

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Influência da soldagem por caldeamento na
tenacidade à fratura e na resistência à fadiga de
trilhos ferroviários

Vicente Gerlin Neto

Orientador: Prof. Dr. Ruis Camargo Tokimatsu

Co-Orientador: Prof. Dr. Celso Ryioitsi Sokei

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia - UNESP – Campus de Ilha
Solteira, para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Conhecimento: Materiais e
Processos de Fabricação

Ilha Solteira
2012

Influência da soldagem por caldeamento na tenacidade à fratura e na resistência à fadiga de trilhos ferroviários

VICENTE GERLIN NETO

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de mestre em engenharia Mecânica na área de concentração MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr. Ricardo Alan Verdú Ramos / Coordenador do Curso

COMISSÃO examinadora:

Prof. Dr. Ruís C. Tokimatsu / Orientador – DEM – FEIS/Unesp

Prof. Dr. Itamar Ferreira – Dema – FEM/Unicamp

Prof. Dr. Juno Gallego – DEM – FEIS/Unesp

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

G371i Gerlin Neto, Vicente.
Influência da soldagem por caldeamento na tenacidade à fratura e na resistência à fadiga de trilhos ferroviários / Vicente Gerlin Neto. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2012
115 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação, 2012

Orientador: Ruis Camargo Tokimatsu

Co-orientador: Celso Riyoitsi Sokei

Inclui bibliografia

1. Trilhos (Ferrovias). 2. Tenacidade. 3. Tenacidade à fratura. 4. Ferrovias.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

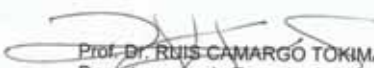
TÍTULO: Influência da soldagem por caldeamento na tenacidade à fratura e na resistência à fadiga de trilhos ferroviários

AUTOR: VICENTE GERLIN NETO

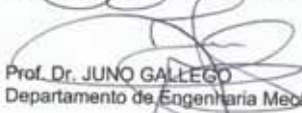
ORIENTADOR: Prof. Dr. RUIS CAMARGO TOKIMATSU

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. CELSO RIYOITSU SOKEI

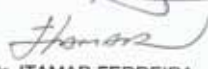
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica ,
Área: MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. RUIS CAMARGO TOKIMATSU

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. JUNO GALLEGO

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. ITAMAR FERREIRA

Departamento de Engenharia de Materiais / Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP

Data da realização: 17 de agosto de 2012.

Dedicatória

A minha mãe Rosemary, a minha
irmã Mirella Carla, ao meu pai
Valentim, aos amigos e demais
familiares que sempre me apoiaram e
acreditaram em mim.

Agradecimentos

Ao Orientador Prof. Dr. Ruís Camargo Tokimatsu por me dar esta grande oportunidade, pela confiança depositada e pelos conselhos cedidos.

Ao Co-Orientador Prof. Celso Ryiotsi Sokei por me ensinar a utilizar a máquina de fadiga do laboratório, por estar presente em meus seminários, por fazer parte de minha banca examinadora de estudos especiais e pelos ensinamentos.

Ao Prof. Dr. Vicente Afonso Ventrella por fazer parte de minha banca examinadora de estudos especiais e Exame Geral de Qualificação, pelos ensinamentos, por estar presente em meus seminários e pelas contribuições e correções para a versão final deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Wyser José Yamakami por participar de minha banca examinadora do Exame Geral de Qualificação e pelas contribuições e correções para a versão final deste trabalho.

Aos professores Dr. João Batista Campos Silva, Dr. Juno Gallego, Dr Edson Del Rio Vieira e Dr. Alessandro Roger Rodrigues pelos ensinamentos e pelos conselhos.

Aos técnicos Sr. Marino Teixeira Caetano e Sr. Darci Alves Ribeiro pela usinagem de grande parte dos corpos de prova utilizados neste estudo.

Aos graduandos em engenharia mecânica Felipe Scheeffe de Souza, Lucas Bertão, Bruno Felipe, Alexandre Roger Antoine Chadouteaud, Luis Augusto Bussaglia Sossai e Rafael Gislotti por me auxiliarem nos ensaios e aos já graduados Eng. Lucas Bannwart, por me auxiliar nos ensaios e Eng. Bruno Colman, por ter desenhado os corpos de prova utilizados neste trabalho.

Aos mestrando Paulo Afonso Franzon Manoel por auxiliar nos ensaios Charpy Instrumentado, por auxiliar na obtenção e tratamento das curvas obtidas nos ensaios, pela convivência e ajuda em diversos momentos durante meu mestrado

Ao Mestrando Rafael Ferreira Gregolin por ajudar em diversos desenhos utilizados neste trabalho, por auxiliar na realização dos ensaios de tração e tenacidade à fratura.

Ao Mestrando Claudemir Briguento, por acompanhar e ajudar na realização dos ensaios d Impacto Charpy Instrumentado, dureza e metalografia e também pelo tempo de convivência.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Capes – pela concessão da bolsa de estudos.

À Pró-Reitoria de Pós Graduação da UNESP – PROPG pelo auxílio financeiro nas participações em eventos científicos.

Ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pelo auxílio financeiro nas participações em eventos científicos.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica e à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira UNESP pela utilização dos laboratórios, viabilização do trabalho de pesquisa e realização dos cursos de graduação e mestrado.

Ao DEMA/FEM/Unicamp pelo acolhimento e pelas condições de trabalho cedidas.

Ao técnico do DEMA/FEM/Unicamp José Luis Lisboa pelo auxílio na realização dos ensaios de tenacidade à fratura.

Sumário

1	Introdução	15
1.1	Objetivos	17
1.2	Justificativas	17
2	Revisão Bibliográfica	18
2.1	Ferrovias no Mundo	18
2.2	Ferrovias no Brasil	21
2.3	Trilhos	23
2.3.1	Esforços atuantes nos trilhos	28
2.4	Ferrovias soldadas continuamente	33
2.5	Defeitos em Trilhos	34
2.5.1	Falhas Transversais	35
2.5.2	Falhas Longitudinais	36
2.6	Ensaio de Impacto Charpy Instrumentado	38
2.7	Fadiga	41
2.7.1	Características Estruturais da Fadiga	44
2.7.2	Influências Metalúrgicas na Fadiga	46
2.7.3	Fadiga de Alto Ciclo	48
2.7.3.1	Ensaio de Fadiga	48
2.7.3.2	Métodos de Determinação do limite de Fadiga	48
2.7.4	Fadiga em Trilhos	51
2.8	Mecânica da Fratura	56
2.8.1	Mecânica da Fratura Elástica Linear	59
2.8.1.1	Distribuição de Tensões em Corpos Trincados	61
2.8.1.2	Ensaio de Tenacidade a Fratura	64
2.8.1.3	Mecânica da Fratura Aplicada em Trilhos	66
3	Materiais e Métodos	71
3.1	Materiais	71
3.1.1	Metalografia	72
3.2	Metodologia	72
3.3.1	Confecção dos corpos de prova	72
3.2.1.1	Charpy Instrumentado	72

3.2.1.2	Tenacidade à fratura	76
3.2.1.3	Tração	77
3.2.1.4	Fadiga	79
3.2.2	Ensaios	80
3.2.2.1	Ensaio de Tração	80
3.2.2.2	Ensaio de Impacto Charpy Instrumentado	81
3.2.2.3	Ensaio de Fadiga	83
3.2.2.4	Ensaio de Tenacidade à Fratura	84
4	Resultados e Discussão	86
4.1	Metalografia.....	86
4.2	Ensaio de Tração	87
4.3	Ensaio de Impacto Charpy Instrumentado	91
4.4	Ensaio de Fadiga	97
4.5	Ensaio de Tenacidade à Fratura	101
5	Conclusões	110
6	Sugestões para trabalhos futuros	111
	Referências	112

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Incidência de defeitos de fadiga em vias soldadas continuamente e não soldadas.....	34
Tabela 2 - Composição química do material do trilho TR-57.....	71
Tabela 3 - Resultados ensaios de tração.....	87
Tabela 4 - Valores K_{ID} Aparente	93
Tabela 5 - Valores de K_{ID} aparente para a condição Alma Transversal Frente	95
Tabela 6 - Valores de K_{ID} aparente para a condição Boleto Transversal Frente.....	95
Tabela 7 - Valores de K_{ID} aparente para a condição Alma Longitudinal Topo	96
Tabela 8 - Valores de K_{ID} aparente para a condição Alma Longitudinal Lateral	96
Tabela 9 - Valores de K_{ID} aparente para a condição Boleto Longitudinal Topo	96
Tabela 10 - Valores de K_{ID} aparente para a condição Boleto Longitudinal Lateral.....	97
Tabela 11 - Resultados pré-teste fadiga	97
Tabela 12 - Resultados Ensaio de Fadiga	99
Tabela 13 - Valores de Carga Máxima e K_{IC} do material dos trilhos	104
Tabela 14 - Resultados K_{IC} condição Alma Transversal Frente	106
Tabela 15 - Resultados K_{IC} condição Alma Transversal Lateral	106
Tabela 16 - Resultados K_{IC} condição Boleto Transversal Topo	106
Tabela 17 - Resultados K_{IC} condição Boleto Transversal Frente	106
Tabela 18 - Resultados K_{IC} condição Alma Longitudinal Topo	107
Tabela 19 - Resultados K_{IC} condição Alma Longitudinal Lateral	107
Tabela 20 - Resultados K_{IC} condição Boleto Longitudinal Topo	108
Tabela 21 - Resultados K_{IC} condição Boleto Longitudinal Lateral	108

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Locomotiva a vapor de Trevithick.	19
Figura 2 - Mapa ferroviário brasileiro.	23
Figura 3 - Superestrutura ferroviária. [6]	24
Figura 4 - Trilho TR-57.	25
Figura 5 - Processo de Lingotamento contínuo de trilhos. [10]	27
Figura 6 - Laminação de trilhos.....	27
Figura 7 - Configuração das forças e tensões atuantes em um trilho. [40]	28
Figura 8 - a) distribuição de tensões na região de contato roda-trilho e b) componentes normal e tangencial da força resultante do contato roda-trilho. [13]	29
Figura 9 - Distribuição normal de contato: a) Hertziano e b) Não-Hertziano. [14]	30
Figura 10 - Estado de tensões residuais no trilho pós-fabricação. [13]	31
Figura 11 - Malha de elementos finitos utilizada na análise de tensões residuais após a solda. [15]	31
Figura 12 - Estado de tensões residuais após a soldagem, análise por elementos finitos. [15]	32
Figura 13 - Análise de elementos finitos de um trilho soldado: a) sem carregamento, b) com carregamento de 30 ton/m, c) com carregamento de 35 ton/m e d) com carregamento de 40 ton/m. [15]	32
Figura 14 - Soldagem de trilhos por caldeamento em campo.	33
Figura 15 - Fratura do tipo feijão. [17]	36
Figura 16 - Exemplos de trincas verticais no boleto. [18]	36
Figura 17 - Exemplo de trinca vertical na alma. [18]	37
Figura 18 - Trinca horizontal no boleto. [18]	37
Figura 19 - Modelo de propagação de trinca horizontal na alma. [19]	38
Figura 20 - Trincas horizontais na alma. [19]	38
Figura 21 - Corpos-de-prova Charpy normalizados pela ASTM E-23. [22]	39
Figura 22 - Resposta força - tempo para um aço de média resistência mecânica	40
Figura 23 - Curva típica força-tempo obtidas no Ensaio Charpy Instrumentado.	41
Figura 24 - Curvas S-N. [27]	42
Figura 25 - Curva característica da/dN x ΔK . [27]	42
Figura 26 - Natureza estatística da fadiga. [27]	43

Figura 27 - Ciclos de tensões existentes. a) reversas, b) repetitivas e c) aleatórias. [27]	44
Figura 28 - Propagação de trinca por fadiga. [27]	45
Figura 29 - Relação limite de fadiga x dureza Rockwell C. [27]	47
Figura 30 - Curva método probit. [27]	49
Figura 31 - Método da escada.	50
Figura 32 - Esquema de tensões em um trilho. [27]	53
Figura 33 - Estado de tensões da região soldada do trilho em linha reta. [30]	54
Figura 34 - Nucleação de trinca na região soldada do trilho em linha reta. [27]	54
Figura 35 - Estado de tensões da região soldada do trilho em curva. [27]	55
Figura 36 - Nucleação de trinca na região soldada do trilho em curva. [27]	55
Figura 37 - Morfologia de falha por fadiga a) Fotografia MEV e b) desenho esquemático. [19]	56
Figura 38 - Fratura navio Liberty.	58
Figura 39 - Trinca elíptica proposta por Inglis. [32]	59
Figura 40 - Modelo de trinca de Griffith. [32]	60
Figura 41 - Modos de solitação de trinca. [32]	61
Figura 42 - Sistema de coordenadas de tensões na ponta da trinca. [32]	63
Figura 43 - Curvas Força x Deslocamento ensaio tenacidade a fratura. [36]	64
Figura 44 - Esquema de ensaio de tenacidade à fratura. [36]	64
Figura 45 - Detalhe encaixe medidor. [36]	65
Figura 46 - Corpo de prova tenacidade a fratura. [36]	65
Figura 47 - Curva de taxa de crescimento de trinca x ΔK . [37]	67
Figura 48 - Fases de uma trinca em um trilho. [41]	68
Figura 49 - Desenho esquemático do squashed balloon. a) tráfego aprisionando o fluido b) tráfego liberando o fluido. [39]	69
Figura 50 - Desenho esquemático do comportamento de uma trinca de fadiga por contato. [40]	70
Figura 51 - Comportamento dos modos de abertura de trinca I e II. [40]	70
Figura 52 - Trilhos como recebidos.	71
Figura 53 - Corpo de Prova Charpy Instrumentado utilizado nos ensaios.	72
Figura 54 - Trilho reduzido a 65 mm.	73
Figura 55 - Trilho soldado após cortes longitudinais.	73
Figura 56 - Corpos de prova Charpy na direção longitudinal.	75

Figura 57 - Corpos de prova Charpy na direção transversal.	76
Figura 58 - Corpo de prova Charpy.	76
Figura 59 - Corpo de Prova tenacidade a fratura.	77
Figura 60 - "Knife edges" e o gabarito durante o processo de colagem.	77
Figura 61 - Desenho corpo de prova tração.	78
Figura 62 - Corpo de prova de tração.	78
Figura 63 - Corpos de prova tração direção longitudinal.	79
Figura 64 - Desenho corpo de prova de fadiga.	79
Figura 65 - Corpo de prova de fadiga.	80
Figura 66 - Ensaio de tração.	81
Figura 67 - Desenho esquemático da cadeia de medição.	82
Figura 68 - Máquina de ensaios Charpy instrumentada.	82
Figura 69 - Corpo de prova de fadiga posicionado na máquina.	83
Figura 70 - Máquina MTS 810-FlexTest 40.	84
Figura 71 - Corpo de prova posicionado na máquina de ensaios.	85
Figura 72 - Corpo de prova após a realização do ensaio.	85
Figura 73 - Seção longitudinal do trilho mostrando as três regiões: linha de caldeamento(LC), Zona Afetada Termicamente(ZAT) e Metal Base(MB).	86
Figura 74 - Gráfico Tensão x Deformação MBAL1.	87
Figura 75 - Gráfico Tensão x Deformação SAL1.	88
Figura 76 - Gráfico Tensão x Deformação SAL2.	88
Figura 77 - Gráfico Tensão x Deformação MBBL1.	89
Figura 78 - Gráfico Tensão x Deformação SBL1	89
Figura 79 - Gráfico Tensão x Deformação SBL2.....	90
Figura 80 - Curva Força x Deslocamento MBBTF-1	91
Figura 81 - Curva Força x Deslocamento ZBTF-3.....	91
Figura 82 - Curva Força x Deslocamento MBALT-3.....	92
Figura 83 - Curva Força x Deslocamento ZALT-3	92
Figura 84 - Curva Força x Deslocamento LALL-3	92
Figura 85 - Gráfico pré-teste	98
Figura 86 - Gráfico Ensaio de Fadiga Método da Escada.....	99
Figura 87 - Curva S-N média com seus desvios.....	100
Figura 88 - Curva Força x Abertura Ponta da Trinca corpo de prova MBATF-1	101

Figura 89 - Curva Força x Abertura Ponta da Trinca corpo de prova ZATF-1	102
Figura 90 - Curva Força x Abertura Ponta da Trinca corpo de prova MBBLT-1	102
Figura 91 - Curva Força x Abertura Ponta da Trinca corpo de prova ZBLT-1	103
Figura 92 - Curva Força x Abertura Ponta da Trinca corpo de prova LBLT-1	103

Resumo

GERLIN NETO, V. **Influência da soldagem por caldeamento na tenacidade à fratura e resistência à fadiga de trilhos ferroviários.** 2012. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2012.

O transporte ferroviário é um meio de transporte já consolidado na maior parte do mundo desde o início do século XIX. Atualmente o Brasil está reiniciando a construção de novas ferrovias e novos investimentos na área surgiram. Com vista nestas novas ferrovias, estudos sobre a caracterização mecânica e de mecânica da fratura dos trilhos se faz necessária e o estudo da tenacidade do material dos trilhos é um importante fator no conhecimento das propriedades dos trilhos. As ferrovias são construídas em linhas contínuas soldadas por um processo denominado caldeamento. Este trabalho teve como objetivo estudar a influência da junta soldada no comportamento à fratura do material de trilhos ferroviários do tipo TR-57. Por meio de ensaios de tração, fadiga por flexão rotativa, impacto Charpy instrumentado e de tenacidade à fratura foi feita a caracterização do material e análise das influências da junta soldada nas características de tenacidade à fratura dinâmica aparente e de tenacidade à fratura do material dos trilhos. Os resultados mostraram que o material dos trilhos segue uma tendência de queda da tenacidade a fratura na região da junta soldada, além de mostrar que o volume de material ensaiado tem uma grande importância na escolha dos ensaios a serem realizados para a caracterização.

Palavras-chave: Trilhos. Tenacidade. Tenacidade à fratura. Ferrovias.

Abstract

NETO, V. G.. **Influence of the flash-butt welding on fracture toughness and fatigue resistance of railway rails.** 2012. 115 p. Dissertation (Mechanical engineering masters degree) School of Engineering, São Paulo State University "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2012.

Rail transportation is an already worldwide consolidated means of transportation since the beginning of 19th century. Nowadays Brazil is restarting to build new railways and investments for the area are appeared. With this new railways, studies on the mechanical and fracture mechanics characteristics of rails are needed and the rail's material toughness is an important factor on knowing rails properties. Railways are built in continuous welded lines by a welding process called flash-butt welding. This work has as objective to study the welded joint influence on the fracture toughness of the brazilian TR-57 rails material. Using traction, rotate bending fatigue, instrumented Charpy impact and fracture toughness tests the material characterization and the welded joint influence on the apparent dynamical fracture toughness and fracture toughness of the rail's material. The results showed that the rail's material followed a fall tendency of the fracture toughness inside the welded joint, and also showed that the tested material volume has a major influence on choosing the tests to be used for characterization.

Key-words: Rails. Toughness. Fracture toughness. Fatigue railways.

1 Introdução

As ferrovias foram o início de uma grande evolução na área de transportes desde seu início que data do começo do século XIX. Não somente por aumentar as cargas e velocidades de transportes da época, mas também por serem responsáveis por um impulso nas pesquisas tecnológicas na área de engenharia por um bom tempo.

As ferrovias não demoraram a se popularizar pela sua alta capacidade de carga e principalmente pelo seu baixo custo. No final do século XIX as ferrovias já estavam consolidadas e representavam a maior parte dos transportes de cargas e passageiros da Europa. Além desta consolidação, as ferrovias alcançavam importância em todos os continentes do mundo, sendo muito presentes e utilizadas na Ásia e nos Estados Unidos.

No Brasil as ferrovias se iniciaram no fim do século XIX e se popularizaram e entraram na planta de transportes do país no começo do século XX com diversos investimentos governamentais e uma grande procura principalmente dos setores açucareiro e de látex, as ferrovias foram até a metade do século um grande meio de transporte de cargas no Brasil.

Com a queda de investimentos governamentais a partir da segunda metade do século XX as ferrovias entraram em processo de decadência e sofreram seu pior período com a chegada da década de 1980 onde todas ferrovias sofreram privatizações para que deixassem de ser um déficit governamental. Com a privatização as ferrovias se tornaram importantes para alguns setores de produção principalmente nas regiões Sul, Sudeste e Norte do país.

O início de programas governamentais como o Programa de Aceleração do Crescimento – PAC – sendo implementados no Brasil, novamente as ferrovias fazem parte do planejamento do país, com diversos quilômetros de ferrovias sendo construídos e mais ferrovias em processos de licitação. Um exemplo é a ferrovia Norte-Sul, que tem como objetivo finalmente ligar as malhas ferroviárias das regiões Norte (no estado do Pará), passando pela região Centro-Oeste (estados de Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul), e ligando as malhas ferroviárias no Sul e Sudeste já existentes.

Uma vez terminada, a ferrovia Norte-Sul terá quase 2.000 km de extensão, passando por 7 estados de 3 diferentes regiões do Brasil. Uma grande construção que ajudará na melhoria da estrutura ferroviária brasileira. Não somente na infraestrutura de transportes mas também na área tecnológica, uma vez que estudos mais aprofundados

nas áreas de engenharia serão necessários em diversas áreas da ferrovia. Uma grande importância do estudo de ferrovias está na caracterização do material dos trilhos ferroviários, parte mais importante da ferrovia.

Este trabalho está inserido em uma parte das linhas de pesquisa do GC3M – Grupo de Caracterização Mecânica e Microestrutural dos Materiais – criado em 1999 no Departamento de Engenharia Mecânica da Unesp Câmpus de Ilha Solteira. O estudo sobre trilhos ferroviários se tornou uma parte dos trabalhos do grupo em 2010 e desde então diversos estudos foram realizados para o conhecimento das propriedades e características mecânicas de trilhos ferroviários.

O conhecimento obtido nos primeiros estudos foi de extrema importância para que novos trabalhos surgissem e ocupassem os alunos e professores componentes do grupo. Para que maior qualidade e conhecimento sejam inseridos no contexto da análise dos trilhos estudos mais direcionados são agora parte da rotina do grupo.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo a caracterização do material dos trilhos com base nos ensaios mecânicos de impacto Charpy instrumentado, tração, tenacidade a fratura e fadiga dos trilhos. As análises serão feitas comparando o comportamento das características citadas de trilhos soldados e não soldados para se entender a influência da junta soldada nas características do material dos trilhos.

1.2 Justificativas

Com a recente expansão ferroviária no Brasil estudos que visam caracterizar os componentes de uma ferrovia, principalmente os trilhos, são de extrema importância. Novas ferrovias como a ferrovia Leste-Oeste que ligará a região Norte do País à região Nordeste serão construídas, além da conclusão de ferrovias como a Norte-Sul que ligará as regiões Norte e Sul do país levam a novos investimentos e a necessidade de estudos sobre as características e condições dos componentes da chamada superestrutura ferroviária.

O estudo da vida dos trilhos e do comportamento dos mesmos ao estarem submetidos a trincas é necessário tendo em vista a alta ocorrência de falhas por fadiga

em ferrovias soldadas continuamente. Estes estudos têm como objetivo auxiliar no desenvolvimento dos processos de manutenção e de inspeção das ferrovias soldadas continuamente

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Ferrovias no Mundo

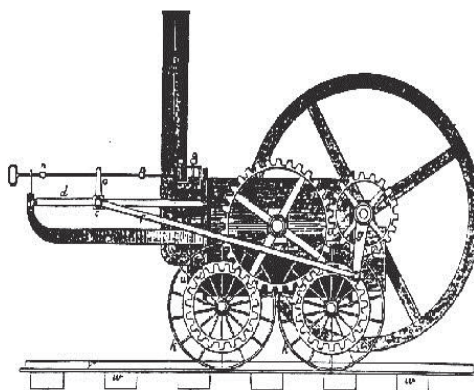
O transporte de cargas ou passageiros por trilhos ferroviários começou por volta de 1800 logo após a invenção da máquina a vapor por James Watt que proporcionou um aumento na potência disponível. Mas o transporte por trilhos surge bem antes disso, em 600 AC com a estrada de Diolkos que passava pelo Istmo de Corinto. Essa estrada de granito foi entalhada com dois sulcos que davam guias para carros puxados por homens ou animais, sendo a primeira estrada com guias da história.

A utilização de trilhos como guias surgiu apenas no século XVI na Alemanha onde trilhos de madeira eram utilizados dentro de minas de carvão e minério de ferro para facilitar na locomoção de carrinhos de carga. Esse tipo de transporte se popularizou e no começo do século XVII trilhos de madeira sendo encontrados em cidades inglesas para facilitar o transporte e ajudar na conservação das estradas de pedra.

Com o transporte por trilhos se difundindo pela Europa, ações para melhorar a qualidade dos trilhos foram realizadas, pela alta umidade e pelo alto atrito entre as rodas e os trilhos, os trilhos não duravam muito tempo. Somente no século XVIII começou a se introduzir ferro nos trilhos e a partir da segunda metade do século os trilhos eram inteiramente de ferro, o que melhorou a qualidade dos trilhos e a velocidade de transporte, mesmo com a tração ainda sendo animal.

Com a invenção da máquina a vapor de James Watt em 1784 uma nova classe de locomotivas poderia ser criada e a primeira locomotiva a vapor foi idealizada e construída por Richard Trevithick em 1804. A locomotiva mostrada na Figura 1 foi utilizada para a primeira viagem em uma ferrovia, levando 7 toneladas de minério e 70 passageiros em uma ferrovia de 14 km a uma velocidade de 8 km/h. A locomotiva de Trevithick fez apenas 3 viagens e foi aposentada em 1808, mas deu a primeira demonstração que o transporte ferroviário poderia ser um sucesso.

Figura 1 - Locomotiva a vapor de Trevithick.



Fonte: Cotton Times (2007)

Em 1825 George Stephenson criou a primeira ferrovia pública de transporte criando a Ferrovia Stockton and Darling que ligava as carvoarias de Darlington com o porto de Stoke-on-Tees, que fazia com que o escoamento da produção fosse mais rápido. Com as ferrovias começando a nascer na Inglaterra, outros países começaram seus projetos e em 1827 nascia nos Estados Unidos a Ferrovia Baltimore & Ohio que tinha como objetivo ligar as cidades de Baltimore, Maryland e Washington para iniciar as ferrovias no país. Nos Estados Unidos as ferrovias começaram a surgir rapidamente, em 1829 já tinham ultrapassado os Montes Apalaches chegando ao estado do Arkansas e tendo então quatro estados conectados e em 1831 chegavam ao rio Mississippi melhorando a ligação entre os diferentes estados americanos.

A partir de 1830 as ferrovias se difundiam ainda mais chegando à Rússia que enxergava a necessidade do transporte ferroviário devido às suas proporções continentais que dificultavam a comunicação e produção do país. Em 1836 a primeira ferrovia russa foi instalada ligando as cidades de São Petersburgo e Pavlosk em uma linha de 27 km e foi o início de uma malha bem sucedida e que se tornou internacional. Atualmente a cidade de São Petersburgo tem ligações com Helsinki na Finlândia, Berlim na Alemanha além de todas as ex-repúblicas soviéticas.

Vários países da Europa tinham suas primeiras ferrovias instaladas e funcionando ao fim da década de 1830 não somente na Rússia mas também na Alemanha, Bélgica, Irlanda, Áustria, França, Holanda e Itália. Também na América do Norte com o Canadá tendo a sua primeira ferrovia, sendo seguida por Cuba na América Central fazendo com que as ferrovias sejam mundialmente utilizadas.

Em 1840 as ferrovias nos Estados Unidos tiveram uma ascensão grandiosa, passando de 37 km em 1830 para mais de 4.400 km uma década depois, mostrando uma evolução grande. A evolução das ferrovias americanas seria ainda maior, chegando a incríveis 48.000 km em 1850, triplicando-se 20 anos mais tarde com 144.000 km em 1870. Em 1869 a primeira ferrovia transcontinental do mundo foi construída nos Estados Unidos com 2.826 km ligando as cidades de Sacramento e Omaha.

No fim da década de 1850 as ferrovias já estavam presentes em todos os países europeus e também em todos os continentes do mundo, com ferrovias na Austrália oceânica, no africano Egito, na asiática Índia e nos sul-americanos Argentina, Chile e Brasil. Também o final desta década marca o início do uso de trilhos de aço para as ferrovias.

No início da década de 1870 toda a malha ferroviária europeia já estava consolidada e instalada, sendo praticamente a mesma até os dias atuais. Também nesta década algumas ferrovias começaram a ser eletrificadas, o que resultava em novas locomotivas e maiores velocidades de transporte.

Com as malhas ferroviárias já instaladas as atenções voltaram-se a novos tipos de combustíveis e novas características construtivas das ferrovias para melhorar as condições das mesmas, aumentando assim a velocidade e o volume de carga transportado. Atualmente no mundo existem mais de 1.131.064 km com os Estados unidos sendo o país com maior número de ferrovias, 226.427 km segundo o CIA World Factbook de 2009. [1]

O interesse em se estudar melhor as condições das vias é antigo como alertava Vose em 1883 [2] que escreveu um artigo alertando sobre o elevado número de acidentes em ferrovias britânicas com as ferrovias já em seu auge na Europa. Em seu artigo Vose credita os elevados números de acidentes a dois períodos, os rigorosos invernos ingleses e no período das férias de verão de Agosto a Outubro quando um número maior de pessoas frequentavam as ferrovias. Ainda segundo Vose, dados estatísticos mais aprimorados auxiliariam na direção dos estudos para se melhorar as condições das vias.

Os principais objetivos da pesquisa da integridade dos trilhos são de melhorar a segurança da via com redução das falhas de trilhos e consequentes descarrilamentos de trens, além de melhorar a economia das ferrovias, fazendo com que os trilhos tenham uma vida útil maior. Para isso, inspeções visuais sempre foram utilizadas nas ferrovias, além de dispositivos de detecção de trincas serem utilizados nas ferrovias desde a

década de 1930. Porém, atualmente o conceito de estudar a integridade da via férrea se aproxima ao conceito de dano tolerado criado pela Força Aérea Americana e muito utilizado pela indústria aeronáutica. [3]

Ainda recentemente principalmente na Europa alguns estudos estão sendo realizados com a preocupação de melhorar a competitividade do transporte ferroviário, melhorar a interoperabilidade entre os diferentes países do continente e de também desenvolver a integridade ferroviária. A abertura do tráfego ferroviário europeu entre os países da União Europeia e os não participantes, foi de muita importância, já que no transporte de passageiros, em 10 anos da medida, quase 100 milhões de pessoas cruzaram as fronteiras da União Europeia além de mais de 148 milhões de toneladas de carga. [4]

Com estas informações, é possível afirmar que tanto o mercado ferroviário quanto as pesquisas no setor continuarão por alguns anos, principalmente com o desenvolvimento de diferentes trens de maiores velocidades e capacidades de passageiros e de carga.

2.2 Ferrovias no Brasil

Enquanto as ferrovias iam se popularizando e alcançando várias localidades do mundo, no Brasil as ferrovias demoraram a fazer parte do transporte local de cargas e passageiros. Apenas em 1852, ou seja, 25 anos depois da primeira ferrovia entrar em operação o Governo Imperial concedeu a Irineu Evangelista de Souza a concessão de terras para a construção daquela que seria a primeira ferrovia brasileira.

Irineu que mais tarde seria conhecido como Barão de Mauá era um incentivador do setor de transportes já tendo sucesso na construção de navios na época e se voltou para a construção da primeira ferrovia brasileira. Em abril de 1854 Dom Pedro II inaugurou a Estrada de Ferro Mauá que tinha 14,5 km de extensão ligando o Porto de Estrela situado na Baía de Guanabara à Raiz da Serra, localidade próxima a cidade de Petrópolis.

Após o início das operações da Estrada de Ferro Mauá várias outras ferrovias foram instaladas em várias regiões do país, a Estrada de Ferro Recife ao São Francisco e Bahia ao São Francisco no Nordeste, a D. Pedro II no RJ, a Santos-Jundiaí e a Companhia Paulista em SP. Uma das ferrovias mais importantes da época foi a ligação

da estrada de ferro da Companhia Paulista com a D. Pedro II ligando as maiores e mais importantes cidades da época Rio de Janeiro e São Paulo.

Apesar do surgimento de algumas ferrovias que davam ao Brasil maior evolução tecnológica alguns problemas que ainda existem surgiram no começo das ferrovias brasileiras. Entre os maiores problemas pode-se destacar as variadas bitolas existentes que dificultam a integração das diferentes ferrovias, traçados feitos em trechos muito longos e sinuosos e a localização dispersa das ferrovias no território nacional.

Até o final do século XIX várias outras ferrovias surgiram principalmente no estado de SP para escoamento da produção agrícola para exportação, em Minas Gerais para transporte principalmente de passageiros e no sul do país. No sul as ferrovias que mais se destacaram foram nos estados do PR e SC, no PR a ferrovia que ligava Curitiba a Paranaguá foi um marco de excelência da engenharia brasileira já que vários engenheiros europeus duvidavam da possibilidade da construção deste trecho de ferrovia. Esta ferrovia possui 420 obras de arte, incluindo, hoje, 14 túneis, 30 pontes e vários viadutos de grande vão, estando o ponto mais elevado da linha a 955 m acima do nível do mar.

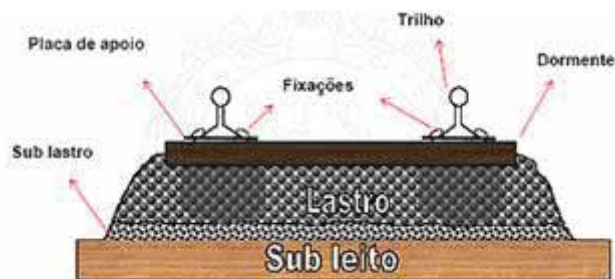
Outras ferrovias regionais surgiram até o fim do Séc. XIX no Norte e Nordeste do Brasil para o escoamento da produção de látex que não era possível pelos rios por conta de corredeiras no Norte que também contaria com uma integração internacional para a Bolívia. No Nordeste a principal atividade das ferrovias era de escoar a produção canavieira e a de produtos importados para toda a região, o que ajudou na evolução das cidades nordestinas. No Sul do país também o RS começava a ter ferrovias com a estrada de ferro ligando Porto Alegre a Novo Hamburgo (então São Leopoldo) e, ao fim do século o Brasil tinha mais de 9.000 km de ferrovias com mais 9.000 km em processo de construção.

Na primeira metade do Século XX o Brasil já possuía um sistema ferroviário nacional com 29.000 km de extensão e que começavam a contar agora com locomotivas elétricas ou a diesel. Em 1930 o então presidente Getúlio Vargas determinou a estatização das estradas de ferro objetivando uma melhora no serviço das ferrovias e a garantia de que as estradas de ferro não parariam de funcionar.

A estatização não se revelou muito boa para o transporte ferroviário brasileiro quando a partir da década de 1980 as empresas ferroviárias começaram a enfrentar uma série de prejuízos financeiros devido a diminuição de investimentos federais. Então, na

lastro. A superestrutura ilustrada na Figura 3 é construída de tal maneira que permita o rolamento dos trens, distribua os esforços provenientes de movimentos verticais (peso dos trens) e horizontais (longitudinais e transversais à via), tem que ser construída pensando em operações de manutenção e ter geometria compatível com o trem, sua segurança e controle.

Figura 3 - Superestrutura ferroviária. [6]



O lastro e o sub lastro ou sub leito distribuem as cargas à plataforma ferroviária e podem ser feitos de solo, areia, escórias, pedras, cascalhos ou pedregulhos e devem ter uma altura tal que não prejudique o funcionamento da ferrovia e suporte os esforços provenientes dos trilhos.

Os dormentes são vigas transversais onde os trilhos são apoiados e tem como principais funções transmitir os esforços para o lastro, amortecer parcialmente as vibrações da via e manter a bitola (distância entre as laterais internas do boleto dos trilhos) da via correta. Os dormentes podem ser de madeira, aço, concreto ou misto, devendo se escolher o tipo com as características da via e custos de material já que para dormentes de madeira devem ser utilizadas madeiras de lei e nos de concreto existir a necessidade de maior manutenção por ocorrência de fissuras.

As fixações são os elementos da superestrutura ferroviária que devem manter o trilho na posição correta e manter a bitola da via, oferecendo resistência ao deslocamento longitudinal e transversal dos trilhos. As fixações podem ser rígidas (pregos ou parafusos) ou elásticas (utilização de presilhas ou prendedores), as rígidas podem perder a rigidez com a vibração da via afrouxando com muito tráfego, já as elásticas exercem pressão constante na via. [6]

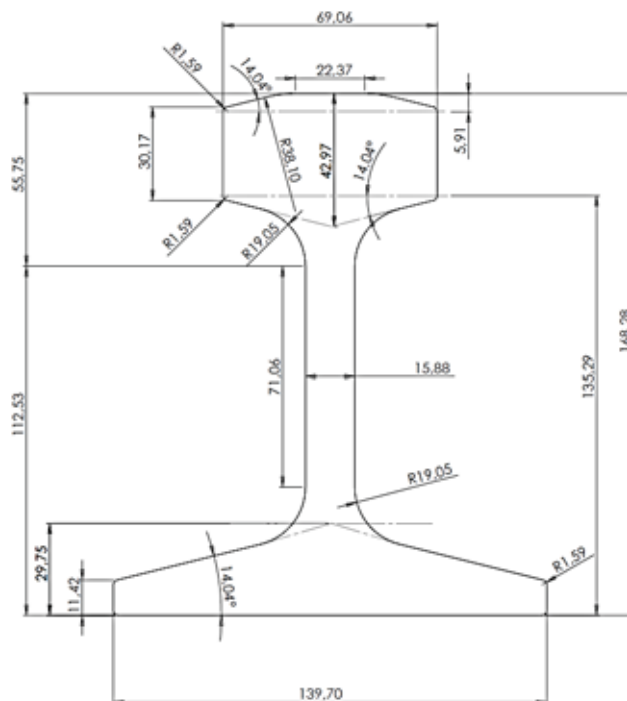
A parte mais importante da superestrutura ferroviária é o trilho que dá suporte e guia aos veículos ferroviários e economicamente detém o menor custo e consiste em dois perfis metálicos em paralelo repousando sobre os dormentes. Os materiais de

fabricação e o perfil dos trilhos foram evoluindo de modo a suportar maiores cargas por eixos e um dos fatores foi o rápido desenvolvimento da produção de aço. [7]

O trilho consiste de 3 partes denominadas alma, boleto e patim. O boleto é a parte mais superior do trilho e tem uma superfície abaulada para facilitar o contato roda-trilho e manter a estabilidade do rolamento, além de ter a maior parte da massa do trilho para suportar o desgaste oriundo do contato roda-trilho. A alma é a parte mais fina e central do trilho, ela é quem suporta os esforços de flexão no trilho e quanto maior for a alma, maior o momento de inércia do trilho. O patim é a parte da base do trilho e deve ter uma espessura mínima para assegurar que a alma fique perpendicular ao dormente durante as solicitações.

O perfil utilizado atualmente nos trilhos é denominado Vignole e são classificados de acordo com a sua massa por metro de trilho e tem denominação TR – XX com XX sendo o valor da massa por metro de trilho, podendo ser de 37, 45, 50, 57 e 68 kg/m classificados de acordo com a norma ABNT NBR 7590 [8]. Além disso, os trilhos podem ter 12, 18 ou 24m e tem tolerâncias e dimensões segundo a norma ABNT NBR 12320 [9]. O trilho TR-57 tem seu perfil e dimensões mostrado na Figura 4 e é atualmente utilizado em larga escala nas novas ferrovias brasileiras.

Figura 4 - Trilho TR-57 e suas dimensões em mm.



Dados do próprio autor.

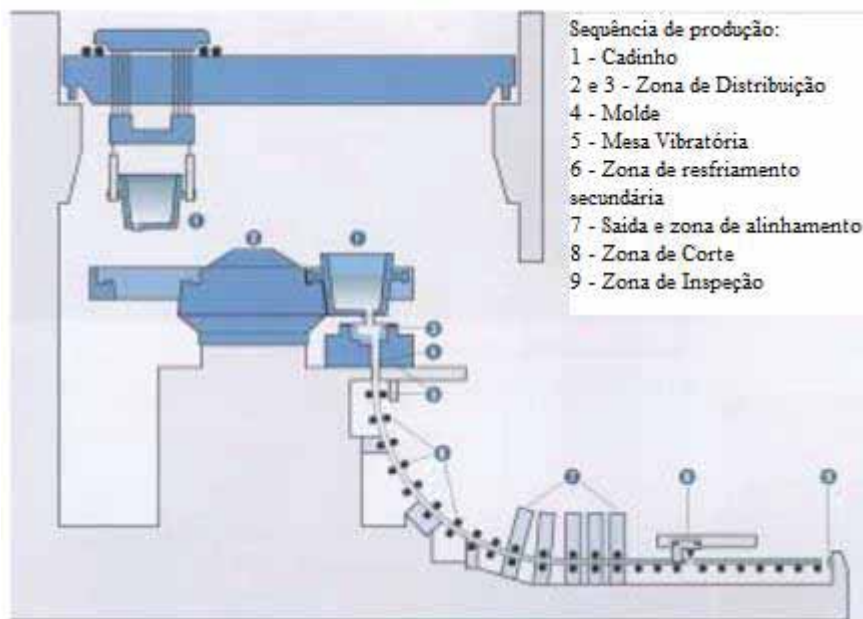
Como o trilho é a parte mais importante da superestrutura ferroviária desde a sua fabricação a importância na inspeção da qualidade dos trens é imprescindível. O processo de fabricação do trilho passa pelas seguintes etapas que serão explicadas posteriormente.

- Alto-Forno
- Fabricação do Aço
- Lingotamento Contínuo
- Laminação
- Alinhamento
- Inspeção
- Aceitação

A fabricação do trilho começa pela obtenção do aço para fabricá-lo, daí o começo com o alto forno, onde são adicionados minério de ferro, coque e calcário em proporções controladas e então o forno é aceso gerando altas temperaturas e oxigênio é adicionado à mistura. Quando o minério se torna ferro gusa, ferro fundido com as impurezas, este é virado em um forno de degaseificação a vácuo com fluxo de argônio para diminuir a quantidade de hidrogênio na mistura e para diminuir a concentração de carbono no ferro fundido que é oxidado junto com demais impurezas e sobe para a escória transformando-o em aço. [10]

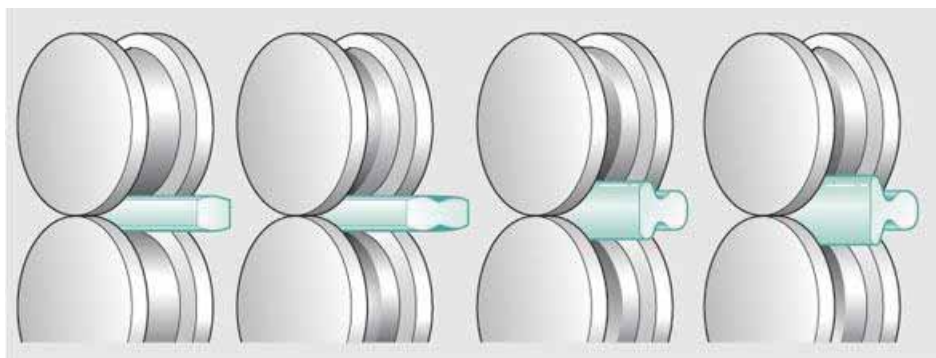
Nos processos mais modernos de fabricação as duas etapas citadas anteriormente são as primeiras do processo de lingotamento contínuo mostrado na Figura 5 Após a obtenção do aço ainda em estado líquido é despejado em uma torre que leva o aço fundido até a posição de derramamento nas formas (partes 2 e 3 da Figura 5. O aço em estado líquido é protegido da atmosfera em tubos que o levam até a seção dos moldes, onde um resfriamento com água é iniciado em um molde de paredes duplas que faz com que o aço fique em uma seção retangular.

Figura 5 - Processo de Lingotamento contínuo de trilhos. [10]



Após sair dos moldes em uma seção retangular os lingotes são colocados em uma série de rolos de laminação para que os trilhos cheguem ao perfil desejado. Para o perfil Vignole são necessárias oito etapas de laminação desde o lingote de seção retangular até o perfil final em um desenho esquemático na Figura 6. Após a laminação os trilhos são deixados para resfriar no ar calmo, segundo a norma da ABNT NBR 11710 [11].

Figura 6 - Laminação de trilhos.



Fonte: Openlear.uk (2006)

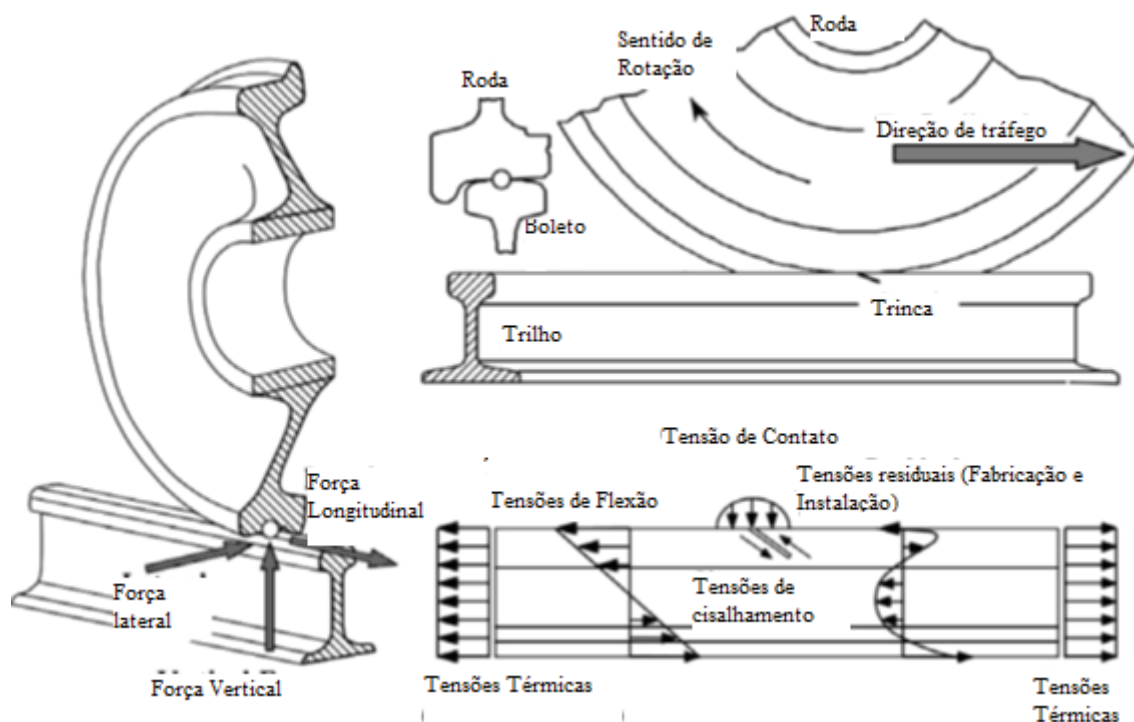
Após a laminação e resfriamento dos trilhos, o processo de inspeção começa basicamente medindo-se as dimensões do trilho e as tolerâncias do perfil seguindo as

normas brasileiras acima citadas. Por fim, se os trilhos sofrem um empenamento após o resfriamento são submetidos a um alinhamento para serem levados à aceitação.

2.3.1 Esforços atuantes nos trilhos

Como os trilhos são a parte mais importante da superestrutura ferroviária, o conhecimento dos esforços atuantes nos trilhos é de extrema importância para conhecer as características e propriedades dos trilhos. Existem 5 tipos principais de tensionamento que os trilhos estão sujeitos, tensões de flexão, de cisalhamento, de contato, térmicas e residuais, mostrados na Figura 7. Destes as mais atuantes são as tensões de flexão e de cisalhamento. Todos os carregamentos são assumidos como valores nominais, ou seja, considerando um carregamento uniforme em cima do trilho, o que não ocorre na realidade.

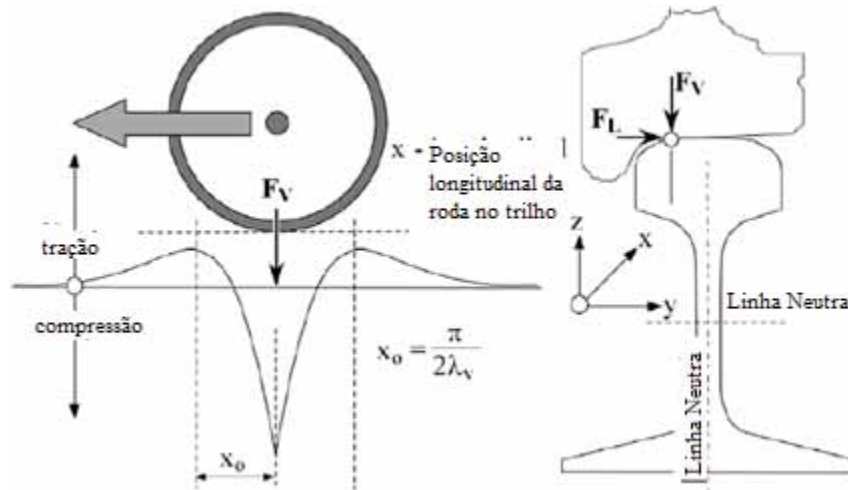
Figura 7 - Configuração das forças e tensões atuantes em um trilho. [40]



As tensões de flexão são ocasionadas pela passagem das rodas nos trilhos e possuem uma componente vertical e uma horizontal como mostrado na Figura 8b. Na 8a têm-se uma demonstração da amplitude da tensão que é compressiva na região de contato da roda com o trilho e se torna de tração nas regiões anteriores e posteriores ao

contato. Esse comportamento de tensões dada a passagem dos trilhos imprime também um estado cíclico de tensões no trilho o que contribuirá para o desenvolvimento de falhas por fadiga. [12]

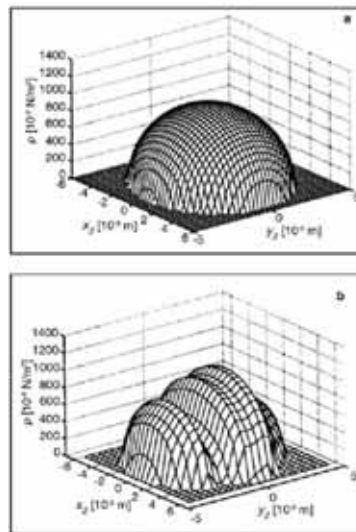
Figura 8 - a) distribuição de tensões na região de contato roda-trilho e b) componentes normal e tangencial da força resultante do contato roda-trilho. [13]



As tensões de cisalhamento acontecem muito em ferrovias com talas de junção, onde os buracos das talas podem auxiliar na existência de tensões de cisalhamento, também na existência de trincas, onde a movimentação das regiões separadas dos trilhos sofrem cisalhamento.

As tensões de contato roda-trilho são muito altas e são bem aproximadas utilizando-se um modelo Hertziano de contato como o mostrado na Figura 9a apesar de um modelo de contato não-Hertziano presente na Figura 9b é melhor aproximado da realidade. Forças que contribuem para altas tensões de contato são o carregamento proporcionado pela roda e as forças existentes no plano de contato, que surgem da tração para aceleração dos trens, frenagem e nas curvas. [12]

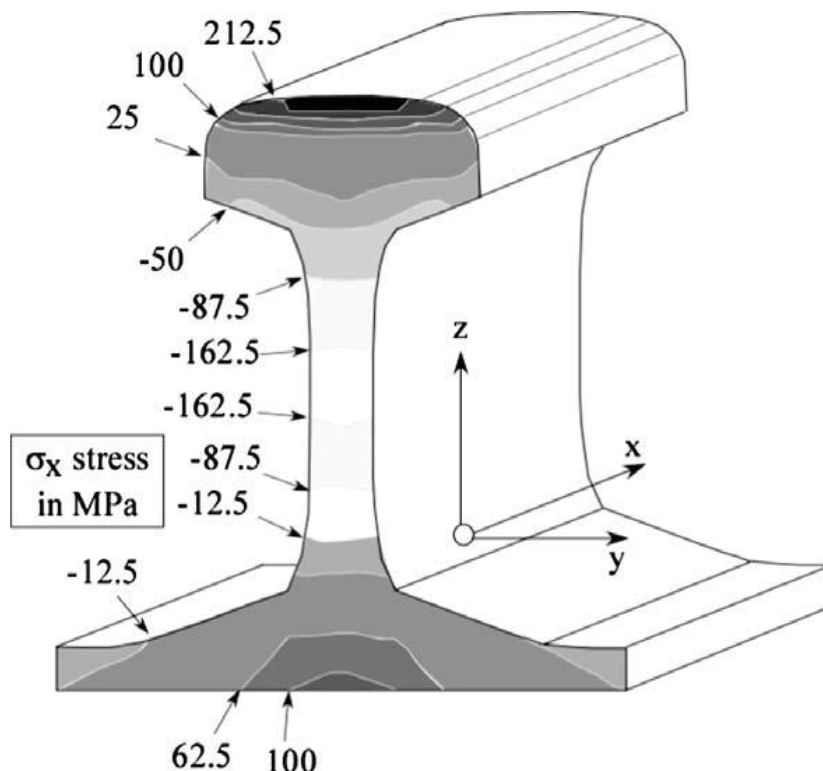
Figura 9 - Distribuição normal de contato: a) Hertziano e b) Não-Hertziano. [14]



Com a eliminação das junções e aparecimento das ferrovias soldadas continuamente o sistema trilho-dormente se torna uma viga biapoiada e pode flambar com altas tensões de compressão. Por esta razão os trilhos são soldados simulando-se uma temperatura ambiente alta, fazendo com que fiquem em estado de tensões trativas na maior parte do tempo. Este método reduz as chances de flambagem, porém aumentam os riscos de ocorrer uma fratura frágil nos trilhos quando o ambiente está a temperaturas baixas, o que aumenta a necessidade de inspeções regulares nos trilhos. [12]

As tensões existentes nos trilhos que não são provenientes de fatores que não são externos são chamadas de residuais, que aparecem após o processo de fabricação e instalação dos trilhos através de tratamentos térmicos, do processo de laminação e do processo de soldagem dos trilhos ou durante o uso dos trilhos com o endurecimento superficial imposto pela deformação causada pelo contato roda-trilho. A Figura 10 mostra o estado de tensões residuais presente após a fabricação e pode se perceber que o estado de tensões predominante é de tração no boleto e compressão na alma. [13]

Figura 10 -: Estado de tensões residuais no trilho pós-fabricação. [13]



Após a fabricação do trilho o mesmo é levado a campo para a soldagem. Após realizada a soldagem por caldeamento, um novo estado de tensões residuais é imposto. Com uma análise de elementos finitos do trilho com modelo e malha mostrados na Figura 11 mostra na Figura 12 como o estado de tensões se torna compressivo na região superficial do boleto e que se segue com tensões trativas na alma.

Figura 11 - Malha de elementos finitos utilizada na análise de tensões residuais após o processo de soldagem. [15]

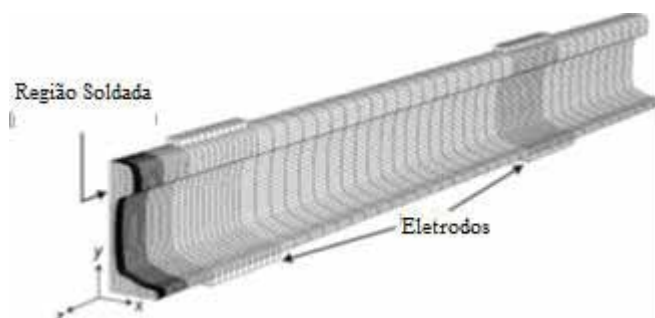
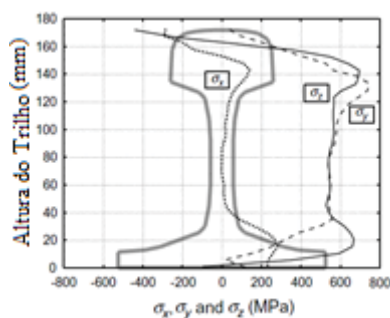
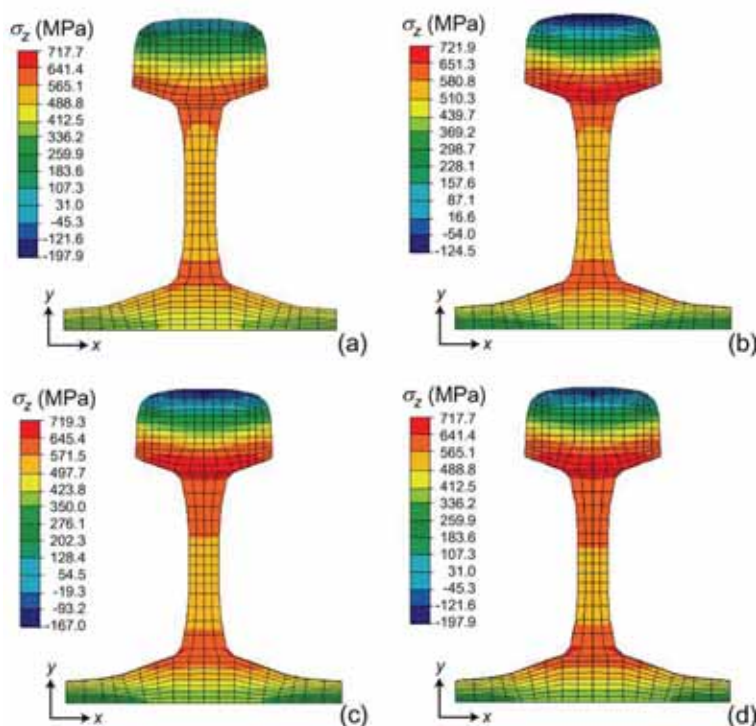


Figura 12 - Estado de tensões residuais após a soldagem, análise por elementos finitos. [15]



O comportamento das tensões residuais sofre mais uma mudança quando o trilho sofre passagem de trens, na Figura 13 temos a demonstração do estado de tensões residuais de um trilho sem a passagem de trens (Figura 13-a), com passagem e carregamento de 30 ton/m (Figura 13-b), 35 ton/m (Figura 13-c) e 40 ton/m (Figura 14 d). Essa análise mostra exatamente como o estado de tensões na superfície do boleto vai ficando mais compressivo e tem duas regiões de maiores tensões trativas, as interfaces boleto-alma e alma-patim.

Figura 13 - Análise de elementos finitos de um trilho soldado: a) sem carregamento, b) com carregamento de 30 ton/m, c) com carregamento de 35 ton/m e d) com carregamento de 40 ton/m. [15]



2.4 Ferrovias soldadas continuamente

A necessidade de se melhorar as características da via principalmente o conforto nos passageiros levou à criação das ferrovias soldadas continuamente. O conceito de uma ferrovia soldada melhora não somente o conforto com o desaparecimento do impacto entre roda e trilho nos pontos de junção em que os trilhos são separados, mas também na diminuição da probabilidade de falhas nas rodas e trilhos.

Para o projeto e instalação de uma ferrovia soldada continuamente as condições climáticas, geográficas e de condições de uso da via, sendo que um rigoroso controle das operações da construção da via deve existir. Os trilhos que podem ser de 12 a 24 metros primeiramente são soldados em estaleiro pelo processo de caldeamento até ficarem com um comprimento de 240 a 396 metros. Então são levados a campo e soldados novamente por caldeamento ou por aluminotermia.

Em campo os trilhos são soldados em sequência por máquinas de solda de grande porte como a mostrada na Figura 14. A faixa de temperaturas em que os trilhos são instalados e soldados em campo deve ser bastante controlada pois é ela que vai influenciar diretamente no alinhamento dos trilhos e na manutenção da bitola da via. Soldagens feitas a temperaturas muito baixas tendem a causar flambagem lateral da via e a temperaturas muito altas causam tensões residuais trativas após o resfriamento.

Figura 14 - Soldagem de trilhos por caldeamento em campo.



Fonte: Rahee (2007)

Segundo Orringer [16] que fez estudos estatísticos em ferrovias de 1975 a 1985 existem 4 tipos de defeitos com maior ocorrência. O principal defeito foi a ruptura de juntas soldadas continuamente que não tiveram as condições de soldagem controladas idealmente. Os outros 3 defeitos encontrados são devido ao processo de fadiga dos trilhos, que são defeitos junto a furos em uniões parafusadas em vias não soldadas, escamação horizontal (chamada de shelling) e trincas verticais nos trilhos.

A Tabela 1 mostra a frequência da ocorrência dos defeitos de fadiga em vias soldadas e não soldadas.

Tabela 1 - Incidência de defeitos de fadiga em vias soldadas continuamente e não soldadas. [13]

Tipo de Defeito Tipo de Via	Trincas em furos de junção	Trincas longitudinais verticais	Trincas transversais verticais
Soldada continuamente	-	25%	75%
Não soldada	50%	25%	25%

2.5 Defeitos em Trilhos

São três os principais e mais perigosos defeitos encontrados em trilhos ferroviários, defeitos de infância (aqueles oriundos do processo de fabricação ou instalação dos trilhos), desgaste e defeitos por fadiga. [16] Os defeitos de infância podem ser classificados como defeitos oriundos do processo de laminação sofrido pelos trilhos ou durante a sua instalação nas vias durante o processo de soldagem (como vazios e inclusões não metálicas).

O desgaste é um defeito bastante presente nos trilhos, com a passagem dos trens, ocorre uma remoção de material da região do boleto, o desgaste é maior quanto maior a frequência de tráfego na via ou quando se aumenta a carga transportada. O desgaste se dá principalmente durante as saídas e paradas dos trens pelos processos de tração e frenagem, em rampas e em curvas pelo deslizamento das rodas.

Juntamente com o desgaste, o defeito mais ocorrente nas ferrovias são as falhas por fadiga, que acontecem pela passagem de diversos trens durante um período de

tempo. Assim como em todos os componentes mecânicos sujeitos a esforços cíclicos, os trilhos sofrem falhas por fadiga. As falhas por fadiga são perigosas principalmente em ferrovias soldadas continuamente pois uma trinca pode propagar até mesmo por diversos metros podendo separar seções de trilhos e causar descarrilamentos.

São dois os principais tipos de falha por fadiga, a fadiga pelo contato roda-trilho que geralmente ocasiona na nucleação de uma trinca que se propaga transversalmente até a fratura total do trilho. E a nucleação de uma trinca que se propaga longitudinalmente causando a divisão do trilho em duas partes podendo a nucleação e propagação ocorrer tanto na alma quanto no boleto.

Pela atual situação das ferrovias, com a procura por maiores velocidades de transporte, maior capacidade de carga e uma maior quantidade de trens circulando, os defeitos por fadiga são os mais preocupantes em uma ferrovia continuamente soldada.

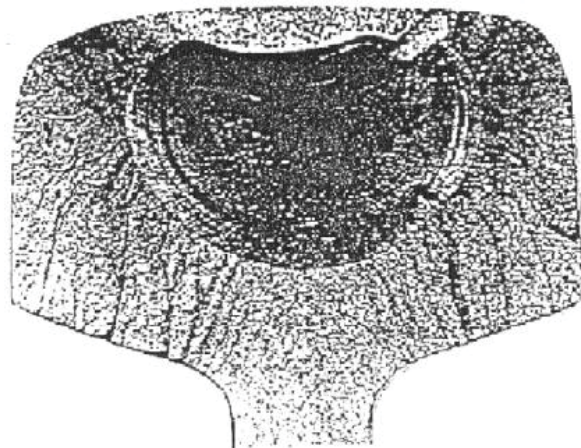
2.5.1 Falhas Transversais

O tipo de falha transversal mais comum são trincas que nucleiam por fadiga principalmente na região do boleto se propagando transversalmente, esta é uma falha perigosa porém muito comum em ferrovias. Estas trincas são detectadas pelo método do ultrassom e inspeções constantes devem ser feitas a fim de se detectar a tempo de prevenir a falha total do trilho que ocorre na passagem dos trens sobre a região trincada.

O processo de nucleação de trincas pode ocorrer por um alinhamento de inclusões decorrentes do processo de fabricação e/ou instalação dos trilhos ou por influência de tensões residuais. O primeiro mecanismo aparece quando do passar dos trens sobre os trilhos, estes deformam plasticamente, fazendo com que inclusões presentes na região do boleto fiquem cada vez mais próximas até que se alinham em uma superfície semi-elíptica que se torna o ponto de nucleação da trinca.

A partir da nucleação a trinca começa a se propagar na direção longitudinal aumentando a relação comprimento/altura da trinca. Essa relação vai ficando maior, chegando a um tamanho crítico onde a trinca chega a seu estágio final de propagação e chegamos à fratura final. O principal tipo de falha transversal é também conhecido como trinca do tipo feijão, já que o formato da região de propagação da trinca tem formato semelhante a um grão de feijão, mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Fratura por fadiga do tipo feijão. [17]



2.5.2. Falhas Longitudinais

As falhas longitudinais são as trincas que se propagam na horizontal e na vertical. No primeiro caso, a trinca geralmente nucleia na região do boleto, propagando na direção de tráfego e dividindo o trilho em duas partes formando uma espécie de degrau na superfície de rolagem dos trilhos, aumento o risco de descarrilamentos. Na Figura 16 temos um exemplo deste tipo de trinca dividindo um boleto, que necessita da substituição do trilho. Este tipo de falha também pode ocorrer na região da alma, como mostrado na Figura 17.

Figura 16 - Exemplos de trincas verticais no boleto. [18]

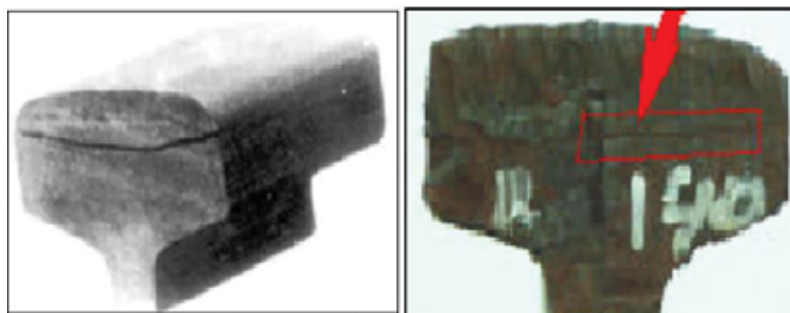


Figura 17 - Exemplo de trinca vertical na alma. [18]



O segundo tipo de trinca, a na horizontal tende a dividir uma das regiões do trilho em duas partes (dividindo o boleto ou a alma em duas partes) ou até mesmo dividir as regiões do trilho, separando boleto e alma por exemplo. Nos dois casos a substituição do trilho é necessária pelo alto risco de descarrilamento. No primeiro caso mostrado como exemplo na Figura 18 o caso mais comum é o de nucleação e propagação de trincas nos boletos podendo separá-lo em duas partes.

Figura 18 - Trinca horizontal no boleto. [18]



As trincas longitudinais horizontais na região da alma ocorrem com certa frequência em trilhos soldados por caldeamento apesar da alta integridade das juntas soldadas. As trincas desta configuração geralmente propagam paralelamente na horizontal e então, ao final do processo de fratura, se dirigem às regiões da base e do topo dos trilhos em um ângulo de 45° . A Figura 19 mostra uma ilustração do caminho da trinca e a Figura 20 mostra exemplos de trilhos fraturados desta maneira. Este tipo de falha pode ocorrer em uma sobrecarga, porém é mais frequente o caso de trincas por fadiga. [19]

Figura 19 - Modelo de propagação de trinca horizontal na alma. [19]

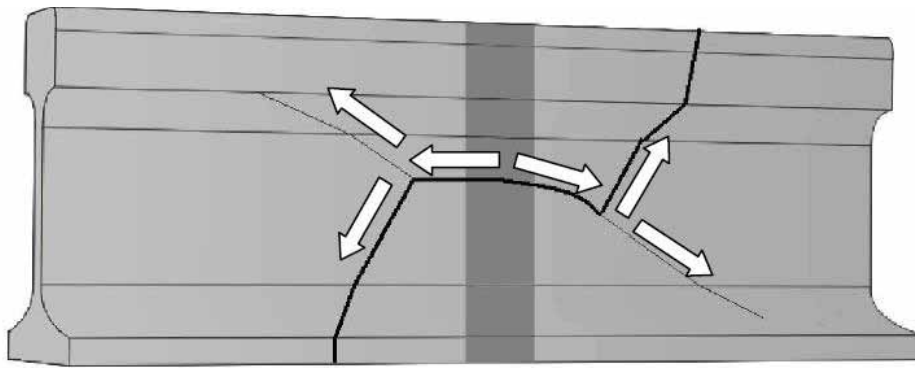


Figura 20 - Trincas horizontais na alma. [19]



2.6 Ensaio de Impacto Charpy Instrumentado

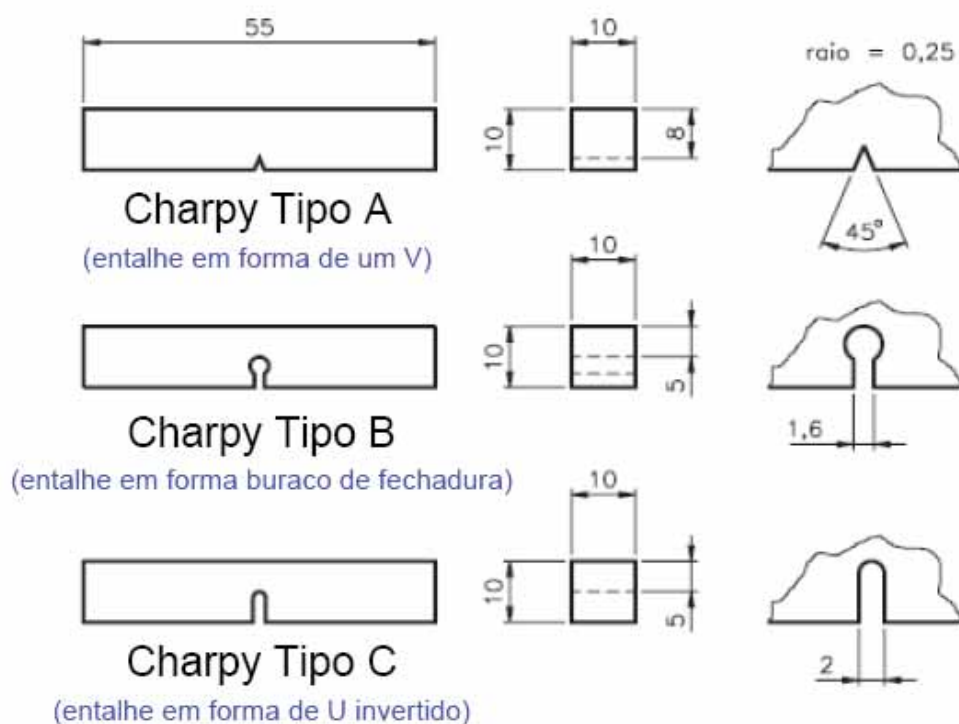
Dentre os ensaios tidos como tradicionais, ou seja, excluindo os da mecânica da fratura, a tenacidade é mais comumente medida sobre altas taxas de deformação, como num ensaio de impacto. [20]

Os ensaios de impacto também são utilizados para determinar a susceptibilidade de alguns materiais à fratura frágil tendo em vista as altas taxas de deformações envolvidas. [21] [22]

Nesse ensaio, um peso conhecido, caindo de uma altura e sob temperaturas conhecidas atinge em impacto um corpo de prova entalhado. [23] A temperatura do corpo-de-prova durante o ensaio afeta significativamente o resultado, pois em temperaturas mais baixas há uma tendência do material se comportar de uma forma mais frágil, para altas temperaturas de uma forma mais dúctil, porém esta influência tem maior ou menor grau entre os materiais e a transição entre comportamento dúctil e frágil para diferentes temperaturas ocorre de forma gradual para um mesmo material.

Os corpos-de-prova também são padronizados, sendo representados na Figura 21.

Figura 21 - Corpos-de-prova Charpy normalizado pela ASTM E-23. [22]



O ensaio Charpy tradicional fornece valores comparativos, como a temperatura de transição, que por sua vez vai depender da espessura do corpo-de-prova, por isso este possui medidas padronizadas. Além disso, o ensaio Charpy mede o valor da energia global (E_T), mas não fornece o valor da energia necessária para iniciar a trinca (E_i), nem para propagá-la (E_p) até que o corpo-de-prova frature.

Ao instrumentar a máquina de ensaio é possível registrar o sinal de células de carga (martelo e corpo-de-prova) com o auxílio de um osciloscópio, ao analisar a curva referente ao ensaio é possível obter informações sobre a carga no escoamento geral, na carga máxima e fratura, além de obter valores das energias E_i e E_p .

Tomando como base a curva registrada pelo osciloscópio e calculando o deslocamento é possível traçar uma curva da energia vs deslocamento.

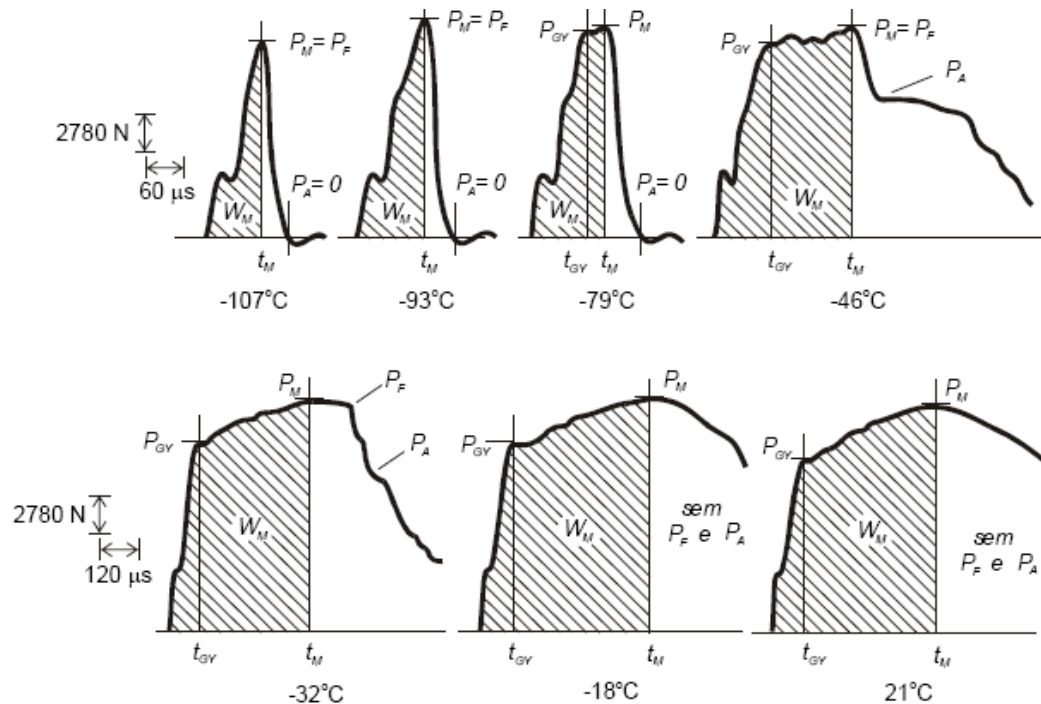
Portanto, o ensaio de impacto Charpy Instrumentado, mostra-se uma alternativa promissora, pois objetiva a caracterização precisa de um processo dinâmico de fratura. [24]

A Figura 22 esquematiza os resultados do ensaio Charpy Instrumentado e apresenta resultados tanto de força em função do tempo como a variação de tais parâmetros com a temperatura. Muitos outros dados podem ser obtidos e são

exemplificados a seguir. O valor da energia W_M é associado à área sob a curva força vs tempo até o carregamento máximo P_M .

Figura 22 - Resposta força vs tempo para um aço de média resistência mecânica.

Fonte: Shockley, 1995



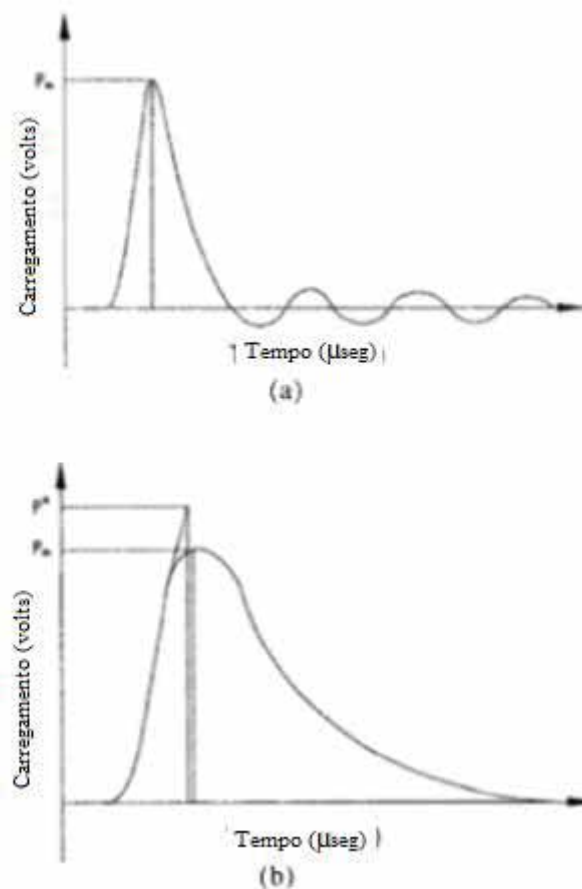
Este valor de impulso é convertido em energia aplicando a lei do movimento de Newton, que considera a velocidade do pêndulo decrescente durante o processo de deformação e fratura.

Esta velocidade decrescente é proporcional à força instantânea aplicada no corpo de prova em qualquer tempo particular t_i . [25]

As aplicações do Ensaio de Impacto Charpy Instrumentado para medir K_{ID} de vários materiais frágeis são raras, pois: é relativamente difícil determinar o a força precisa de início de fratura devido aos efeitos inerciais pronunciados na carga total. [26]

A típica curva de impacto força-tempo obtida no ensaio Charpy Instrumentado é mostrada na Figura 23. Nela, a força cresce linearmente até que a força máxima é alcançada onde a fratura aparenta ser iniciada.

Figura 23 - Curva típica força(volt)-tempo(μ sec) obtidas no Ensaio Charpy Instrumentado.



Nos últimos anos, o ensaio Charpy Instrumentado tem ganhado a confiança de pesquisadores que têm o utilizado como meio para determinar a energia líquida de impacto ou a tenacidade à fratura dinâmica de alguns materiais.

2.7 Fadiga

O conceito de falha por fadiga nasceu em meados do século XIX quando na Inglaterra em pleno auge da revolução industrial falhas em ferrovias e em outros setores industriais começaram a surgir mesmo com componentes trabalhando a tensões menores do que as projetadas. Esse aspecto de tensões consideradas pequenas e que não ocasionariam em falhas levou os engenheiros e pesquisadores da época a questionarem diversos aspectos da metodologia de projeto da época.

Uma observação da época era que as falhas em diversos componentes eram ocasionadas por esforços cíclicos, o estudioso alemão August Wöhler (1819 – 1914) foi um dos pioneiros em estudos sobre fadiga e ele idealizou as curvas que hoje são

utilizadas para estudo de fadiga chamadas curvas S-N que são mostradas na figura 24 com as duas curvas mostrando ligas ferrosas ou não-ferrosas.

O estudo da fadiga pode ser dividido em três diferentes situações:

A) Fadiga de alto ciclo: No caso de tensão nominal de operação do componente menor do que o limite de escoamento do material e o número de ciclos do material até a sua ruptura sendo maior do que 1.000.000;

B) Fadiga em baixo ciclo: Neste caso temos a tensão nominal maior que o limite de escoamento e o número de ciclos sendo menor que 1.000.000 ciclos, neste caso altas deformações são observadas e;

C) Propagação de trinca por fadiga: Agora, a metodologia da mecânica da fratura entra em cena e a curva característica deixa de ser a S-N da Figura 24 e passa a ser a curva de taxa de propagação de trinca da/dN e taxa de intensificação de tensão ΔK mostrada na Figura 25.

Figura 24 - Curvas S-N. [27]

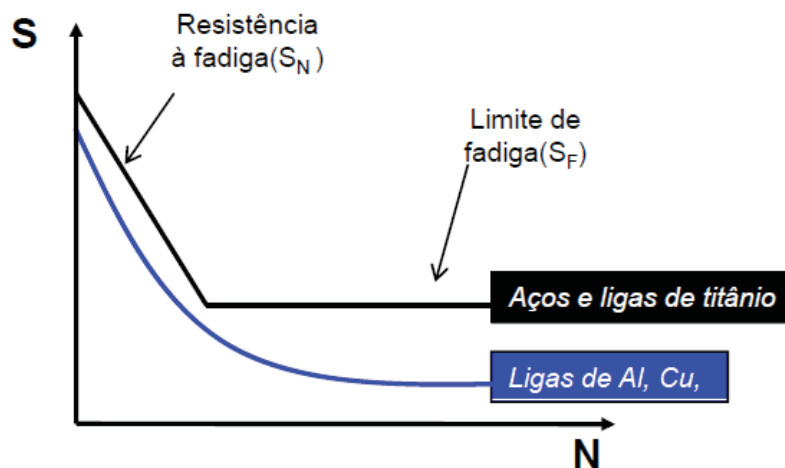
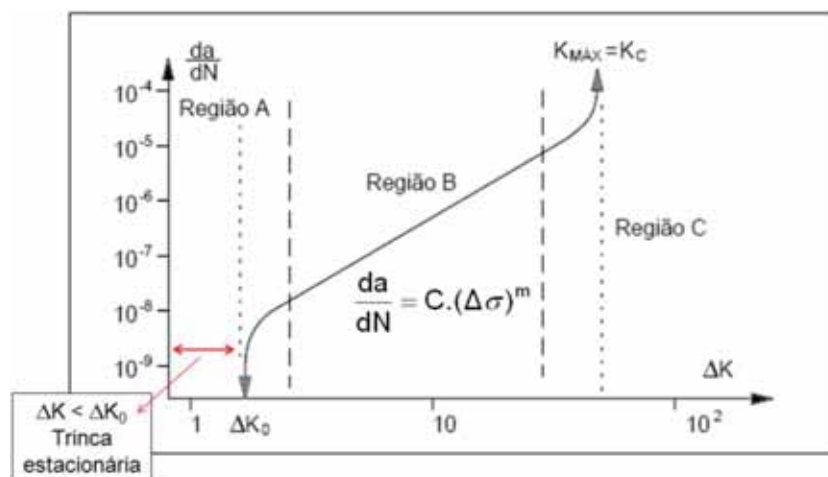


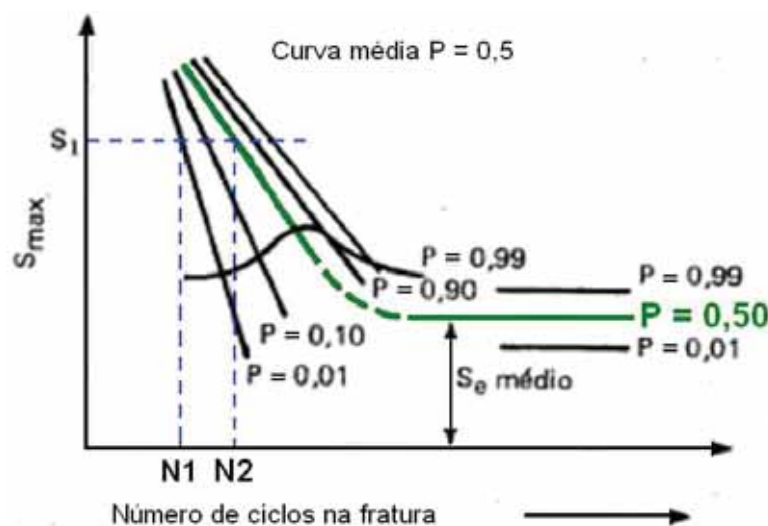
Figura 25 - Curva característica da/dN - ΔK . [27]



No gráfico da Figura 24 pode-se observar que para ligas de aço e de titânio duas regiões se observam uma de alta tensão, mas de baixa vida (Resistência à Fadiga S_N) e uma região de tensão baixa e de alta vida (Limite de Fadiga S_F) onde supostamente o material teria vida infinita. Essas regiões são as duas utilizadas para o projeto com base na vida a fadiga.

A curva S-N é uma curva que requer um grande tempo para ser construída e por isso é baseada em dados estatísticos já que o tempo de ensaio pode chegar à diversas horas por corpos de prova, métodos analíticos ou teóricos para a obtenção desta curva são mais utilizados. A Figura 26 mostra esta natureza estatística da curva S-N, com a curva média em destaque, onde para um tensionamento S_1 a N_1 ciclos 1% dos corpos de prova falhariam por fadiga e para N_2 50% dos corpos de prova falhariam por fadiga.

Figura 26 - Natureza estatística da fadiga. [27]



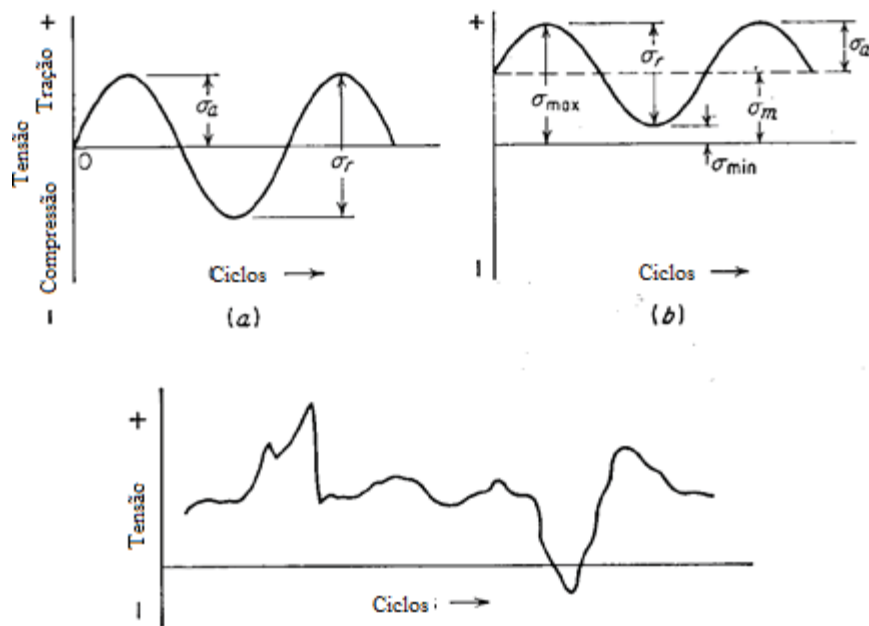
Atualmente estima-se que mais de 90% das falhas em componentes mecânicos ocorram de falhas por fadiga já que automóveis, aeronaves, compressores, bombas entre outros equipamentos estão sempre submetidos a carregamentos repetidos e vibrações. A falha por fadiga ocorre sem dar aviso prévio, o que a torna perigosa. O resultado de uma falha por fadiga é uma fratura de aparência frágil, sem grandes deformações na fratura. [21]

A falha por fadiga precisa que 3 fatores básicos estejam presentes simultaneamente para ocorrer, tensões cíclicas ou variáveis, deformações plásticas e tensões normais de tração. Ainda existem diversos fatores externos como fatores ambientais (temperatura, corrosão, oxidação, radiação), aspectos relacionados ao

material (tipo de material, subestrutura, condições microestruturais e metalúrgicas do material e a macroestrutura e geometria) e o ciclo de tensões.

Existem três tipos principais de ciclo de tensões exemplificados na Figura 27 [21] abaixo. A Figura 27-a mostra um ciclo de tensões reversas senoidais solicitando por flexão um corpo de prova, que exemplifica o funcionamento de um eixo rotativo por exemplo. A Figura 27-b ilustra um ciclo de tensão repetitivo onde não se tem inversão de tensão e por fim, a Figura 27-c mostra um ciclo de tensões irregular ou aleatório.

Figura 27 - Ciclos de tensões existentes. a) reversas, b) repetitivas e c) aleatórias. [27]



2.7.1 Características Estruturais da Fadiga

A fadiga foi um fenômeno muito estudado e após vários estudos o mesmo foi definido como tendo 4 estágios [21]:

1 – Iniciação da trinca: começa o processo de nucleação da trinca e o desenvolvimento inicial dos danos causados pelos carregamentos cíclicos que podem ser removidos por tratamentos térmicos;

2 – Crescimento da trinca em bandas de deslizamento: crescimento da trinca nucleada nos planos com altas tensões tangenciais ou de cisalhamento, com este estágio

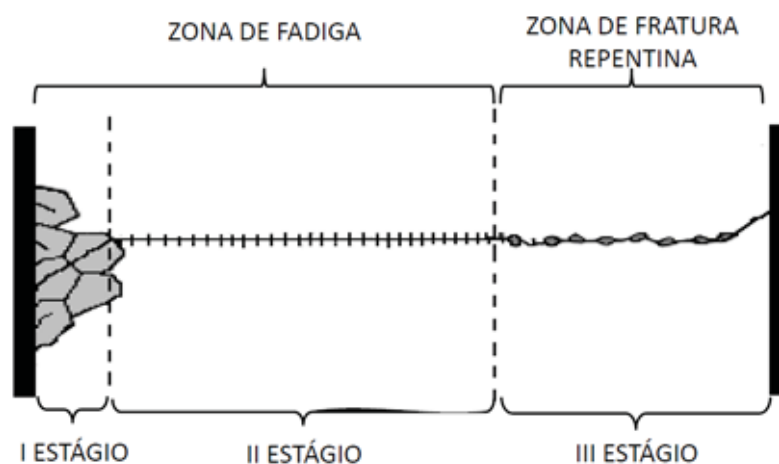
em conjunto com o primeiro estágio também chamado de estágio I do crescimento da trinca de fadiga;

3 – Crescimento da trinca em planos preferenciais: ocorre o crescimento de uma trinca bem definida na direção normal máxima perpendicular a tensão principal σ_1 , este estágio também é conhecido como estágio II do crescimento da trinca de fadiga e;

4 – Ruptura final: ocorre quando a trinca alcança um tamanho crítico tal que a seção restante do componente não consegue sustentar e rompe totalmente, este conhecido como estágio III do crescimento da trinca de fadiga.

Os dois primeiros estágios da fadiga ou estágio I do crescimento da trinca de fadiga é aquele que consome o maior tempo do processo de fratura por fadiga de alto ciclo, cerca de 90% do tempo da fratura. No caso de fratura de baixo ciclo, como temos maiores tensões envolvidas pode ser muito rápido ou pode nem mesmo ser observado. O processo da nucleação de trincas por fadiga está mostrado na Figura 28.

Figura 28 - Propagação de trinca por fadiga. [27]



No estágio I da propagação da trinca por fadiga, a trinca se propaga de maneira transgranular pelo estado de tensões predominante, porém, em algumas situações em que existem fragilizações metalúrgicas a trinca pode se propagar pelos contornos de grão.

Uma vez passado o estágio I da propagação da trinca por fadiga e alcançado o estágio II a maneira da propagação da trinca muda e aparece uma característica marcante que são estrias de fadiga. Essas estrias nem sempre são visíveis, porém se existem marcas de praia se tem a certeza que a falha foi por fadiga. Cada estria

representa a posição que a trinca alcançou em um plano normal ao da máxima tensão de tração após um ciclo de tensão.

2.7.2 Influências Metalúrgicas na Fadiga

É comum se associar o valor do limite de fadiga dos materiais com outras propriedades mecânicas como o limite de resistência à tração e a dureza Vickers como exemplos. Apesar de existirem tabelas que relacionam as propriedades para cada material é mais usual no caso do limite de resistência à tração se usar as equações (2.5.2.1) e (2.5.2.2) para encontrar o limite de fadiga de aços trabalhados e fundidos.

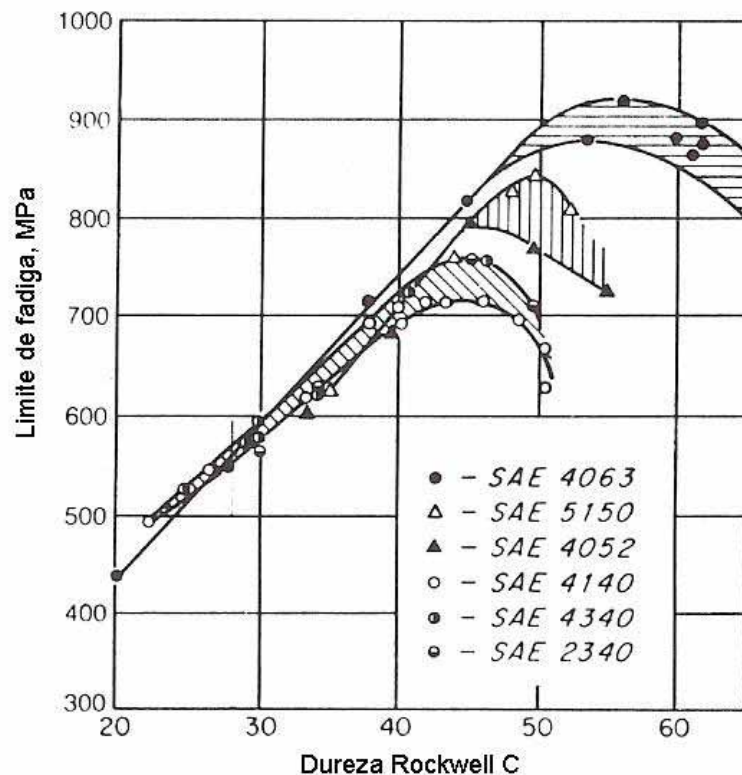
$$S'_f = 0,5 \cdot \sigma_t \text{ para aços com } \sigma_t \leq 1.400 \text{ MPa} \quad (2.1)$$

$$S'_f = 700 \text{ Mpa para aços com } \sigma_t > 1.400 \text{ MPa} \quad (2.2)$$

nas quais S'_f é o limite de fadiga de um corpo de prova de fadiga liso e polido do ensaio de barreta rotativa e σ_t o limite de resistência à tração encontrado em um ensaio de tração convencional.

Pelas equações observa-se que o limite de fadiga aumenta juntamente com o limite de resistência à tração, o que não acontece quando a dureza dos materiais aumenta o que pode diminuir o limite de resistência à fadiga como visto na Figura 29 abaixo [21].

Figura 29 - Relação limite de fadiga x dureza Rockwell C. [21]



Pode-se relacionar os efeitos de diversos aspectos metalúrgicos com as propriedades de fadiga e tração segundo Dieter (1988). Em aços com o mesmo limite de resistência a tração estruturas perlíticas tendem a ter menor limite de fadiga que estruturas esferoidizadas o que pode ser explicado pelas lamelas de cementita exercerem efeito de entalhe. Microestruturas temperadas e revenidas de aços de baixa liga geralmente resultam em ótimas propriedades de fadiga. O limite de fadiga dos aços na direção transversal tende a ser menor que o limite medido na direção longitudinal com as falhas de fadiga em corpos de prova transversais geralmente nucleando-se em inclusões não-metálicas. Deformações plásticas homogêneas tendem a dificultar a formação de extrusões e intrusões e o tamanho de grão influencia diretamente na vida em fadiga dos materiais com tamanhos de grão menores tendo melhores propriedades de fadiga.

2.7.3 Fadiga de Alto Ciclo

A fadiga de alto ciclo teve início com os estudos de August Wöhler (1819 – 1914) que propôs e realizou experimentos por 12 anos criando as curvas S-N que são conhecidas como curvas de Wöhler.

2.7.3.1 Ensaios de Fadiga

Os ensaios de fadiga podem ser realizados na peça desejada já finalizada quando possível (eixos, trilhos) sendo assim possível se aproximar mais dos esforços e situações encontradas em serviço. Porém, na maioria das vezes isso não é possível pela necessidade de máquinas muito específicas e sendo assim, na maioria das vezes são utilizados corpos de prova usinados para a realização dos ensaios de fadiga.

Existem vários tipos de ensaios utilizados para a determinação das propriedades em fadiga dos materiais sendo os mais importantes o ensaio de barreta rotativa com o corpo de prova fixado em apenas uma extremidade, o de barreta rotativa com o corpo de prova fixado nas duas extremidades, o de tração-compressão, o de tração-tração com várias razões de carga e o de torção cíclica.

2.7.3.2 Métodos de Determinação do limite de Fadiga

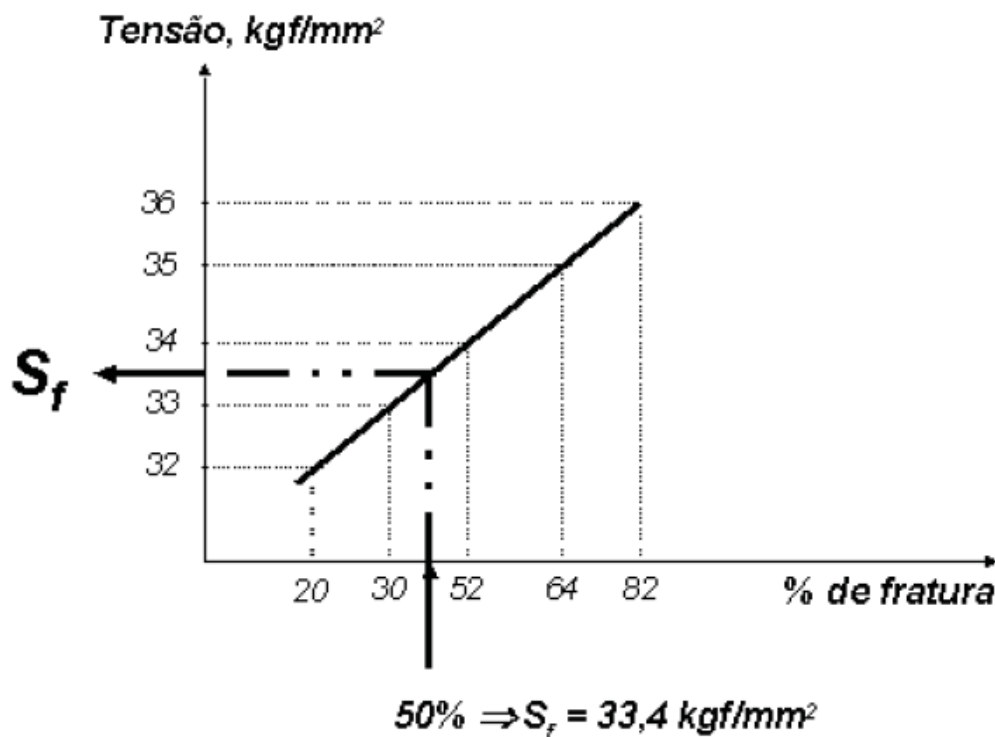
Existem dois métodos de obtenção do limite de fadiga dos materiais, métodos de longa duração e métodos estatísticos. Os métodos de longa duração são realizados por meio de ensaios com vários níveis de tensões decrescentes e geralmente são realizados para a obtenção da curva S-N. Os ensaios são geralmente dependentes de longo tempo de realização e, na prática, são necessários pelo menos 30 corpos de prova para cada nível de tensão. Com essas dificuldades os métodos estatísticos por utilizarem um número menor de corpos de prova são mais recomendáveis.

Os métodos de longa duração são bastante dispendiosos requerendo muito tempo e material para serem realizados, tendo em vista que para se ter uma grande precisão nos resultados destes ensaios pelo menos 1.000 corpos de prova para cada nível de tensão sejam utilizados. Por este motivo atualmente estes ensaios estão deixando de ser utilizados.

Os métodos estatísticos mais utilizados são o método da escada e o método probit e são mais recomendáveis por utilizar menos corpos de prova para chegar aos resultados desejados. O método probit foi desenvolvido por Finney em 1952 e o número de corpos de prova deve ser preferencialmente entre 150 e 200 corpos porém, geralmente se utilizam 80 corpos de prova. Os corpos de prova serão ensaiados em 4 ou 5 níveis de tensão sendo estes escolhidos de maneira a conter o limite de fadiga do material ensaiado.

O método consiste em se determinar a porcentagem de corpos de prova que romperam até um número de ciclos convencional e após a realização dos ensaios a tensão correspondente à 50% de probabilidade de fratura é a tensão limite de fadiga do material. A Figura 30 mostra um resultado referente ao método probit, com a tensão com 50% probabilidade de fratura sendo a escolhida como o limite de fadiga.

Figura 30 - Curva obtida pelo método probit.[27]

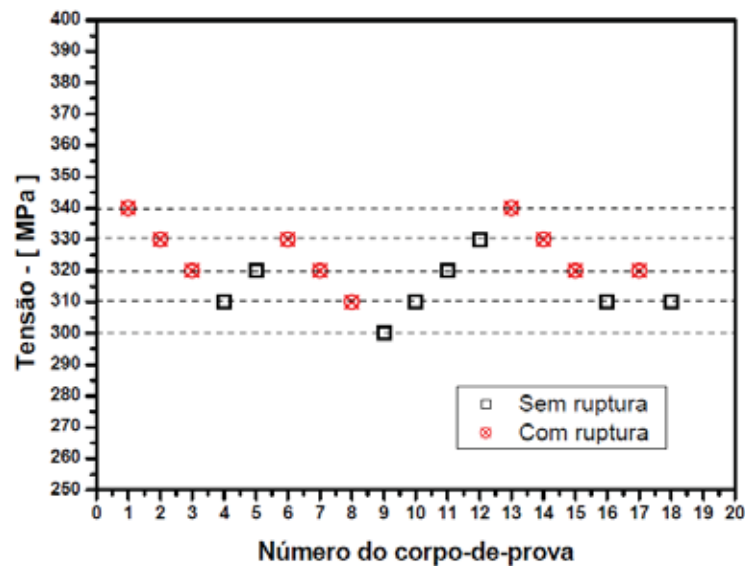


O método da escada foi desenvolvido em 1948 por Dixon e Mood e foi realizado com a idéia de utilizar um número menor de corpos de prova. O método parte de um valor estimado de limite de fadiga como sendo aproximadamente 50% do valor do limite de resistência à tração.

Após decidido o valor limite escolhido, o método consiste em ensaiar-se o 1º corpo de prova com o limite estimado, a segunda etapa consiste em se aumentar ou diminuir a tensão realizando um “degrau” da escada. Na primeira etapa, se o corpo de prova não romper aumenta-se a tensão em um $\Delta\sigma$ fixo, do contrário, diminui-se a tensão. Após a segunda etapa, se o 2º corpo de prova romper com menos de 10^7 ciclos se diminui o valor da tensão novamente. Com os resultados dos ensaios se obtém uma curva semelhante à da Figura 31.

O procedimento do ensaio deve ser realizado até se atingir 18 corpos de prova ensaiados, variando-se a tensão de ensaio de acordo com os critérios anteriores. Com as equações (2.3) e (2.4) é possível calcular o valor do limite de fadiga médio e o desvio padrão do mesmo.

Figura 31 - Curva obtida após realização do método da escada.



$$\overline{S_f} = S_0 + d \cdot \left(\frac{A}{N} \pm \frac{1}{2} \right) \quad (2.3)$$

$$\delta = 1,620 \cdot d \cdot \left(\frac{N \cdot B - A^2}{N^2} + 0,029 \right) \quad (2.4)$$

$$\text{para } \frac{N \cdot B - A^2}{N} > 0,3, A = \sum i \cdot n_i \text{ e } B = \sum i^2 \cdot n_i$$

sendo

S_0 – Menor tensão do ensaio;

d – Valor da “escada” sendo incremento ou decrescimento;

N – Número de corpos de prova que não romperam;

i – Número de corpos de prova que não romperam para uma dada tensão e ;

n_i – Número de corpos de prova que romperam para uma dada tensão.

Na equação (2.3) o sinal de + é utilizado quando o número de corpos de prova considerados não rompidos é maior e o sinal de – quando o número de corpos de prova considerados rompidos for maior. O método da escada leva a valores com boa estimativa do limite de fadiga, porém, o método probit se mostra mais preciso por utilizar um número maior de corpos de prova.

No ensaio de fadiga com o corpo de prova apoiado em quatro pontos o momento fletor é dado pela equação (2.5):

$$M_b = \frac{PL}{2} \quad (2.5)$$

com P sendo a carga aplicada no ensaio e L a distância entre os dois apoios do corpo de prova.

A tensão de flexão é dada pela relação entre o momento e o módulo de resistência W .

$$S_b = \frac{M_b}{W} \quad (2.6)$$

Para uma seção circular o módulo de resistência se torna:

$$W = \frac{\pi d^3}{32} \quad (2.7)$$

Aplicando-se na equação da tensão e ajustando a mesma, temos:

$$S_b = \frac{32PL}{2\pi d^3} \quad (2.8)$$

2.7.4 Fadiga em Trilhos

Os defeitos de fadiga tendem a demorar algumas passagens dos trens para aparecerem trincas com comprimento crítico detectável pelos processos de detecção utilizados em campo. Os defeitos de fadiga com maior incidência são as trincas transversais e as escamações horizontais e ocorrem geralmente em ferrovias de via contínua com elevadas carga por eixo e tonelagem bruta anual. [28]

Os defeitos de fadiga principais citados possuem a mesma origem com uma mudança apenas no plano de propagação da trinca e o local de nucleação dos defeitos está diretamente relacionada a dois mecanismos, tensões residuais trativas e presença de inclusões não metálicas. [29]

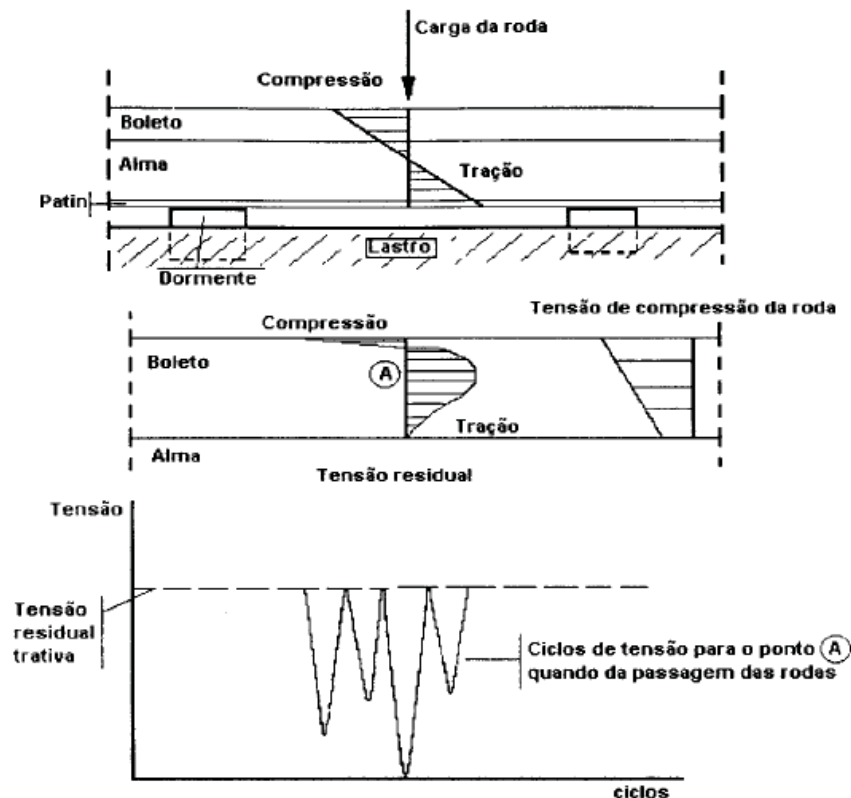
Os defeitos transversais por fadiga em trilhos são perigosos porém frequentes e de fácil detecção pelos processos de inspeção utilizados. A detecção destes defeitos ocorre mesmo quando o comprimento da trinca ainda é pequeno, por volta de 10 mm porém, pela dificuldade de estimativa do tempo de propagação da trinca, estes trilhos defeituosos são substituídos.

A ocorrência de tensões residuais trativas leva à nucleação de trincas, o efeito cíclico do carregamento sofrido pelos trilhos com a indesejável presença de inclusões em aços de alta resistência é muito maléfica. Os defeitos transversais tem como ponto de nucleação um ponto específico do boleto, sendo que um dos dois mecanismos de nucleação, por inclusões ou tensões trativas, pode se encontrado com o primeiro ficando cada vez mais difícil de ser encontrado pela melhora nos processos de fabricação dos trilhos e na qualidade dos processos de soldagem.

As tensões trativas existentes e que justificariam a nucleação de uma trinca são tensões estáticas da própria linha ou de tensões residuais provocadas pela deformação do boleto oriunda do contato roda-trilho. Apesar de não serem tensões cíclicas, estas tensões se tornam cíclicas pelo comportamento de flexão do trilho pela passagem dos trens que provoca um estado de compressão no boleto, que tende a anular as tensões longitudinais trativas a cada passagem de uma roda o que propicia condições para ocorrer a nucleação e propagação de trincas por fadiga.

Como o estado de tensões predominante no boleto é de compressão, é estranha a nucleação de trincas no boleto, também pelo fato de no patim surgirem as tensões de tração quando da passagem das rodas. Quando da passagem das rodas sobre os trilhos os mesmos se comportam como uma viga biapoiada com tensões trativas no patim e compressivas no boleto como mostrado na Figura 32. Porém, em ferrovias soldadas continuamente são transportadas altas cargas que associadas ao efeito dinâmico da velocidade dos trens que podem gerar deformações na superfície do boleto.

Figura 32 - Esquema de tensões em um trilho. [28]



Com o esmagamento da parte superior do boleto com uma deformação plástica, a camada logo abaixo da deformação permanece no estado elástico, esta configuração faz com que a camada elástica atue forçando a camada deformada a retornar ao seu estado de equilíbrio, exercendo tensões compressivas na camada deformada. Por outro lado, a região plástica irá se sujeitar a tensões trativas para poder voltar para seu estado de equilíbrio e será impedida pela região deformada.

As tensões que aparecem devido a este mecanismo são chamadas tensões residuais devido ao contato roda-trilho e podem variar de magnitude e localização dependendo da carga, área de contato e da região onde são aplicadas. As tensões trativas que aparecem na região elástica do boleto aliadas às tensões de compressão de contato geram um ciclo de tensões que se torna básico para a nucleação de um defeito por fadiga.

A ocorrência de inclusões não metálicas pode ser um agravante na nucleação de trincas por fadiga já que pela deformação do boleto podem se alinhar inclusões e uma trinca nuclear em conjunto com o estado cíclico de tensões.

As trincas por fadiga não nucleiam logo na superfície como já mencionado, mas em uma região subsuperficial, onde o estado de tensões trativas aparece. As Figuras 33

e 34 simulam essa condição, com a nucleação da trinca ocorrendo em uma região central do boleto, logo abaixo da região de tensões compressivas. Além desta condição, temos também a variação do ponto de nucleação de trincas no boleto em curvas, onde o estado de tensões muda, simulado nas Figuras 35 e 36 onde a nucleação se dá em uma região deslocada do centro do boleto.

Figura 33 - Estado de tensões da região soldada do trilho em linha reta. [30]

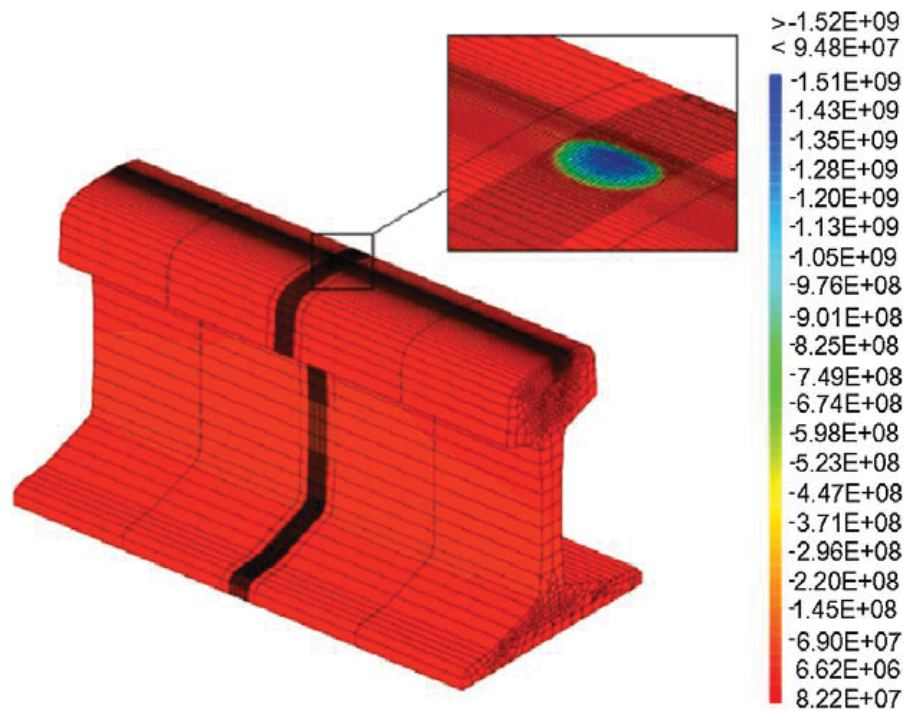


Figura 34 - Nucleação de trinca na região soldada do trilho em linha reta. [30]

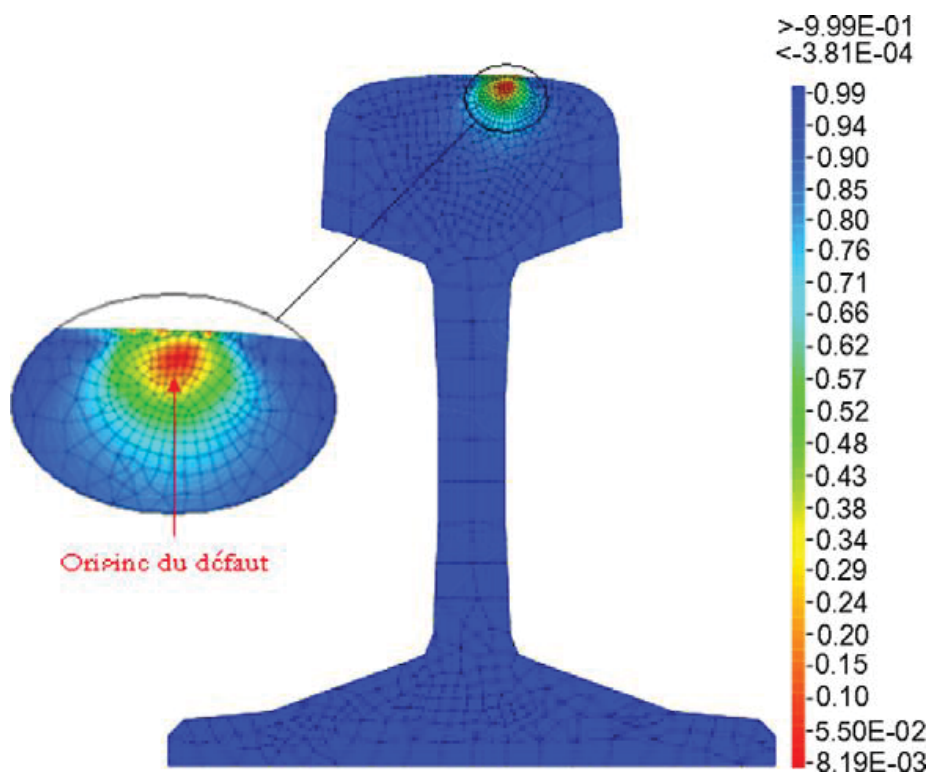


Figura 35 - Estado de tensões da região soldada do trilho em curva. [30]

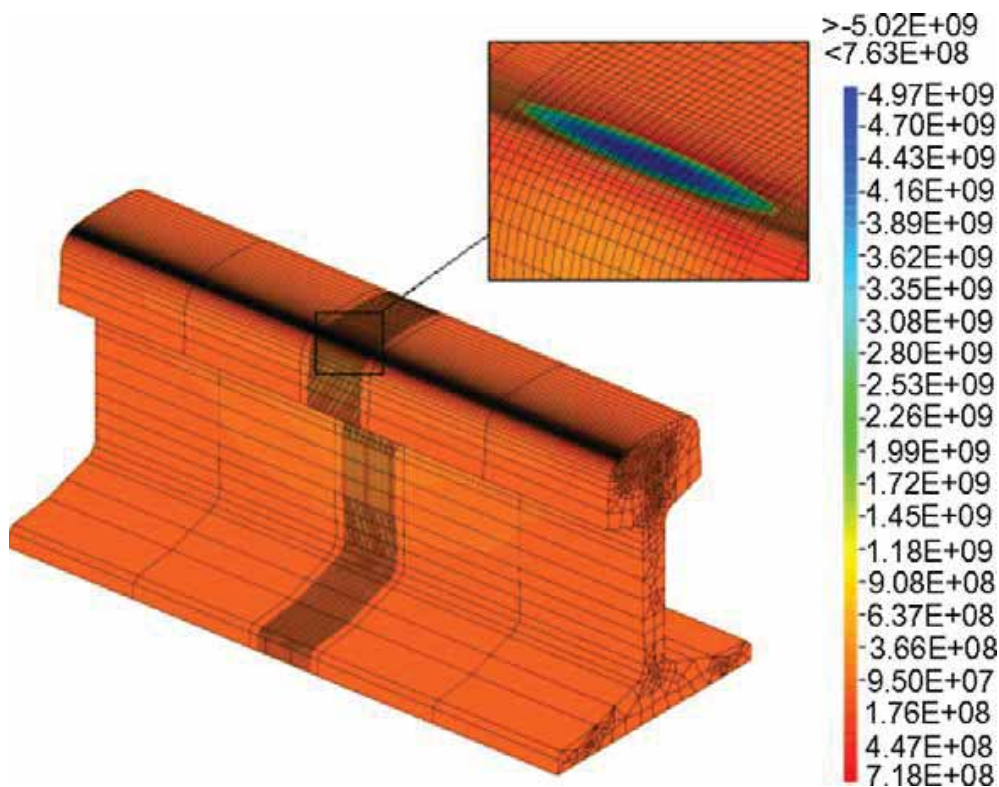
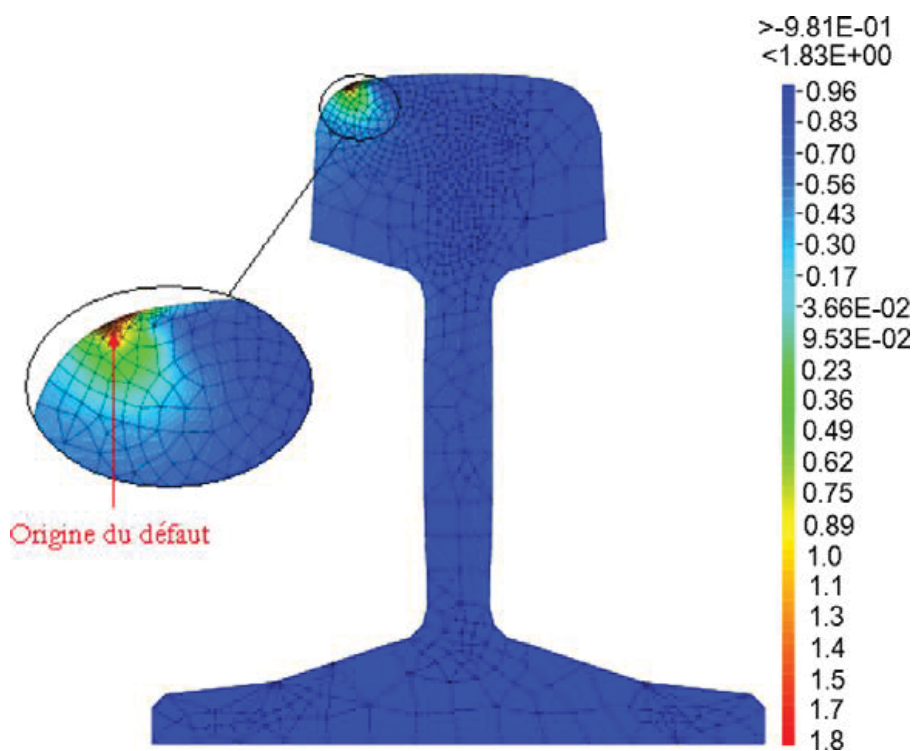


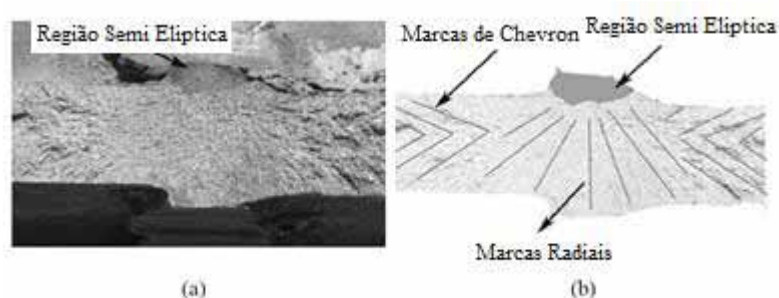
Figura 36 - Nucleação de trinca na região soldada do trilho em curva. [30]



As falhas longitudinais por fadiga ocorrem em sua maioria como trincas nucleadas na região soldada da alma próxima ao boleto, região com altas tensões

residuais de tração. A trinca geralmente é nucleada em uma região semi elíptica de morfologia suave, e que pode nuclear no interior do trilho ou, em alguns casos, na região de rebarba da soldagem por caldeamento. As trincas longitudinais tendem a se propagar na longitudinal até atingirem seu comprimento crítico, quando a trinca muda sua direção de propagação em um ângulo de 45° em direção ao boleto e ao patim, como na Figura 19. As Figuras 37 a e b mostram a morfologia de uma falha por fadiga longitudinal na alma e um desenho esquemático com as estruturas radiais e de catraca sendo mostradas. [19]

Figura 37 - Morfologia de falha por fadiga a) Fotografia MEV e b) desenho esquemático. [19]



2.8 Mecânica da Fratura

A evolução da metodologia de projeto começou com métodos de tentativa e erro e, com a racionalização dos projetos surgiu a resistência dos materiais que por muitos anos foi a única metodologia de projetos utilizada. Com o surgimento de acidentes principalmente no meio ferroviário mesmo quando componentes eram utilizados a tensões muito menores do que as que eram projetados surgiu a dúvida sobre a aplicabilidade da resistência dos materiais. Longas discussões ocorreram com adaptações criadas à metodologia da época para sanar esses problemas.

A aplicação de melhorias na teoria da resistência dos materiais não foi suficiente para acabar com os acidentes e somente com o entendimento da presença de trincas nos materiais, a mecânica da fratura começou a surgir. A mecânica da fratura como é entendida surgiu apenas em 1920 com os estudos de Griffith sobre o processo de fratura frágil de alguns materiais como o vidro [31].

Griffith propôs a ideia de que a resistência ao crescimento de uma trinca estaria relacionada com a quantidade de energia superficial para a formação de uma nova

superfície de trinca. Com essa relação e com auxílio de um balanço energético utilizando a segunda lei da termodinâmica Griffith estabeleceu um critério de fratura quantitativo para os sólidos.

Apesar dos avanços que a teoria de Griffith proporcionou no estudo da fratura dos materiais, os estudos em relação à fratura dos materiais se limitavam a trabalhos acadêmicos. Um dos motivos dessa limitação de estudos se deve a não aplicabilidade da teoria para os metais tendo em vista que os mesmos sempre sofrem alguma deformação plástica antes de fraturar mesmo que muito pequena.

A mecânica da fratura encontra uma aplicação mais clara e industrial na Segunda Guerra Mundial, quando uma série de navios da marinha dos Estados Unidos denominada série Liberty. Os navios da série Liberty eram navios com o casco inteiramente soldado e que surgiam como grandes projetos de navios principalmente para carga. A ocorrência de diversas falhas em navios da série em mares turbulentos ou até mesmo quando ancorados levou a um questionamento na metodologia de projeto e nos processos de soldagem da época.

O problema da falha dos navios Liberty era o fato de os navios serem fabricados com aços de alta ductilidade, porém fraturavam com escoamento plástico muito pequeno. A maior parte das falhas ocorreu em mares gelados e assustavam pois ocorriam até mesmo em navios ancorados, ou seja, sem nenhum esforço externo inesperado como mostrado na Figura 38. As várias falhas ocorridas na Segunda Guerra colocaram o estudo da fratura novamente no mapa e diversos estudos eram realizados pelos cientistas aliados.

Figura 38 - Fratura navio Liberty.



Estudos para a aplicação da teoria de Griffith para os metais eram realizados e dois pesquisadores em diferentes trabalhos a entenderem que a equação de balanço de energia de Griffith precisava ser modificada para servir também aos metais. Com isso a mecânica da fratura se encaixou no perfil necessário para o estudo dos metais e se tornou uma metodologia de projeto muito eficiente, utilizada até os dias de hoje.

No início a mecânica da fratura foi utilizada apenas para suprir os defeitos que a teoria de falha existente na época tinha. Mas, ao longo dos anos, várias aplicações apareceram sendo as principais, sendo as duas primeiras as mais utilizadas para projetos:

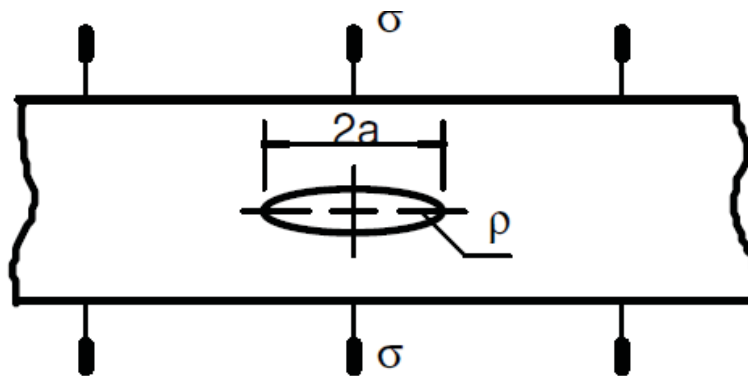
- Mecânica da Fratura Elástica Linear (MFLE) – que trata de fraturas com escoamento em pequena escala;
- Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP) – que trata de fraturas precedidas de deformação elasto-plástica;
- Mecânica da Fratura Inelástica – fraturas dependentes do tempo;
- Mecânica da Fratura de Compósitos – fratura de materiais heterogêneos e;
- Mecânica da Fratura Dinâmica – fratura sob carregamentos dinâmicos.

2.8.1 Mecânica da Fratura Elástica Linear

A existência de uma trinca em um corpo que sofre solicitações uniaxiais leva à concentração de tensões e à formação de estados triaxiais de tensões na região da ponta de trinca. Na maioria dos materiais a resistência mecânica está relacionada às forças de coesão entre os átomos e, devido a simplificações a resistência teórica de coesão dos materiais é a relação entre a força e a unidade de área necessária para a separação atômica. Na prática este valor é muito maior que os valores de resistências dos materiais devido a escoamentos a baixos níveis de tensões ou pela propagação de trincas que podem ocorrer em pequenos defeitos.

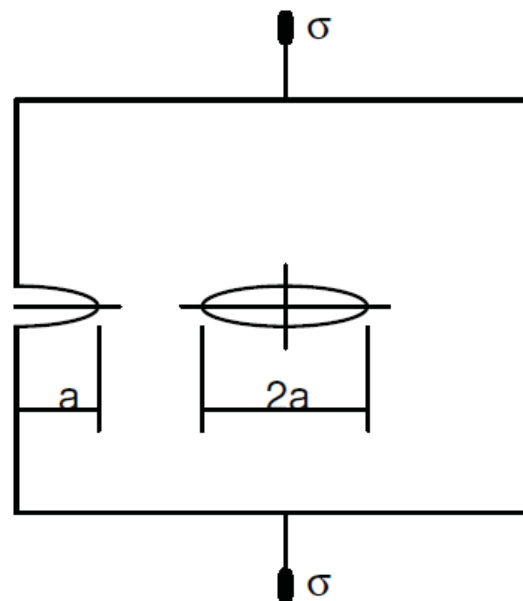
Inglis determinou em 1913 o modelo de trinca mostrado na Figura 39 e definiu que quando a tensão da ponta da trinca atinge o valor da tensão de resistência teórica ocorre uma fratura frágil, entretanto, afirmação tem uma inconsistência, a equação que estabelece a concentração de tensão foi obtida com base no comportamento elástico linear e a resistência de coesão teórica baseia-se em uma relação senoidal que considera a força e o espaçamento atômico. Inconsistência esta que foi evitada por Griffith pois sua aproximação se baseia em aproximações termodinâmicas.

Figura 39 - Trinca elíptica proposta por Inglis. [32]



A proposição de Griffith diz que os materiais frágeis contém uma família de pequenas trincas, que produzem uma concentração de tensão que atinge a resistência de coesão. O modelo de trinca de Griffith propõe que a trinca tem uma seção transversal elíptica com uma trinca no interior de uma chapa tem comprimento $2a$ e na extremidade a como mostra a Figura 40.

Figura 40 - Modelo de trinca de Griffith. [32]



Griffith estabeleceu que o critério para a propagação de trinca era que a mesma se propagará quando a diminuição da energia de deformação elástica é pelo menos igual à energia requerida para criar a nova superfície de trinca.

A equação de Griffith se aplica apenas a materiais frágeis já que para esses casos o comprimento de trincas é pequeno, já para materiais dúcteis, o comprimento de trinca fica maior que a espessura da chapa.

Como se sabe que mesmo materiais com fratura predominantemente frágeis sofrem alguma deformação plástica antes de fraturarem, a teoria de Griffith não se aplica aos metais. Orowan [33] propôs que a equação de Griffith seria aplicável a metais frágeis pela inclusão de um termo expressando o trabalho plástico necessário para estender a trinca.

Irwin propôs que era necessário uma quantidade crítica de energia para criar uma área adicional da superfície da trinca e que esta seria determinada para um material específico em um ensaio de fratura. Com isso poder-se-ia fazer previsões sobre a propagação ou não de uma trinca pela comparação de energia dissipada quando uma trinca se propaga sob um nível de tensão especificado.

Irwin definiu por meio de uma análise de tensões na ponta da trinca que as tensões locais dependem de um produto entre a tensão nominal σ e da raiz quadrada da metade do comprimento da trinca. Com base nesta análise definiu-se o fator intensificador de tensão K para uma trinca elástica em uma chapa de largura infinita:

$$K = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (2.9)$$

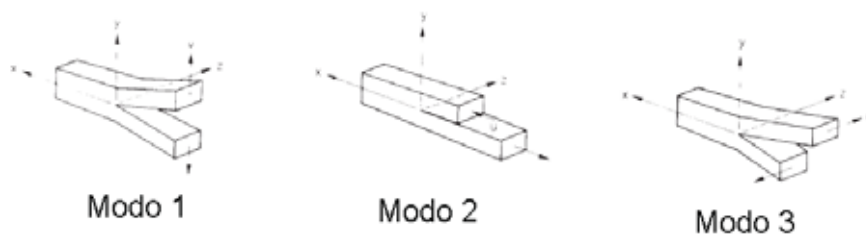
onde a é a metade do comprimento da trinca localizada no interior da chapa.

Apesar da força de extensão da trinca ter um significado físico maior, o fator de intensidade de tensão é mais utilizado por ser mais facilmente tratado analiticamente e por já existirem livros, normas e outras referências que fornecem K para várias configurações geométricas de trinca e de corpos de prova.

2.8.1.1 Distribuição de Tensões em Corpos Trincados

Existem três modos diferentes de solicitação de uma trinca. A Figura 41 mostra os 3 modos, sendo o modo 1 com uma tensão perpendicular à superfície da trinca, o modo 2 tem uma tensão de cisalhamento perpendicular à superfície da trinca e no modo 3 uma tensão de cisalhamento paralela à superfície da trinca.

Figura 41 - Modos de solicitação de uma trinca. [32]



O modo 1 de solicitação é o modo mais utilizado para ensaios em engenharia devido a sua facilidade de tratamento analítico e de aplicação e ajuste práticos. Com a definição por Irwin do fator de intensidade de tensões K ficou mais simples o problema da análise de tensões na vizinhança de uma trinca já que, com K determinado, as tensões são facilmente encontradas.

Os campos de tensão e deslocamento da ponta de uma trinca podem ser caracterizados pela combinação dos 3 modos de deformação em um conjunto de expressões. Como o modo 1 é o mais utilizado, seguem as expressões para este modo em deformação plana. [34]

$$\sigma_{xx} = \frac{K_1}{(2 \cdot \pi \cdot r)^{1/2}} \cdot \cos(\theta/2) \cdot [1 - \sin(\theta/2) \cdot \sin(3\theta/2)] \quad (2.10a)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_1}{(2 \cdot \pi \cdot r)^{1/2}} \cdot \cos(\theta/2) \cdot [1 - \sin(\theta/2) \cdot \sin(3\theta/2)] \quad (2.10b)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_1}{(2 \cdot \pi \cdot r)^{1/2}} \cdot [\cos(\theta/2) \cdot \sin(\theta/2) \cdot \cos(3\theta/2)] \quad (2.10c)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yz} = 0 \quad (2.10d)$$

$$\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad (2.10e)$$

$$u = \frac{K_1}{G'} \cdot \left[\frac{r}{2 \cdot \pi} \right]^{1/2} \cdot \cos(\theta/2) [1 - 2\nu + \sin^2(\theta/2)] \quad (2.11a)$$

$$u = \frac{K_1}{G'} \cdot \left[\frac{r}{2 \cdot \pi} \right]^{1/2} \cdot \cos(\theta/2) [2 - 2\nu - \cos^2(\theta/2)] \quad (2.11b)$$

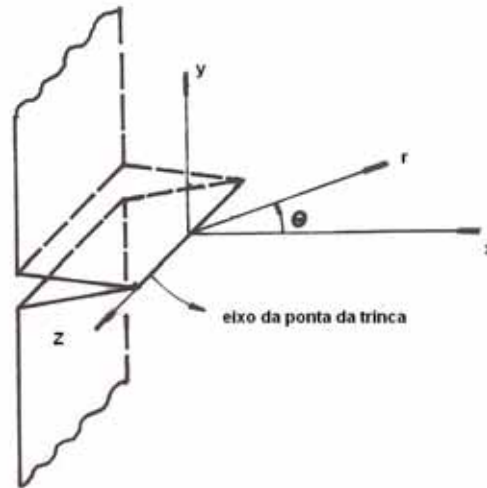
$$w = 0 \quad (2.11c)$$

Nas expressões acima K_1 é o fator de intensidade de tensão para o modo I e G' é o módulo de cisalhamento $G' = E/2 (1 + \nu)$ sendo K_1 definido como [35]:

$$K_1 = \lim_{r \rightarrow 0} [\sigma_{yy} (2 \cdot \pi \cdot r)^{1/2}] \quad (2.12)$$

As equações acima definem os sistemas de coordenadas com origem no eixo da ponta da trinca como visto na figura xx e u, v e w são os deslocamentos em x, y e z respectivamente. Elas são válidas quando o raio da ponta da trinca tende a zero e são exatas somente no limite quando r se aproxima de zero, porém apresentam uma boa aproximação da região onde r é muito menor em relação ao comprimento da trinca e a menor dimensão do espécime.

Figura 42 - Sistema de coordenadas de tensões na ponta da trinca. [32]



Analisando as equações pode-se observar que as tensões nas vizinhanças de uma trinca em um material com comportamento elástico linear dependem somente do fator de intensidade de tensão. Pode-se então fazer relações entre a taxa de dissipação de energia elástica G e o fator de intensidade de tensão K . Combinando as equações (2.10) e (2.11).

$$G_I = \frac{K^2}{E} \text{ para condições de tensão plana} \quad (2.13a)$$

$$G_I = \frac{K^2}{E} (1 - \nu^2) \text{ para condições de deformação plana} \quad (2.13b)$$

A expressão (2.13) é válida para a extensão da trinca em seu plano original. A MFLE tem como base o fator de intensidade de tensões e, uma vez conhecido este, a distribuição de tensões e de deslocamentos nas vizinhanças de uma trinca em um material elástico são facilmente calculados pelas equações (2.11) e (2.12). Esse fator é de grande importância no controle da fratura frágil e pode-se calcular o fator de intensidade de maneira analítica, teórica ou experimental. Atualmente diversas maneiras diferentes de se calcular K existem em manuais e outras bibliografias, sendo o mais usual:

$$K = y \cdot \sigma \sqrt{\pi \cdot a} \quad (2.14)$$

onde y é uma função da geometria do espécime e da trinca.

2.8.1.2 Ensaio de Tenacidade a Fratura

O ensaio de tenacidade a fratura consiste em se determinar a tenacidade a fratura com deformação linear-elástica em condições de deformação plana K_{IC} de corpos de prova pré-trincados com pelo menos 1,6 mm de espessura ou mais submetidos a forças de abertura de trinca aumentadas rápida ou lentamente [36].

A força é aplicada nos corpos de prova em tensão ou em um aparato de flexão em três pontos e um gráfico força x abertura de trinca mostrado na Figura 43 é autografado ou digitalmente armazenado. O valor de K_{IC} é calculado com base na força encontrada no encontro de uma reta secante com inclinação 5% menor que a zona elástica do ensaio. O valor é então encontrado por equações concebidas com base em análises de tensões elásticas com base na geometria do corpo de prova a ser utilizado.

Figura 43 - Curvas Força x Deslocamento ensaio tenacidade a fratura. [36]

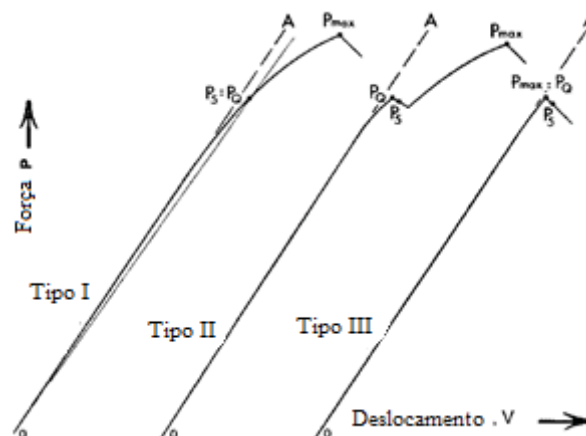
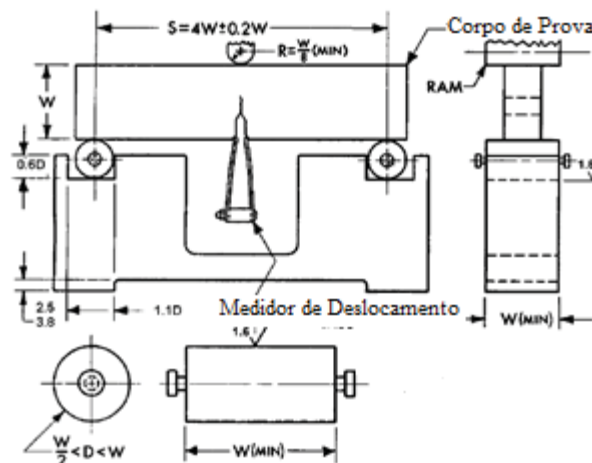


Figura 44 - Esquema de ensaio de tenacidade à fratura. [36]



Antes da realização do ensaio o corpo de prova entalhado é pré-trincado em uma máquina de fadiga, para que o valor de a mostrado na Figura 46 esteja entre uma faixa de $0,45W < a < 0,55W$. Após a realização da pré-trinca os corpos de prova estão prontos para serem ensaiados. O corpo de prova é colocado sobre um sistema de 3 roletes para simular um ensaio de flexão de 3 pontos e, com o corpo de prova posicionado como na figura 44, acopla-se no entalhe do mesmo um medidor de deslocamento munido de extensômetros em detalhe na Figura 45. O ensaio deve ser repetido por 3 vezes para cada condição para se obter resultados favoráveis, com a tolerância dos corpos de prova sendo de 0,03 mm como o desenho da Figura 46, primeiramente se medindo o tamanho da trinca e tomando cuidado para não nuclearem mais de uma trinca.

Figura 45 - Detalhe encaixe medidor. [36]

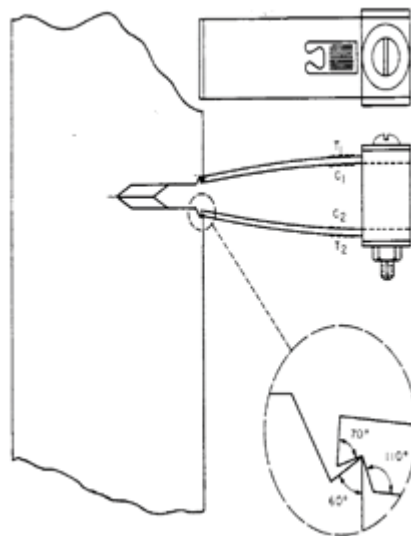
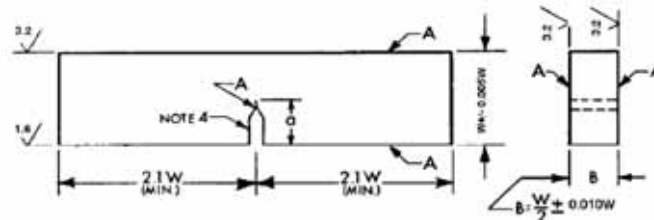


Figura 46 - Corpo de prova tenacidade a fratura. [36]



Após o término do ensaio e com as curvas de força x deslocamento em mãos, uma secante é traçada no gráfico como na Figura 46 e duas condições podem existir, se a secante cortar o gráfico em um ponto abaixo do ponto de carga máxima, esta força

chamada P_Q é então utilizada, do contrário, a força $P_{m\acute{a}s}$ é utilizada para se calcular K_Q das equações (2.15) e (2.16). Se a relação $P_{m\acute{a}s}/P_Q < 1,1$:

$$K_Q = \frac{P_Q \cdot S}{\sqrt{B \cdot B_B} \cdot W^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (2.15)$$

onde

P_Q é a força determinada anteriormente;

B é a espessura do corpo de prova;

B_N espessura alternativa do corpo de prova, para o caso de corpos retangulares é igual a B ;

S é o span, distância dos centros dos dois roletes de apoio;

W é a altura do corpo de prova e;

A é o comprimento de trinca.

com

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = 3 \sqrt{\frac{a}{W}} \cdot \frac{1,99 - \left(\frac{a}{W}\right)\left(1 - \frac{a}{W}\right)\left[2,15 - 3,93\frac{a}{W} + 2,7\left(\frac{a}{W}\right)^2\right]}{2\left(1 + 2\frac{a}{W}\right)\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \quad (2.16)$$

Se a relação $2,5(K_Q/\sigma_{YS})^2 < W - a$ for satisfeita, $K_Q = K_{IC}$.

2.8.1.3 Mecânica da Fratura Aplicada em Trilhos

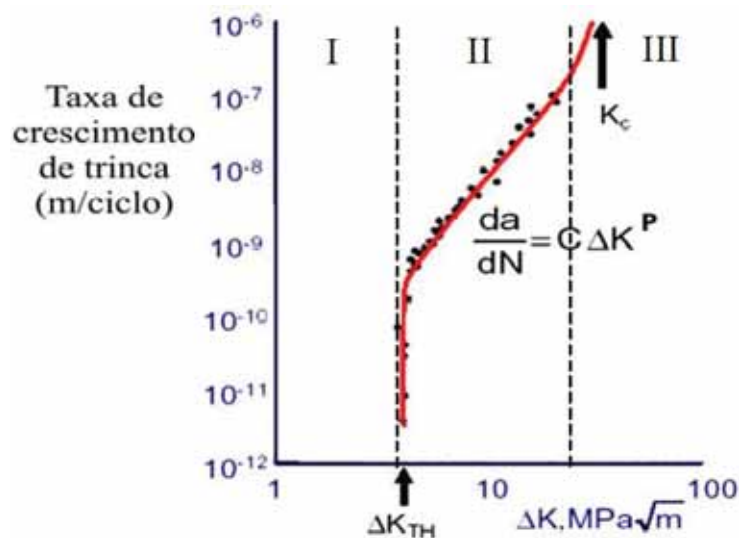
A utilização de conceitos da mecânica da fratura para ferrovias vem sendo aplicada com sucesso em algumas ferrovias nos Estados Unidos e na Austrália com experimentações sendo realizadas para se entender o comportamento do material dos trilhos com a presença de uma trinca. A tolerância ao dano da mecânica da fratura é aplicada em trilhos ferroviários com base no material e no estado de tensões encontrado.

No caso dos trilhos, a ocorrência de uma trinca implica em uma queda de resistência do trilho trincado em relação ao trilho intacto e a resistência decresce com o aumento dos defeitos ou trincas. Sob a influência de tensões cíclicas, trincas vão se propagar e o comportamento típico da taxa de crescimento de trincas em materiais pode ser aproximada pela curva da Figura 47 com base na Lei de Paris. [37]

A curva possui três regiões, na região I com baixos níveis de tensão ou de comprimento de trinca, as trincas não se propagam ou propagam muito pouco quando

submetidas a esforços cíclicos. Na região II a curva se torna linear, o que mostra uma relação entre a velocidade de propagação de trinca da/dN e a amplitude do fator intensificador de tensões ΔK e, essa relação condiz com a lei de Paris com a qual é possível se estimar a vida em fadiga de peças e componentes. [38] Na região II ocorre um aumento rápido do comprimento de trinca que ocorre até que um $K_{máx}$ alcance o valor crítico de K_{IC} onde a fratura instável está prestes a ocorrer.

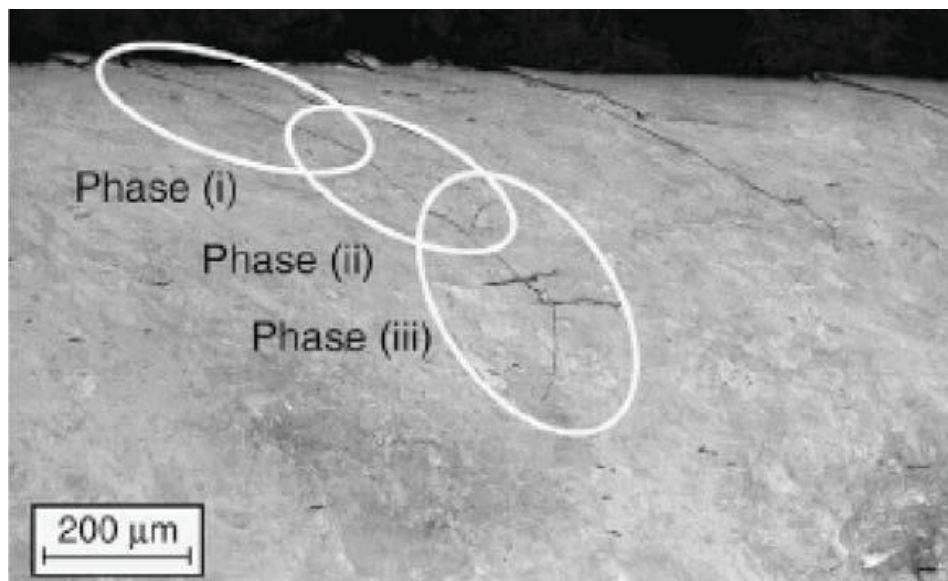
Figura 47 - Curva de taxa de crescimento de trinca x ΔK . [37]



A mecânica da fratura também ajuda no modelamento das condições de nucleação e propagação de trincas. A nucleação no caso de trincas transversais se dá entre os grãos do material metálico, com a alta deformação plástica da superfície do trilho aliada ao estado de tensões residuais pode ocasionar um deslizamento de banda, fazendo com que surja uma região de nucleação de trinca. A nucleação da trinca ocorre geralmente em uma região imediatamente abaixo da superfície ou na própria superfície dependendo dos carregamentos envolvidos.

A propagação se dá pela passagem repetitiva de trens sobre os trilhos, que causa a chamada fadiga por contato e o desgaste nos trilhos. Altas forças tangenciais aliadas à rugosidade da superfície induzem a um estado de deformações uniaxial em uma fina camada, fazendo com que uma trinca nucleie. Uma vez nucleada a trinca vai se propagar partindo da superfície em um ângulo pequeno (de 10 a 25°) até a região de material deformado anisotrópico até que alcance um tamanho crítico (1 a 2 mm). A essa altura, as tensões e deformações na ponta da trinca irão definir a direção de propagação, se para a direção da superfície ou para a base do trilho, como demonstrado na Figura 48.

Figura 48 - Fases de uma trinca em um trilho. [41]



As trincas não se propagam quando existe um estado de tensões predominantemente compressivas, entretanto, uma vez uma trinca nucleada por tensões de contato, a passagem das rodas em conjunto com fluídos pode incentivar o crescimento de uma trinca. Este fenômeno, conhecido como *squashed balloon*, consiste em quantidade de fluido se aprisionar na região da trinca e exercer uma alta pressão na ponta da trinca de magnitude maior que a tensão de compressão.

Isso também pode explicar porque seções de trilho quando sofrem esmerilhamento podem parar de propagar trincas mesmo que elas não sejam eliminadas. Se as trincas são retiradas do contato roda-trilho, o mecanismo de *squashed balloon* não ocorre, com a aproximação da roda a boca da trinca abre permitindo a entrada de fluido. Após a passagem da roda a boca da trinca se fecha, aprisionando o fluido dentro permitindo assim a abertura da boca da trinca, como mostrado na Figura 49. [37]

Figura 49 - Desenho esquemático do *squashed balloon*. a) tráfego aprisionando o fluido e b) tráfego liberando o fluido. [39]



Este mecanismo também pode explicar porque as trincas crescem geralmente no sentido de tráfego dos trens e não ao contrário, como mostrado na parte b da Figura 49. Se for invertido o sentido do tráfego, a compressão exercida pela roda expulsará o fluido ao invés de aprisioná-lo.

A nucleação, propagação e fratura final de uma trinca transversal por fadiga pode ser observada esquematicamente na Figura 50 e ocorre em três estágios distintos. No início a nucleação se dá como já comentado anteriormente nesta seção, após a ponta da trinca atingir uma certa profundidade, que depende da carga aplicada e das propriedades do material do trilho, a propagação da trinca é acelerada. A trinca se propaga em um mecanismo combinado dos modos I e II de abertura que podem ser agravados por aprisionamento de líquido como demonstrado na Figura 51. No início, a trinca tende a se propagar em marcas de catraca. Após a trinca começar a se mover mais rapidamente, ela começa a propagar quase que unicamente no modo I e ela se propaga pelos esforços de tração e cisalhamento existentes na superfície da trinca.

Por fim, quando a intensidade das tensões na ponta da trinca chega a um valor crítico maior ou igual a tenacidade a fratura do material do trilho o mesmo fratura. [40]

3 Materiais e Métodos

3.1 Materiais

Para a realização deste trabalho foram utilizados trilhos ferroviários do tipo TR-57 recebidos como mostrados na Figura 52. Os trilhos recebidos eram de dois tipos, soldados por caldeamento ou apenas metal base, todos com comprimento de 2 metros. O perfil dos trilhos é o mostrado na Figura 4 do capítulo 2 do presente trabalho e a composição química feita com base no ferro do material dos trilhos consta na tabela 2 e foi realizada pelo laboratório LabMat utilizando-se de um espectrômetro de emissão óptica.

Figura 52 - Trilhos como recebidos.



Dados do próprio autor.

Tabela 2 - Composição química do material do trilho TR-57.

Elemento:	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	V
Porcentagem em massa:	0,82	0,42	1,02	0,011	0,005	0,40	0,04	0,03	0,003	0,003

A composição química dos trilhos se mostrou em compatibilidade com as normas brasileiras nas quais este trabalho se baseou. A análise química revelou que nenhum dos componentes está presente em uma quantidade fora da margem permitida pela norma e que o aço se assemelha a um aço do tipo 1080.

3.1.1 Metalografia

Ensaio metalográfico macroscópicos foram realizados nos trilhos a fim de caracterizar o material e suas diferenças nas três diferentes condições, Metal Base, Zona Afetada Termicamente e Linha de Caldeamento nas regiões da alma e do boleto. Um corte na direção longitudinal foi feito e a amostra foi atacada com Nital 5% para evidenciar as condições acima citadas.

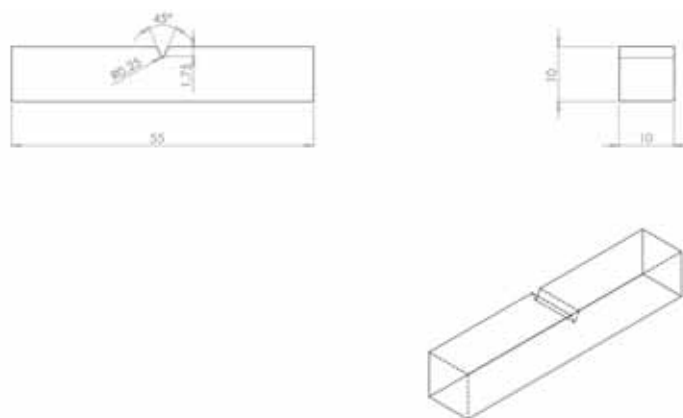
3.2 Metodologia

3.2.1 Confeccção dos corpos de prova

3.2.1.1 Charpy Instrumentado

Os corpos de prova para o ensaio de impacto Charpy instrumentado foram os do tipo A com entalhe em V com dimensões e especificações como mostrado na Figura 53 e foram confeccionados seguindo a norma ASTM E23 (2007) tanto nos trilhos soldados e nos não soldados. Para confirmar a qualidade do entalhe dos corpos de prova foram realizadas verificações da profundidade e da abertura do entalhe em um perfilômetro óptico.

Figura 53 - Corpo de Prova Charpy Instrumentado utilizado nos ensaios.



Dados do próprio autor.

A Figura 54 mostra o começo do processo de fabricação com dois cortes transversais nos trilhos soldados ou não-soldados para que o comprimento do trilho

fosse diminuído para 65 mm . Essa diminuição foi realizada nos trilhos soldados de forma que toda a região da junta soldada estivesse contida nesta região de trilho. Após a diminuição do comprimento dois cortes longitudinais eram realizados, para separar as regiões da alma, boleto e patim como a Figura 55 sendo que este último não foi utilizado para construção dos corpos de prova.

Figura 54 - Trilho reduzido a 65 mm.



Dados do próprio autor.

Figura 55 - Trilho soldado após cortes longitudinais.



Dados do próprio autor.

Após a separação das regiões a serem ensaiadas os corpos de prova seriam retirados em duas direções, longitudinal (seguindo a direção de laminação) e

transversal. Os corpos de prova foram então subdivididos em três condições, metal base, zona afetada termicamente e linha de caldeamento. Após esta divisão de região, direção e condição, os corpos foram denominados pela posição do entalhe, cada tipo de corpo de prova está descrito a seguir.

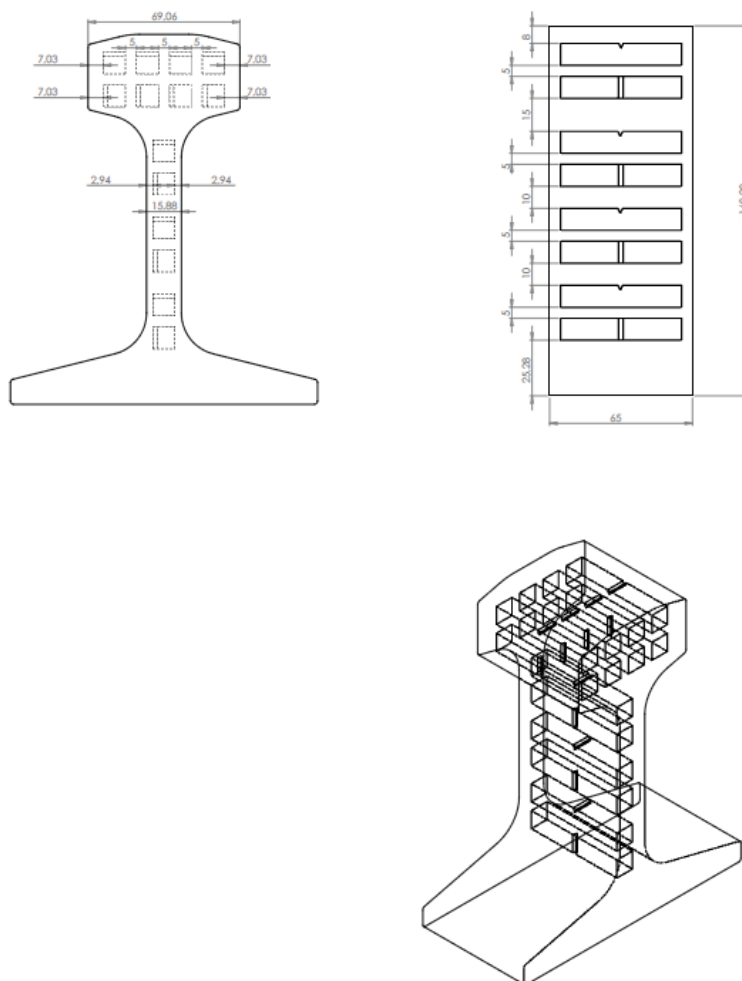
- Região do Boleto
 - o Longitudinal
 - o Topo
 - o Lateral
 - o Transversal
 - o Topo
 - o Frente
- Região da Alma
 - o Longitudinal
 - o Topo
 - o Lateral
 - o Transversal
 - o Frente
 - o Lateral

Além das subdivisões de região, têm-se as condições, Metal Base (MB), Zona Afetada Termicamente (ZAT) e Linha de Caldeamento (LC). A nomenclatura correta então ficou na seguinte sequência CONDIÇÃO + REGIÃO + DIREÇÃO + POSIÇÃO DO ENTALHE, como exemplo Metal Base Boleto Longitudinal Topo. Todas as condições estão colocadas abaixo com sua respectiva nomenclatura. As figuras 56 e 57 mostram as posições e desenhos dos corpos de prova em cada direção, longitudinal e transversal. No final, os corpos de prova ficaram como mostrado na figura 58.

- Metal Base
 - o Alma Longitudinal Lateral (MBALL)
 - o Alma Longitudinal Topo (MBALT)
 - o Alma Transversal Frente (MBATF)
 - o Alma Transversal Lateral (MBATL)
 - o Boleto Longitudinal Lateral (MBBLL)
 - o Boleto Longitudinal Topo (MBBLT)
 - o Boleto Transversal Frente (MBBTL)
 - o Boleto Transversal Topo (MBBTT)

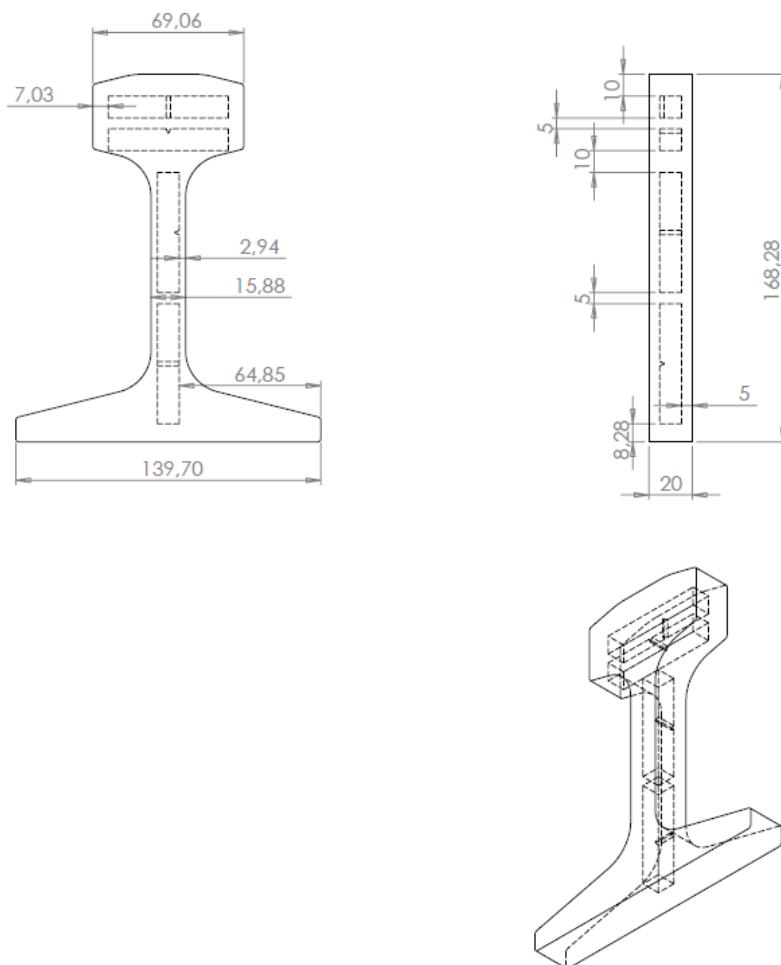
- Zona Afetada Termicamente
 - o Alma Longitudinal Lateral (ZALL)
 - o Alma Longitudinal Topo (ZALT)
 - o Alma Transversal Frente (ZATF)
 - o Alma Transversal Lateral (ZATL)
 - o Boleto Longitudinal Lateral (ZBLL)
 - o Boleto Longitudinal Topo (ZBLT)
 - o Boleto Transversal Frente (ZBTF)
 - o Boleto Transversal Topo (ZBTL)
- Linha de Caldeamento
 - o Alma Longitudinal Lateral (LALL)
 - o Alma Longitudinal Topo (LALT)
 - o Boleto Longitudinal Lateral (LBLL)
 - o Boleto Longitudinal Topo (LBLT)

Figura 56 - Corpos de prova Charpy na direção longitudinal.



Dados do próprio autor.

Figura 57 - Corpos de prova Charpy na direção transversal.



Dados do próprio autor.

Figura 58 - Corpo de prova Charpy.



Dados do próprio autor.

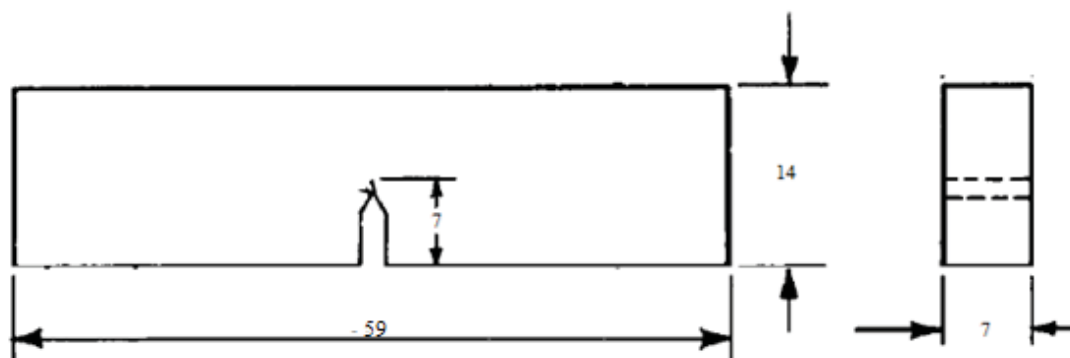
3.2.1.2 Tenacidade à fratura

Assim como nos corpos de prova Charpy instrumentado os trilhos foram cortados para posterior usinagem. Os corpos de prova foram feitos com base na forma

E-399 da ASTM e tem o desenho como mostrado na Figura 59, as dimensões do corpo de prova estão listadas abaixo e foram definidas com base na norma.

Os corpos de prova foram retirados das regiões, condições e direções citadas nos corpos de prova Charpy. Portanto, as posições e nomenclatura dos corpos de prova são as mesmas utilizadas para os corpos de prova Charpy.

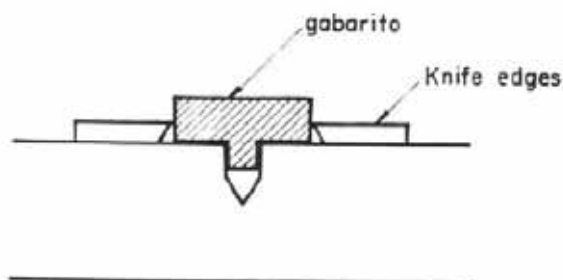
Figura 59 - Corpo de Prova tenacidade a fratura.



Dados do próprio autor.

Para a realização do ensaio de tenacidade à fratura pequenas chapas denominadas “knife edges” foram coladas com resina epoxi na superfície dos corpos de prova para encaixe dos extensômetros durante a realização dos ensaios. A superfície dos corpos de prova foi lixada e posteriormente para o auxílio da colagem um gabarito como o da Figura 60 foi utilizado.

Figura 60 - “Knife edges” e o gabarito durante o processo de colagem. [20]

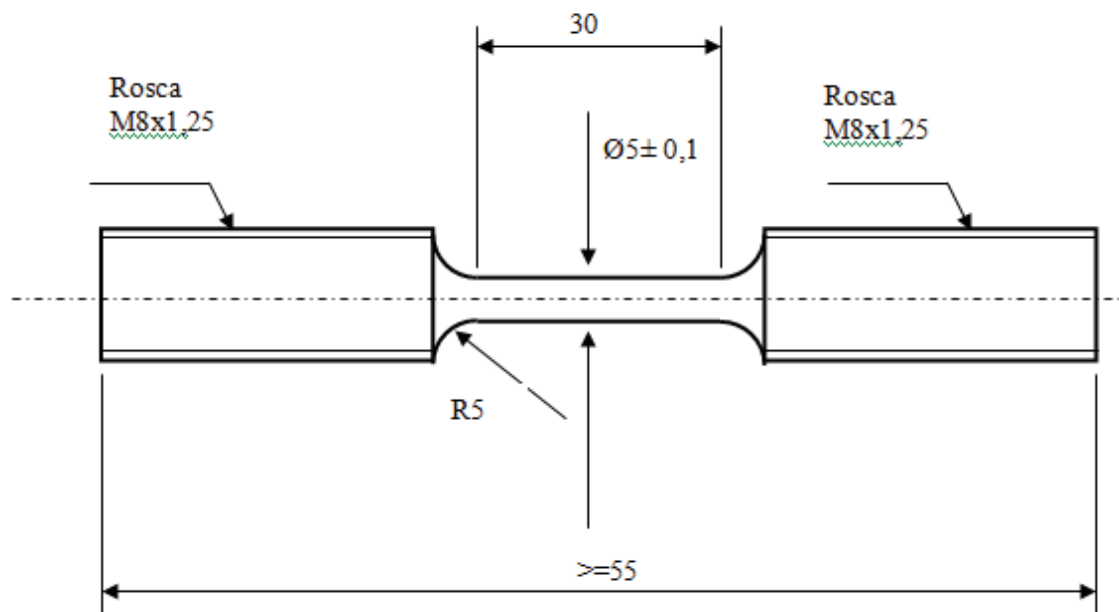


3.2.1.3 Tração

Os corpos de prova de tração de desenho mostrado na Figura 61 tiveram o processo de corte dos trilhos semelhante ao realizado para os corpos de prova charpy

instrumentado. Porém, os corpos foram usinados para o formato da Figura 62. Os corpos de prova foram retirados de duas regiões do trilho, alma e boleto, em duas condições, zona de solda e metal base na direção longitudinal como mostrados na Figura 63. Nos corpos de prova de tração não foram utilizados os mesmos modelos de corpos de prova que os de charpy pela configuração do corpo que não compreenderia uma região pequena como a linha de caldeamento, por isso a opção de duas condições, soldados e metal base.

Figura 61 - Desenho corpo de prova tração.



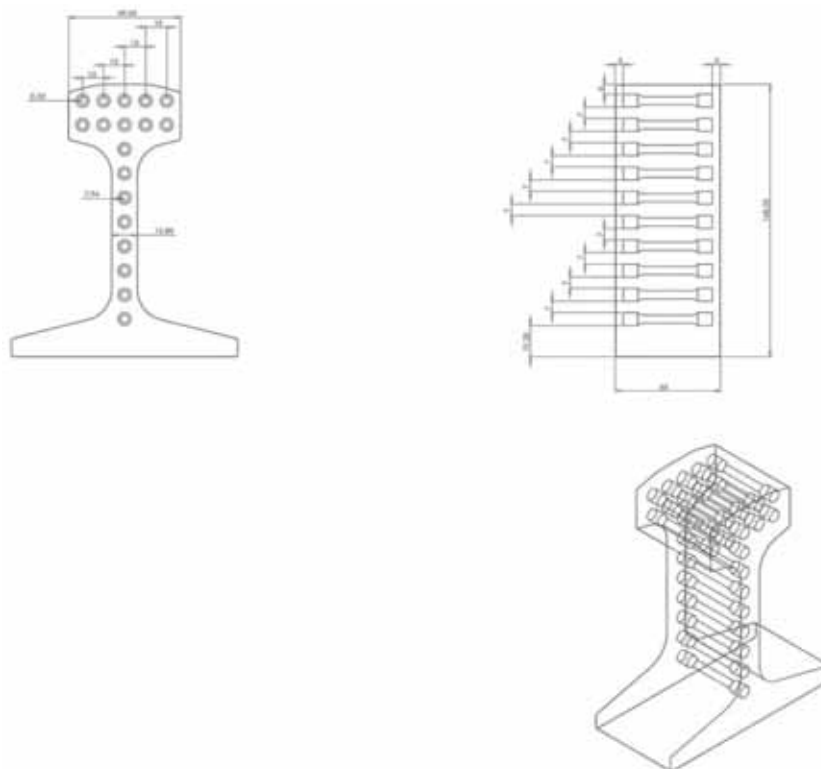
Dados do próprio autor.

Figura 62 - Corpo de prova de tração.



Dados do próprio autor.

Figura 63 - Corpos de prova tração direção longitudinal.

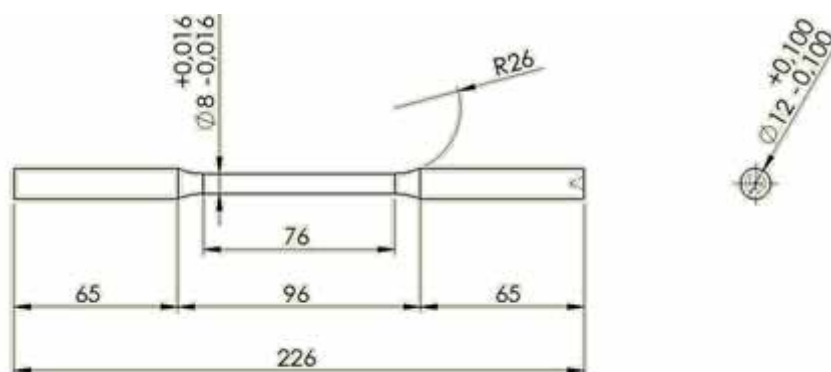


Dados do próprio autor.

3.2.1.4 Fadiga

Os corpos de prova de fadiga de desenho mostrado na Figura 64 foram retirados dos trilhos cortados como citados anteriormente, com a diferença que o comprimento do trilho após o corte foi de 200 mm. Os trilhos foram novamente divididos entre alma e boleto e foram usinados até ficarem com a forma da Figura 65.

Figura 64 - Desenho corpo de prova de fadiga.



Dados do próprio autor.

Figura 65 - Corpo de prova de fadiga.



Dados do próprio autor.

3.2.2 Ensaaios

3.2.2.1 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração mostrado na Figura 66 foram realizados nas dependências do Laboratório de Ensaios Mecânicos do DEMA/FEM/Unicamp em um equipamento servo-hidráulico para ensaios mecânicos do fabricante MTS de modelo 810-FlexTest 40 e capacidade de 100 kN e foram ensaiados 6 corpos de prova das seguintes condições:

- Metal Base Alma Longitudinal (MBAL) – 1 CP
- Zona de Solda Alma Longitudinal (SAL) – 2 CPs
- Metal Base Boleto Longitudinal (MBBL) – 1 CP
- Zona de Solda Boleto Longitudinal (SBL) – 2 CPs

Os corpos foram ensaiados até a ruptura e foram obtidos os resultados do limite de escoamento, do limite de resistência à tração e do limite de ruptura. Dos três valores, o limite de resistência à tração foi utilizado para se encontrar o valor inicial do limite de fadiga para os ensaios de fadiga.

Figura 66 - Ensaio de tração.



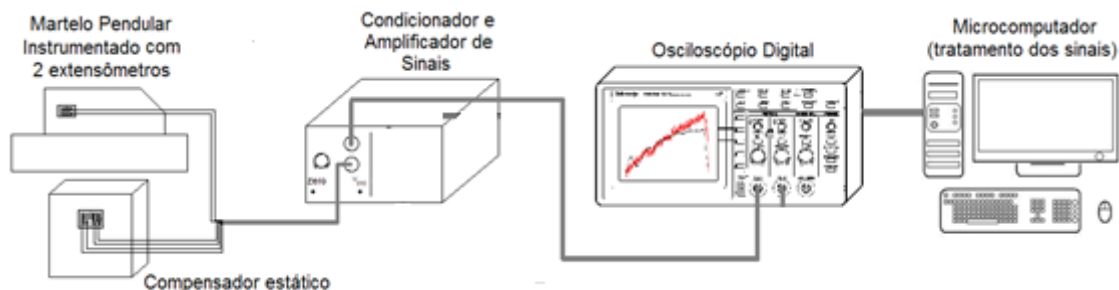
Dados do próprio autor.

3.2.2.2 Ensaio de Impacto Charpy Instrumentado

Os ensaios de impacto Charpy Instrumentado foram realizados nas dependências do GC3M no DEM da Unesp de Ilha Solteira. A máquina utilizada é uma máquina de ensaios convencional com capacidade de 300 J da marca Heckert e modelo 423/18 com o cutelo instrumentado pela norma ISO 14556 [42]. A energia apresentada pelo dial da máquina tem uma precisão de 0,5 Joules, com a massa do martelo era de 19,952kg e liberada por um sistema de alavanca atingindo 5,4 m/s. A instrumentação da máquina mostrada esquematicamente na Figura 67 conta com um osciloscópio digital Tektronix® TDS220, um condicionador de sinais e um computador AMD Athlon® 1 GHz, HD Sygate® de 80 Gb, RAM 512 Mb. O software utilizado para capturar os sinais do canal 1 do osciloscópio digital (martelo instrumentado) foi o Wavestar (versão 1.1). O osciloscópio digital e o condicionador de sinais pertencem ao Laboratório de

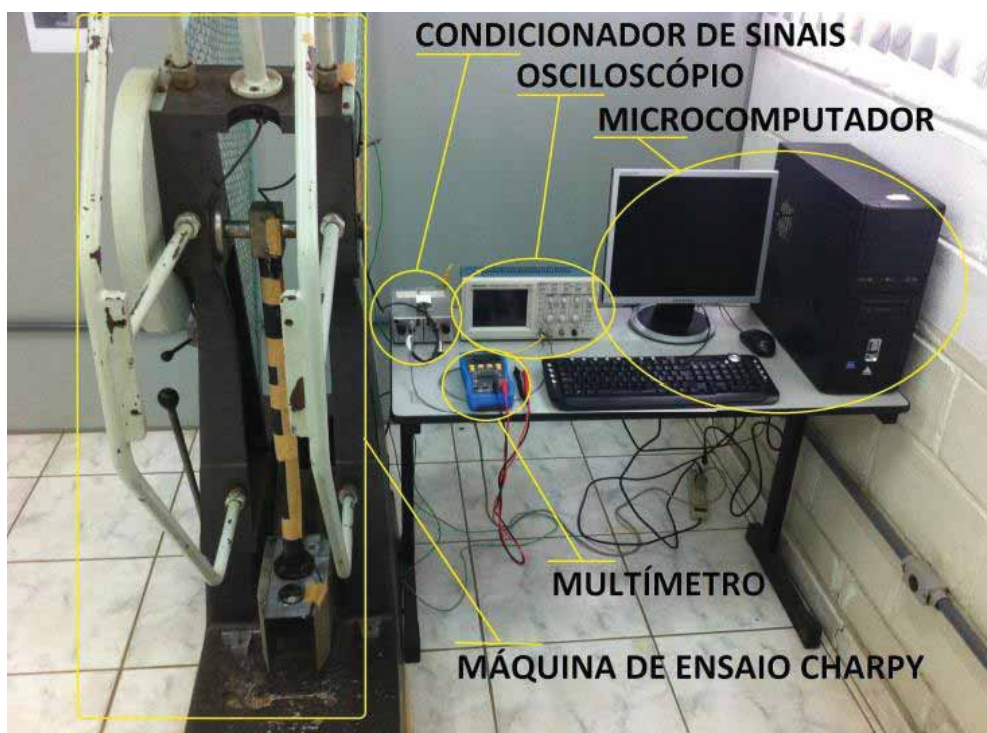
Ensaio Mecânico – DEM – UNESP/campus de Ilha Solteira. A Figura 68 mostra a máquina instrumentada e pronta para o ensaio.

Figura 67 - Desenho esquemático da cadeia de medição.



Dados do próprio autor.

Figura 68 - Máquina de ensaios Charpy instrumentada.



Dados do próprio autor.

Os ensaios foram realizados após uma calibração do martelo pendular como proposta por Rodrigues [43] e Vidotto [44]. Os corpos de prova são normalizados como citado anteriormente e os ensaios foram realizados à temperatura ambiente. Os corpos de prova foram ensaiados em trios para cada condição das já citadas anteriormente.

Com os ensaios realizados, as curvas obtidas dos ensaios são tratadas em uma rotina computacional no MatLab. Com a filtragem do sinal, uma curva de inclinação 5%

é traçada no mesmo gráfico da curva, para se encontrar o valor de K_{ID} , que se refere ao valor de tenacidade à fratura dinâmica e está incluso na região de deformação elástica do ensaio.

3.2.2.3 Ensaio de Fadiga

Os ensaios para a determinação do limite de resistência à fadiga do material dos trilhos foi o ensaio de fadiga por flexão rotativa, em que um corpo de prova mostrado na Figura 69 é colocado em uma máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa do tipo UBM – 01 da marca Heckert. Para iniciar o ensaio, os resultados dos ensaios de tração foram utilizados para um valor inicial do limite de resistência à fadiga que foi de metade do limite de resistência à tração. Este valor é apenas para dar início ao ensaio. Como o método escolhido foi o método de escada, uma vez escolhido o chute inicial e após ensaiar o corpo de prova com o primeiro valor, se ajusta o degrau e a variação de carga para cada novo corpo de prova. O equacionamento do ensaio está presente na seção 2.7.2.

Figura 69 - Corpo de prova de fadiga posicionado na máquina.



Dados do próprio autor.

Uma vez definido o degrau, os corpos de prova foram ensaiados a cada carga até que se ensaiou um mínimo de 18 corpos de prova para se definir um limite de resistência à fadiga médio. Para chegar ao limite, os corpos eram ensaiados até atingirem 2×10^6 ciclos, se rompessem antes desse limite, o tensionamento era diminuído. Se o corpo não rompesse após completar 2×10^6 ciclos o ensaio era interrompido e o corpo de prova trocado para se usar um valor de tensionamento maior. Esse processo foi repetido até o número de 18 corpos de prova para chegar ao valor do limite de resistência à fadiga médio.

3.2.2.4 Ensaio de Tenacidade à Fratura

Os ensaios de tenacidade à fratura também foram realizados nas dependências do Laboratório de Ensaios Mecânicos do DEMA/FEM/Unicamp em um equipamento servo-hidráulico para ensaios mecânicos do fabricante MTS de modelo 810-FlexTest 40 e capacidade de 100 kN mostrada na Figura 70. Os corpos de prova foram ensaiados à temperatura ambiente e 2 corpos de prova para cada uma das condições citadas anteriormente foram ensaiados num total de 40 corpos de prova e a posição dos mesmos na máquina de ensaio está na Figura 71.

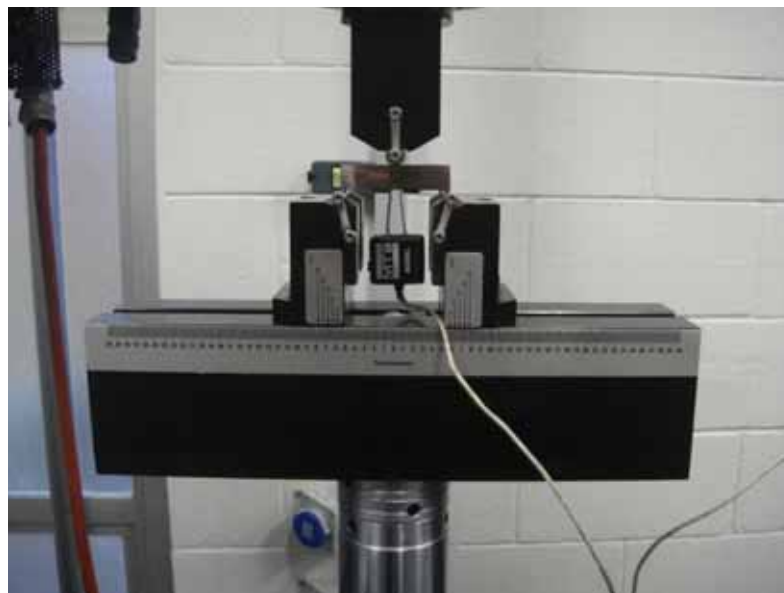
O ensaio se inicia com a nucleação da pré-trinca que tem comprimento de 2 mm e foi realizada com a máquina já citada, com razão de carga de 0,1 e frequência de 25 Hz. A carga variava de um máximo de 4150 N e um mínimo de 415 N e um “clip-gage” foi utilizado para o controle da abertura da trinca que, uma vez medida, enviava dados para um software que calculava o comprimento da pré-trinca. A posição dos corpos de prova com o “clip-gage” está na Figura 72.

Figura 70 - Máquina MTS 810-FlexTest 40.



Dados do próprio autor.

Figura 71 - Corpo de prova posicionado na máquina de ensaios.



Dados do próprio autor.

Uma vez realizada a pré-trinca, os corpos de prova eram colocados novamente na posição da Figura 71 e uma carga de 0,1 kN/s foi aplicada até que a trinca se propagasse até a ruptura do corpo de prova. Uma vez rompidos os corpos de prova, o software utilizado fornecia os dados de carga e abertura da ponta da trinca, que são utilizados para os cálculos de K_{IC} . A Figura 72 mostra um corpo de prova após o ensaio.

Figura 72 - Corpo de prova após a realização do ensaio.



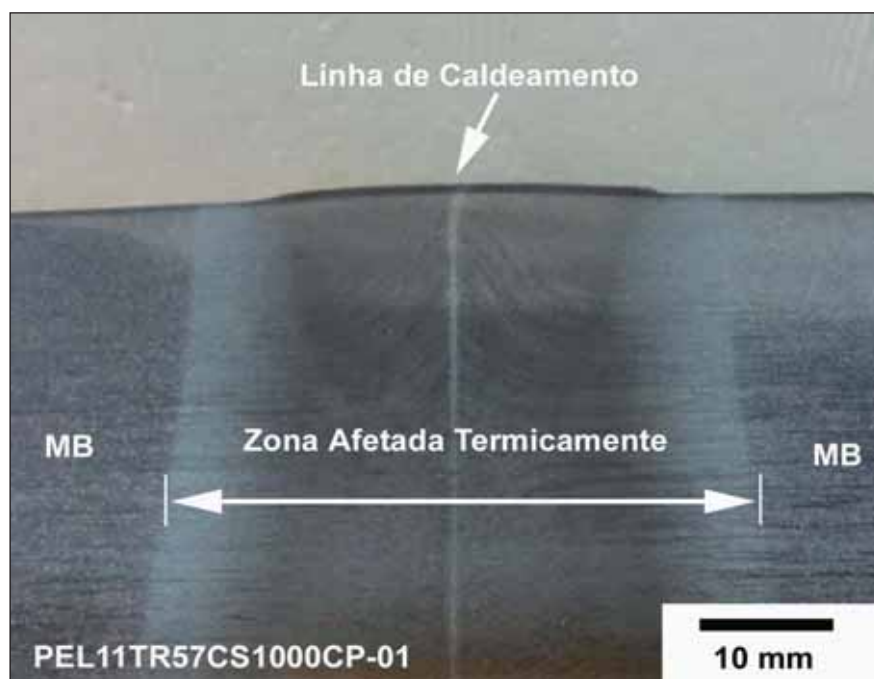
Dados do próprio autor.

4 Resultados e Discussão

4.1 Metalografia

A Figura 73 mostra a amostra atacada evidenciando as 3 condições citadas no trabalho, metal base, zona afetada termicamente e linha de caldeamento. As três condições são facilmente identificadas e a diferença de coloração após o ataque de Nital 5% demonstra que são diferentes entre si. Essas condições foram utilizadas para a confecção dos corpos de prova.

Figura 73 - Seção longitudinal do trilho mostrando as três regiões: linha de caldeamento(LC), Zona Afetada Termicamente(ZAT) e Metal Base(MB).



Dados do próprio autor.

A análise macrográfica do trilho mostra exatamente a diferença das 3 condições utilizadas neste trabalho para justificar a presença de entalhes em diferentes posições. A diferença na característica das condições sugere uma influência nas propriedades mecânicas do material dos trilhos.

4.2 Ensaio de Tração

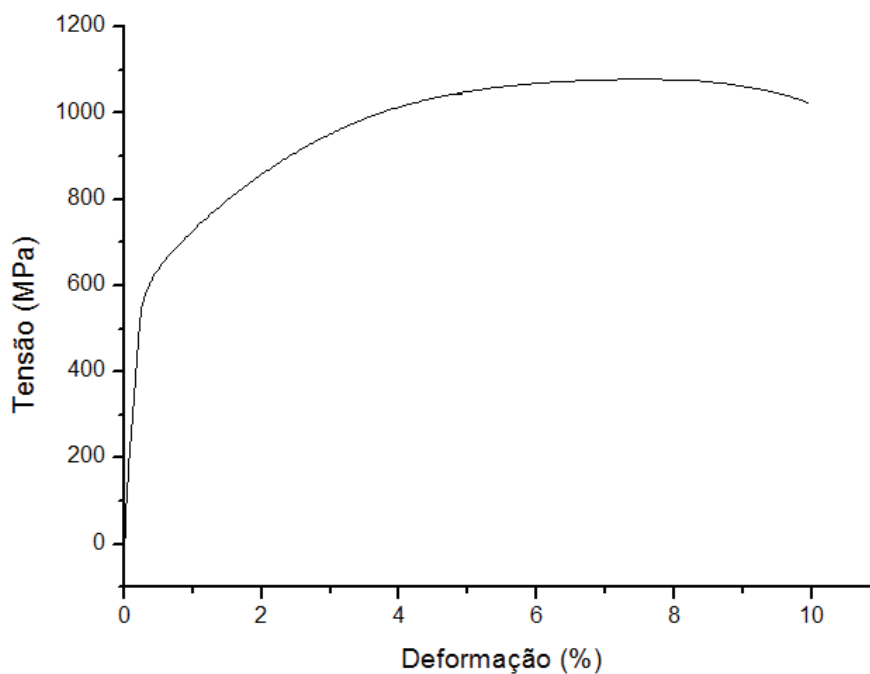
Na tabela 3 estão os resultados dos ensaios de tração de todos os corpos de prova ensaiados. Nas Figuras de 74 a 79 estão os gráficos obtidos pela máquina MTS.

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de tração.

Corpo de prova:	Limite de Escoamento (MPa)	Média (Desvio) (MPa)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Média (Desvio) (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Média (Desvio) (MPa)
MBAL1	555	-	1078	-	1020	-
SAL1	577	549 (40)	1001	977 (34)	878	866 (18)
SAL2	521		953		853	
MBBL1	745	-	1083	-	1073	-
SBL1	514	512 (4)	1058	1047 (16)	904	860 (62)
SBL2	509		1036		816	

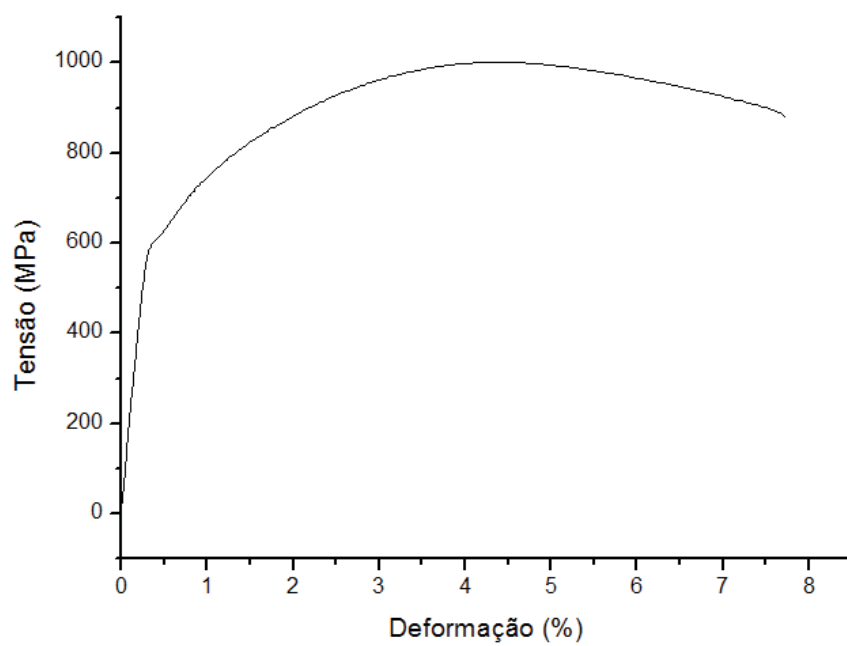
Dados do próprio autor.

Figura 74 - Curva Tensão x Deformação MBAL1.



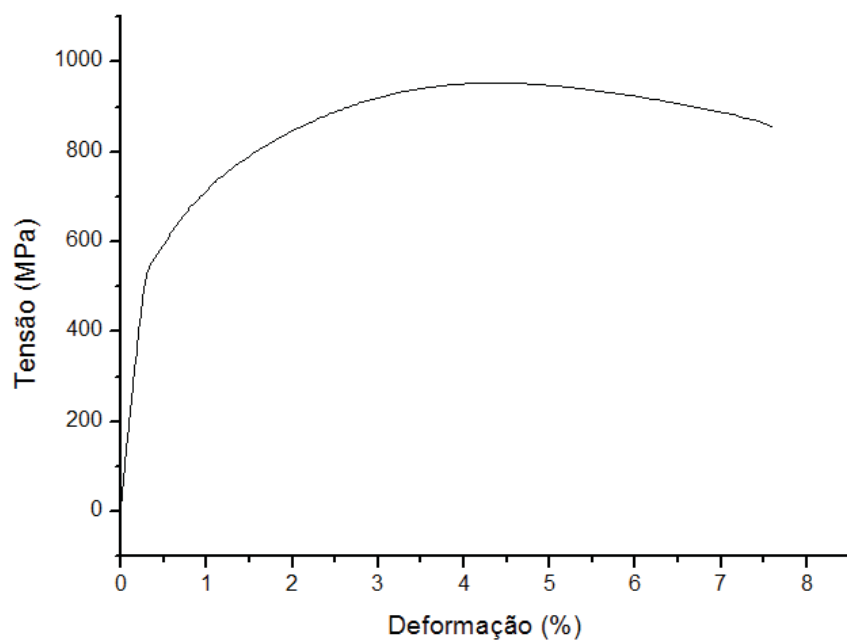
Dados do próprio autor.

Figura 75 - Curva Tensão x Deformação SAL1.



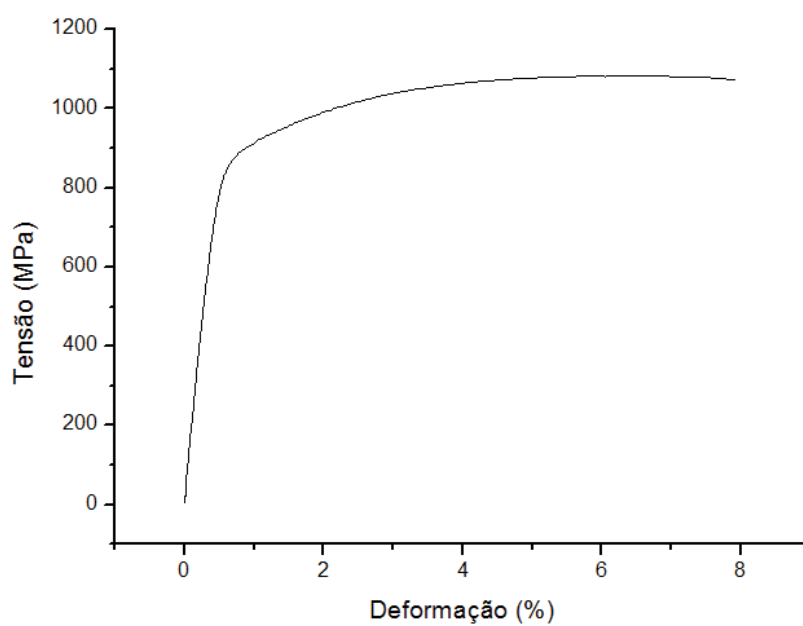
Dados do próprio autor.

Figura 76 - Curva Tensão x Deformação SAL2.



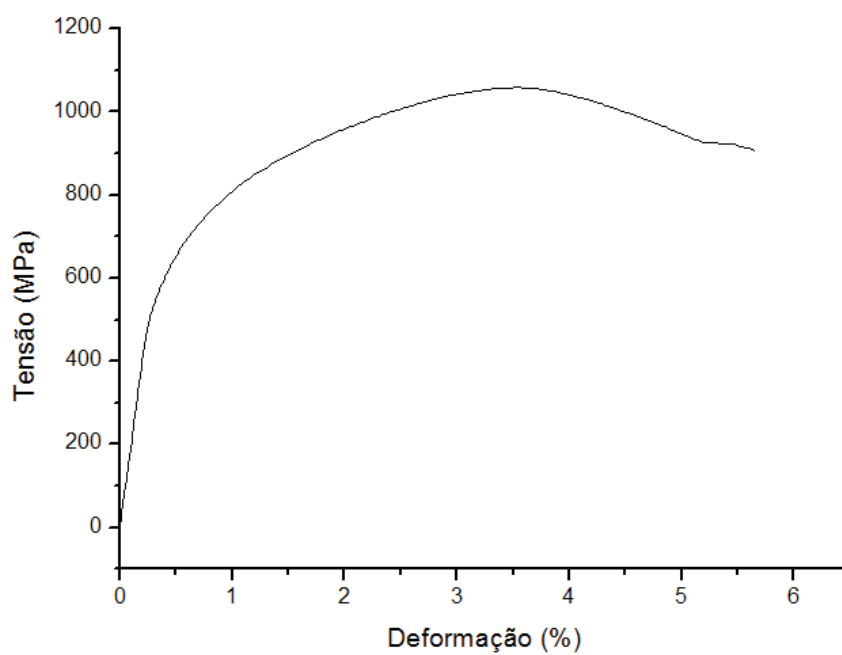
Dados do próprio autor.

Figura 77 - Curva Tensão x Deformação MBBL1.



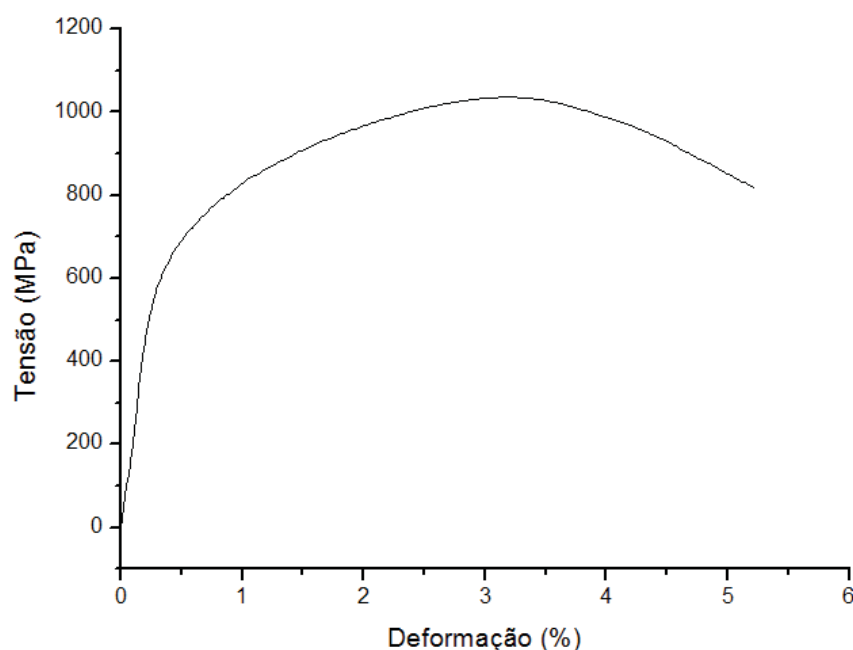
Dados do próprio autor.

Figura 78 - Curva Tensão x Deformação SBL1.



Dados do próprio autor.

Figura 79 - Curva Tensão x Deformação SBL2.



Dados do próprio autor.

Os resultados dos ensaios de tração mostram que, na direção longitudinal tanto no boleto quanto na alma os valores das tensões de escoamento, resistência à tração e de ruptura são maiores para o metal base como esperado já que são regiões menos duras e mais dúcteis que as regiões mais duras (ZAT e LC). O Limite de escoamento é maior no boleto chegando a 745 MPa o que é uma característica muito boa para uma região de contato direto roda-trilho e que sofre muita deformação. Assim como o limite de escoamento, o limite de resistência à tração e o de ruptura são maiores no metal base do boleto chegando a 1.083 e 1.073 MPa respectivamente. A tensão de escoamento na alma é menor, 555 MPa, assim como sua deformação, o que é um bom sinal já que a alma não pode se deformar muito mesmo sofrendo as maiores tensões de flexão no trilho, pois uma deformação muito grande da alma pode sujeitar o trem a um descarrilamento. Também os valores de limite de resistência à tração e de ruptura são menores, 1.078 e 1.020 MPa respectivamente, mostrando este comportamento menos dúctil da alma.

Quando se compara os valores de tensão dos corpos longitudinais soldados percebe-se uma queda nos valores das tensões tanto na alma quanto no boleto, com o boleto tendo as variações mais pronunciadas. Os valores de tensão de escoamento sofrem uma queda de mais de 200 MPa caindo a 509 MPa para o corpo de prova SBL2 que também tem os menores valores de limite de resistência à tração e de ruptura, caindo para 1.036 e 816 MPa respectivamente.

Na alma se observa um comportamento não muito discrepante como o do boleto, a região soldada apresenta um limite de escoamento maior para o SAL1 577 MPa e menor para o SAL2 521 MPa, porém ao se analisar os limites de resistência à tração e de ruptura, vemos que nos dois corpos de prova os valores são menores que no metal

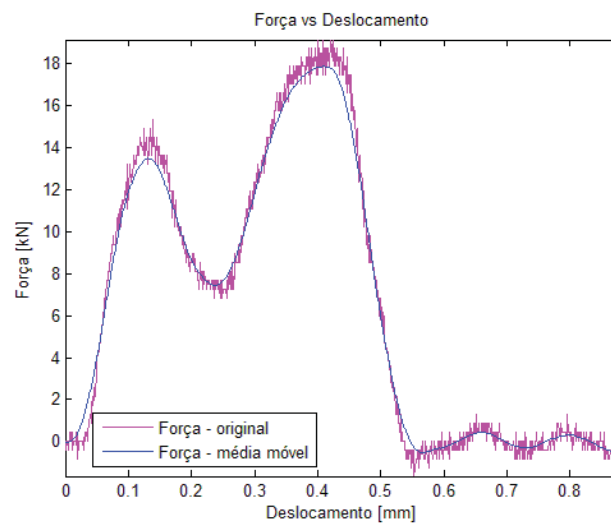
base. E um comportamento semelhante ao do metal base, com os limites de resistência à tração e de ruptura sofrendo quedas de até 200 MPa para o limite de ruptura.

4.3 Ensaio de Impacto Charpy Instrumentado

Após a realização dos ensaios de impacto Charpy instrumentado, as curvas obtidas foram tratadas por um software computacional e numericamente foi retirado o valor de K_{ID} aparente para os 42 corpos de prova que foram aceitos após a perfilometria óptica.

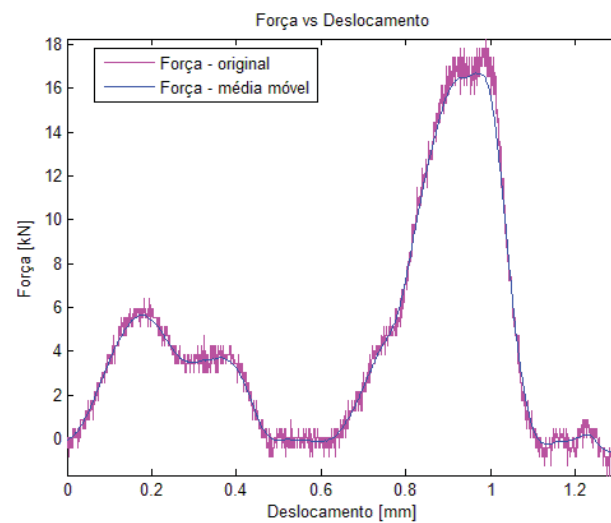
As curvas das Figuras 80 a 84 mostram as curvas obtidas nos ensaios para algumas das condições ensaiadas.

Figura 80 - Curva Força x Deslocamento MBBTF-1.



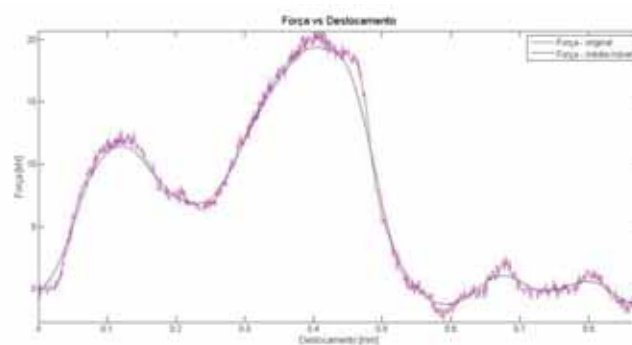
Dados do próprio autor.

Figura 81 - Curva Força x Deslocamento ZBTf-3.



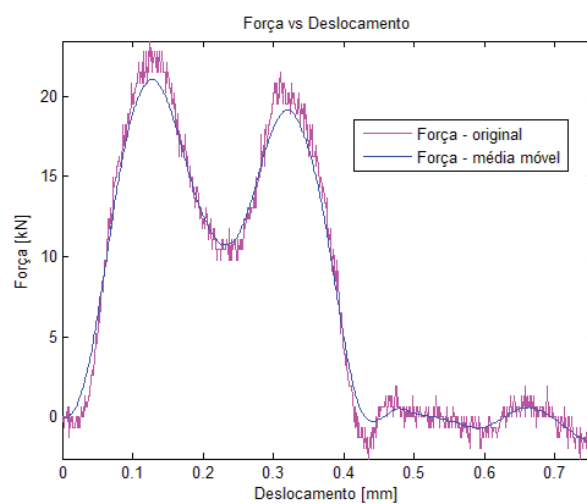
Dados do próprio autor.

Figura 82 - Curva Força x Deslocamento MBALT-3.



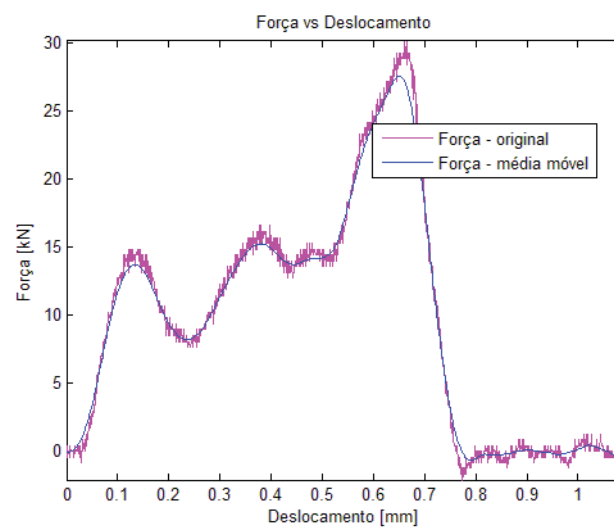
Dados do próprio autor.

Figura 83 - Curva Força x Deslocamento ZALT-3.



Dados do próprio autor.

Figura 84 - Curva Força x Deslocamento LALL-3.



Dados do próprio autor.

Os resultados de K_{ID} Aparente encontrados estão na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores K_{ID} Aparente.

Corpo de Prova	K_{ID} Aparente (MPa . m ^{1/2})	K_{ID} Aparente médio (MPa . m ^{1/2})	Desvio Padrão (MPa . m ^{1/2})
MBATF-1	100	100	-
MBALT-1	71	80	9
MBALT-2	79		
MBALT-3	90		
ZATF-1	116	109	10
ZATF-2	101		
ZATL-1	97	97	-
ZALT-1	112	105	7
ZALT-2	98		
ZALT-3	105		
ZALL-1	86	102	16
ZALL-2	101		
ZALL-3	120		
ZBLT-1	82	87	5
ZBLT-2	87		
ZBLT-3	92		
ZBLL-1	85	90	9
ZBLL-2	101		
ZBLL-3	84		
ZBTT-1	94	96	11
ZBTT-2	107		
ZBTT-3	85		
ZBTF-1	72	78	6
ZBTF-2	85		
ZBTF-3	77		
MBBLT-1	96	94	4
MBBLT-2	89		
MBBLT-3	98		
MBBLL-1	89	89	1
MBBLL-2	87		
MBBLL-3	90		
MBBTF-1	83	99	17
MBBTF-2	117		
MBBTF-3	96		
LBLT-1	82	79	12
LBLT-2	66		
LBLT-3	90		
LALL-1	148	123	27
LALL-2	93		
LALL-3	128		

Dados do próprio autor.

Os resultados de K_{ID} aparente obtidos mostram grandes desvios em quase todas as condições em que foi possível a obtenção de K_{ID} aparente. Poucas condições tiveram desvios menores que 10% o que mostra uma grande dispersão nos resultados. Apesar de ser um método numérico que trabalha com curvas de sinal tratado para a retirada de interferência, a dispersão foi alta nos valores encontrados.

Ao analisar os resultados para a direção Transversal, é perceptível que a alma tem maior valor de K_{ID} aparente na direção frontal de entalhe tanto para o Metal Base quanto para a Zona Afetada Termicamente em relação ao boleto. Porém, ao se analisar os valores dos desvios os valores se tornam parecidos no Metal Base, com o boleto tendo valor máximo maior que o da alma, diferentemente do que acontece na Zona Afetada Termicamente que teve desvios menores e mantém o que foi observado anteriormente.

Na posição de entalhe lateral para a alma não foram obtidos resultados para o Metal Base, o mesmo ocorre na posição topo para o boleto. Com os resultados da Zona Afetada Termicamente os valores de K_{ID} aparente foram maiores no boleto em relação à alma.

Na direção Transversal é possível afirmar que boleto e alma tem comportamento muito parecido com base na tenacidade a fratura dinâmica aparente. Os valores de K_{ID} foram muito parecidos em todas as condições ensaiadas na direção, apesar de a alma ainda mostrar valores mínimos menores na Zona Afetada Termicamente, indicando uma queda da tenacidade ao se partir para a junta soldada..

Na direção Longitudinal não é possível se comparar alma e boleto no Metal Base pela falta de resultados da alma, porém o boleto mostra comportamento semelhante nas duas posições de entalhe ensaiadas. Na Zona Afetada Termicamente com o entalhe posicionado no topo a alma teve valores maiores de K_{ID} aparente, mostrando que nessa região tem melhor tenacidade a fratura que o boleto. Na posição lateral de entalhe lateral o mesmo ocorre, apesar dos altos desvios, a alma ainda tem valores mínimos menores que os do boleto, mostrando melhor tenacidade a fratura dinâmica aparente.

Quando se observa a linha de caldeamento, apesar de as posições de entalhes dos resultados serem diferentes, a alma tem maior K_{ID} aparente mínimo que o máximo valor do boleto. Novamente a alma tem melhores propriedades a fratura que o boleto.

Ao observarmos a direção Longitudinal, no Metal Base a alma permanece tendo valores de K_{ID} aparente maiores do que o boleto, comportamento que muda ao se alcançar a Zona Afetada Termicamente que tem o boleto com melhor tenacidade a fratura dinâmica aparente para todas as posições de entalhe. Este comportamento é novamente observado na Linha de Caldeamento, onde novamente a alma tem tenacidade a fratura dinâmica maior que o boleto.

Apesar de algumas posições de entalhe nas 3 condições de corpos de prova terem ficado sem resultados por rejeição dos corpos de prova na inspeção ou por um

problema de falta de material, é possível afirmar que a alma tem um comportamento a fratura melhor que o boleto, tendo maior tenacidade a fratura dinâmica aparente que o boleto.

Para facilitar a análise dos resultados para cada condição ensaiada, as Tabelas de 5 a 10 estão abaixo mostrando as diferenças entre cada posição de entalhe para as condições Metal Base, Zona Afetada Termicamente e Linha de Caldeamento.

Tabela 5 - Valores de K_{ID} aparente para a condição Alma Transversal Frente.

Corpo de Prova	K_{ID} Aparente médio (MPa . m^{1/2})	Desvio Padrão (MPa . m^{1/2})
MBATF	100	-
ZATF	109	10

Dados do próprio autor.

Nesta condição a Zona Afetada Termicamente se mostra com menor tenacidade a fratura dinâmica aparente se comparada com o Metal Base, isso mostra a fragilização que a Zona Afetada Termicamente sofre após a soldagem na região da alma, que teve propriedades melhores que o boleto como discutido anteriormente.

Tabela 6 - Valores de K_{ID} aparente para a condição Boleto Transversal Frente.

Corpo de Prova	K_{ID} Aparente médio (MPa . m^{1/2})	Desvio Padrão (MPa . m^{1/2})
MBBTF	99	17
ZBTF	78	6

Dados do próprio autor.

Novamente a Zona Afetada Termicamente se mostra com uma tenacidade a fratura menor que o Metal Base agora para a região do boleto. A direção transversal mostra que tanto para a alma quanto para o boleto a Zona Afetada Termicamente tem piores propriedades a fratura que o Metal Base, o que mostra a fragilização desta região da junta soldada.

As posições de entalhe transversal simulam trincas longitudinais dos trilhos. Os valores de tenacidade a fratura dinâmica aparente sugerem que uma vez nucleada uma trinca, a mesma se propagará muito mais rapidamente na região da Zona Afetada Termicamente do que no Metal Base. Apesar da junta soldada ter comprimento pequeno ao ser comparada com a totalidade da via, uma trinca longitudinal pode se propagar e ocorrer a fratura final principalmente na região da Zona Afetada Termicamente.

Tabela 7 - Valores de K_{ID} aparente para a condição Alma Longitudinal Topo.

Corpo de Prova	K_{ID} Aparente médio (MPa . m^{1/2})	Desvio Padrão (MPa . m^{1/2})
MBALT	80	9
ZALT	105	7

Dados do próprio autor.

Neste caso a Zona Afetada Termicamente sofre um aumento no valor de K_{ID} aparente em relação ao Metal Base, diferente do que aconteceu na direção Transversal. Um dos motivos desta variação pode ser o fato de o entalhe estar mais próximo à Linha de Caldeamento do que do Metal Base, região que compreende um material com melhores propriedades do que a região periférica Zona Afetada Termicamente-Metal Base.

Tabela 8 - Valores de K_{ID} aparente para a condição Alma Longitudinal Lateral.

Corpo de Prova	K_{ID} Aparente médio (MPa . m^{1/2})	Desvio Padrão (MPa . m^{1/2})
ZALL	102	16
LALL	123	27

Dados do próprio autor.

Na condição Alma Longitudinal Lateral infelizmente não foi possível a obtenção de resultados para o Metal Base, porém, os valores mostram que a Linha de Caldeamento tem tenacidade a fratura dinâmica aparente maior que a Zona Afetada Termicamente. Assim como no caso anterior, isso mostra a melhor qualidade desta região da junta soldada em relação a Zona Afetada Termicamente.

Tabela 9 - Valores de K_{ID} aparente para a condição Boleto Longitudinal Topo.

Corpo de Prova	K_{ID} Aparente médio (MPa . m^{1/2})	Desvio Padrão (MPa . m^{1/2})
MBBLT	94	4
ZBLT	87	5
LBLT	79	12

Dados do próprio autor.

No boleto, o comportamento da junta soldada se modifica em relação à alma, já que uma queda de K_{ID} aparente é observada do Metal Base até a Linha de Caldeamento. Esse comportamento mostra uma maior susceptibilidade de nucleação e propagação de trincas transversais na região da junta soldada no boleto.

Tabela 10 - Valores de K_{ID} aparente para a condição Boleto Longitudinal Lateral.

Corpo de Prova	K_{ID} Aparente médio (MPa . m ^{1/2})	Desvio Padrão (MPa . m ^{1/2})
MBLL	89	1
ZBLL	90	9
LBLL	-	-

Dados do próprio autor.

Na posição de entalhe lateral, apesar de os valores médios de K_{ID} aparente serem semelhantes, a Zona Afetada Termicamente novamente sofre uma queda, o que mostra um comportamento semelhante ao anterior, com maior facilidade de nucleação e propagação de trincas na junta soldada.

A direção Longitudinal dos corpos de prova que simula trincas transversais nos trilhos mostra que a região da junta soldada mostra que o boleto tem maiores chances de nucleação e propagação de trincas que a alma e também que a junta soldada é uma região preocupante nesse aspecto. Já na alma, além da chance de nucleação e propagação ser mais difícil que no boleto, a junta soldada mostra não ser tão crítica em relação ao comportamento de nucleação e propagação de trincas quanto o boleto, tendo tenacidade a fratura dinâmica aparente maior.

4.4 Ensaio de Fadiga

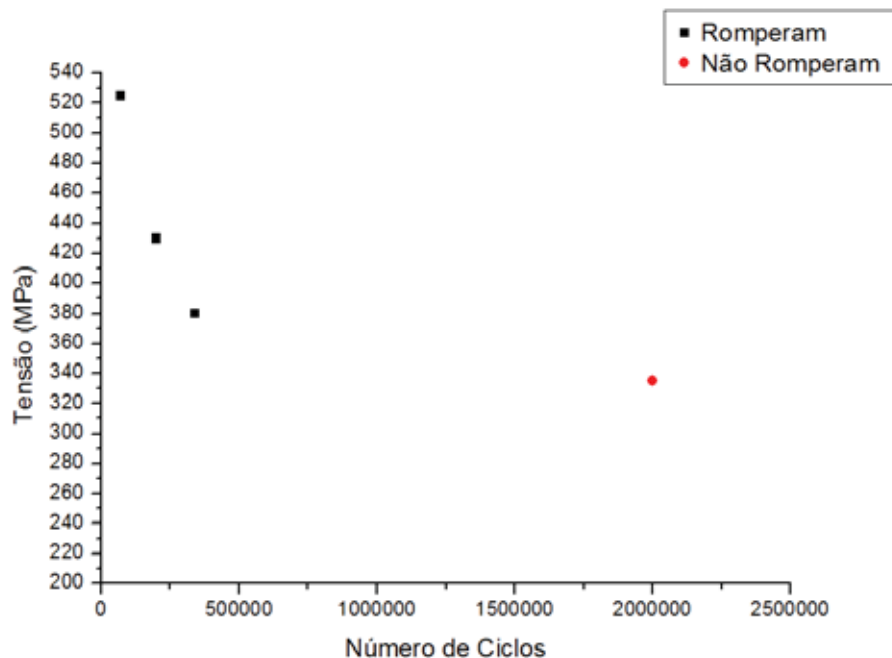
Antes de realizar o ensaio dos 18 corpos de prova do método da escada, 4 corpos de prova foram utilizados como um pré-teste. Como o valor de tensão inicial seria de 542 Mpa, que era maior do que a maior tensão que se poderia colocar em nossa máquina de ensaios. Com isso, o pré-teste foi realizado com 4 corpos de prova, sendo que as tensões e o número de ciclos dos corpos estão na tabela 11 e o gráfico da escada na figura 86. Nesse caso a escada não é evidenciada por se tratar de um pré-teste para conhecimento do comportamento do material dos trilhos.

Tabela 11 - Resultados pré-teste fadiga.

Número do CP	Tensão (MPa)	Número de Ciclos	Rompeu
1	525	70000	Sim
2	335	2000000	Não
3	430	200000	Sim
4	380	340000	Sim

Dados do próprio autor.

Figura 85 - Gráfico pré-teste.



Dados do próprio autor.

Após a realização do pré-teste, foi decidido que os ensaios para obtenção do limite de resistência à fadiga do material dos trilhos seria começado com o carregamento de 350 MPa com um degrau de aproximadamente 10 MPa.

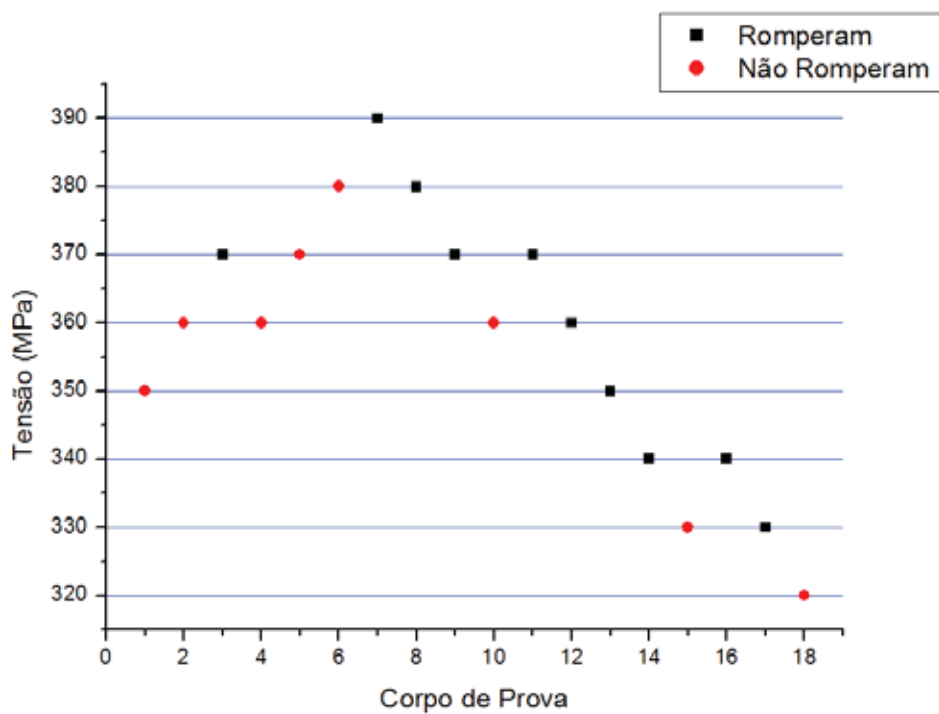
Uma vez realizado o pré-teste os 18 corpos de prova foram ensaiados começando-se com carregamento de 350 MPa e variando-se o degrau como explicado na seção 3.2.2.3. Os resultados estão na Tabela 5 e o gráfico de Tensão x Corpos de Prova está na Figura 87.

Tabela 12 - Resultados Ensaio de Fadiga.

Número do CP	Tensão (MPa)	Número de Ciclos (10^3)	Rompeu
1	350	2.000	Não
2	360	2.000	Não
3	370	787	Sim
4	360	2.000	Não
5	370	2.000	Não
6	380	2.000	Não
7	390	358	Sim
8	380	990	Sim
9	370	559	Sim
10	360	2.000	Não
11	370	180	Sim
12	350	360	Sim
13	360	380	Sim
14	340	280	Sim
15	330	2.000	Não
16	340	459	Sim
17	330	415	Sim
18	320	2.000	Não

Dados do próprio autor.

Figura 86 - Gráfico Ensaio de Fadiga Método da Escada.



Dados do próprio autor.

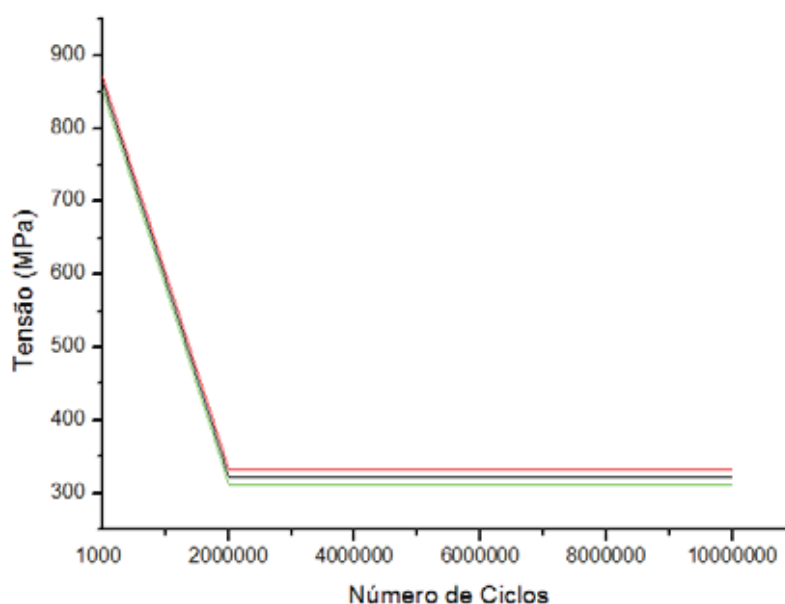
Para se encontrar o limite de fadiga médio dos trilhos foi utilizado o equacionamento mostrado na seção 2.7.3.2. deste trabalho.

Nos ensaios de fadiga, a fim de começar com um valor de tensão já próximo do que seria o limite de resistência à fadiga, o pré-teste foi realizado para entender o comportamento do material ensaiado. O pré-teste mostrou que o chute inicial de 540 MPa ou metade do limite de resistência à tração era muito alto, pois quando colocou-se o carregamento máximo suportado pela máquina de 525 MPa o corpo de prova fraturou com menos de 100.000 ciclos e com alta deformação plástica. Isso nos mostrou que o valor do limite de fadiga estava bem abaixo deste chute.

Quando o carregamento foi diminuído em 200 MPa para 330 MPa o corpo de prova não fraturou com 2×10^6 ciclos que é o critério de parada escolhido, o que obrigou a aumentar o valor de tensão em 100 MPa, que fez com que o corpo de prova fraturasse a um número de 2×10^5 ciclos. Como o corpo fraturou rapidamente, um novo valor de tensão, agora de 380 MPa foi utilizado, levando o CP à fratura com 340.000 ciclos.

Com o pré-teste finalizado, o valor inicial de 350 MPa foi utilizado para o começo do ensaio. Com o método explicado na seção 3.2.2.3. deste trabalho, a tensão foi sendo aumentada e diminuída de acordo com a ruptura ou não dos corpos de prova. Após os 18 corpos de prova serem ensaiados, o equacionamento da seção 2.5.3.2. foi utilizado para se encontrar o limite de fadiga médio do material dos trilhos. O limite de resistência à fadiga médio S_{fmed} foi de $322,5 \pm 10,34$ MPa. Com o valor do limite de resistência à fadiga encontrado, a curva S-N do material dos trilhos foi obtida, mostrada na Figura 87 com a curva do limite de fadiga médio e seus respectivos desvios.

Figura 87 - Curva S-N média com seus desvios.



Dados do próprio autor.

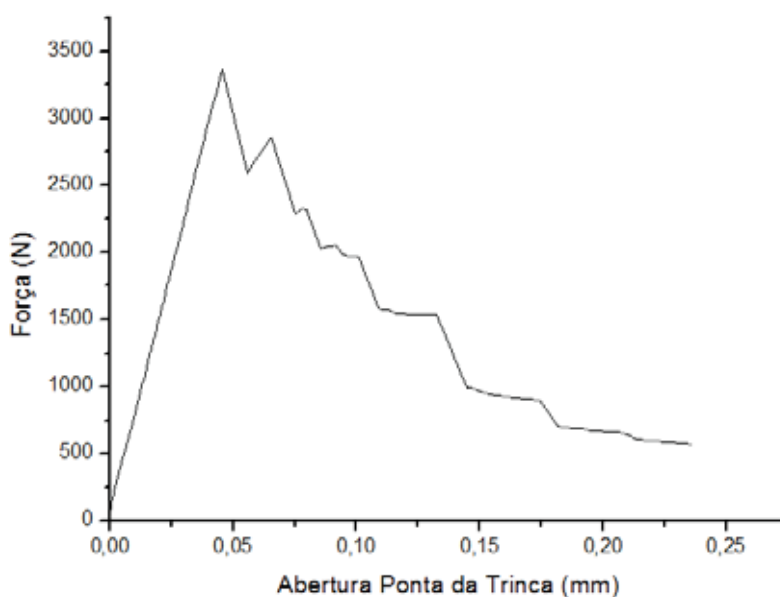
Por um problema de acesso a novos trilhos soldados não foi possível a realização de ensaios de fadiga com corpos de prova soldados. Outra dificuldade se deu com base nos resultados dos ensaios de tração, que mostraram que em uma região muito grande de ensaio, que compreende as três distintas regiões da junta soldada, não se teriam resultados muito confiáveis.

4.5 Ensaio de Tenacidade à Fratura

Os ensaios de tenacidade a fratura foram compostos em duas partes, inicialmente uma pré-trinca de 2 mm foi realizada em todos os 40 corpos de prova disponíveis. Os corpos eram posicionados na máquina e eram submetidas a um ensaio de fadiga para a nucleação e propagação da trinca. A taxa de carregamento era escolhida de modo ao comprimento de trinca desejado ser alcançado entre 30.000 e 50.000 ciclos para a propagação não ser muito rápida e diminuir a chance de corpos fraturarem antes do ensaio. Durante a realização das pré-trincas dois corpos de prova fraturaram em meio ao processo, os corpos ZBTF-2 e LBLL-1.

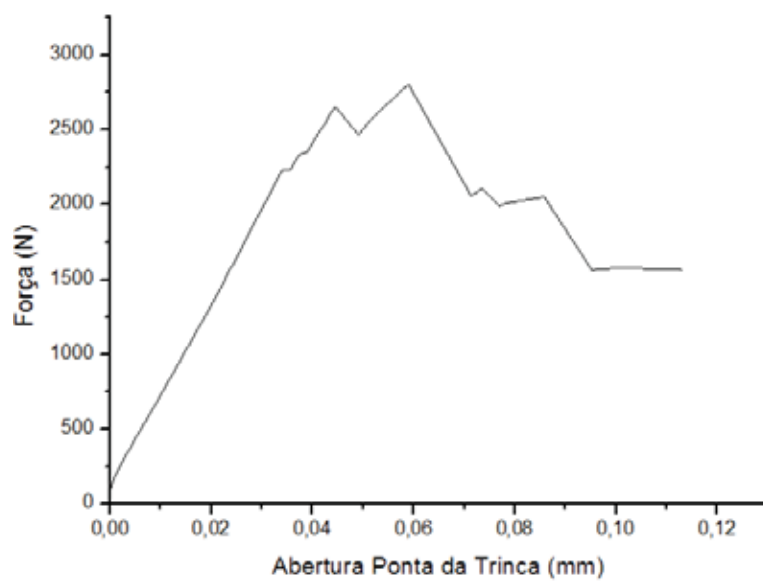
Com as pré-trincas realizadas o ensaio de tenacidade foi realizado, o ensaio grava a curva Força x Abertura da Ponta da Trinca. Nas Figuras 88 a 92 temos as curvas das 3 condições ensaiadas, Metal Base, Zona Afetada Termicamente e Linha de Caldeamento na direção Longitudinal para o Boleto e nas condições Metal Base e Zona Afetada Termicamente na direção Transversal para a Alma.

Figura 88 - Curva Força x Abertura Ponta da Trinca corpo de prova MBATF-1.



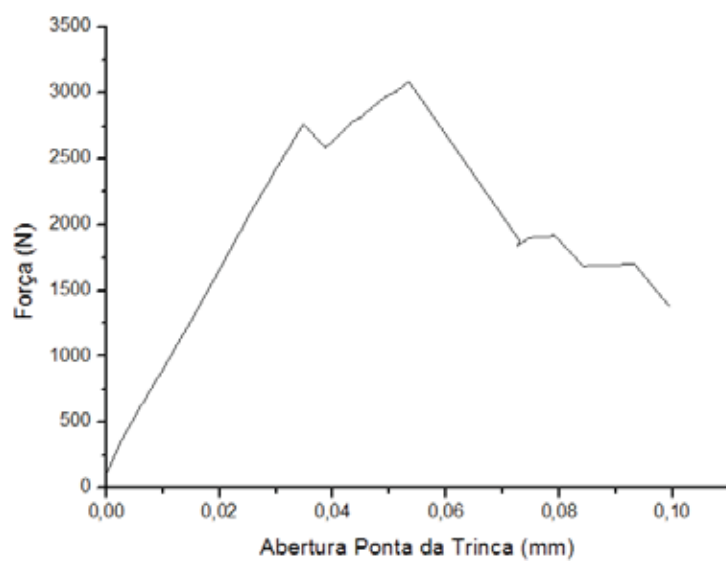
Dados do próprio autor.

Figura 89 - Curva Força x Abertura Ponta da Trinca corpo de prova ZATF-1.



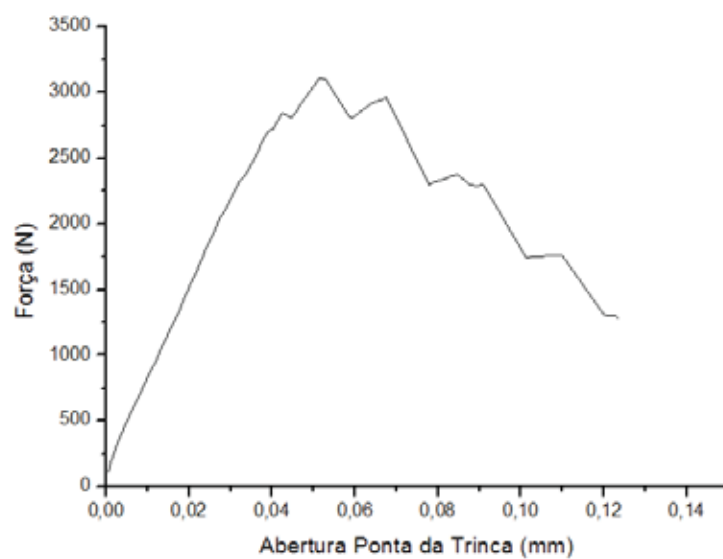
Dados do próprio autor.

Figura 90 - Curva Força x Abertura Ponta da Trinca corpo de prova MBBLT-1.



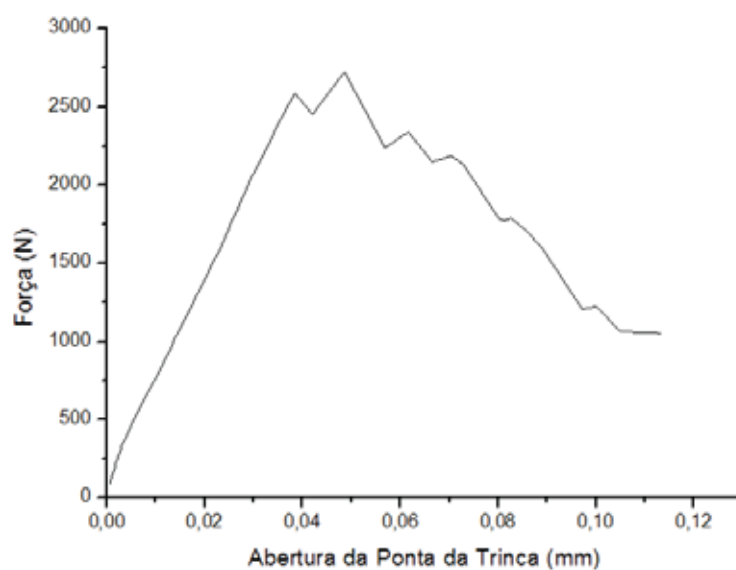
Dados do próprio autor.

Figura 91 - Curva Força x Abertura Ponta da Trinca corpo de prova ZBLT-1.



Dados do próprio autor.

Figura 92 - Curva Força x Abertura Ponta da Trinca corpo de prova LBLT-1.



Dados do próprio autor.

A Tabela 13 traz todos os valores de carga máxima atingida nos ensaios que foi utilizada para calcular os valores de K_{IC} do material dos trilhos e os valores de K_{IC} para cada uma das condições ensaiadas.

Tabela 13 - Valores de Carga Máxima e K_{IC} do material dos trilhos.

Corpo de Prova	Carga Máxima Ensaio (N)	K_{IC} (MPa. m ^{1/2})	K_{IC} méd (MPa. m ^{1/2})	Desvio Padrão (MPa. m ^{1/2})
MBATF-1	3374	43	43	0
MBATF-2	3399	43		
MBATL-1	4652	42	43	1
MBATL-2	3429	44		
MBALT-1	2801	36	39	4
MBALT-2	3284	42		
MBALL-1	3054	39	38	1
MBALL-2	2900	37		
ZATF-1	2805	36	37	2
ZATF-2	3091	39		
ZATL-1	2665	34	37	3
ZATL-2	3094	39		
ZALT-1	2665	35	35	1
ZALT-2	2809	36		
ZALL-1	3318	42	45	3
ZALL-2	4194	47		
ZBLT-1	3140	40	40	0
ZBLT-2	3122	40		
ZBLL-1	2988	38	37	1
ZBLL-2	2885	37		
ZBTT-1	3735	48	42	7
ZBTT-2	2952	37		
ZBTF-1	2642	33	33	-
ZBTF-2	-	-		
MBBLT-1	3105	39	40	1
MBBLT-2	3264	41		
MBBLL-1	3126	40	38	2
MBBLL-2	2893	37		
MBBTT-1	2834	36	35	1
MBBTT-2	2730	35		
MBBTF-1	3019	38	37	1
MBBTF-2	2881	37		
LBLT-1	2745	35	36	1
LBLT-2	2857	36		
LBLL-1	-	-	33	-
LBLL-2	2640	33		
LALT-1	3073	39	41	2
LALT-2	3324	42		
LALL-1	3236	41	42	1
LALL-2	3384	43		

Dados do próprio autor.

Os ensaios de tenacidade a fratura mostraram que o K_{IC} não sofreu muitas variações entre os corpos de prova de cada condição, tirando as condições ZATF, ZATL, ZALL e ZBTT, todos os valores tiveram um desvio pequeno, menor do que 5%.

Como o número de corpos de prova ensaiados foi pequeno, de apenas 2 por condição, devido ao tempo de utilização da estrutura dos ensaios ser pequeno, o que dificultou na obtenção de melhores resultados com uma amostragem maior.

Ao se analisar os resultados do Metal Base na direção transversal temos a alma com os maiores valores médios de K_{IC} que os do boleto sendo de $43 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ o maior valor médio na alma e de $40 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ o maior valor do boleto. Ao se analisar os valores de tenacidade para as diferentes posições de entalhes os valores foram muito parecidos tanto na alma quanto no boleto. Apesar de as posições dos entalhes serem diferentes em cada região, os menores valores de tenacidade mostram uma maior facilidade de propagação de trincas no boleto.

Na direção longitudinal o comportamento da direção transversal não é observado, sendo que a diferença entre os valores médios para as duas regiões, alma e boleto, são bastante parecidos, tendo a alma com maior valor de $39 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ e o boleto de $40,94 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. Nas diferentes posições de entalhe novamente os valores de tenacidade quase não variaram tanto na alma quanto no boleto. Neste caso, as posições dos entalhes são as mesmas, simulando a propagação de trincas na transversal do trilho, neste caso, os valores semelhantes não indicam nenhuma região de maior facilidade de propagação de trincas.

Na Zona Afetada Termicamente os valores de K_{IC} na transversal o boleto teve o maior valor médio de $42 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ contra $37 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ na alma. Na alma a variação do valor de K_{IC} foi novamente pequena para os dois tipos de entalhes, já no boleto a variação entre as duas posições de entalhe foi maior, com o entalhe no topo tendo o maior valor de tenacidade a fratura. Nesta condição, a propagação de trincas deve ser mais fácil na região da alma que possui os menores valores de K_{IC} .

Ao analisar os resultados da Linha de Caldeamento que só teve corpos de prova na longitudinal novamente a alma tem valores médios maiores com o máximo de $42 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ maior que o valor de $36 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ encontrado no boleto. Novamente a posição do entalhe teve pouca influência nos valores de K_{IC} , com a influência sendo um pouco maior no boleto, onde o entalhe no topo teve valores maiores de tenacidade a fratura. Também nesta condição, assim como no Metal Base, a propagação de trincas deve encontrar maior facilidade para ocorrer no boleto.

Para facilitar a leitura e análise dos resultados para cada condição ensaiada, comparando-se entre Metal Base, Zona Afetada Termicamente e Linha de Caldeamento, os resultados foram colocados novamente nas Tabelas 14 a 21 para que cada condição tenha seus resultados agrupados.

Tabela 14 - Resultados K_{IC} condição Alma Transversal Frente.

Condição	$K_{IC} \text{ méd (MPa. m}^{1/2})$	Desvio Padrão(MPa. m ^{1/2})
MBATF	43	0
ZATF	37	2

Dados do próprio autor.

Nos corpos de prova ATF a tenacidade sofreu uma queda do Metal Base para a Zona Afetada Termicamente, o que mostra uma influência direta da junta soldada no comportamento de K_{IC} do material dos trilhos. Esta condição simula uma trinca longitudinal horizontal nos trilhos, e mostra que existe uma facilidade de nucleação e propagação de trincas na Zona Afetada Termicamente.

Tabela 15 - Resultados K_{IC} condição Alma Transversal Lateral.

Condição	$K_{IC} \text{ méd (MPa. m}^{1/2})$	Desvio Padrão(MPa. m ^{1/2})
MBATL	43	1
ZATL	37	3

Dados do próprio autor.

Novamente na condição ATL a tenacidade sofreu uma queda semelhante aos corpos ATF, mostrando novamente a influência da junta soldada no comportamento do K_{IC} . Esta posição de entalhe simula exatamente o mesmo tipo de trincas da anterior, reforçando a fragilidade da Zona Afetada Termicamente em relação ao Metal Base.

Tabela 16 - Resultados K_{IC} condição Boleto Transversal Topo.

Condição	$K_{IC} \text{ méd (MPa. m}^{1/2})$	Desvio Padrão(MPa. m ^{1/2})
MBBTT	35	1
ZBTT	42	7

Dados do próprio autor.

Nos corpos BTT a tenacidade sofreu um aumento ao partir do Metal Base para a Zona Afetada Termicamente. Apesar do comportamento ser diferente do observado nas condições anteriores, o alto desvio padrão da condição ZBTT mostra que os valores podem ser iguais ou até mesmo menores que a condição MBBTT. Uma justificativa para este efeito pode ser o posicionamento do entalhe na região da Zona Afetada Termicamente. Como a Zona Afetada tem duas regiões distintas, o entalhe pode estar posicionado em uma região mais próxima da Linha de Caldeamento, que tem dureza maior que a região mais próxima do Metal Base.

Tabela 17 - Resultados K_{IC} condição Boleto Transversal Frente.

Condição	$K_{IC} \text{ méd (MPa. m}^{1/2})$	Desvio Padrão(MPa. m ^{1/2})
MBBTF	37	1
ZBTF	33	-

Dados do próprio autor.

Na condição BTF novamente a queda do valor de K_{IC} foi observada na região da Zona Afetada Termicamente em relação ao Metal Base. O comportamento de K_{IC} no boleto mostra que a região da junta soldada sofre uma fragilização que aumenta a chance de nucleação e propagação de trincas por fadiga.

Tabela 18 - Resultados K_{IC} condição Alma Longitudinal Topo.

Condição	K_{IC} méd (MPa. m^{1/2})	Desvio Padrão(MPa. m^{1/2})
MBALT	39	4
ZALT	35	1
LALT	41	2

Dados do próprio autor.

Na condição ALT, o valor de K_{IC} caiu ao passar da região Metal Base para Zona Afetada Termicamente, porém ao se alcançar a região da Linha de Caldeamento o valor de K_{IC} aumentou. O comportamento da Zona Afetada Termicamente é o mesmo encontrado para a direção Transversal para a maior parte das posições de entalhe e novamente mostra a fragilidade da Zona Afetada Termicamente. O aumento do valor de K_{IC} na região da Linha de Caldeamento não foi um valor considerável, já que ao se observar os desvios da própria Linha de Caldeamento e do Metal Base, os valores se mostram muito semelhantes.

Tabela 19 - Resultados K_{IC} condição Alma Longitudinal Lateral.

Condição	K_{IC} méd (MPa. m^{1/2})	Desvio Padrão(MPa. m^{1/2})
MBALL	38	1
ZALL	45	3
LALL	42	1

Dados do próprio autor.

A condição ALL teve novamente um aumento do valor de K_{IC} na Zona Afetada Termicamente, nesta condição o Metal base teve o menor valor, mudando o comportamento da posição de entalhe anterior ALT. Novamente este efeito pode ser justificado pelo posicionamento do entalhe em uma região da Zona Afetada próxima à Linha de Caldeamento, também se percebe que pelos valores de desvio da Zona Afetada e da Linha de Caldeamento que os valores das duas são praticamente iguais, o que sugere o posicionamento dos dois entalhes sendo parecidos.

Tabela 20 - Resultados K_{IC} condição Boleto Longitudinal Topo.

Condição	K_{IC} méd (MPa. m^{1/2})	Desvio Padrão(MPa. m^{1/2})
MBBLT	40	1
ZBLT	40	1
LBLT	36	1

Dados do próprio autor.

Na condição BLT uma queda sequencial do Metal Base até a Linha de Caldeamento foi observada, diferentemente do que foi encontrado na Alma. A queda do Metal Base para a Zona Afetada Termicamente foi menor nesta condição, já a queda para a Linha de Caldeamento foi maior, mostrando uma fragilidade desta região no boleto.

Tabela 21 - Resultados K_{IC} condição Boleto Longitudinal Lateral.

Condição	K_{IC} méd (MPa. m^{1/2})	Desvio Padrão(MPa. m^{1/2})
MBLL	38	2
ZBLL	37	1
LBLL	33	-

Dados do próprio autor.

Novamente a diminuição gradativa do valor de K_{IC} foi observada na condição BLL, com o Metal Base tendo o maior valor. Esta queda em uma posição diferente de entalhe, sugere que no boleto a região mais frágil e suscetível à nucleação e propagação de trincas é realmente a Linha de Caldeamento. A variação entre Metal Base e Zona Afetada Termicamente não foi muito grande, o que sugere que a posição do entalhe novamente influenciou nos valores de K_{IC} .

Quando comparamos as condições da alma entre si, na direção Transversal temos a região da Zona Afetada Termicamente tendo valores de K_{IC} bem menores do que o Metal Base para as duas posições de entalhe utilizadas, Frente e Lateral. Nesta direção temos um comportamento mais frágil da região da Zona Afetada da alma, o que aliado ao comportamento predominantemente elástico do material torna um fator preocupante. Ao uma trinca longitudinal horizontal nuclear, ela se propagará de maneira muito rápida na região da Zona Afetada Termicamente, que é pequena ao se comparar com o comprimento dos trilhos, porém, cria uma região de preocupação e que precisa de constantes inspeções.

Na direção Longitudinal o comportamento foi muito diferente da direção Transversal, já que com o entalhe posicionado no topo o valor de K_{IC} caiu na Zona Afetada e aumentou na Linha de Caldeamento. Porém os valores dos desvios indicam que a diferença entre os valores do Metal Base e da Linha de Caldeamento são parecidos, indicando que na Linha de Caldeamento a diferença na tenacidade a fratura não foi perceptível. Ao se analisar o entalhe lateral o valor de K_{IC} se torna maior na Zona Afetada, porém, os valores dos desvios novamente fazem os valores se tornarem próximos, indicando um comportamento não muito diferente para as três condições.

No boleto, a direção transversal o entalhe no topo teve um comportamento não muito confiável, já que o desvio da Zona Afetada Termicamente foi muito alto, sugerindo que a diferença das duas condições foi muito pequena ou inexistente. No entalhe frontal o mesmo comportamento encontrado na alma aparece, com a tenacidade

a fratura da Zona Afetada Termicamente sendo menor em relação ao Metal Base indicando que a primeira condição é a de maior atenção na região do boleto.

Na direção Transversal os entalhes simulam trincas longitudinais horizontais no caso da alma e verticais no caso do boleto. Com os resultados encontrados uma maior atenção à região da Zona Afetada Termicamente deve ser dada, com maiores inspeções pois uma vez nucleada uma trinca, seja na região da Zona Afetada Termicamente, ao passar pela Zona Afetada a trinca se propagará rapidamente com a passagem de trens.

Os resultados para a alma na direção Longitudinal mostram novamente que a região mais frágil é a da Zona Afetada Termicamente, com o Metal Base e a Linha de Caldeamento tendo valores de K_{IC} próximos. Apesar de o entalhe na posição lateral mostrar que a Zona Afetada tem o maior valor médio de K_{IC} ao se estudar o valor dos desvios percebe-se que os valores para as três condições não têm muita diferença. Um problema com a posição dos entalhes pode justificar o comportamento parecido da Zona Afetada Termicamente com a Linha de Caldeamento, já que entalhes próximos podem fazer os resultados serem parecidos.

No boleto para as duas posições de entalhe na direção Longitudinal uma queda gradativa da condição Metal Base para a Linha de Caldeamento foi observada. Com o valor de K_C sendo menor na Linha de Caldeamento, novamente uma fragilização do material dos trilhos é observada na junta soldada.

Na direção Longitudinal a posição dos entalhes que simula trincas transversais mostra que na região do boleto a Linha de Caldeamento se mostra crítica, com os menores valores de K_{IC} juntamente com a Zona Afetada Termicamente. Na alma os resultados não foram conclusivos pela alta dispersão dos valores médios, porém a Zona Afetada Termicamente se mostra mais frágil e propensa a nucleação e propagação de trincas. Portanto, tanto na alma quanto no boleto a junta soldada é uma área que necessita de constantes inspeções para se identificar as trincas no seu período inicial para prevenir falhas.

5 Conclusões

Com base nos resultados apresentados, é possível concluir:

- A junta soldada influencia diretamente no comportamento das propriedades mecânicas do material dos trilhos, modificando as propriedades principalmente na Zona Afetada Termicamente.
- A Zona Afetada Termicamente requer estudos mais aprofundados pela existência de duas regiões internas distintas, uma com propriedades aparentemente melhores, próxima à Linha de Caldeamento e uma que tende a fragilizar o material localizada mais próxima do Metal Base.
- Os resultados de todos ensaios realizados mostram que uma caracterização melhor do material dos trilhos se dá com ensaios em que um pequeno volume do material ou um volume mais direcionado do material é ensaiado. As diferenças nas propriedades mecânicas medidas pelo ensaio de tração não foram altas muito devido ao grande volume de material ensaiado comparado com o volume da junta soldada. Em compensação forma mais perceptíveis nos ensaios Charpy instrumentado e de tenacidade à fratura, com um volume menor de material ensaiado e com a posição da região de ensaio, que era menor e mais direta.
- Os ensaios Charpy mostram que a junta soldada tem um comportamento diferente na região da alma em relação ao boleto. Na alma, a junta soldada mostra ter melhores propriedades a fratura que a região do Metal Base, já no boleto a região da junta soldada mostra-se mais frágil. Este comportamento se deve em muito no posicionamento dos entalhes, se o mesmo estiver mais próximo da Linha de Caldeamento a tenacidade a fratura dinâmica aparente se mostra maior do que a região da Zona Afetada Termicamente mais próxima do Metal Base.
- Os ensaios de tenacidade a fratura mostraram que a junta soldada tem influência direta no valor de K_{IC} do material dos trilhos, sendo que este valor é menor na região da junta soldada em relação ao Metal Base.
- Os ensaios de tenacidade a fratura também mostraram que o material tem um comportamento predominantemente elástico tanto no Metal Base quanto na região da junta soldada. Esse comportamento reflete nos baixos valores de tenacidade encontrados e também na ocorrência de falhas catastróficas como fraturas frágeis.

6 Sugestões para trabalhos futuros

- Trabalhar com trilhos já usados, para uma caracterização da influência do tempo de tráfego nas características dos trilhos.
- Análise das superfícies de fratura dos ensaios de impacto Charpy instrumentado e de tenacidade à fratura a fim de caracterizar a superfície de fratura e assim entender melhor os micromecanismos de fratura e como eles influenciam no comportamento a fadiga dos trilhos.
- Utilizar ensaios de fadiga de diferentes solicitações e de modelos de corpos de prova mais compactos.
- Estudar o processo de soldagem por caldeamento em como as condições de soldagem influenciam na junta soldada.

Referências

- [1] MUNDI, INDEX. **Mapa comparativo entre países**. [S.l.: s.n., 200-] Disponível em: <<http://www.indexmundi.com/map/?t=0&v=113&r=xx&l=pt>>. Acesso em: 13 jun. 2010
- [2] VOSE, G. L. Railway-accidents in 1882. **Science**, Washington, v. 1, n. 6, p.167-168, mar. 1883.
- [3] JEONG, D. Y. **Progress in railway integrity research**. Cambridge: Us Department Of Transportation, 2000. 36 p.
- [4] JACQUES, D. **Situation and perspectives of the rail market TREN/R1/350-2008 lot 2: final report**. Zoetermeer: NEA, 2010. 247 p.
- [5] AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (Org.). **Relatório anual 2010**. Brasília: Supernova, 2010. 154 p.
- [6] PORTO, T. G. **PTR 2501 - ferrovias**. São Paulo: USP, 2004. 80 p.
- [7] MACÊDO, F. B. **Estudo do desgaste de trilhos ferroviários**. 2009. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2009.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7590: trilho vignole**. Rio de Janeiro, 1991.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12320: trilho vignole – forma e dimensão**. Rio de Janeiro, 1979.
- [10] ESVELD, C. **Modern railway track**. 2. ed. Duisburg. MRT-Productions, 2001. 632 p.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11710 trilho Vignole – especificação**. Rio de Janeiro, 1979.
- [12] CANNON, D. F. EDEL, K. O. GRASSIE, S. L. SAWLEY, K. **Rail defects: an overview. fatigue fracture engineering materials structure**. Oxford: Blackwell, 2003. p. 865-877
- [13] ORRINGER, O.; TANG Y. H.; GORDON J. E.; JEONG D. Y.; MORRIS J. M.; PERTMAN A. B. **Crack propagation life of detail fractures in rails**. Buffalo: UJ Department of Transportation, FRA, DOT/FRA/ORD-88/13, 1988. 198 p.
- [14] RINGSBERG, J. W.; JOSEFSON, B. L. Finite element analyses of rolling contact fatigue crack initiation in rail heads. I. Mech.e. f. railw. **Journal of rail and rapid transit. Huddersfield**. v. 214, n. 215, p. 243-259, 2000.

- [15] SKYTTEBOL, A.; JOSEFSON; RINGSBERG, J. W. Fatigue crack growth in a welded rail under the influence of residual stresses. **Engineering Fracture Mechanics**, Elmsford, v. 72, n. 2 , p. 271-285, out. 2003.
- [16] ORRINGER, O. Some suggestions for adjusting rail test schedules to reflect track characteristics, maintenance, traffic and weather. In: RAIL STEELS SYMPOSIUM, 1., 1992, Warrendale. **Proceedings...** Warrendale: The society, 1992. p. 149-158.
- [17] VAN, K. D. et al. A comprehensive approach for modeling fatigue and fracture of rails. **Engineering Fracture Mechanics**, Paris, v. 76, p.2626-2636, jan. 2009.
- [18] VALE. **Manual de manutenção ferroviário**. Rio de Janeiro: Nacional, 2009. 362p.
- [19] FARHANGI, H.; MOUSAVIZADEH, S. M. Horizontal split-web fractures of flash-butt welded rails. In: INTERNATIONAL FRACTURE CONFERENCE, 8., 2007, Istanbul. **Conference...** Istanbul: [s.n.], 2007 p. 509-517.
- [20] TOKIMATSU, R. C. **Influência de parâmetros microestruturais e procedimentos de ensaios no comportamento mecânico de um aço de ultra-resistência e baixa liga**. 1995. 435 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, Campinas, 1995.
- [21] DIETER, G. E. **Mechanical metallurgy**. Londres: Mcgraw-hill Book Company, 1988. 751p.
- [22] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E23-96**: standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials. Danvers, 1996. p.136-55.
- [23] DELFORGE, D. Y. M. **Instrumentação de um pêndulo para ensaio de impacto Charpy**. 1994. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas. Campinas, 1994.
- [24] YAMAMOTO, I. KOBAYASHI, T. Evaluation method of dynamic toughness by computer aided instrumented Charpy impact testing system. **International Journal of Vessel & Piping**, Netherlands, v. 55, p. 295-312, 1993.
- [25] HERTZBERG, R. W. Transition temperature approach to fracture control. **Deformation and fracture mechanics of engineering materials**. 4. ed. New York: J. Wiley, 1995. p. 297-323.
- [26] LEE, O. S. HONG, S. K. Dynamic fracture characteristics of highly brittle materials by using instrumented charpy impact test, **KSME International Journal**, Seoul, v. 11, n. 5, p. 513~520, 1997.
- [27] FERREIRA, I.; TOKIMATSU, R. C. **Apostila fadiga dos materiais**. Campinas: Editora da Unicamp, 2001. p. 88.

- [28] LIMBERGER, I. F. **Trilhos ferroviários**. 2000. 144 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- [29] BROEK, D. **The practical use of fracture mechanics**. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1989. 585 p.
- [30] PLU, J.; BONDEUX, S.; BOULANGER, D.; HEYDER, R. Application of fracture mechanics methods to rail design and maintenance. **Engineering Fracture Mechanics**, Ithaca, v. 76, p. 2602-2611, 2009.
- [31] GRIFFITH, A. A. The phenomena of rupture and flow in solids. **Philosophical Transactions of Royal Society**, London, 221 A, p. 163-198, 1920.
- [32] FERREIRA, I. **Fratura dos metais**. Campinas: Unicamp. 2001. 75 p.
- [33] OROWAN, E. **Fracture and strenght of solids**. London: [s.n], 1948. p. 185 (Reports on Progress in Phisics, 12).
- [34] PARKER, A.P. **The mechanics of fracture and fatigue**. USA: E. & F.N. Spon, 1981. p. 28-48.
- [35] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 1823 – 96**: definition of terms relating to fatigue and fracture testing. Danvers, 1996.
- [36] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 399 – 09**: standard test method for linear-elastic plane-strain fracture toughness KIC of metallic materials. Danvers, 2010.
- [37] SCHNEIDER, E. L. **Análise da vida remanescente de trilhos com defeitos transversais desgastados em serviço**. 2005. 115 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- [38] PARIS P. C.; ERDOGAN F. J. A critical analysis of crack propagation laws. **Journal of fluids engineering**. Law Drive, v. 4 n. 85, p. 6, 1963.
- [39] RAILTRACK, P. L. C. **Rolling contact fatigue in rails**: a guide to current understanding and practice. Birmingham: Heron Press, 1993. 28 p.
- [40] ZERBST, U.; SCHÖDEL, M.; HEYDER, R. Damage tolerance investigations on rails. **Engineering Fracture Mechanics**, Paris, v. 76 , p. 2637-2653, ago. 2008.
- [41] RINGSBERG J. W. Life prediction of rolling contact fatigue crack initiation. **International Journal of Fatigue**, Chalme, v. 23, n. 7. p. 575–586, 2001.
- [42] INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 14556**: steel - charpy v-notch pendulum impact test - instrumented test method. Geneva: [s.n.], 2000. 14 p.
- [43] RODRIGUES, A. R. **Determinação da tenacidade à fratura dinâmica de materiais metálicos**. 2001. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) -

Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de São Paulo “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2001.

- [44] VIDOTTO, G. J. **Calibração estática/dinâmica conforme a norma ISO 14.556 para o ensaio Charpy instrumentado.** Ilha Solteira: [s.n.], 2003, 70 p. Relatório final de pesquisa de iniciação científica.