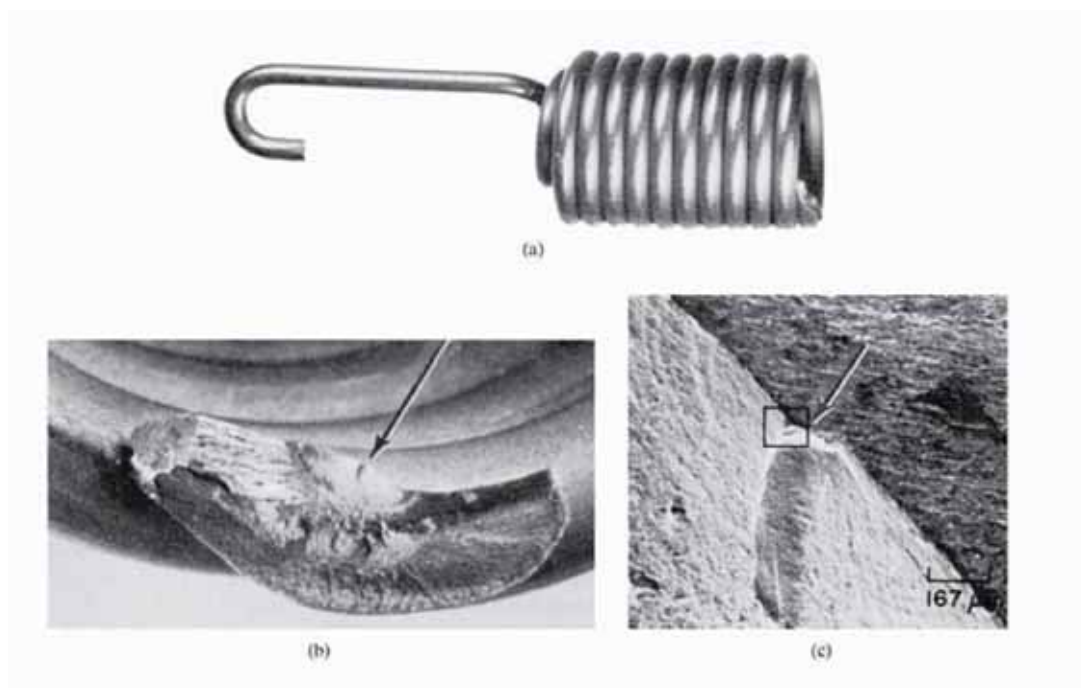


Figura 4 - Superfície característica de fratura por fadiga. (a) Fotografia de uma mola de controle de aceleração de aeronave que partiu por fadiga após 274 h de serviço (b) Micrografia (c) Micrografia eletrônica de varredura (SHACKELFORD, 2008).

A quantidade total de ciclos até a fratura ou vida em fadiga (N_f), pode ser considerada como sendo a soma do número de ciclos para a iniciação da trinca N_i e a propagação da trinca N_p :

$$N_f = N_i + N_p \quad (2.1)$$

A etapa de fratura final ocorre muito rapidamente, contribuindo muito pouco para a duração total da fadiga, sendo então considerada insignificante. As proporções da duração total que são relativas ao número de ciclos para iniciação da trinca e ao número de ciclos para a propagação da trinca dependem das condições do ensaio e do material utilizado. Para fadigas de alto ciclo (utilizando baixos níveis de tensão), a iniciação da trinca utiliza uma grande fração da vida em fadiga. Aumentando-se o nível de tensão, o número de ciclos para a iniciação da trinca diminui, formando-se as mesmas mais rapidamente. Dessa forma, no caso de fadiga de baixo ciclo (altos níveis de tensão), a etapa de propagação ocupa um maior tempo, sendo predominante (CALLISTER, 2002).

A tensão na extremidade de um furo, ou na raiz de um entalhe, tem um valor mais elevado do que a tensão média. Este fenômeno é chamado de "concentração de tensões". As trincas de fadiga na maior parte das vezes se iniciam (ou nucleiam) nos lugares de concentração de tensão. Os locais de concentração de tensões incluem riscos superficiais, cantos vivos, rasgos de chaveta, filetes de roscas e afins. Uma vez que a trinca se iniciou, temos que considerar a concentração de tensão da trinca. Entretanto, deve ser notado que as características da concentração de tensões na ponta de uma trinca são bem diferentes daquelas de furos e entalhes (CALLISTER, 2002; MURAKAMI, 2002).

Quando uma trinca estável é nucleada, começa a se propagar muito lentamente e, em metais policristalinos, com elevadas tensões de cisalhamento ao longo dos planos. Como dito acima, este estágio é algumas vezes chamado de propagação de estágio I (Figura 5). A vida neste estágio pode ser curta devido à presença de entalhes e tensões elevadas, dependendo do nível de tensão e da natureza do corpo de prova do ensaio. Em metais policristalinos, a trinca se estende normalmente através de somente alguns grãos durante esse estágio de propagação. A superfície de fadiga que é formada durante essa propagação de estágio I possui uma aparência plana sem características especiais.

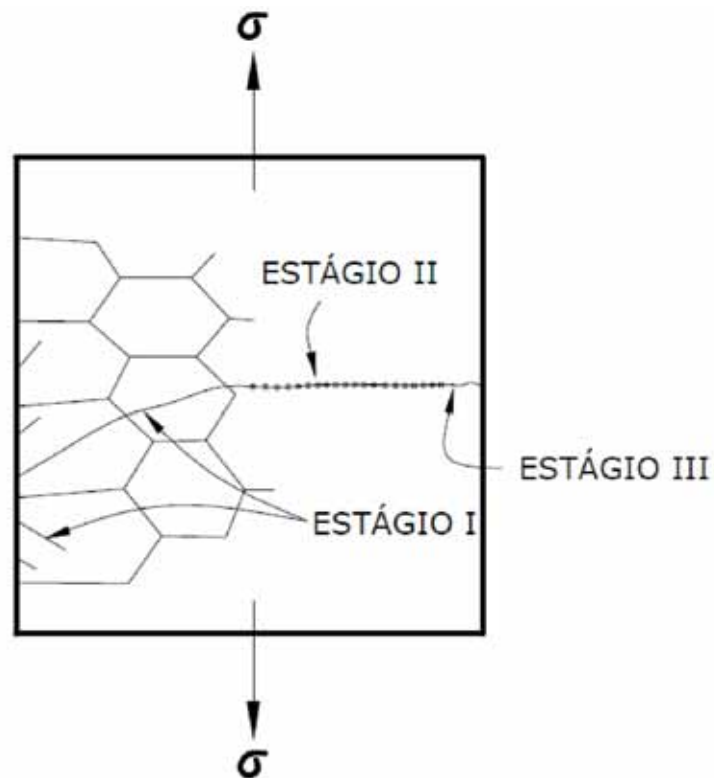


Figura 5 - Representação esquemática mostrando os estágios da propagação de trinca por fadiga (adaptado de MEYERS, CHAWLA, 1982).

No estágio de propagação da trinca ocorre uma alteração na direção de propagação para uma direção que é praticamente perpendicular à tensão de tração aplicada (ver Figura 5). Durante esse estágio, o crescimento da trinca avança através de um processo repetitivo de abaulamento plástico e afilamento da ponta da trinca, como na Figura 6. No início do ciclo de tensões há uma ponta no formato de um duplo entalhe (Fig. 6a). À medida que a tensão de tração é aplicada em cada um dos entalhes, ocorre uma deformação localizada ao longo de planos de que estão orientados a 45° em relação ao plano da trinca (Fig. 6b). Com o alargamento da trinca até sua extensão máxima, a ponta avança pela deformação abaulada (Fig. 6c). Durante a compressão, há a inversão das direções da deformação cisalhante na ponta da trinca (Fig. 6d) até que, no ápice do ciclo, uma nova ponta de trinca aguda com entalhe duplo se formou (Fig. 6e). Dessa forma, durante um ciclo completo a ponta da trinca avançou o equivalente à distância de um entalhe.

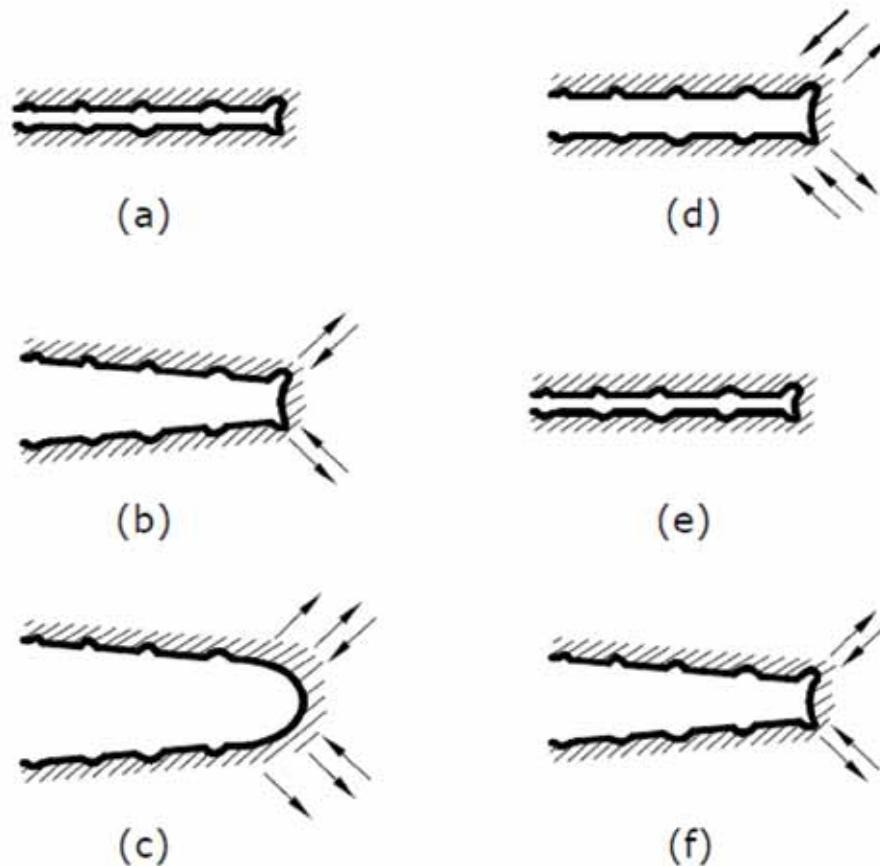


Figura 6 - Processo de crescimento da trinca por fadiga. (adaptada de CALLISTER, 2002).

As trincas podem crescer desde um tamanho praticamente imperceptível até algum comprimento crítico no estágio II, portanto pode-se relacionar a vida de um componente estrutural à taxa de crescimento da trinca. A taxa de propagação desta trinca neste estágio pode ser medida experimentalmente através de técnicas disponíveis que são empregadas para monitorar o comprimento da trinca durante o tensionamento cíclico. Há uma coleta dos dados, que são registrados e plotados em uma curva que relaciona o comprimento da trinca a e o número de ciclos N . Esta taxa, que é uma função também de variáveis do material, e não somente do nível de tensão e do tamanho da trinca, matematicamente pode ser expressa em termos do fator de intensidade de tensão K :

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^m \quad (2.2)$$

Os parâmetros A e m são constantes do material e irão depender também do ambiente,

da frequência, e da razão das tensões. O valor de m varia normalmente entre 1 e 6 (CALLISTER, 2002).

2.2.4 Falhas por fadiga em rodas ferroviárias

Na iniciação de trincas superficiais de fadiga em rodas, a fenda tipicamente cresce para baixo em direção ao cubo da roda na propagação subsequente, como na Figura 7a. Em seguida, desvia-se a uma profundidade de cerca de 20 milímetros com um crescimento contínuo na direção da circunferência. Quando iniciado com uma maior profundidade, a trinca tipicamente continua a crescer a esta profundidade, como na Figura 7b. A fratura final irá eventualmente ocorrer como ramificação em direção à superfície como na Figura 7a, ou, mais raramente, em direção ao cubo da roda, como na Figura 7b. Em ambos os casos (e também em fadiga dos trilhos), as superfícies da trinca apresentam uma característica de “marcas de praia” (EKBERG; KABO, 2005).

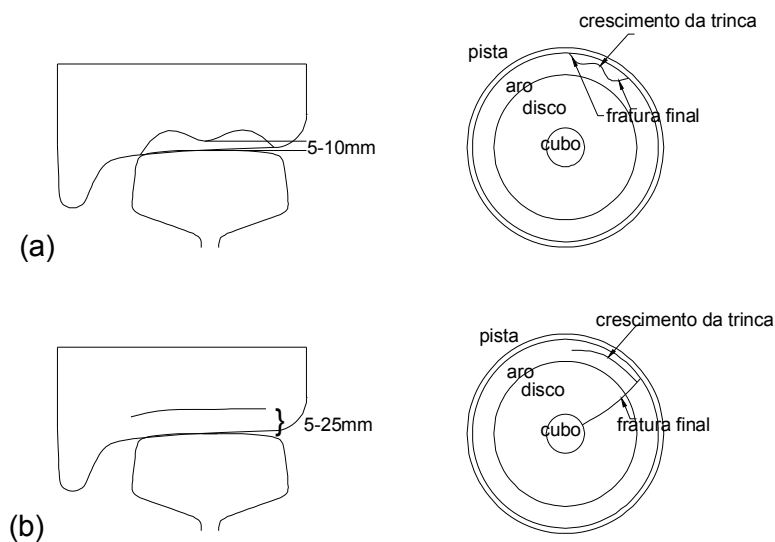


Figura 7 - Aparência típica de trincas de fadiga em rodas de trem: (a) início na superfície e (b) início num defeito profundo (adaptada de EKBERG; KABO, 2005).

Segundo Liu et al. (2006), de acordo com o banco de dados de fratura de rodas da Union Pacific Railroad, 65% das falhas em rodas ferroviárias são causadas por aro destruído, 5% por falha térmica, e os outros 30% pela divisão vertical do aro. A falha

térmica geralmente rompe um pedaço da superfície da roda, enquanto um falha de aro quebrado pode destruir a integridade da roda e, portanto, é mais perigosa. A destruição do aro é o resultado de grandes trincas de fadiga que se propagam bruscamente paralelas à superfície da roda. Não há dúvida de que os vazios e inclusões em um tamanho suficiente em um campo de tensão irão conduzir à falha de rodas. Melhorias significativas foram feitas nos últimos anos para impedir as falhas de quebra no aro, tais como os regulamentos severos na inspeção de fabricação de rodas, etc. No entanto, estes só ajudam a reduzir a ocorrência de fraturas em aros, mas não irá impedir a formação de todos eles.

2.3 Efeitos do processo de fabricação

Segundo Tarafder, Sivasprasad e Ranganath (2007), o material fundido mostra propriedades superiores de resistência e propriedades inferiores de ductilidade, em comparação com o material forjado. Em ambos os tipos de rodas, as propriedades de resistência são maiores na região do aro, em comparação com a região do disco. A resistência ao crescimento da trinca por fadiga dos materiais fundido e forjado aparenta ser semelhante para as orientações e localizações equivalentes. Em geral, o material forjado apresenta resistência à fratura maior em comparação com o material da roda fundida. A resistência ao crescimento da fratura na roda forjada é menor no sentido radial, no entanto, ainda é maior do que a maior resistência à fratura obtida no material fundido, que não necessariamente é no sentido radial.

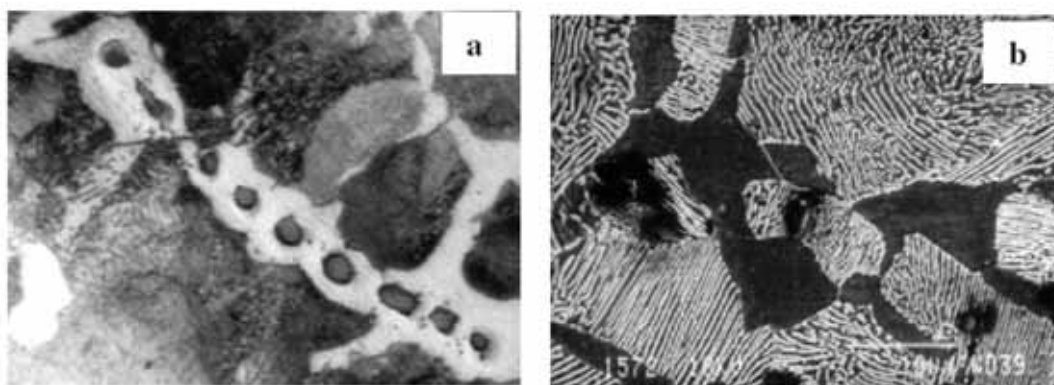


Figura 8 - Microestrutura de uma (a) roda fundida (b) roda forjada (TARAFDER; SIVASPRASAD; RANGANATH, 2007).

2.3.1 Comportamento dos materiais fundidos em fadiga

Em componentes fundidos, falhas de fadiga muitas vezes são originárias de defeitos internos, tais como cavidades de microrrechupes e crateras, devido a um processo de fundição não otimizado. Um critério de engenharia de segurança de projeto para os componentes em materiais fundidos dúcteis tem sido o foco de muitos estudos. O limite de fadiga de materiais fundidos é controlado principalmente pela presença destes defeitos ou impurezas citados acima, sendo que os defeitos próximos à superfície são muito mais perigosos no que diz respeito ao limite de fadiga do que defeitos internos. Segundo Schilke, Ahlström e Karlsson (2012), a porosidade de um material fundido mais refinado também diminui a vida em fadiga.

Apesar de defeitos próximos à superfície serem mais perigosos, Pook, Greenan, Found e Jackson (1981) verificaram que defeitos brutos de rechupe nas linhas de centro têm um sério efeito sobre a resistência à fadiga em materiais fundidos sujeitos à tração, mas pequeno efeito sobre a resistência à fadiga quando os materiais são sujeitos à carregamentos de flexão, quando estão próximos do eixo central.

2.3.2 Comportamento dos materiais forjados em fadiga

Pessard, Morel, Verdu, Flacelière e Baudry (2011) afirmam que uma das principais preocupações na concepção de componentes forjados é o papel de inclusões não metálicas sobre os mecanismos de falha por fadiga. Embora a influência de inclusões não metálicas na ductilidade e na tenacidade do aço seja reconhecida, o efeito em propriedades de fadiga continua a ser um tema de debate. Sabe-se que a ductilidade está intimamente relacionada tanto como a fração de volume, como com a morfologia das inclusões. Inclusões, tais como sulfetos e silicatos, normalmente são responsáveis por reduções drásticas de ductilidade. Em nível microscópico, inclusões não metálicas são responsáveis pela criação de vazios microscópicos, levando a microfissuras por coalescência. Aços laminados a quente e

forjados em geral têm uma microestrutura anisotrópica e contém inclusões de sulfeto de manganês (MnS) alongadas na direção da laminação. O efeito das inclusões de MnS alongadas na resistência à fadiga depende diretamente da sua concentração, morfologia e orientação no que diz respeito às cargas aplicadas. Mais exatamente, sabe-se que vários fatores, como a forma, tamanho, distribuição espacial e adesão na interface inclusão/matriz controlam as propriedades de fadiga. Isto resulta na anisotropia tanto da fadiga como das propriedades monotônicas. Tipicamente, as propriedades dos materiais em fadiga de alto ciclo são estimadas através da realização de testes cíclicos em amostras simples. No entanto, devido à alta dispersão observada em torno do limite de fadiga, muitos testes são necessários para obter uma boa estimativa da resistência à fadiga.

Segundo Pessard, Morel, Bellet e Morel (2012), materiais laminados ou forjados são conhecidos como materiais que possuem boa resistência mecânica e à fadiga. Estas características estão ligadas ao fato de que o material é mais compacto e tem uma microestrutura que é mais fina, devido ao processo de fabricação.

Pessard, Morel, Verdu, Flacelière e Baudry (2011) concluíram que para amostras orientadas a 0° em relação à direção da laminação, as inclusões são paralelas ao eixo da carga aplicada e a iniciação da microtrinca é controlada pelo material da matriz. Para amostras orientadas a 45° e 90° aglomerados de inclusões de sulfeto de manganês alongados desempenham um papel na iniciação de trincas e a resistência à fadiga cai significativamente. Esta diminuição da resistência à fadiga depende da direção da laminação.

Roiko, Hänninen e Vuorikari (2012) concluíram que os locais de nucleação das trincas que conduzem à falha foram identificados como inclusões na superfície das amostras ou próximas da mesma para 58 de 61 barras de ensaio. As inclusões consistiam principalmente em uma mistura de óxidos de alumínio com pequenos traços de MnS. Todas as inclusões de MnS foram encontradas nos locais de iniciação de trinca por fadiga.

2.4 Influências de micro-inclusões e defeitos internos na vida em fadiga

Teorias tradicionais de avaliação dos efeitos de entalhes, com base em fatores de concentração de tensão, e distribuição de tensão ou gradiente, são aplicáveis a entalhes que podem ser vistas a olho nu, que são maiores que aproximadamente 1 milímetro. No entanto, à medida que são considerados tamanhos menores de entalhe, essas teorias se tornam inválidas. Assim como os entalhes artificiais, e os efeitos do entalhe devido a defeitos de superfície e riscos, ambos os defeitos naturais e inclusões não metálicas, são de importância prática (MURAKAMI, 2002).

Para os casos de fricção de superfície moderada (um coeficiente de atrito utilizado abaixo de aproximadamente $\mu < 0,3$), trincas de fadiga tendem a iniciar abaixo da superfície. Tal início é promovido pela ocorrência de defeitos de material. Um fator adicional que pode promover o início da trinca é contato próximo da face lateral da roda. De acordo com a análise elástica, a maior tensão alternada de cisalhamento em uma roda ferroviária devido ao contato de rolamento (de perfis nominais) é tipicamente uns 4 ou 5 milímetros abaixo da superfície. No entanto, o ponto de iniciação de trincas subsuperficiais em rodas ferroviárias pode ser de 4 a 20 milímetros abaixo. Existem várias razões para isso: o endurecimento do material é mais nítido na superfície, as tensões residuais de compressão na superfície devido à carga de fabricação e operacional tendem a suprimir a iniciação de trincas superficiais de fadiga, e os defeitos no material podem causar tensões muito altas localizadas mesmo em profundidades consideráveis. Quanto mais profundo o ponto de início, mais importante o efeito de defeito dos materiais. Abaixo de 10 milímetros, as magnitudes de tensões globais são muito baixas. Ainda assim, um defeito de material irá gerar uma concentração de tensão muito elevada que pode desencadear a iniciação da fadiga. Em contraste, quanto mais perto da superfície, mais importante a influência da geometria do contato. Deve-se notar que, uma vez que a trinca cresce em compressão e cisalhamento, que fricciona as faces da trinca, os defeitos de material que atuaram como desencadeadores da trinca podem ser desgastados durante a propagação da trinca (EKBERG; KABO, 2005).

Se o tamanho dos entalhes é relativamente grande, e os mesmos são visíveis a olho nu, então a tensão máxima admissível na raiz do entalhe tem uma correspondência de um para um com o gradiente de tensão na raiz do entalhe. Portanto, se uma curva mestra para a

relação entre a tensão máxima admissível e o gradiente do limite de fadiga é determinada a partir de testes de laboratório, então, a tensão máxima elástica desvia-se da curva principal. Isto é porque o tamanho (profundidade) dos entalhes torna-se da mesma ordem que o tamanho do domínio de trincas por fadiga na raiz do entalhe.

No limite de fadiga (σ_w) fraturas são geradas de pequenos defeitos iniciais e trincas, e então param de se propagar. Além do valor de σ_w , pode-se definir outra tensão crítica, σ_{wi} , sob a qual não há início de fraturas a partir da trinca original. Essas duas tensões críticas têm um importante papel na predição da vida em fadiga sob carregamentos de amplitude variável. Isso acontece porque as duas quantidades fornecem as medições necessárias para validar a contribuição de tensões de amplitude variável em falhas por fadiga em tensões aplicadas maiores do que σ_{wi} .

Um método experimental muito simples foi usado. Amostras contendo pequenas trincas, as quais surgiram de furos artificiais foram preparadas. Essas amostras foram recozidas para aliviar as tensões residuais produzidas durante a introdução da trinca inicial de fadiga. Portanto, estas amostras deveriam conter as assim chamadas trincas ideais antes do teste de fadiga subsequente, durante o qual a tensão crítica para a iniciação da trinca por fadiga, σ_{wi} , é medida.

A Figura 2.10 ilustra o procedimento usado para determinar σ_{wi} . Se uma trinca recozida não se propaga, pode ser assumido que nem o fechamento de trinca plasticamente induzida, nem o fechamento de trinca induzida por rugosidade superficial, nem fechamento de trinca induzida por óxido irão ocorrer.

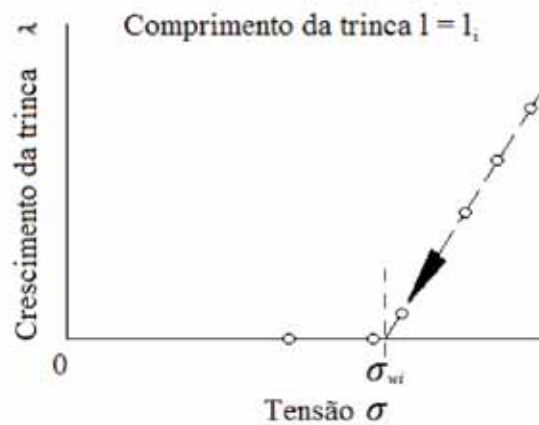


Figura 9 - Determinação da tensão crítica σ_{wi} , a partir de uma trinca inicial (adaptada de MURAKAMI, 2002).

A Figura 10 mostra que apenas inclusões de óxido com mais de $30\mu\text{m}$ de diâmetro devem ser consideradas quando se avalia a vida em fadiga de rolamentos de esferas, e através da Figura 11 nota-se que o efeito das inclusões do mesmo tamanho pode variar dependendo do local onde elas estavam situadas na seção transversal de uma amostra. Eles também mostraram que as inclusões menores do que um tamanho limiar não afetou a resistência à fadiga do material (MURAKAMI, 2002).

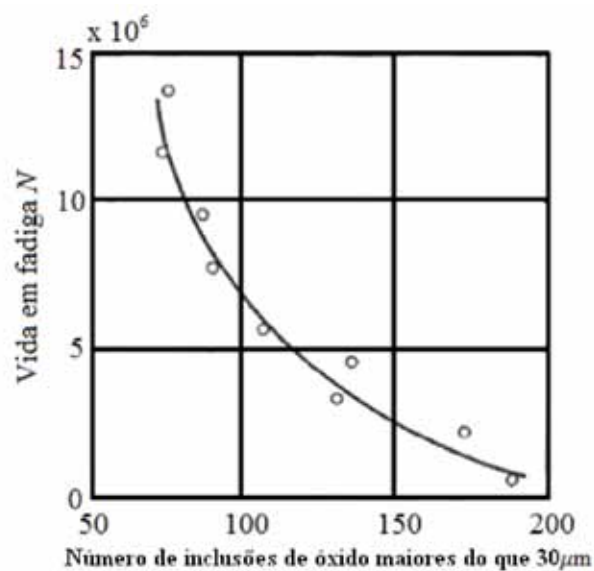


Figura 10 - Relação entre vida em fadiga de esferas de rolamentos e número de inclusões de óxido maiores do que $30\mu\text{m}$ (adaptada de MURAKAMI, 2002).

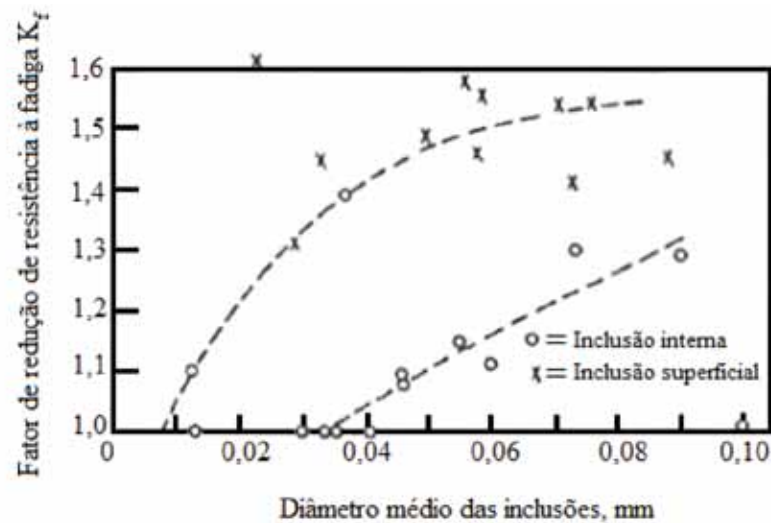


Figura 11 - Relação entre diâmetro médio da inclusão e fator de redução de resistência à fadiga (adaptada de MURAKAMI, 2002).

Hashimoto, Fujimatsu, Tsunekage, Hiraoka, Kida e Santos (2011) concluíram que fechando as cavidades de inclusão/matriz, consegue-se uma vida estendida antes da iniciação da fadiga e, provavelmente, uma supressão no crescimento de trincas já existentes. Os autores concluíram também que a condição de interface inclusão/matriz, bem como o tamanho da inclusão desempenha um papel importante na vida do material de contatos rolantes em fadiga.

Segundo Meurling, Melander, Tidesten, Westin (2001), o limiar para propagação de trincas em inclusões e carbonetos controlam a resistência à fadiga.

Saberifar, Mashrengi, Mosalaeepur e Ghasemi (2011) concluem que trincas de fadiga tendem a iniciar e se propagar a partir de inclusões não metálicas quando elas são grandes o suficiente para gerar maior intensidade de tensão do que a rugosidade superficial. Em superfícies rugosas, a intensidade total de tensão gerada por inclusões não metálicas e rugosidade superficial levou a uma notável diminuição de resistência à fadiga. Foi concluído também que para uma dada tensão, o tamanho crítico da inclusão é aumentado pela diminuição da rugosidade de superfície.

A mesma inclusão pode ter efeitos diferentes sobre a resistência à fadiga, dependendo da direção da carga. Assim influências diferentes de inclusões aparecem, dependendo se

uma carga produz uma tensão de tração na direção longitudinal ou na direção transversal (MURAKAMI, 2002).

2.5 Análise estatística de ensaios de fadiga

A fim de especificar a vida em fadiga e limite de resistência à fadiga em termo de probabilidades, várias técnicas estatísticas foram desenvolvidas. Uma maneira conveniente é através de uma série de curvas de probabilidade constante, como exemplificado na figura 2.13. O valor de P associado com cada curva representa a probabilidade de falha. Por exemplo, em um nível de tensão de 200 MPa (30.000 psi), esperaríamos que 1% das amostras fraturassem em até aproximadamente 2×10^6 ciclos e 50% fraturasse com aproximadamente 5×10^7 ciclos, e assim por diante. Deve ser lembrado que as curvas σ - N representadas na literatura são normalmente valores médios, a menos que seja feita uma observação em contrário (CALLISTER, 2002).

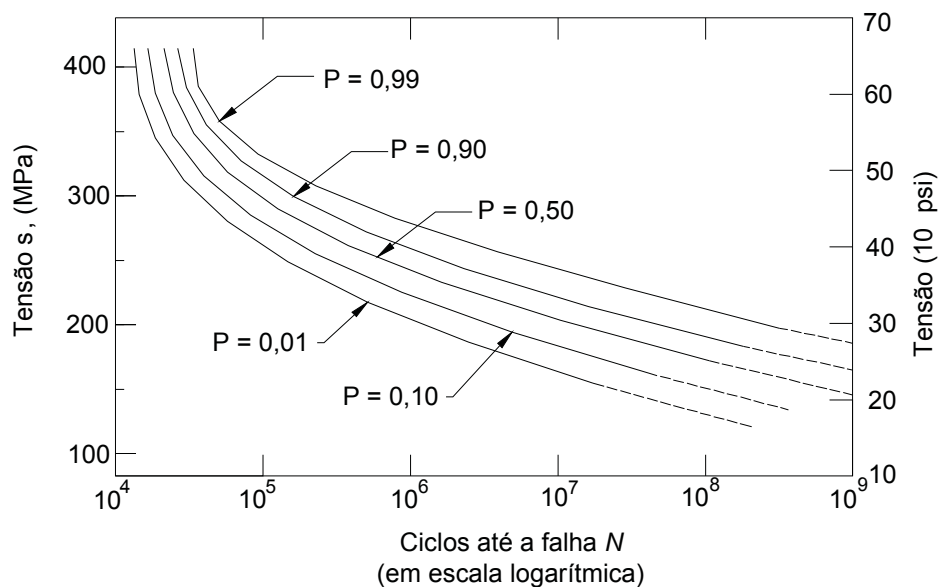


Figura 12 - Probabilidade σ - N de fadiga de curvas de fratura para uma determinada liga; P representa a probabilidade de falha (adaptada de CALLISTER, 2002).

Conforme a norma ASTM E739-10, a análise estatística de ensaios de fadiga deve seguir alguns passos. O ensaio deve possuir uma amostra de 12 a 24 corpos de prova para apresentar dados confiáveis. Ao contrário do usual, seguindo a norma, o eixo X é vertical, enquanto o eixo Y é horizontal.

Primeiramente, determina-se o número de corpos de prova a serem ensaiados (k) e o número de níveis de tensão do ensaio (l). Com estes valores, determina-se o número de réplicas por nível de tensão (m), e então, calcula-se a repetitividade do ensaio através da fórmula:

$$\%R = 100 \left(1 - \frac{N^{\circ} \text{ de níveis de tensão } (l)}{N^{\circ} \text{ de CDP's ensaiados total } (k)} \right) \quad (2.3)$$

Sendo que para dados para projeto, este valor deve ser no mínimo de 50 a 75% e para dados confiáveis este valor deve ser no mínimo de 75 a 88%.

Posteriormente, se obtêm os valores nos ensaios de fadiga. Sendo X uma escala cartesiana normal, este eixo representará os valores de tensão no eixo vertical, e Y representará o número de ciclos em escala logarítmica ($Y_i = \log N$) no eixo horizontal. Em alguns casos X pode representar as tensões também em escala logarítmica ($X_i = \log S$). Com os dados, obtém-se uma tabela com todos os valores necessários para os procedimentos subseqüentes, Y_i e X_i , sendo necessário também o cálculo de X e Y médios. Com os valores médios, são calculados para cada ponto i os valores de $(X_i - \bar{X})$, $(X_i - \bar{X})^2$, $(Y_i - \bar{Y})$, $(Y_i - \bar{Y})^2$ e $(X_i - \bar{X}).(Y_i - \bar{Y})$.

Com as tabelas montadas, podemos obter os valores das constantes $\hat{A}$ e $\hat{B}$ da equação ajustada 2.4, obtidos através das fórmulas:

$$\hat{Y} = \hat{A} + \hat{B}.X_i \quad (2.4)$$

$$\hat{B} = \frac{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X}).(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \quad (2.5)$$

$$\hat{A} = \bar{Y} - \hat{B}\bar{X} \quad (2.6)$$

Com a equação 2.4, obtêm-se uma nova tabela, desta vez com os valores $\hat{Y}_i$, $(Y_i - \hat{Y}_i)$, $(Y_i - \hat{Y}_i)^2$, $(\hat{Y}_i - \bar{Y})$, $(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$ para cada ponto i . Com estes dados organizados em uma tabela calcula-se a variância através da fórmula (2.7) e o desvio padrão a partir da fórmula (2.8).

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{k - 2} \quad (2.7)$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\hat{\sigma}^2} \quad (2.8)$$

O coeficiente de determinação (R), que deve ser o mais próximo de 1 o possível para o modelo ser considerado adequado, é obtido através da fórmula:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^k (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (2.9)$$

A partir das equações (2.11) e (2.12), calcula-se o intervalo de confiança para os parâmetros A e B , respectivamente:

$$\hat{A} \pm t_p \cdot \hat{\sigma} \left[\frac{1}{k} + \frac{\bar{X}^2}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.10)$$

$$\hat{B} \pm \left[\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2.11)$$

O valor t_p é encontrado na tabela abaixo, onde n é sempre igual ao número de corpos de prova subtraindo-se 2 ($n = k - 2$), e a porcentagem é o intervalo de confiança que pode ser de 90 ou 95%.

Tabela 1 - Valores de t_p (Adaptada da ASTM E739-10).

n^A	Valores de t_p	
	$P_1\%^B$	
	90	95
4	2,1318	2,7764
5	2,0150	2,5706
6	1,9432	2,4469
7	1,8946	2,3646
8	1,8595	2,3060
9	1,8331	2,2622
10	1,8125	2,2281
11	1,7959	2,2010
12	1,7823	2,1788
13	1,7709	2,1604
14	1,7613	2,1448
15	1,7530	2,1315
16	1,7459	2,1199
17	1,7396	2,1098
18	1,7341	2,1009
19	1,7291	2,0930
20	1,7247	2,0860
21	1,7207	2,0796
22	1,7171	2,0739

^A n não é o tamanho da amostragem e sim os graus de liberdade de t, que é $n = k - 2$

^B P é a probabilidade em porcentagem da variável aleatória t estar no intervalo de $-t_p$ e $+t_p$.

Finalmente, calcula-se o intervalo de confiança (σ -N) pela fórmula (2.13):

$$Y = \hat{A} + \hat{B}X_i \pm \sqrt{2F_p} \cdot \hat{\sigma} \left[\frac{1}{K} + \frac{(X_i - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

O valor de F_p é obtido na tabela abaixo, onde n_1 é sempre igual a 2 e $n_2 = k - 2$, com 95% de confiança na primeira linha e 99% na segunda linha.

Tabela 2 - Valores de F_p para 5% de significância (Adaptada da ASTM E739-10).

Valores de F_p , com 5% de significância				
Graus de liberdade, n_2	Graus de liberdade, n_1			95%
	1	2	3	
1	161,45	199,50	215,71	224,58
2	18,51	19	19,16	19,25
3	1,13	9,55	9,28	9,12
4	7,71	6,94	6,59	6,39
5	6,61	5,79	5,41	5,19
6	5,99	5,14	4,76	4,53
7	5,59	4,74	4,35	4,12
8	5,32	4,46	4,07	3,84
9	5,12	4,26	3,86	3,63
10	4,96	4,10	3,71	3,48
11	4,84	3,98	3,59	3,36
12	4,75	3,89	3,49	3,26
13	4,67	3,81	3,41	3,18
14	4,60	3,74	3,34	3,11
15	4,54	3,68	3,29	3,06
16	4,49	3,63	3,24	3,01
17	4,45	3,59	3,20	2,96
18	4,41	3,55	3,16	2,93
19	4,38	3,52	3,13	2,90
20	4,35	3,49	3,10	2,87
21	4,32	3,47	3,07	2,84
22	4,30	3,44	3,05	2,82
23	4,28	3,42	3,03	2,80

Tabela 3 - Valores de F_p para 1% de significância (Adaptada da ASTM E739-10).

Valores de F_p , com 1% de significância				
Graus de liberdade, n_2	Graus de liberdade, n_1			99%
	1	2	3	4
1	4052,2	4999,3	5403,5	5624,3
2	98,50	99,00	99,16	99,25
3	34,12	30,82	29,46	28,71
4	21,20	18,00	16,69	15,98
5	16,26	13,27	12,06	11,39
6	13,75	10,92	9,78	9,15
7	12,25	9,55	8,45	7,85
8	11,26	8,65	7,59	7,01
9	10,56	8,02	6,99	6,42
10	10,04	7,56	6,55	5,99
11	9,65	7,21	6,22	5,67
12	9,33	6,93	5,95	5,41
13	9,07	6,70	5,74	5,21
14	8,86	6,51	5,56	5,04
15	8,68	6,36	5,42	4,89
16	8,53	6,23	5,29	4,77
17	8,40	6,11	5,19	4,67
18	8,29	6,01	5,09	4,58
19	8,18	5,93	5,01	4,50
20	8,10	5,85	4,94	4,43
21	8,02	5,78	4,87	4,37
22	7,95	5,72	4,82	4,31
23	7,88	5,66	4,76	4,26

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Material

O trabalho foi executado em duas rodas de aço SAE-1070 sendo uma fabricada pelo processo de forjamento, cedida pela MWL Brasil, e a outra fabricada pelo processo de fundição. As rodas foram fabricadas conforme requisitos da norma Association of American Railroad – AAR M-107 (2011) e o diâmetro final das mesmas é de 33 polegadas, sendo que os corpos de prova foram retirados através de procedimento de corte com serra de fita, nas mesmas posições e na mesma quantidade para as duas rodas para uma maior confiabilidade nos resultados e na comparação, conforme a Figura 13.



Figura 13 - Corpos de prova retirados da roda fundida.

Primeiramente foram estudadas as características do material da roda forjada, e o mesmo procedimento foi feito posteriormente para rodas fundidas.

3.2 Etapas do processo de fabricação

3.2.1 Etapas do processo de fabricação de rodas fundidas

A primeira roda analisada foi fabricada pelo processo de fundição sob pressão. O processo de fundição sob pressão é feito segundo as seguintes etapas, tendo-se um controle rigoroso e constante nas características envolvidas, como temperatura, pressão e tempo: preparação do aço, preparação dos moldes, vazamento do aço nos moldes, e algumas etapas complementares de fabricação, como corte à quente para a retirada de massalotes, a gravação de identificação de rastreabilidade, tratamentos térmicos, acabamentos específicos e ensaios não destrutivos (partículas magnéticas e ultra-som), que garantem maior qualidade final do produto identificando defeitos internos e superficiais, que não são permitidos para aprovação das rodas. Tais processos são ilustrados nas Figuras 14 a 16.



Figura 14 - Vazamento do aço do forno elétrico para a panela durante sua preparação.



Figura 15 - Preparação dos moldes.

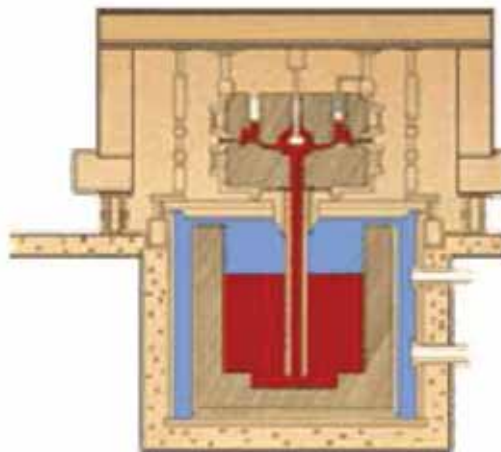


Figura 16 - Vazamento de aço dos moldes.

3.2.2 Etapas do processo de fabricação de rodas forjadas

A segunda roda analisada foi fabricada pelo processo de forjamento. O processo de forjamento para fabricação de rodas ferroviárias consiste nas seguintes etapas: aciaria (fusão da sucata, acerto da composição química e vazamento do aço líquido em lingoteiras), corte a quente, forjamento, tratamento térmico e usinagem. Tais etapas estão ilustradas nas Figuras 17 a 21.



Figura 17 - Vazamento do aço na aciaria. Foto cedida pela MWL Brasil.



Figura 18 - Corte a quente do lingote. Foto cedida pela MWL Brasil.

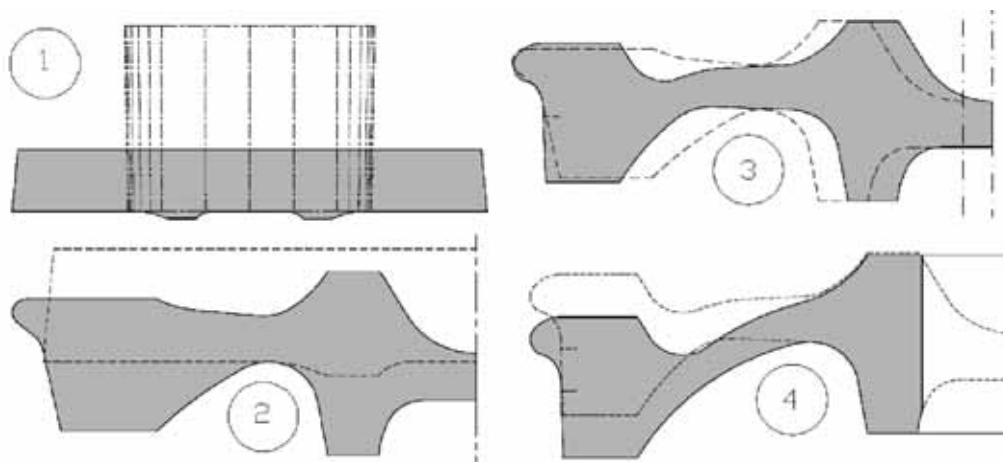


Figura 19 - Sequência das operações do processo de forjamento (adaptada de VILLAS BÔAS, 2009).



Figura 20 – Tratamento térmico. Foto cedida pela MWL Brasil.

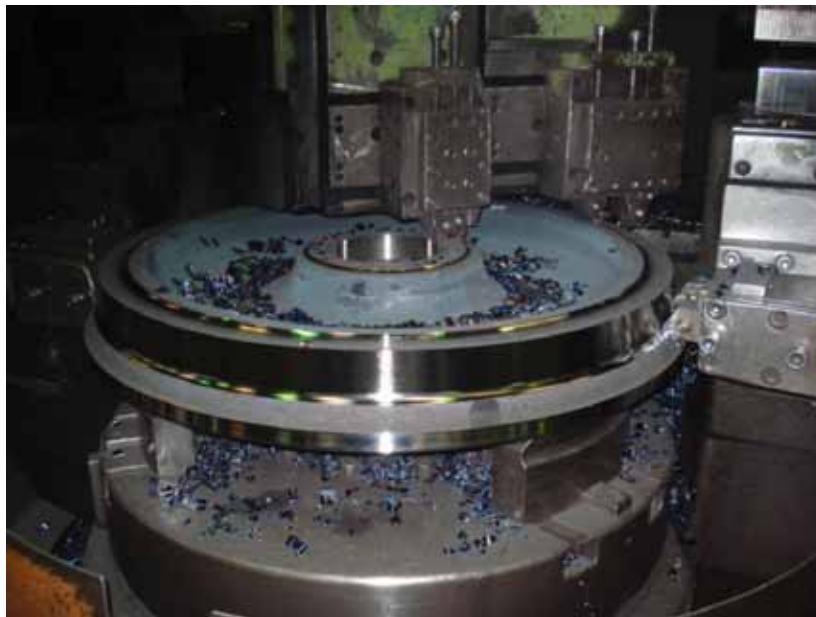


Figura 21 - Usinagem da roda. Foto cedida pela MWL Brasil.

3.3 Análise química

As análises químicas dos materiais foram realizadas na empresa MWL Brasil,

utilizando um espectrômetro de emissão óptica. Os resultados obtidos pelas análises químicas são apresentados nas tabelas 4 e 5, e comparados com a norma AAR M-107, sendo a presença dos elementos residuais (Cr, Ni, Mo, Al, Cu, V, Ti, B, Sn, Nb) na composição devido ao processo produtivo dos mesmos, ambos estão dentro da faixa especificada.

Tabela 4 - Composição química do aço SAE-1070 da roda fundida (porcentagem em peso).

Elemento	Encontrado	Especificado
C	0,719	0,67-0,77
Mn	0,731	0,60-0,90
Si	0,553	0,15-1,00
P	0,021	máximo 0,03
S	0,0122	0,005-0,040
Cr	0,043	máximo 0,25
Ni	0,012	máximo 0,25
Mo	0,004	máximo 0,10
Al	0,009	máximo 0,06
Cu	0,022	máximo 0,35
V	0,0032	máximo 0,04
Ti	0,0022	máximo 0,03
B	0,0002	-
Sn	0,002	-
Nb	0,0025	máximo 0,05

Tabela 5 - Composição química do aço SAE-1070 da roda forjada (porcentagem em peso).

Elemento	Encontrado	Especificado
C	0,712	0,67-0,77
Mn	0,806	0,60-0,90
Si	0,272	0,15-1,00
P	0,0165	máximo 0,03
S	0,0133	0,005-0,040
Cr	0,1786	máximo 0,25
Ni	0,055	máximo 0,25
Mo	0,0126	máximo 0,10
Al	0,0096	máximo 0,06
Cu	0,118	máximo 0,35
V	-	máximo 0,04
Ti	-	máximo 0,03
B	-	-
Sn	0,0058	-
Nb	0,0035	máximo 0,05

3.4 Tratamentos térmicos realizados

Ambas as rodas foram submetidas ao tratamento de têmpera, sendo totalmente austenitizadas a 880°C, durante o tempo necessário para a homogeneização da temperatura em todo o material e somente a pista de rolamento foi resfriada com água até a temperatura ambiente. Posteriormente à têmpera, as rodas passaram pelo processo de revenimento, a uma temperatura de 540°C para alívio de tensões e para uma redução da dureza.

3.5 Análise microestrutural

As amostras foram retiradas da região do aro das rodas e posteriormente embutidas à quente em baquelite. As amostras foram preparadas e as microestruturas dos materiais foram

analisadas no Laboratório de Metalografia e Análise de Imagens de Materiais (LAIMat) nas dependências do Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG-UNESP. As amostras submetidas aos exames de metalografia foram lixadas dentro do procedimento convencional, numa sequência de granulometria de 220, 320, 400, 600 e 1200. Foi realizado também o polimento fino em pasta de diamante com granulometria de 1 e 3 μm . Para a aquisição das imagens, foi utilizado o microscópio óptico da marca ZEISS. Para que fosse revelada a ferrita com uma cor branca e os produtos transformados com uma cor escura, as amostras retiradas foram atacadas com o reagente Nital 2 %.

3.6 Ensaio de dureza

Foram realizados ensaios de dureza nas rodas forjada e fundida. Foi medida a dureza Rockwell C, num equipamento da marca WILSON. A Figura 22 mostra o posicionamento da medição de dureza Brinell nas amostras das rodas forjada e fundida.

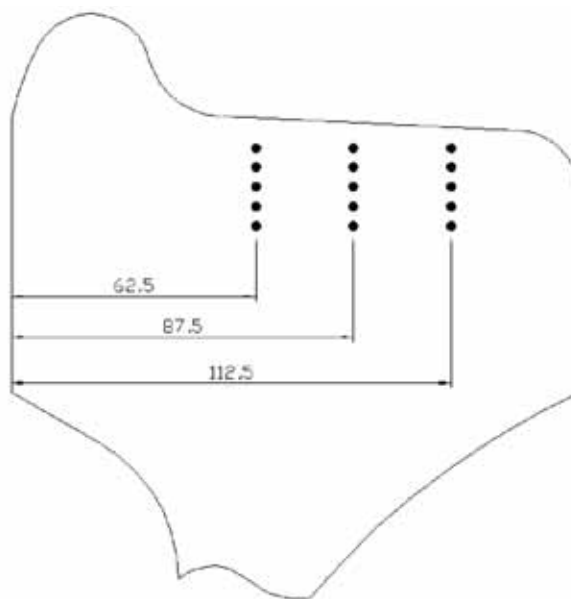


Figura 22 – Posicionamento da retirada de medidas de dureza Rockwell C.

3.7 Ensaio de tração

Os ensaios foram realizados em 5 corpos de prova retirados da região do aro de cada roda. Os mesmos foram conduzidos conforme requisitos da ASTM A370 (2003) e norma ferroviária EN 13262, retirados conforme a Figura 23.

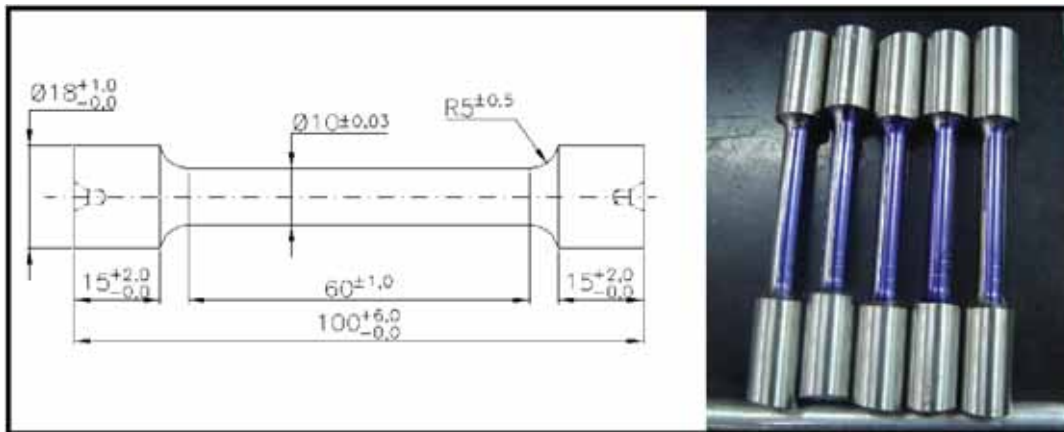


Figura 23 - Corpos de prova utilizados nos ensaios de tração (dimensões em milímetros).

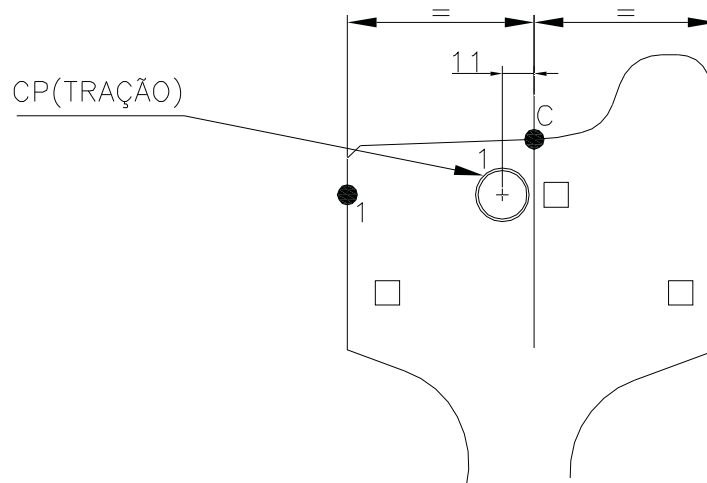


Figura 24 - Posição da retirada dos corpos de prova dos ensaios de tração (dimensões em milímetros).

Para os ensaios foi utilizada uma máquina de tração da marca LOSENHAUSEN,

conforme a Figura 25, com capacidade para 40 toneladas, através da qual foram determinados os parâmetros de limite de escoamento (σ_e), limite de resistência a tração (σ_T), alongamento total (A) e redução de área (RA). Os ensaios foram realizados em temperatura ambiente, e o alongamento e a redução de área foram medidos conforme a norma ASTM A370 (2003). As marcas feitas ao longo da parte central do corpo de prova (“gage marks”) auxiliaram a medição do alongamento. Através da medição da distância entre estas marcas antes do ensaio e unindo-se as partes separadas após o rompimento foi determinado o alongamento. A redução de área foi determinada pela medição do diâmetro do corpo de prova antes do ensaio e após seu rompimento, também através da união das partes.



Figura 25 – Máquina de Tração na qual foram feitos os ensaios.

3.8 Ensaio de fadiga

A fim de levantar as curvas em fadiga dos materiais propostos, foram realizados ensaios uniaxiais de tração, na razão de carregamento $R = 0,1$. Os corpos de prova foram retirados conforme a Figura 26 e suas dimensões são conforme norma ASTM E-466. Foram retirados 20 espécimes de material de cada roda. Os corpos de prova foram ensaiados em 5 diferentes níveis de tensão, o que determina um nível de repetitividade de 75% caracterizando dados mais confiáveis conforme norma ASTM E-739. Os corpos de prova seguem as dimensões ilustradas na Figura 27.

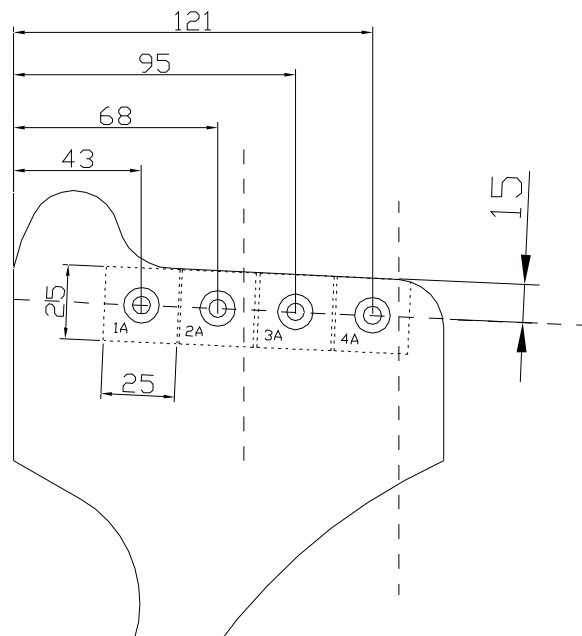


Figura 26 - Posição de retirada dos corpos de prova para ensaios de fadiga.

4 RESULTADOS

4.1 Aspectos da microestrutura

Os aspectos microestruturais do material são mostrados através das Figuras 28 a 31, o que facilitará o desenvolvimento dos resultados deste trabalho. As Figuras 28 e 29 mostram a microestrutura do aço SAE-1070 utilizado na roda forjada, da qual o material foi submetido aos processos descritos de têmpera e revenimento e atacado com Nital 2%.

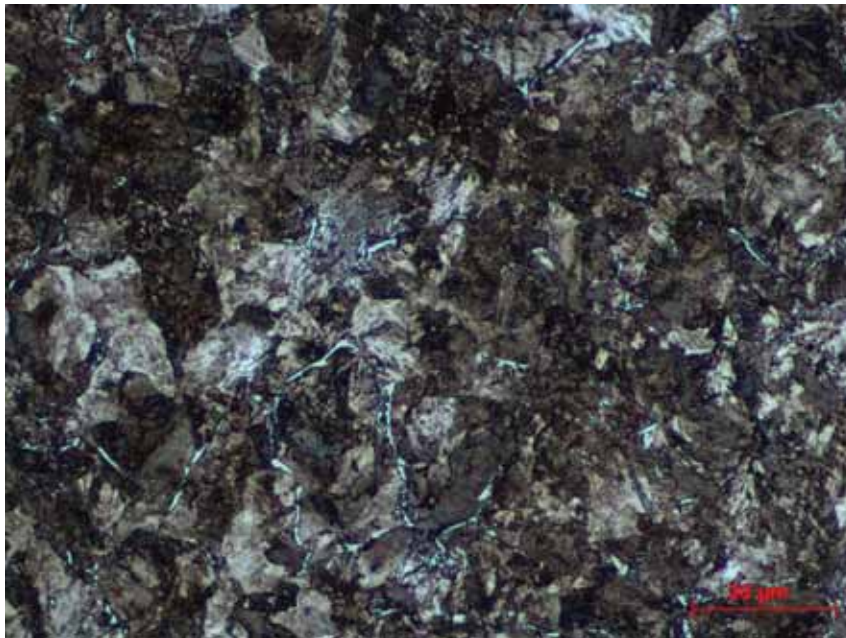


Figura 28 - Aspectos microestruturais do aço SAE-1070 da roda forjada, com ataque de Nital 2% e Microscopia óptica de 500x.

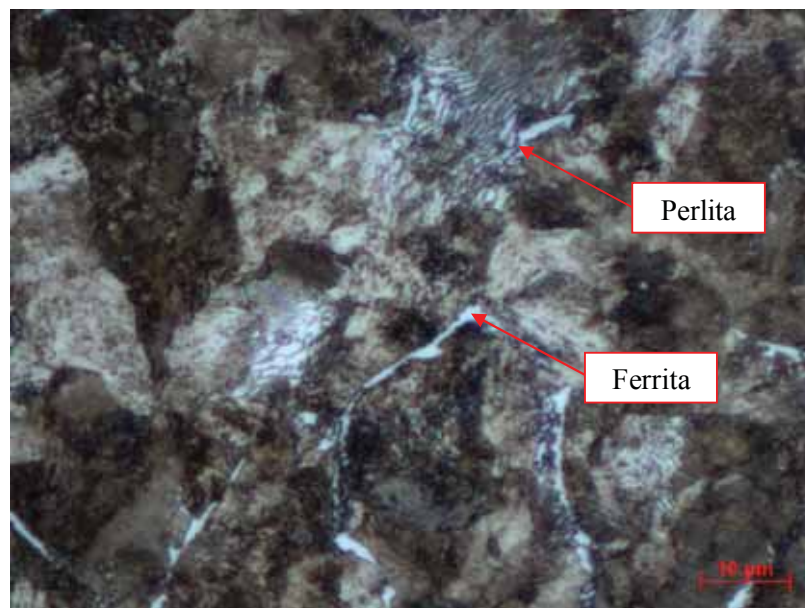


Figura 29 - Aspectos microestruturais do aço SAE-1070 da roda forjada, com ataque de Nital 2% e Microscopia óptica de 1000x.

As Figuras 30 e 31 mostram a microestrutura do aço SAE-1070 utilizado na roda fundida, da qual o material também foi submetido aos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento e posteriormente atacado com Nital 2%.

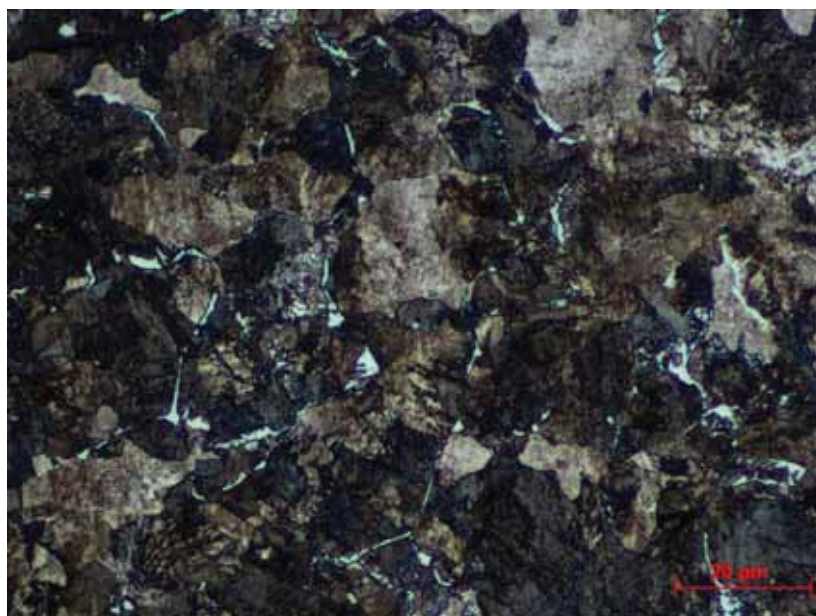


Figura 30 - Aspectos microestruturais do aço SAE-1070 da roda fundida, com ataque de Nital 2% e Microscopia óptica de 500x.

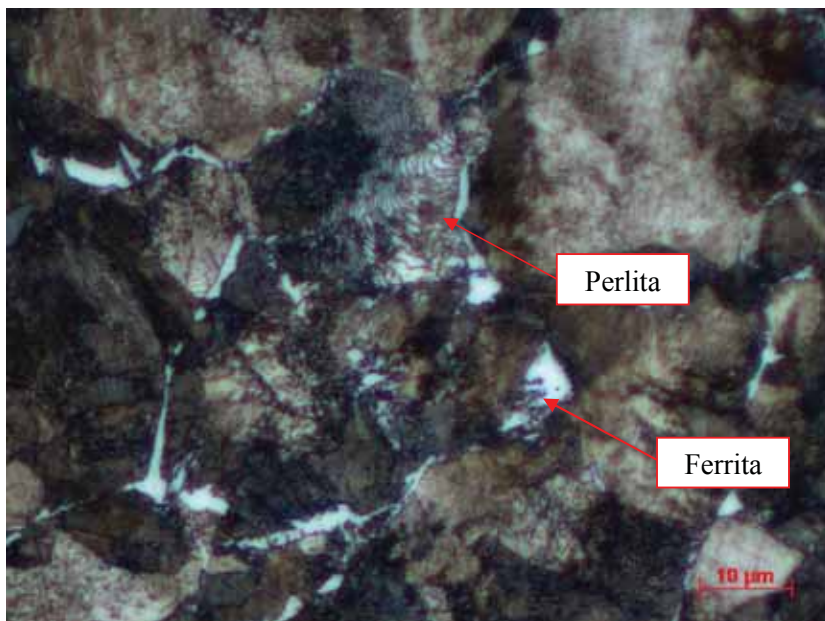


Figura 31 - Aspectos microestruturais do aço SAE-1070 da roda fundida, com ataque de Nital 2% e Microscopia óptica de 1000x.

Em ambas as situações observa-se uma microestrutura composta por ferrita e perlita. Ressalta-se que ambos os materiais foram temperados a uma temperatura de 880°C, resfriados com água, e revenidos a uma temperatura de 540°C. Uma possível discussão sobre este resultado se encontra no caso de ter-se obtido uma estrutura perlítica, o que é desejado, e não martensítica. As normas ferroviárias proíbem a existência de uma estrutura martensítica nas rodas, por isso os tratamentos térmicos de têmpera efetuados neste componente tiveram como finalidade a obtenção de uma estrutura perlítica. O revenimento aplicado tem a finalidade controlar a relação entre tenacidade e dureza após a têmpera, aliviando as tensões residuais geradas durante o primeiro tratamento térmico.

4.2 Resultados dos ensaios de dureza

Os ensaios de dureza realizados obtiveram os seguintes resultados:

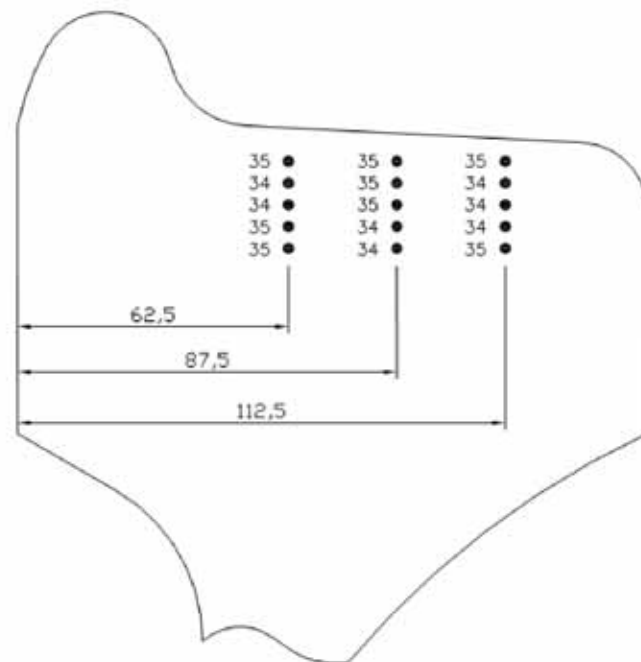


Figura 32 – Resultados de dureza Rockwell C na amostra retirada da roda fundida.

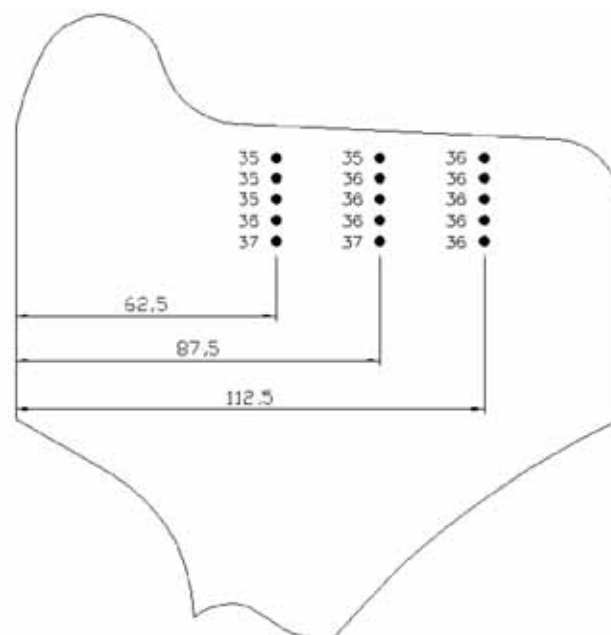


Figura 33 - Resultados de dureza Rockwell C na amostra retirada da roda forjada.

Pontualmente, as medidas de dureza na roda forjada resultaram em valores maiores

para todos os pontos de obtenção de medida. Mesmo sendo uma pequena diferença, a roda forjada apresenta maior dureza Rockwell C do que a roda fundida, ao contrário do que foi afirmado por Tarafder, Sivasprasad e Ranganath (2007), os quais concluíram que o material fundido mostra propriedades superiores de resistência.

4.3 Resultados dos ensaios de tração

Os ensaios foram conduzidos nos corpos de prova retirados das duas rodas conforme mostrado na seção 3.7. São mostrados na tabela 6 os valores de tensão média de escoamento, resistência média à tração, alongamento médio e redução média de área, sendo as médias obtidas dos resultados nos 5 corpos de prova de cada roda.

Tabela 6 - Resultados dos ensaios de tração nas rodas forjada e fundida.

	Tensão de Escoamento (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento (%)	Redução de Área (%)
Forjada	746,0 ± 10,5	1150,7 ± 3,9	12,9 ± 0,6	31,2 ± 1,7
Fundida	701,8 ± 16,8	1124,6 ± 15,0	13,5 ± 0,3	26,7 ± 2,2

Analisando os resultados, pode-se notar que a roda forjada atinge o escoamento em uma tensão estática aproximadamente 6% maior que a roda fundida e que a resistência à tração da roda forjada é maior que a da roda fundida, mais uma vez, ao contrário do que foi afirmado por Tarafder, Sivasprasad e Ranganath (2007), que concluíram que o material fundido mostra propriedades superiores de resistência. O menor alongamento e a maior redução de área dos aços podem ser explicados pelo fenômeno do empescoçamento do corpo de prova. No material da roda fundida, a redução de área foi menor e o alongamento foi uniforme ao longo do corpo de prova, já na roda forjada ocorreu o empescoçamento, que é uma deformação localizada do corpo de prova, sendo o alongamento menor e a redução percentual de área mais intensa, comparando os corpos de prova retirados das duas rodas.

4.4 Resultados dos ensaios de fadiga

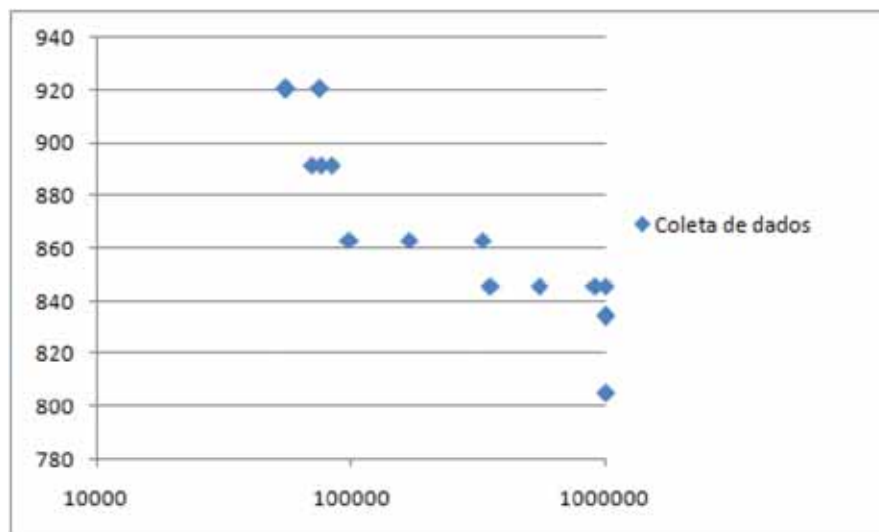
Os ensaios de fadiga foram efetuados para ambas as rodas, e seus valores foram plotados em curvas σ -N, conforme definido na seção 3.10. Nas Tabelas 7 e 8 são apresentados os valores de tensão e o número de ciclos obtidos para todos os corpos de prova ensaiados. A nomenclatura dos corpos de prova foi dada em função do posicionamento dos mesmos. Os resultados plotados no plano σ -N estão representadas nas Figuras 34 e 35.

Tabela 7 – Resultados dos ensaios de fadiga para o aço SAE-1070 da roda forjada.

Corpos de prova	Tensão (MPa)	Ciclos
1E	920,6	55327
1F	920,6	54748
2C	920,6	75744
2H	891,8	76544
3H	891,8	70199
3A	891,8	83860
2F	863,0	168720
3F	863,0	329143
3B	863,0	98645
3D	845,8	915709
2A	845,8	553954
3G	845,8	1000000
2G	845,8	355863
4D	834,3	1000000
4G	834,3	1000000
2D	834,3	1000000
3E	805,5	1000000
4B	805,5	1000000
2B	805,5	1000000

Tabela 8 – Resultados dos ensaios de fadiga para o aço SAE-1070 da roda fundida.

Corpos de prova	Tensão (MPa)	Ciclos
2F	892,0	17854
2E	892,0	30295
1G	892,0	25236
3H	834,3	52850
2H	834,3	27375
4G	834,3	60553
3A	746,0	101248
2G	746,0	61860
1D	746,0	76183
3F	696,0	511407
4B	696,0	1000000
4E	696,0	222330
4F	696,0	852952
3E	646,0	1000000
4D	646,0	1000000
4C	646,0	1000000

Figura 34 – Coleta de dados $\log \sigma \times \log N$ dos ensaios de fadiga da roda forjada.

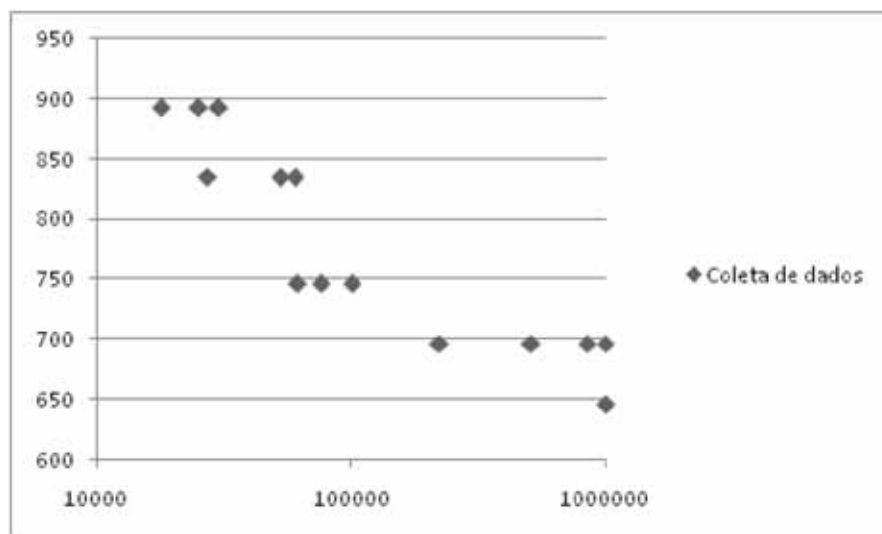


Figura 35 – Coleta de dados log σ x log N dos ensaios de fadiga da roda fundida.

Para uma melhor análise e comparação, estes mesmos pontos foram tratados estatisticamente, conforme a norma ASTM E739-10. As curvas corrigidas obtidas com seus respectivos intervalos de confiança estão representadas nas Figuras 36 e 37.

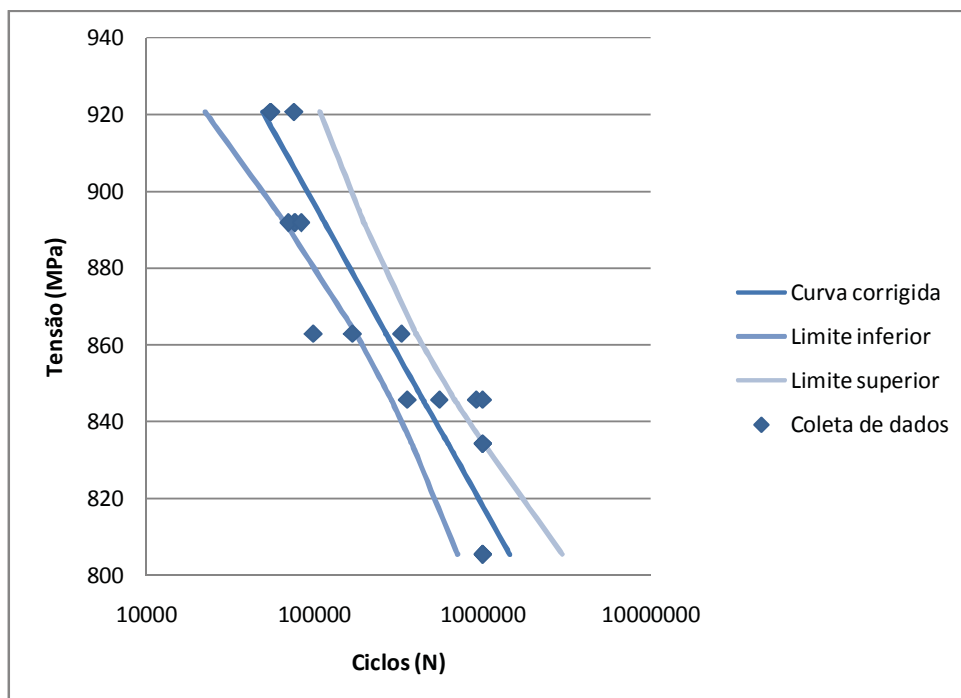


Figura 36 – Curva σ -N corrigida com intervalo de confiança de 95% obtida com os dados do ensaio de fadiga dos corpos de prova da roda forjada.

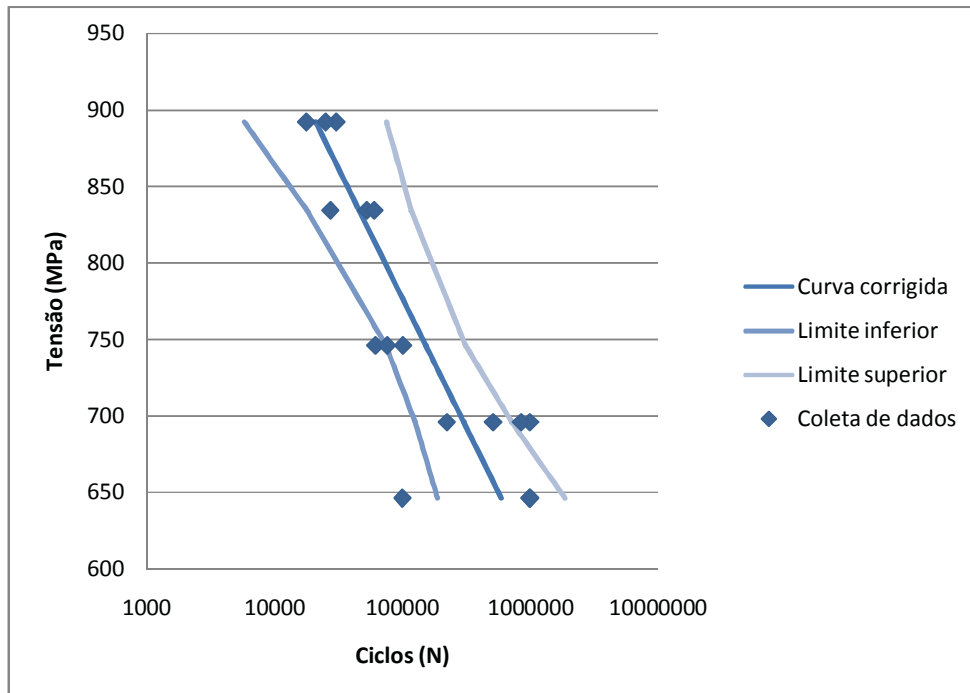


Figura 37 – Curva σ -N corrigida com intervalo de confiança de 95% obtida com os dados do ensaio de fadiga dos corpos de prova da roda fundida.

Na Figura 38 os dois resultados são colocados em um mesmo gráfico. Comparando as duas curvas é possível notar que a resistência à fadiga da roda fundida diminui muito mais com o aumento dos ciclos. Como foi concluído por Pessard, Morel, Bellet e Morel (2012), materiais laminados ou forjados possuem boa resistência à fadiga pelo fato do material ser mais compacto e ter uma estrutura mais fina devido ao processo de fabricação.

O material fundido normalmente apresenta diversos defeitos que originam falhas em fadiga devido ao processo de fabricação, tais como porosidades, cavidades de microrrechupes e crateras, ou seja, para a utilização deste tipo de material em componentes que devem ter um alto grau de confiabilidade e segurança, o limite de fadiga destes materiais deve ser controlado principalmente pela presença destes defeitos ou impurezas, deve-se lembrar que defeitos próximos à superfície são mais perigosos no que diz respeito ao limite de fadiga do que defeitos internos, porém, como Pook, Greenan, Found e Jackson (1981) verificaram, em tração, defeitos tais como rechupes nas linhas de centro têm um sério efeito sobre a resistência à fadiga em materiais fundidos.

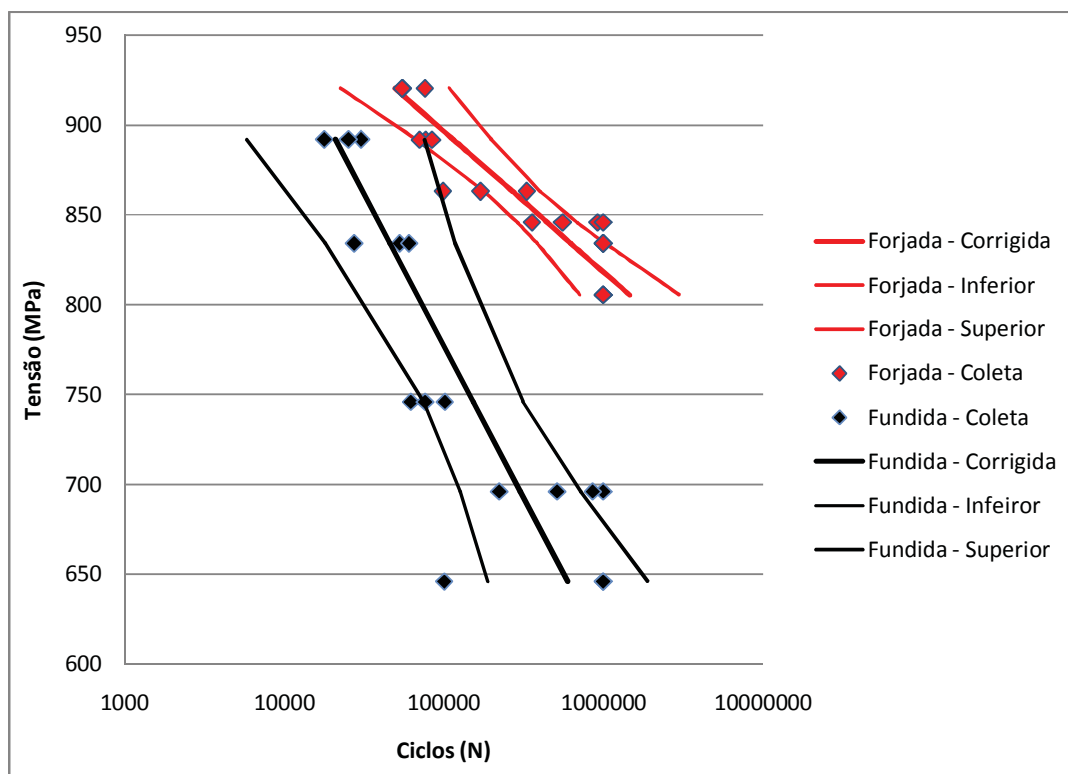


Figura 38 – Comparação dos resultados em fadiga das rodas forjada e fundida trabalhados estatisticamente.

Além de menor resistência à fadiga da roda fundida, este ensaio mostra também que a dispersão dos resultados dos corpos de prova da roda fundida é maior do que a dispersão dos corpos de prova da roda forjada, o que fornece à roda forjada uma maior confiabilidade e maior certeza dos resultados e conseqüentemente uma maior segurança com relação à utilização das mesmas. Melhores conclusões e afirmações mais concretas podem ser obtidas a partir da análise fractográfica dos corpos de prova que foram sujeitos ao ensaio de fadiga.

4.5 Resultados da análise fractográfica

Os corpos de prova sujeitos ao ensaio de fadiga foram analisados conforme mostrado na seção 3.11. Desta análise, a partir das imagens, pôde-se entender a origem das fraturas como já foi previsto neste trabalho.

Seguindo as marcas de praia ou linhas de divisa, podemos encontrar a origem das trincas iniciais, pois estas marcas apontam para o início da fratura. Da Figura 39 a 43 estão representas as análises fractográficas das superfícies dos corpos de prova da roda forjada.

Em todas as imagens as trincas tiveram origem na superfície livre do material em função do processo de formação de bandas de deslizamento, as quais funcionam como concentradores de tensão.

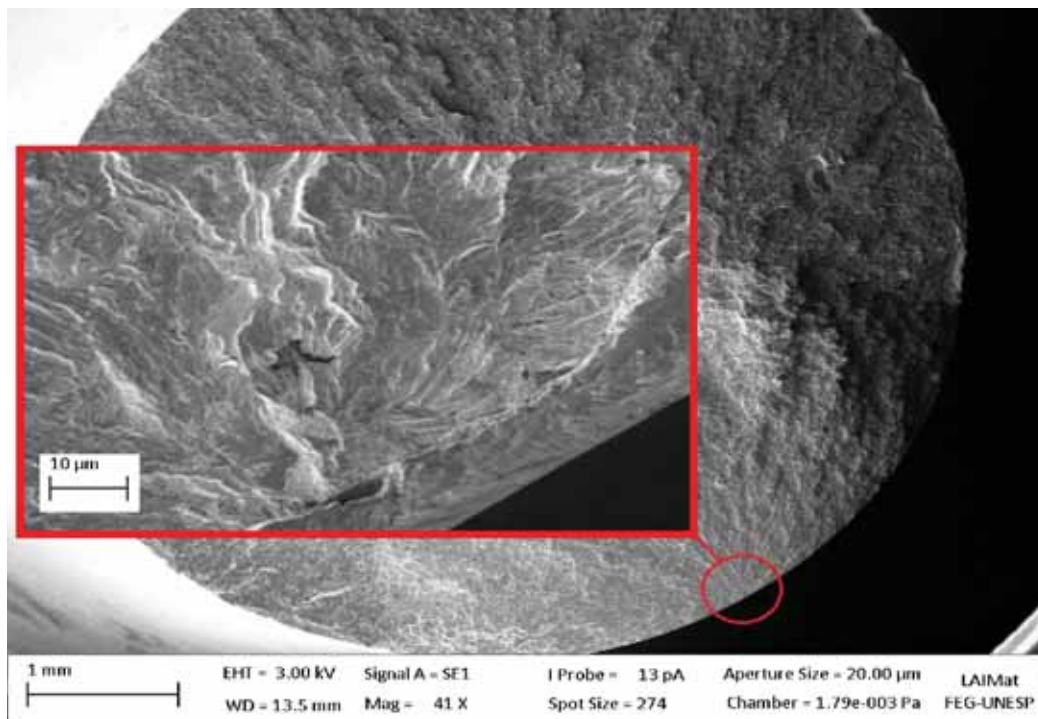


Figura 39 – Início da fratura da amostra 1F da roda forjada.

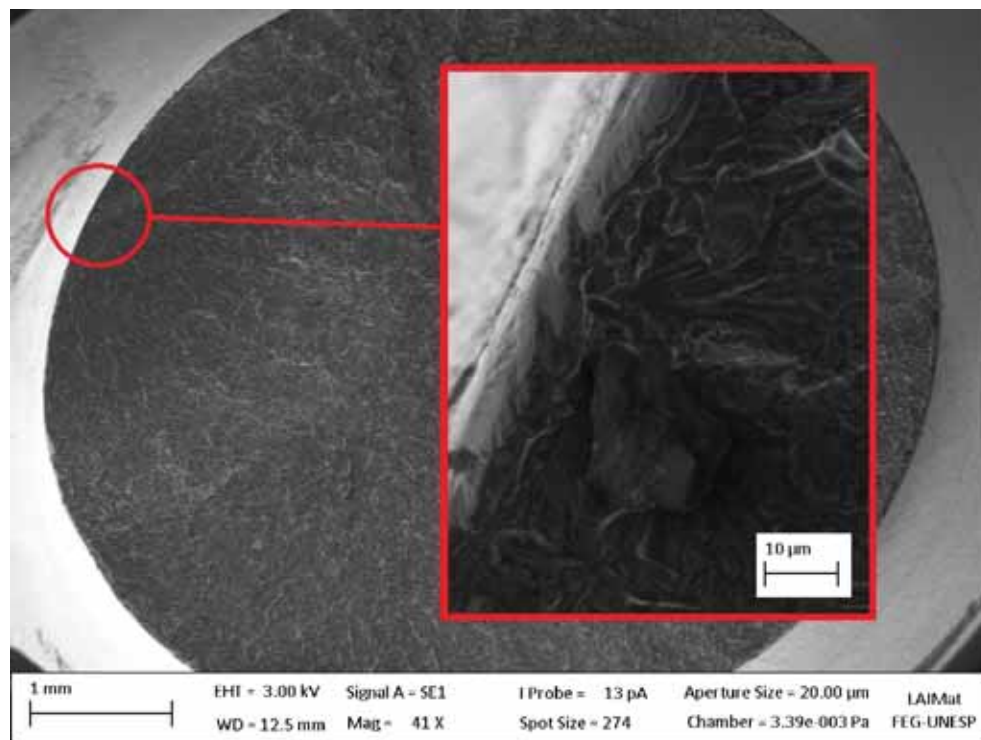


Figura 40 – Início da fratura da amostra 2F da roda forjada.

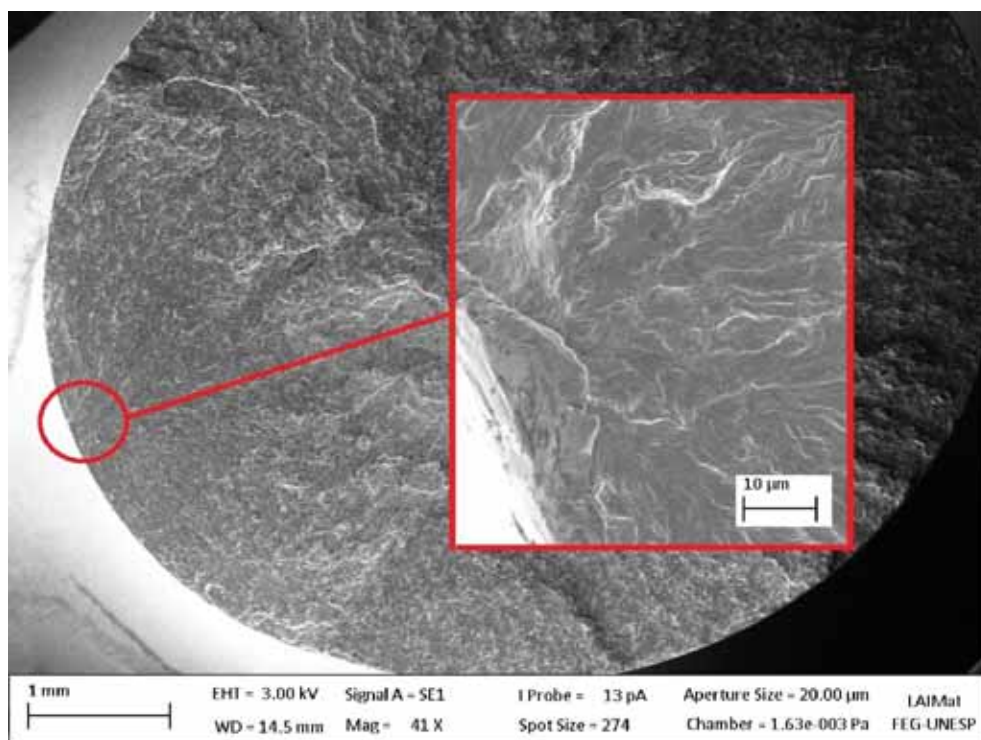


Figura 41 – Início da fratura da amostra 2G da roda forjada.

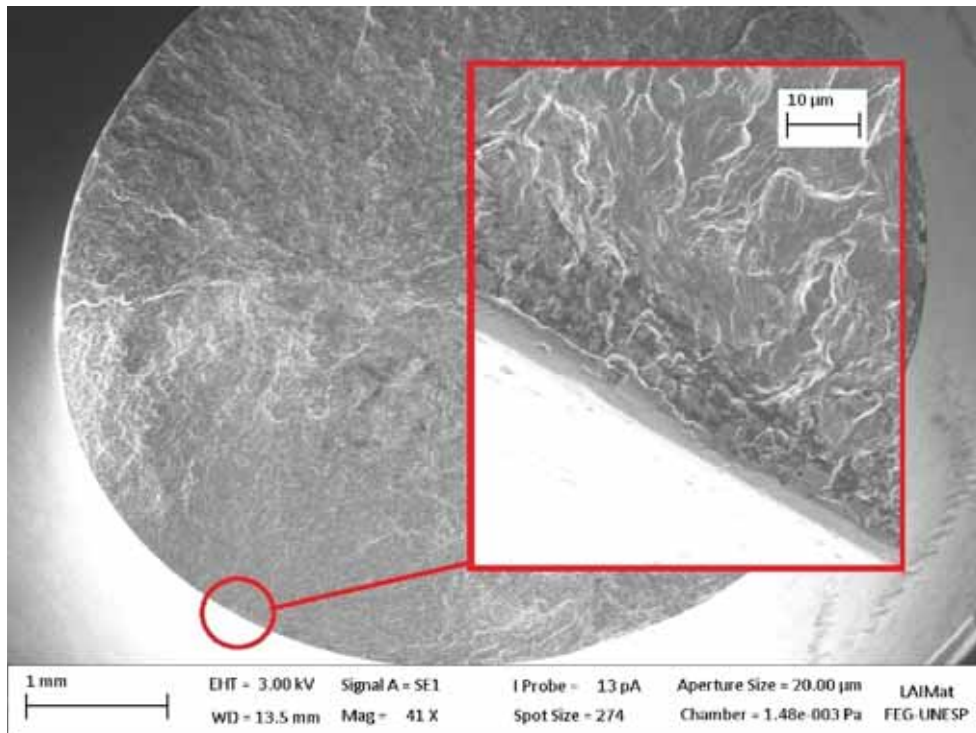


Figura 42 – Início da fratura da amostra 2H da roda forjada.

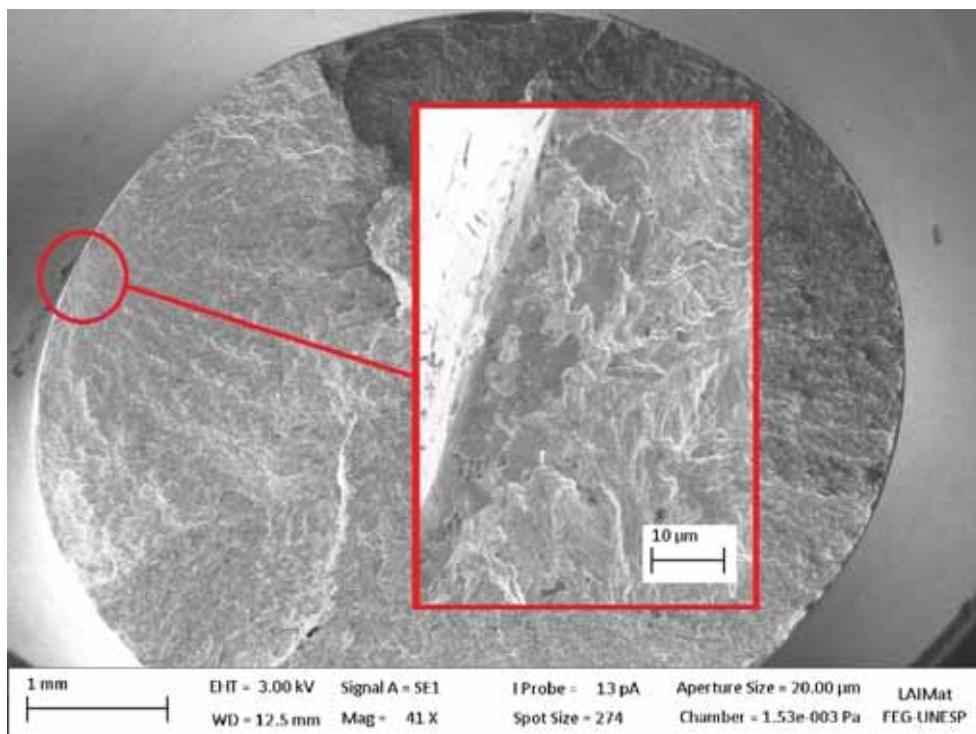


Figura 43 – Início da fratura da amostra 3B da roda forjada.

Da Figura 44 até a Figura 48 são mostradas as análises fractográficas das superfícies dos corpos de prova da roda fundida. Assim como citado para a roda forjada, a falha por fadiga nos casos abaixo foi iniciada pela elevada concentração de tensões presente nos defeitos citados em cada corpo de prova.

A Figura 44 mostra claramente o defeito próximo à superfície do corpo de prova, o qual originou a fratura. As irregularidades na superfície revelam defeitos tais como rugosidade e porosidade. Pode-se notar a presença de pontos escuros que são resíduos da resina depositada na superfície que provavelmente não saíram com o banho. O mesmo defeito mostrado na Figura 44 pode ser notado também na Figura 48, onde as marcas de praia apontam para um defeito de porosidade próximo à superfície. Schilke, Ahlström e Karlsson (2010) concluem em seu trabalho com relação aos efeitos prejudiciais da porosidade em aços fundidos.

A Figura 45 mostra os diversos pontos de origem de trinca na peça. À direita, nota-se um rechupe externo, similar a uma trinca e também impurezas próximas à superfície. À esquerda é possível ver crateras. Os dois defeitos são responsáveis pelo início da fratura e ambos são originados pelo processo de fundição do material. Nesta figura é possível visualizar algumas crateras que não foram responsáveis pelo início da trinca, isso se pode explicar pelo já conhecido fato de que defeitos menores que o tamanho limiar não afetam a resistência à fadiga do material.

Na Figura 46 é visível um grande vazio e as marcas de praia apontam para o mesmo, mostrando que a trinca originou-se nele, trazendo àquilo que Pook, Greenan, Found e Jackson (1981) concluíram, afirmando que defeitos brutos de rechupe próximos a linha de centro salientam a diminuição da resistência à fadiga em materiais fundidos sujeitos à tração.

Na Figura 47, similarmente à Figura 46 seguindo as marcas de praia nota-se que a trinca originou-se devido à presença de cavidades. É possível ver também a presença de impurezas, o que diminuiu ainda mais a resistência à fadiga. Ressalta-se que este defeito, diferentemente do defeito da Figura 46 encontra-se próximo a superfície, o que contribuiu para uma grande diminuição da resistência à fadiga.

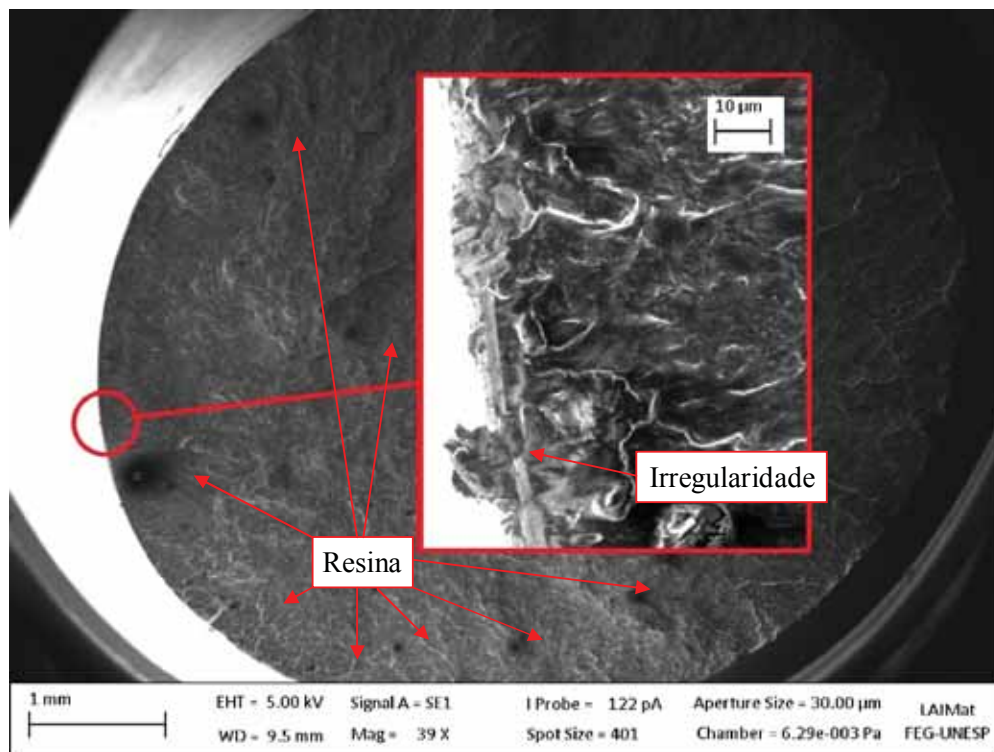


Figura 44 – Início da fratura da amostra 2F da roda fundida.

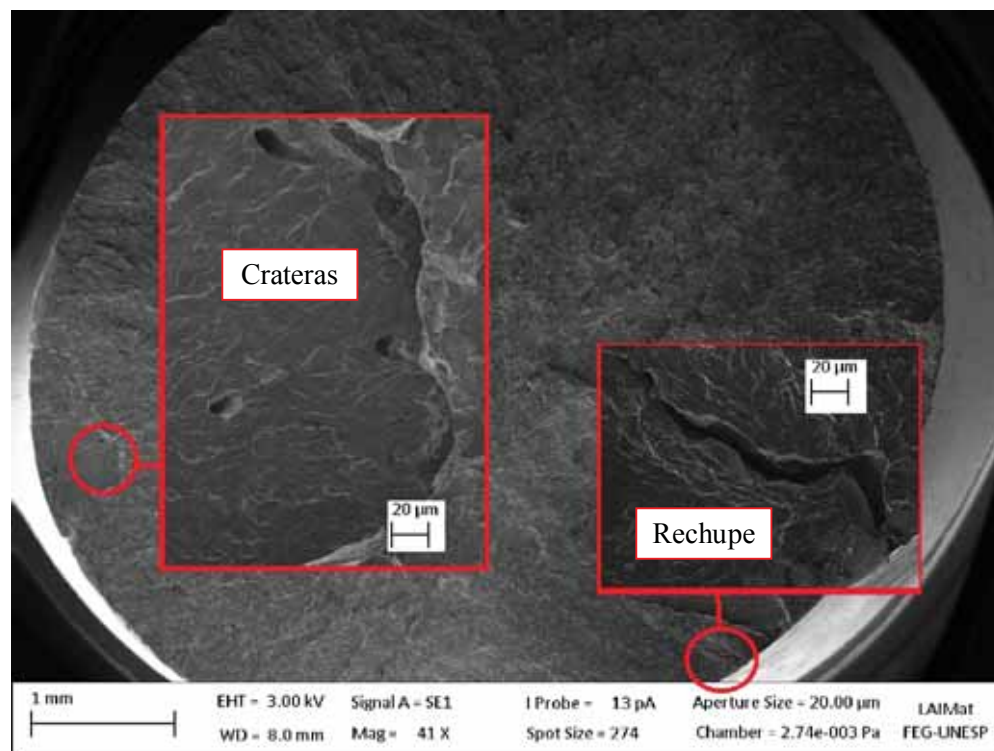


Figura 45 – Início da fratura da amostra 2G da roda fundida.

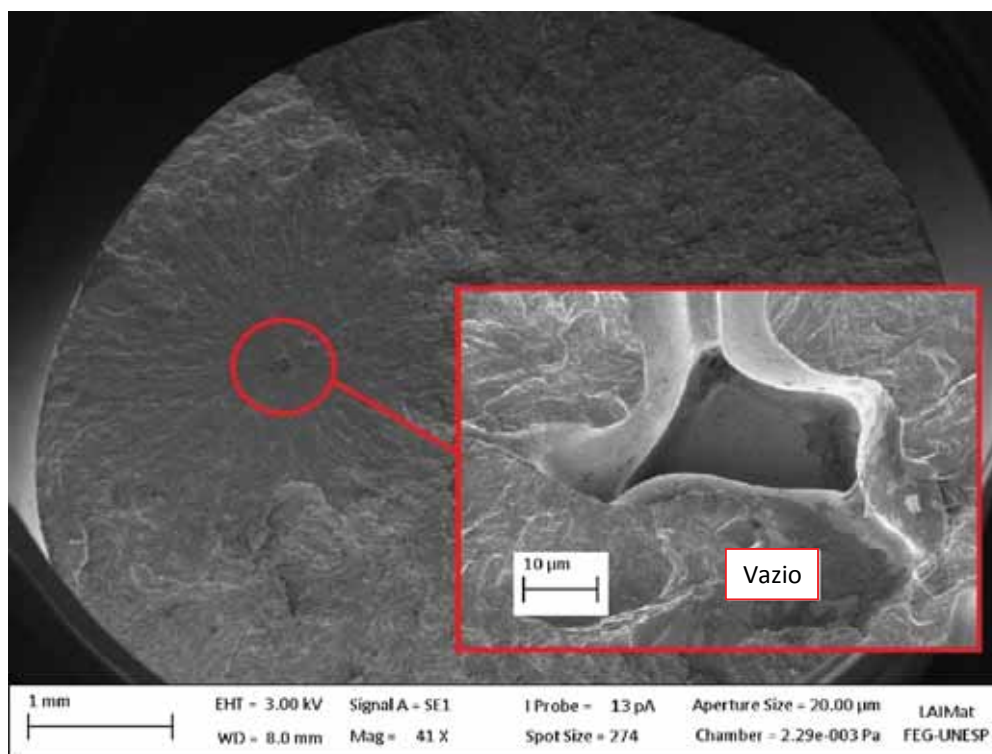


Figura 46 – Início da fratura da amostra 3F da roda fundida.

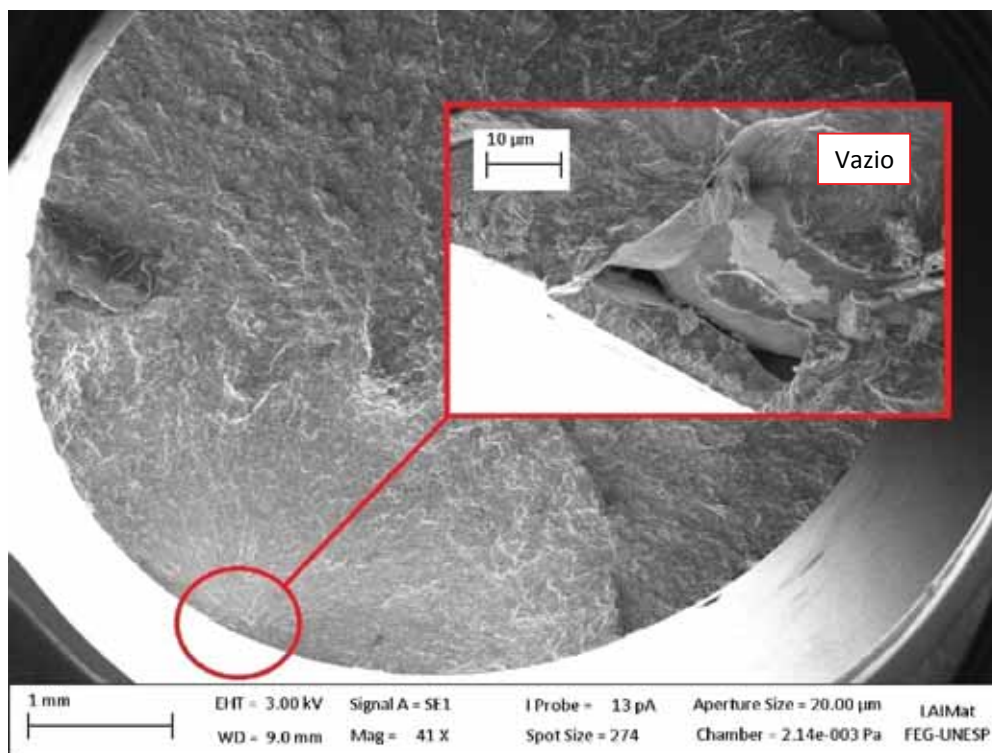


Figura 47 – Início da fratura da amostra 3H da roda fundida.

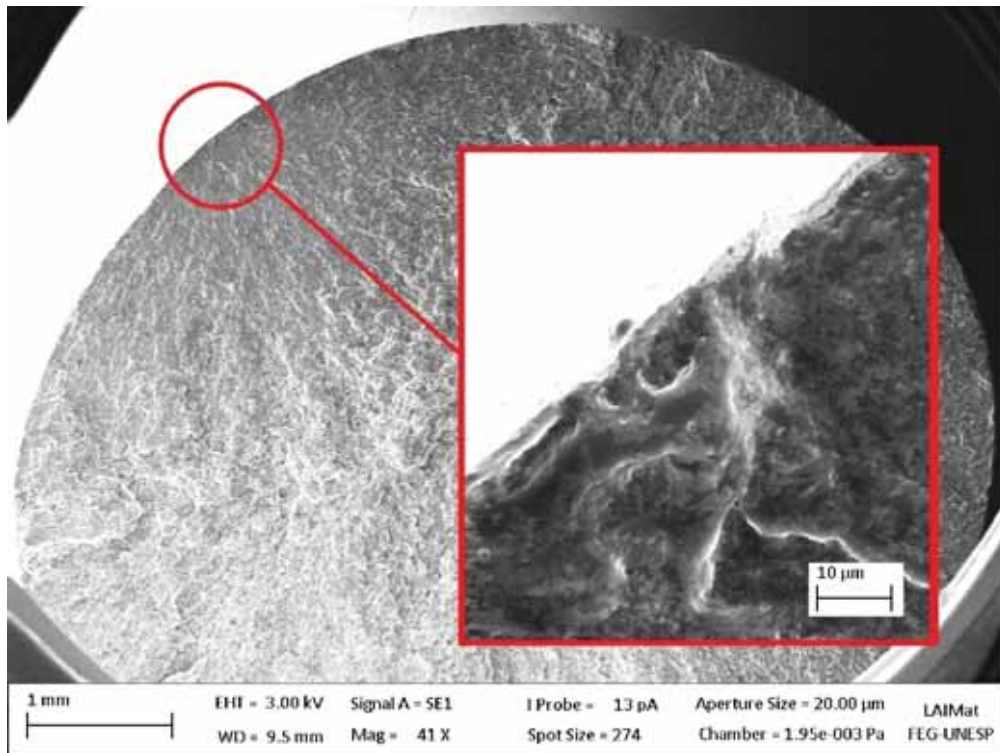


Figura 48– Início da fratura da amostra 4E da roda fundida.

Com o resultado destas análises, é possível compreender a afirmação de Liu et al. (2006), com relação a falhas correspondentes à quebra da região do aro da roda, que pode destruir a integridade da mesma, sendo muito perigosa. A compreensão desta afirmação se deve ao fato de que a destruição do aro é o resultado de grandes trincas de fadiga que se propagam bruscamente paralelas à superfície da roda. Liu et al. (2006) atribui estas trincas aos vazios e inclusões em um tamanho suficiente em um campo de tensão, que conduzem à falha de rodas.

Os resultados também confirmam o que foi afirmado na revisão bibliográfica citando Saberifar, Mashreghi, Mosalaeepur e Ghasemi (2011), quando os mesmos concluem que trincas de fadiga tendem a iniciar e se propagar a partir de inclusões não metálicas quando elas são grandes o suficiente para gerar maior intensidade de tensão do que a rugosidade superficial. Foi também comprovado que em superfícies rugosas, a intensidade total de tensão gerada por inclusões não metálicas e rugosidade superficial leva a uma diminuição de resistência à fadiga.

Em todas as imagens obtidas pelo MEV é possível analisar as características de falha por fadiga do estágio I, que são as microtrincas, e estágio II, que são as macrotrincas, e as superfícies de fratura com platôs paralelos, separados por sulcos também paralelos.

Para ambos os casos (roda forjada e fundida) vale ressaltar que para superfícies sujeitas à fricção, a origem de trincas tende a ser abaixo da superfície, porém o ensaio de fadiga foi feito considerando apenas a tração, desconsiderando qualquer efeito de fricção.

Analizando paralelamente os resultados dos ensaios de fadiga e da análise fractográfica, pode-se compreender que falhas como cavidades de microrrechupes internos e externos, crateras e porosidade, provenientes de um processo de fundição são mais prejudiciais que os defeitos de vazio e inclusões não-metálicas provenientes de um processo de forjamento, levando-se em conta a comparação da vida em fadiga mostrada na Figura 4.21, na qual é possível notar que o material forjado apresenta maior resistência à fadiga do que o material fundido, além de uma maior confiabilidade.

5 CONCLUSÃO

Como trabalho de graduação, este estudo abrangeu diversas áreas de grande importância em um curso de Engenharia Mecânica. Nas pesquisas, ensaios e análises estatísticas elaboradas no trabalho, evidenciou-se a necessidade de um embasamento teórico forte fornecido pelo curso e também a proximidade da universidade com o desenvolvimento e a melhoria contínua de tecnologias visando o bem-estar e a segurança da sociedade, o que visivelmente é um desafio no dia-a-dia de um engenheiro em seu ambiente de trabalho, seja este uma instituição com fins lucrativos ou um ambiente acadêmico. As conclusões obtidas estão descritas a seguir.

A composição química de ambos os materiais está dentro do previsto pela norma. Os aspectos microestruturais de ambas são similares porque ambas são fabricadas de aço SAE-1070, sujeitas aos mesmos tratamentos de têmpera e revenimento.

Nos ensaios de dureza e tração o material fundido mostra propriedades inferiores de resistência. Nos pontos dos quais foram retiradas as medidas de Dureza Rockwell C, em todos eles o valor de dureza foi maior, mesmo que pouco, nas rodas forjadas. Nos ensaios de tração, o resultado obtido mostrou que a roda forjada apresenta maior Tensão de Escoamento e Maior Resistência à Tração. Em ambos, nota-se uma diferença muito pequena de resultados quando comparados os processos de fabricação.

Através do ensaio de fadiga com o auxílio do estudo estatístico foi possível verificar uma maior resistência à fadiga da roda forjada, além de que a dispersão dos resultados da roda forjada é muito menor, o que gera maior confiabilidade à mesma.

Paralelamente ao ensaio de fadiga, a análise fractográfica leva a conclusão de que as fraturas no material fundido são originadas normalmente em defeitos como cavidades de microrrechupes internos e externos, crateras e porosidade provenientes de um processo de fundição, o que gera concentração de tensões que desencadeiam o processo de trinca e sua propagação, enquanto nos materiais forjados as trincas se iniciam na superfície livre do material, pelas formações de bandas de deslizamento.

Com estas conclusões e como já havia sido afirmado no presente trabalho, materiais forjados possuem boa resistência mecânica e à fadiga pelo motivo de serem mais compactos e terem uma microestrutura mais fina, devido ao processo de fabricação.

Conclui-se finalmente que, para rodas ferroviárias de aços SAE-1070, sujeitas aos mesmos processos de têmpera e revenimento, o processo de fabricação por forjamento proporciona propriedades mecânicas superiores e mais resistentes garantindo uma maior vida para a roda. Desta forma, é possível garantir maior segurança no transporte ferroviário, menor retenção de vagões para manutenção corretiva e menor custo operacional.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROAD. **AAR M-107**: Railway Wheels – Manual of Standards and Recommended Practices - Section G. Washington, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A-370**: Standard Test Methods and Definition for Mechanical Testing of Steel Products. Philadelphia, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E-1112**: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. Philadelphia, 1996 (Reapproved 2004).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E-1820**: Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. Philadelphia, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E-23**: Standard Test Method for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, Philadelphia, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E-399**: Standard Test Methods for Plane-strain Fracture Toughness of Metallic Materials. Philadelphia, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **ASTM E-466**: Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials. Pennsylvania, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **ASTM E-739**: Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data. Philadelphia, ASTM, 2000.

BRINA, H.L. **Estradas de ferro : tração, frenagem, material rodante, circulação de trens**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 1988. 216p.

CALLISTER, W.D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 589p.

CANTINI, S.; et al. “Safe Life” Inspection intervals of railways axles: a comparison of crack growth properties of different steel grades. In: **Proceedings 14th International Wheelset Congress**, Orlando, 2004.

EKBERG, A.; KABO, E. Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading—an overview. **Wear**, v. 258, p. 1288–1300, fev. 2005.

EUROPEAN STANDARD **EN 13262**: Railway Applications – Wheelsets and Bogies – Wheels – Product Requirement. Brussels, 2004.

GUIMIARÃES, V.A. **Influência da taxa de resfriamento nas propriedades mecânicas e no micromecanismo de fratura de um aço microligado com nióbio e titânio**. 1997. 156 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

HASHIMOTO, K. et al. Effect of inclusion/matrix interface cavities on internal-fracture-type rolling contact fatigue life. **Materials and Design**, v. 32, p. 4980–498, jul. 2011.

HIBBELER, R.C. **Resistência de Materiais**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2004. 688p.

HODDINOTT, D.S. Railway axle failure investigations and fatigue crack growth monitoring of an axle. **Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, v. 218, n.4, p.283-292, 2004.

KABO, E.; EKBERG, A. Fatigue initiation in railway wheels—a numerical study of the influence of defects. **Wear**, v. 253, p. 26–34, nov. 2002.

LIU, Y. STRANDMAN, B. MAHADEVAN, S. Fatigue crack initiation life prediction of railroad wheels, **International Journal of Fatigue**, v. 28, p. 747–756, ago. 2006.

MEGSON, T.H.G. **Aircraft structures for engineering students**. 3rd. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann Ltd, 1999. 608p.

MEURLING, F. et al. Influence of carbide and inclusion contents on the fatigue properties of high speed steels and tool steels. **International Journal of Fatigue**, v. 23, p. 215–224, jan. 2001.

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

MINICUCCI, D.J. Contato roda-trilho: Rodeiros. In: BRANCO, J. C.; FERREIRA, R. **Tratado de Estradas de Ferro**. Rio de Janeiro: Reflexus Estúdio de Produção Gráfica, 2000. 438p.

MURAKAMI, Y. **Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions**. Oxford: Elsevier Science ltd, 2002. 369p.

PESSARD, E. et al. Microstructural heterogeneities and fatigue anisotropy of forged steels. **Materials Science and Engineering A**, v. 529, p. 289–299, set. 2011.

PESSARD, E. et al. A new approach to model the fatigue anisotropy due to non-metallic inclusions in forged steels. **International Journal of Fatigue**, v. 41, p. 168–178, jan. 2012.

POOK, L. P. et al. Tests to determine the fatigue strength of steel castings containing shrinkage. **International Journal of Fatigue**, v. 3, p. 149-156, jul. 1981.

ROIKO, A. HÄNNINEN, H. VUORIKARI, H. Anisotropic distribution of non-metallic inclusions in a forged steel roll and its influence on fatigue limit. **International Journal of Fatigue**, v. 41, 158–167, jan. 2012.

ROZA, L.C. Teoria da tração e da frenagem, In: BRANCO, J. C.; FERREIRA, R. **Tratado de Estradas de Ferro**. Rio de Janeiro: Reflexus Estúdio de Produção Gráfica, 2000. 438p.

SABERIFAR, S. et al. The interaction between non-metallic inclusions and surface roughness in fatigue failure and their influence on fatigue strength. **Materials and Design**, v. 35, p. 720–724, mar. 2012.

SEO, J.W. et al. Effects of residual stress and shape of web plate on the fatigue life of railway wheels. **Engineering Failure analysis**, v.16, p. 2493–2507, jun. 2009.

SETTI, J. B. História do trem. BRANCO, J. C.; FERREIRA, R. **Tratado de Estradas de Ferro**. Rio de Janeiro: Reflexus Estúdio de Produção Gráfica, 2000. 438p.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos Materiais**, 6. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2008. 576p.

SHIGLEY J. E. MISCHKE, C. R. BUDYNAS, R. G. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 960p.

SCHILKE, M. AHLSTRÖM, J. KARLSSON, B. Low cycle fatigue and deformation behavior of austenitic manganese steel in rolled and in as-cast conditions. **Procedia Engineering: Fatigue**, v. 2, p. 623-628, mar. 2010.

TARAFDER, S.; SIVAPRASAD, S.; RANGANATH, V. R. Comparative assessment of fatigue and fracture behaviour of cast and forged railway wheels. **Fatigue Fracture Engineering Material Structure**, v. 30, p. 863–876, maio 2007.

UGURAL, A.C. **Mecânica dos Materiais**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2009. 647p.

VILLAS BÔAS, R. L. **Desenvolvimento de aço microligado para rodas ferroviárias**. 2010. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.