Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais





Dissertação de Mestrado

Anderson de Matos Gomes

Caracterização Microestrutural, Mecânica e de Tensões Residuais de Trilhos Utilizados em Vias de Transporte de Aço Líquido

> Belo Horizonte Outubro de 2016

Anderson de Matos Gomes

Caracterização Microestrutural, Mecânica e de Tensões Residuais de Trilhos Utilizados em Vias de Transporte de Aço Líquido

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Ciência e Desenvolvimento de Materiais Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização de Materiais Orientador: Prof^a. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa Coorientador: Prof. Dr. Nilton da Silva Maia

> Belo Horizonte Outubro de 2016

Gomes, Anderson de Matos.
G633g Caracterização microestrutural, mecânica e de tensões residuais
de Matos Gomes 2016.
145 f. : il., tabs., grafs., fotos
Orientadora: Elaine Carballo Siqueira Corrêa.
Co-orientador: Nilton da Silva Maia.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica
de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Materiais, Belo Horizonte, 2016.
Bibliografia.
1. Microestrutura. 2. Dureza. 3. Fadiga dos materiais. 4. Tensão
dos materiais. I. Corrêa, Elaine Carballo Siqueira. II. Maia, Nilton da
Silva. II. Título.
CDD: 620.11230287

L



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO "CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL, MECÂNICA E DE TENSÕES RESIDUAIS DE TRILHOS UTILIZADOS EM VIAS DE TRANSPORTE DE AÇO LÍQUIDO"

Autor: Anderson de Matos Gomes

Orientadora: Profª. Drª. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Elaine Carballo Scono

Prof^a. Dr^a. Elaine Carballo Siqueira Corrêa (ORIENTADORA) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Nilton da Silva Maia (COORIENTADOR) Centro Federal de Educação Tecnológica de Mines Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Wellington Lopes Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

- - (sourie Re 3/4

Prof. Dr. Emerson Giovani Rabello Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear / Comissão Nacional de Energia Nuclear

Belo Horizonte, 04 de Outubro de 2016.

Dedico esse trabalho aos educadores dos anos iniciais. Tão importantes, mas poucos valorizados. Eles são os cultivadores das sementes da ciência.

AGRADECIMENTOS

À Deus por me guiar.

A Prof^a Dr^a Elaine Carballo Siqueira Corrêa pela orientação e incomparável dedicação.

Ao Prof. Dr. Nilton da Silva Maia pela coorientação dando um excelente norte ao trabalho.

Ao professor Carlos Eduardo dos Santos por permitir utilizar a oficina do CEFET-MG e aos seus colaboradores Geraldinho, Carlinhos e Rogério pelo apoio na preparação dos materiais.

Ao funcionário do CDTN Vlamir Caio Eustáquio pelo apoio nos ensaios de tensões residuais.

Ao Dr. Emerson Giovani Rabello por abrir as portas do CDTN viabilizando a realização dos ensaios de tensões residuais;

Ao Msc. Denis Henrique Bianchi Scaldaferri pelo profissionalismo e disponibilidade.

Ao Dr. Tanius Rodrigues Mansur pelo direcionamento na fase de qualificação

À Msc. Suzanny Cristina Soares Martins por suas contribuições.

À aluna Patrícia Sperber pelo apoio nas práticas laboratoriais.

À mãe Natália e ao pai Jésus, origem de tudo, e aos irmãos pela torcida.

Àqueles que, por um objetivo pessoal, tiveram a minha dedicação e presença um pouco mais restrita em suas vidas: minha esposa Waldete e filho Renan.

RESUMO

Definido como suporte e guia de equipamentos industriais, o componente trilho é elemento de grande importância na continuidade do funcionamento de um sistema de produção de uma planta industrial. Sujeitos a altos valores de carregamentos cíclicos, os trilhos estão suscetíveis a falhas de diversas naturezas exigindo constante substituição de parte ou da totalidade do mesmo. Nesse contexto, defeitos e descontinuidades tipicamente conhecidos nos trilhos de ferrovias foram abordados nesta pesquisa, de forma específica em amostras de trilhos tipo A100 da norma DIN 536/1991 aplicado como caminho para o equipamento denominado Carro de Transferência de Aço Líquido (CTAL) utilizado em usinas siderúrgicas. A variação de composição química e temperatura de duas regiões específicas onde o trilho é instalado foram explorados como variável. Da mesma forma, foram analisadas as tensões residuais relacionando-as com as variações de propriedades e com a microestrutura reveladas na caracterização dos materiais em situações distintas da utilização. As caracterizações, como um todo, mostraram a heterogeneidade das amostras novas e as modificações da microestrutura e das propriedades mecânicas das superfícies das amostras dos trilhos usados. A não homogeneidade identificada nas amostras influenciou na análise dos resultados obtidos nos ensaios de tensões residuais. Dessa forma, sugeriu-se haver relação de tais parâmetros com as propriedades mecânicas.

Palavras chaves: microestrutura, dureza, fadiga, furo cego.

ABSTRACT

Defined as support and guide industrial equipment, the rail component is very important element in the continuity of the operation of an industrial plant production system. Subject to high cyclical loading values, rails are susceptible to failures of various natures requiring constant replacement of part or all of the same. In this context, defects and discontinuities typically known in the railroad tracks were addressed discontinuities typically known on track railways were addressed in this study, specifically samples of type A100 rails DIN 536/1991 standard applied as path to the equipment called Teeming Ladle Car used in steel mills. The range of chemical composition and temperature in two specific regions where the rail is installed were exploited as variable. Likewise, residual stresses were analyzed by relating them to the variations in properties and the microstructure discussed in the characterization of materials in different use situations. The characterizations as a whole indicated heterogeneity of new samples and structural modifications and modifications of the microstructure and the mechanical properties of the surfaces of the samples of used rails. The non-homogeneity in the samples identified influence on the analysis of results obtained in tests of residual stresses. Thus, it was suggested a relation of these parameters with the mechanical properties.

Key words: microstructure, hardness, fatigue, hole drilling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Partes constituintes de um trilho23
Figura 3.2 – Fissuração do canto do boleto ou <i>head checking</i>
Figura 3.3 – Escamação ou <i>flaking.</i> 27
Figura 3.4 – Estilhamento do canto do boleto ou <i>spalling</i> 28
Figura 3.5 – Despedaçamento do canto do boleto ou <i>shelling</i>
Figura 3.6 – Patinagem ou Wheel Burn
Figura 3.7 – Deformação plástica do boleto ou rail plastic flow
Figura 3.8 – Desgaste ou <i>Wear.</i>
Figura 3.9 – Representação da deformação plástica resultante da interação entre a
roda e o trilho, na qual as linhas tracejadas indicam planos antes e após a deformação.
Figura 3.10 - Diferentes tipos de carga por contato que resultam em formação de
trincas
Figura 3.11– Aspecto da rede de ferrita fragilizada34
Figura 3.12– Microestrutura deformada e crescimento de trinca por RCF
Figura 3.13 – Mecanismo de propagação de trinca pela pressão de um fluido
aprisionado
Figura 3.14 - Rugosidade de superfície de um material em diferentes escalas e
carregamento em uma rugosidade causando cone de trinca
Figura 3.15 - Fotomicrografias do canto do boleto de um trilho ferroviário novo e
usado
Figura 3.16 – Fotomicrografia da seção do canto do boleto de um trilho usado38
Figura 3.17 – Perfis de dureza de duas amostras distintas de trilhos usados
Figura 3.18 – Perfis de dureza da amostra de trilhos novo
Figura 3.19 – Perfis de dureza da amostra de trilho novo
Figura 3.20 – Visão de trinca e região de desgaste de um trilho usado de alto teor de
carbono40
Figura 3.21 – Análise da microestrutura do trilho ferroviário BS113A grade 22041
Figura 3.22 – Efeito da tensão residual no desempenho do material42
Figura 3.23 – Origem das tensões residuais44
Figura 3.24 – Representação esquemática da aplicação de roseta para utilização do
método do furo cego para medição de tensões residuais47

Figura 3.25 – Tipos de rosetas47
Figura 3.26 – Representação da geometria típica de uma roseta de três elementos.
Figura 3.27 – Perfil típico de tensões residuais aliviadas obtido pelo método do furo
cego incremental52
Figura 3.28 – Representação da geometria típica de uma roseta de três elementos.
Figura 3.29 - Ocorrência de tensão residual no material durante a laminação de
chapas57
Figura 3.30 – Desempeno dos trilhos laminados59
Figura 3.31 – Perfil do trilho a alta temperatura seguindo para o leito de resfriamento
e desempeno por rolos para compensação por alteração de curvatura60
Figura 3.32 – Gráfico da tensão residual após desempeno e modelo apresentando as
linhas de tensões61
Figura 3.33 – Distribuição de tensões residuais na região branca de maior dureza. 61
Figura 3.34 – Efeito do desempeno e da utilização nas tensões residuais no trilho. 62
Figura 3.35 – Configuração típica de carregamento de um trilho63
Figura 3.36 – Desenho esquemático das posições da região do boleto para a
realização dos ensaios64
Figura 4.1 – Trilho tipo A100 da norma DIN 536/199165
Figura 4.2 – Representação do carro mecânico de transporte de aço líquido com as
principais dimensões66
Figura 4.3 – Regiões de extração das amostras dos trilhos usados para ensaios67
Figura 4.4 – Regiões de extração dos trilhos usados para ensaios
Figura 4.5 – Sequenciamento de corte das amostras70
Figura 4.6 – Fluxograma das etapas experimentais do trabalho a ser realizado70
Figura 4.7 – Dimensões nominais trilho A10073
Figura 4.8 – Pontos de medição dos trilhos (avaliação geométrica)
Figura 4.9 – Planejamento inicial do posicionamento das furações na superfície dos
trilhos74
Figura 4.10- Roseta colada com orientações dos SG's, eixos e tensões principais
(montagem típica)75
Figura 4.11 – Sistema de furação (e seus componentes) utilizado no ensaio de tensões
residuais por furo cego76

Figura 4.12 – Sistema de aquisição de dados76
Figura 4.13 – Montagem típica do ensaio77
Figura 4.14 - Representação esquemática das posições de medições de dureza
Rockwell B no boleto, na alma e na região central do patim de todas as seções
consideradas81
Figura 4.15 - Representação esquemática das linhas verticais nas quais foram
realizadas as medições de microdureza
Figura 4.16 - Representação das regiões nas quais será realizada a análise da
microestrutrura do boleto dos trilhos
Figura 5.1 – Máxima deformação plástica para amostra TURQ0587
Figura 5.2 – Acabamento superficial das amostras TN's
Figura 5.3 – Descontinuidades na amostra TURF08
Figura 5.4 – Defeito tipo despedaçamento (<i>shelling</i>) na amostra TURQ0590
Figura 5.5 – Descontinuidade tipo deformação plástica (rail plastic flow) na amostra
TURQ0591
Figura 5.6 – Descontinuidade tipo escamação (flaking) na amostra TURQ0591
Figura 5.7 – Perfil de dureza Rockwell B (HRB) na seção transversal amostra TN05
(seção 1)93
Figura 5.8 – Perfil de dureza Vickers X microestrutura a partir da superfície da amostra
TN0594
Figura 5.9 – Perfil de dureza Rockwell B (HRB) na seção transversal amostra TURQ05
(seção 1)96
Figura 5.10 – Perfil de dureza Vickers X microestrutura a partir da superfície amostra
TURQ05 (seção 1)
Figura 5.11 - Perfil de dureza Vickers X microestrutura a partir da superfície da
amostra TURQ05 (seção 2)99
Figura 5.12 – Perfil de dureza Rockwell B (HRB) na seção transversal amostra TN08
(seção 1)101
Figura 5.13 - Perfil de dureza Vickers X microestrutura a partir da superfície da
amostra TN08102
Figura 5.14 – Perfil de dureza Rockwell B (HRB) na seção transversal TURF08 (seção
1)103
Figura 5.15 – Perfil de dureza Vickers X microdureza a partir da superfície da amostra
TURF08104

Figura 5.16 – Tensões residuais amostra TN05107
Figura 5.17 – Tensões residuais amostra TN08108
Figura 5.18 – Tensões residuais amostra TURQ05110
Figura 5.19 – Tensões residuais amostra TURF08111
Figura A.1- Perfil de dureza Rockwell B (HRB) na seção transversal amostra TN05
(seção 1)116
Figura A.2 – Micrografia das regiões (A-D) próximas à superfície na amostra TN05
(seção 1)117
Figura A.3 – Micrografia das regiões (A-D) mais internas do boleto amostra TN05
(seção 1)118
Figura A.4- Micrografia das regiões (A-D) próximas à superfície do boleto amostra
TN05 (seção 2)119
Figura A.5 – Micrografia das regiões (A-D) próximas à superfície do boleto amostra
TN05 (seção 2)120
Figura A.6 – Perfil de dureza Rockwell B (HRB) na seção transversal amostra TURQ05
(seção 2)121
Figura A.7 – Perfil de dureza Rockwell B (HRB) na seção transversal amostra TURQ05
(seção 3)122
Figura A.8 – Micrografia das regiões (A-D) próximas à superfície do boleto amostra
TURQ05 (seção 1)
Figura A.9 – Micrografia das regiões (E-H) próximas à superfície do boleto amostra
TURQ05 (seção 1)
Figura A.10 – Micrografia das regiões (A-D) mais internas do boleto amostra TURQ05
(seção 1)125
Figura A.11 – Micrografia das regiões (E-H) mais internas do boleto amostra TURQ05
(seção 1)126
Figura A.12-Micrografia das regiões (A-D) próximas à superfície do boleto amostra
TURQ05 (seção 2)
Figura A.13 – Micrografia das regiões (E-H) próximas à superfície do boleto amostra
TURQ05 (seção 2)
Figura A.14 – Micrografia das regiões (A-D) mais internas do boleto amostra TURQ05
(seção 2)129
Figura A.15 – Micrografia das regiões (E-H) mais internas do boleto amostra TURQ05
(seção 2)130

Figura A.16 – Perfil de dureza Rockwell B (HRB) na seção transversal amostra TN08
(seção 2)
Figura A.17 – Micrografia das regiões (A-D) próximas à superfície do boleto amostra
TN08 seção 1). (132
Figura A.18 - Micrografia das regiões (A-D) mais internas do boleto amostra
TN08.(seção 1)133
Figura A.19 – Micrografia das regiões (A-D) próximas à superfície do boleto amostra
TN08 seção 2). (134
Figura A.20 – Micrografia das regiões (A-D) mais internas do boleto amostra TN08
(seção 2)135
Figura A.21 – Perfil de dureza Rockwell B (HRB) na seção transversal TURF08 (seção
2)136
Figura A.22 – Micrografia das regiões (A-D) próximas à superfície do boleto amostra
TURF08 (seção 1)137
Figura A.23 – Micrografia das regiões (A-D) mais internas do boleto amostra TURF08
(seção 1)138
Figura A.24 – Micrografia das regiões (A-D) próximas à superfície do boleto amostra
TURF08 (seção 2)139
Figura A.25 – Micrografia das regiões (A-D) mais internas do boleto amostra TURF08
(seção 2)140

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Principais perfis de trilhos	23
Tabela 4.1 – Descrição (quantitativa) de caracterizações para cada amostra	71
Tabela 4.2 – Limite de resistência e composição química para trilhos (norma	DIN
536/1991 e informações de fabricante).	72
Tabela 4.3 – Tensões residuais limites para as amostras do trabalho	80
Tabela 5.1 – Composição química (% em peso) do trilho novo	85
Tabela 5.2 – Medidas das amostras	86
Tabela 5.3 – Tensões principais aliviadas e ângulo β correspondentes	112

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM: American Society for Testing and Materials;

CDTN: Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear;

CTAL: Carro de Transferência de Aço Líquido;

DIN: Deutsches Institut für Normung

GF: Gage Factor);

MO: Microscopia Óptica;

FCR: Fadiga de Contato por Rolagem;

SG: Strain Gage;

tf: tonelada força;

TN05: Trilho Novo com teor de 0,50% de carbono: refere-se a uma amostra em seu estado inicial com teor próximo a 0,5% de carbono;

TURQ05: Trilho Usado Região Quente com 0,50% de carbono: refere-se a uma amostra usada com teor próximo a 0,50% e localizada em uma região de maior temperatura;

TN08: Trilho Novo com teor de 0,80% de carbono: refere-se a uma amostra em seu estado inicial com teor próximo a 0,80% de carbono;

TURF08: Trilho Usado Região Fria com 0,80% de carbono: refere-se a uma amostra usada com teor próximo a 0,80% localizada em uma região de temperatura próxima à ambiente.

LISTA DE SÍMBOLOS

ā: constante de calibração para tensões isotrópicas;

 \overline{b} : constante de calibração para tensões de cisalhamento;

aik: matriz da calibração para tensões isotrópicas;

bik: matriz de calibração para tensão de cisalhamento;

c: matriz tri-diagonal

D: diâmetro do círculo da roseta;

D₀: diâmetro do furo perfurado;

E: módulo de Young;

j: número de passos de profundidade do furo;

k: número de sequência de passos para furação

kt: constante característica de cada resistência da roseta que normalmente vem especificada nas embalagens das mesmas, também denominada de *Gage Factor* (G*F*).

P: tensão isotrópica uniforme (equibiaxial);

Pk: tensão isotrópica no passo de profundidade k da furação,

p = deformação isotrópica uniforme (equibiaxial);

pk: deformação isotrópica após o passo de profundidade k da furação;

Q = tensão de cisalhamento uniforme a 45°

Q_k: tensão de cisalhamento a 45° no passo de profundidade *k* da furação;

R resistência de cada elemento da roseta [ohm]

q: deformação uniforme a 45°;

qk: deformação cisalhante a 45°

T: tensão de cisalhamento uniforme em x-y;

T_k: tensão de cisalhamento em *x-y*no passo de profundidade k da furação;

t: deformação cisalhante em x-y;

tk: deformação cisalhante em x-y após o passo de profundidade k da furação;

T = (sobrescrito) matriz transposta;

α_P: fator de regularização para tensão P;

α_Q: fator de regularização para tensão Q;

α_T: fator de regularização para tensão T

 β = ângulo no sentido horário para o eixo *x* (gage 1) para a direção da tensão máxima principal;

ε: deformação aliviada para o caso de tensão "uniforme";

ε_j: deformação aliviada medida após j passos do furo perfurado;

v: coeficiente de Poisson;

 θ = ângulo do strain gage em relação ao eixo x;

σmax: máxima tensão principal (maior tração);

σ_{min}: mínima tensão principal (maior compressão);

 σ_x : tensão normal uniforme na direção x;

 $(\sigma_x)_k$: tensão normal na direção x no passo de profundidade k da furação;

σy: tensão normal uniforme na direção y

 $(\sigma_y)_k$: tensão normal na direção y no passo de profundidade k dafuração;

Txy: tensão de cisalhamento no plano xy;

 $(\tau_{xy})_k$: tensão de cisalhamento no plano xy no passo de profundidade k da furação.

SUMÁRIO

1.	INT	rro	DUÇÃO	19
2.	OB	JET	TIVOS	21
2	2.1.	Obj	jetivos gerais	21
2	2.2.	Obj	jetivos específicos	21
3.	RE	VIS	ÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3	3.1.	Def	finições Gerais	22
3	3.2.	Ma	teriais de Trilhos	24
3	3.3.	Des	scontinuidades e Defeitos em Trilhos: Uma Visão Geral	25
: F	3.4. Propa	Fer agaç	nômenos Associados à Fadiga, à Deformação Plástica e ao Surgimento ção de Trincas em Trilhos) e 30
3	3.5.	Est	tudos Relacionados à Ocorrência de Deformação Plástica em Trilhos	37
3	3.6.	Ter	nsões Residuais	42
	3.6	.1.	Características gerais	42
	3.6	.2.	Determinação das tensões pelo método do furo cego	46
	3.6	.3.	Tensões residuais no processo de laminação	57
	3.6	.4.	Tensões residuais em trilhos	58
4.	MA	TEF	RIAIS E MÉTODOS	65
2	4.1.	Des	scrição Geral do Trabalho	65
2	1.2. Driun	Coi idas	ndições de Trabalho das Amostras e Propriedades de Trilhos A10 de Referências Normativa e de Fabricante	00 71
2	4.3.	Ava	aliação Geométrica	72
2	1.4.	Ob	servação da Superfície	74
2	4.5.	Ens	saio de Tensões Residuais	74
۷	4.6.	Ca	racterização Mecânica	81
	4.6	.1.	Ensaios de dureza	81
	4.6	.2.	Ensaios de microdureza	82

4.7.	Car	racterização Microestrutural	.83	
5. RI	ESULTADOS			
5.1.	Cor	mposição Química dos Trilhos	.85	
5.2.	5.2. Avaliação Geométrica			
5.3.	Ob	servação da Superfície	.87	
5.	3.1.	TN05 e TN08	.87	
5.	3.2.	TURF08	.88	
5.	3.3.	TURQ05	.90	
5.4. Caracterização Mecânica e Microestrutural dos Trilhos				
5.	4.1.	TN05	.92	
5.	4.2.	TURQ05	.94	
5.	4.3.	TN08	.99	
5.	4.4.	TURF08	102	
5.5.	Ter	nsões Residuais	105	
6. C	ONCI	LUSÕES	114	
APÊN	DICE		116	
REFE	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS141			

1. INTRODUÇÃO

Segundo Sokei et al. (2012), o contato roda-trilho é o maior causador dos desgastes em ambos os elementos sendo que as tensões de contato que ocorrem numa pequena área, são responsáveis pelo surgimento de muitos defeitos nos trilhos.

Uma significativa quantidade de estudos acerca de defeitos de trilhos ferroviários é disponível nos meios acadêmicos. No entanto, quando se trata de estudos relacionados em trilhos da norma DIN 536/1991, amplamente aplicados em Pontes Rolantes e Carros de Transferência de Aço Líquido (CTAL's) utilizados em indústria siderúrgica, constata-se a escassez de referências literárias. Vê-se, assim, uma oportunidade ímpar de se explorar tal assunto.

Outro aspecto a ser considerado é que a falha em serviço gera grandes prejuízos na produção obrigando a interromper o processo produtivo seja para um reparo, ou para substituição parcial ou total de um trecho da via de trânsito do equipamento. Em tais situações, o fator segurança também pode ser prejudicado haja vista que falhas no elemento trilho eleva a possibilidade de ocorrência de acidentes com danos materiais ou a pessoas.

Os CTAL's de uma grande usina siderúrgica têm como principal característica a elevada capacidade de transporte que determina um elevado valor de carga a ser suportado pelas rodas e trilhos e o processo especifico de produção de aço líquido faz com que as rodas e os trilhos trabalhem, em algumas situações, em temperaturas maiores que a ambiente. No caso específico deste trabalho, uma amostra sujeita a temperaturas da ordem de 200° C foi retirada para análise.

Os defeitos em trilhos provenientes da utilização podem causar a fragilização da superfície de rodagem propiciando trincas e, em um estágio mais avançado, a quebra da referida região do componente provocando, como afirmado anteriormente, paradas não programadas que são eventos indesejáveis em um processo produtivo industrial.

Assim, conhecer os defeitos do componente trilho bem como princípios, origem e relações com fatores influentes é bastante benéfico do ponto de vista da engenharia

de materiais no sentido de estabelecer melhorias que proporcionem uma vantajosa relação custo/benefício aliada à uma adequada estratégia de engenharia de manutenção.

Dessa forma, nesse trabalho são apresentadas avaliações comparativas de estados distintos de trilhos da norma DIN 536/1991 no seu ciclo de utilização tendo como referência teórica estudos desenvolvidos sobre trilhos ferroviários ao longo dos anos de forma a estabelecer inferências para o presente trabalho.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos gerais

Realizar a caracterização estrutural considerando a região da superfície (macro e microestrutura), as propriedades mecânicas e análise das tensões residuais em trilhos do tipo A100 da norma DIN 536/1991 utilizados como via de Carros de Transferência de Aço Líquido nos estados novo e pós utilizados em uma situação onde há predominância de carregamento mecânico (região distante da descarga de aço líquido) e outra onde há a associação do carregamento mecânico e efeito de aquecimento (região na descarga de aço líquido).

2.2. Objetivos específicos

Tem-se como objetos específicos nesse trabalho os seguintes tópicos:

 avaliar visual e dimensionalmente as superfícies dos trilho antes e após um período de 193 dias de utilização;

 realizar a avaliação mecânica do boleto (próximo à superfície de rodagem) e regiões mais internas dos trilhos por meio da caracterização das microestruturas utilizando-se de microscopia óptica suportada por medições de microdureza;

- analisar a distribuição de dureza na seção transversal de cada trilho;

 - analisar as tensões residuais próximas à superfície de rodagem dos trilho utilizandose do método de furo cego;

 - analisar a influência e/ou relação que as variações das propriedades estabelecidas possuem com as situações de utilização impostas aos trilhos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Definições Gerais

O trilho, fundamento de uma via, é o elemento ativo da estrutura submetido a diversas ações procedentes do material rodante de um equipamento industrial (RIVES; PITA; PUENTE apud SEMPREBONE, 2006).

Os trilhos, em geral, são fabricados por laminação à quente a partir dos blocos provenientes dos lingotes. "A seção do trilho é obtida pela passagem sucessiva do bloco aquecido, numa série de cilindros de laminação projetados de tal modo que a forma retangular do bloco é gradualmente desenvolvida na seção do trilho" (MACÊDO, 2009). As operações mencionadas demandam exatidão de desenho dos diversos contornos dos cilindros e uma supervisão constante durante o processo, permitindo a obtenção da seção desejada.

As variações de composição química do material do trilho associadas ao processo de laminação podem afetar o grau de homogeneidade da microestrutura, além do tamanho e da distribuição de inclusões frágeis e dúcteis. Relatos dão conta que, objetivando buscar um maior grau de homogeneidade, países da Europa e Japão tem o hábito de produzir trilhos por lingotamento contínuo (GARNHAM; DAVIS, 2009).

Diversos são os perfis encontrados para os trilhos, sendo cada um atribuído a aplicações típicas e regido por uma norma específica. Na Tabela 3.1 são apresentados exemplos esquemáticos desses componentes, acompanhados de suas denominações.

Em geral, independentemente do perfil, os trilhos são constituídos das partes apresentadas pela Figura 3.1: boleto, alma e patim. Sokei et al. (2012) definem o boleto como "a parte do trilho destinada ao apoio e ao deslocamento da roda [...] e alma como a parte do trilho compreendida entre o boleto e o patim. Este último é definido como a base do trilho constituída pela massa mais longa do duplo T por meio do qual o trilho é apoiado e fixado nos dormentes".

Тіро	Norma (s)	Denominações típicas	Perfil	Aplicação
Vignole (perfil americano)	ASTM A1 e AREMA	141RE (TR70), CB122, 90ARA-A (TR45)		Ferrovias
Leve (perfil americano)	ASTM A1 e AREMA	ASCE75 (TR37)		Máquinas Leves
Vignole (perfil europeu)	UIC 860-0 ou EM 13674	RN45, 50E6 (U50), 54E2 (UIC54E)		Ferrovias
Leve (perfil europeu)	DIN 5901	S7, S30, S41/10 (41E1), 26AFNOR		Máquinas leves.
Perfil americano	ASTM A759	CR175 (TR87), CR171		Pontes rolantes e guindastes
Perfil Europeu	DIN 536/1991	A150, A120, A100		Pontes rolantes e guindastes

Tabela 3.1 – Principais perfis de trilhos.

FONTE: http://www.comercialforte.com.br (adaptado).





Fonte: Norma DIN 536/1991 (adaptado).

Semprebone (2006) destaca duas funções principais do componente trilho:

 constituir a superfície de rolamento pela qual trafegam os veículos industriais servindo como guia;

 transmitir os esforços decorrentes do movimento do veículo (carga dos eixos, esforços de aceleração e frenagem e esforços devido à variação de temperatura) para a infraestrutura.

3.2. Materiais de Trilhos

Entre todos os materiais, o aço é aquele que oferece as melhores vantagens no emprego e na fabricação dos trilhos (BRINA apud MACÊDO, 2009). Macêdo (2009) considera que "para exercer a sua função de superfície de rolamento e suporte das cargas transportadas pelos veículos, é necessário que o trilho tenha dureza, tenacidade, elasticidade e resistência à flexão".

A resistência do boleto do trilho ao desgaste e à fadiga, assim como as demais características, é determinada pela composição química do material e pelo processo de fabricação, associado ainda à operação de conformação a quente (GARNHAM; DAVIS, 2009). Nesse contexto, a inserção de elementos de liga e o controle do resfriamento atuam de maneira decisiva nas propriedades mecânicas do trilho.

Considerando inicialmente a composição química, o carbono é o elemento que proporciona maior dureza à liga (MACÊDO, 2009). A medida que seu teor é elevado, entretanto, o material pode se tornar frágil. Dessa forma, a presença e a quantidade de carbono são atribuídas às propriedades resistência mecânica, resistência ao desgaste, dureza e fragilidade. Em geral, a quantidade usual de carbono nos trilhos é de 0,5% a 0,8% (% em peso). O emprego de 0,8% de carbono em aços especiais tem propiciado ao material maior dureza e resistência à fadiga por contato de rolagem (SCHILKE, 2013).

Outro elemento importante é o manganês, associado à elevação da temperabilidade e do limite elástico. No entanto, além de contribuir para a tendência de formação de trincas durante a fabricação, esse elemento aumenta o custo do material, sendo empregado principalmente nos trilhos de aço liga e em peças especiais como componentes de mudança de via (MACÊDO, 2009).

O silício minimiza o efeito do desgaste e, indiretamente, é benéfico às outras propriedades mecânicas. Essa característica é relacionada ao fato de que se trata do principal agente desoxidante da liga, ajudando a evitar a formação de bolhas ou inclusões não metálicas. Por fim, menciona-se o fósforo, cujo comportamento, considerado negativo, se dá no sentido de fragilizar o material.

Segundo Schilke (2013), o aço perlítico, constituído das fases ferrita e cementita, associado à simplicidade de seu processo de fabricação e às boas propriedades mecânicas, tem sido o mais utilizado em trilhos na Europa. Destaca-se, também, o aço austenítico com alto teor de manganês, por possuir elevadas resistências ao impacto e ao desgaste em seu produto final. Nesse caso, é enfatizado o aço austenítico Hadfield com 13% de manganês em peso. Aços bainíticos também são comumente utilizados para trilhos por possuírem dureza mais alta se comparados ao aço perlítico. No entanto, a heterogeneidade de sua microestrutura pode propiciar a nucleação prematura de trincas o que dificulta prever antecipadamente seu desempenho.

Em relação à realização de tratamentos térmicos, Garnham; Davis (2009) destacaram a iniciativa de alguns países de controlar ou alterar as propriedades dos trilhos por meio dessas operações salientando, entretanto, que essa não é uma prática comum.

3.3. Descontinuidades e Defeitos em Trilhos: Uma Visão Geral

A correta conceituação de descontinuidade e defeito é de suma importância para o desenvolvimento desse trabalho. Dessa forma entende-se que¹:

 descontinuidade: refere-se a uma interrupção da estrutura típica de um material como a falta de homogeneidade na caraterística mecânica, metalúrgica ou física.
Dessa forma, a descontinuidade não é necessariamente um defeito;

¹AWS – The Everyday Pocket Handbook for Visual Inspection and Weld Discontinuities— Causes and Remedies – Number 2 in a series

 defeito: refere-se a condição ou a condições que tornam uma parte incapaz de satisfazer uma mínima aceitação de padrão ou especificação.

Os defeitos e descontinuidades em trilhos podem se apresentar em dois tipos (MACÊDO, 2009):

 - de fabricação, compreendendo vazios, segregação, inclusões, fissuras transversais e defeitos de laminação;

- originados em serviço.

Há vários fatores que influenciam na expectativa de vida útil do trilho, sendo essa afetada principalmente pela composição química, pela programação da manutenção e pela velocidade e carga aplicada sobre ele. Todos esses fatores cooperam no desenvolvimento de desgastes lateral e vertical, na deformação plástica do boleto e no desenvolvimento de descontinuidades e defeitos em geral.

Particularmente, o desgaste originado pelo fator carga em serviço, em função da interface de contato entre roda e trilho, constitui em um dos mais importantes aspectos de pesquisa que envolvem fenômenos de desgastes de trilhos. Pau; Aymerich; Ginesu (2002), Santos (2000), Ekberg; Åkesson; Kabo (2014), Steenbergen; Dollevoet (2013), Taraf et al. (2010) e Ringsberg; Lindback (2003) explanam em seus trabalhos as elevadas tensões atuantes presentes durante a interação da roda e trilho embasados na teoria Hertziana.

Schneider (2005), Petroni (2006) e Coimbra (2008) relatam de forma completa os vários tipos de descontinuidades e defeitos nos trilhos, associados à utilização desses componentes classificando-os em longitudinais, superficiais, transversais e desgastes. A seguir são explanadas algumas das descontinuidades e defeitos superficiais descritos pelos referidos autores bem como as respectivas causas:

 Fissuração do canto do boleto ou *head checking* (Figura 3.2): trincas de pequena extensão e inclinadas próximas ao canto superior do boleto que ocorrem principalmente em curvas sendo causadas pela grande pressão das rodas contra os trilhos, principalmente quando a carga por eixo dos vagões é muito elevada (igual ou maior a 30 tf).



Figura 3.2 – Fissuração do canto do boleto ou head checking

a) característica do defeito, (b) aspecto esquemático. Fonte: COIMBRA, 2008

- Escamação ou *flaking* (Figura 3.3): constitui a evolução do *head checking* que em função da alta pressão do contato da roda e trilho, resulta em leve perda de material apresentando lâminas agrupadas próximas ao canto do boleto.



Figura 3.3 – Escamação ou *flaking.*

Fonte: SCHNEIDER, 2005

- Estilhamento do canto do boleto ou *spalling* (Figura 3.4): descontinuidade associada ao *flaking,* caracterizado pelo destacamento de massas ou porções de aço do trilho

causado por atuação de elevadas cargas próximas ao canto do boleto fragilizado apresentando trincas superficiais que se aprofundaram.



Figura 3.4 – Estilhamento do canto do boleto ou spalling

Fonte: SCHNEIDER, 2005

- Despedaçamento do canto do boleto ou *shelling* (Figura 3.5): caracterizado por formação de rebarbas e trincas nas laterais e, finalmente, pelo despedaçamento do canto. Esse defeito é causado, principalmente, por elevadas cargas da roda agindo com frequência sobre uma pequena área de contato entre roda e trilho, resultando em tensões que excedem a capacidade do trilho.





a) aspecto esquemático, (b) característica do defeito. Fonte: SCHNEIDER, 2005

- Patinagem ou *wheel burn* (Figura 3.6): a fricção e o calor gerado nos deslizamentos entre a roda e o trilho ocasionam escavação da superfície do trilho. Dessa forma, pode ocorrer a formação de trincas transversais ao boleto (trincas térmicas) em volta da marca deixada pela patinagem, surgindo fissuramento transversal interno, podendo progredir até uma fratura completa.



Figura 3.6 – Patinagem ou Wheel Burn.

- Deformação plástica do boleto ou rail plastic flow (Figura 3.7): caracterizada pela alteração do contorno do boleto do trilho, sendo resultado da ação combinada de elevadas forças de compressão e de arrasto geradas pelos repetidos "passeios" das rodas sobre o mesmo. Como consequência dessas ações, há um "repuxado" ou "escorrimento" do aço para além da face externa do boleto com formação de rebarbas ou apêndices externos.









a) característica do defeito, (b) aspecto aproximado. Fonte: SCHNEIDER, 2005.

Fonte: COIMBRA, 2008

- Desgaste ou *wear* (Figura 3.8): pode apresentar-se vertical, lateralmente ou em forma ondulatória (corrugações). Ocorre em função da ação do tráfego por um longo período aliado à falta ou descuido da inspeção, resultando em perda de material dos trilhos (para o desgaste vertical ou lateral), podendo levar a uma fratura.



a) na sequência: desgaste vertical / lateral esquemáticos e desgaste real, (b) ondulações.
Fonte: SCHNEIDER, 2005.

3.4. Fenômenos Associados à Fadiga, à Deformação Plástica e ao Surgimento e Propagação de Trincas em Trilhos

Em aplicações de engenharia, o contato entre a roda e o trilho gera tensões que podem ser consideradas entre as mais complexas de serem determinadas (EKBERG; ÅKESSON; KABO, 2014). Essas tensões são influenciadas por fatores diversos, tais como a magnitude da força de contato, o coeficiente de atrito, o trecho de contato e o comportamento do material (BROUZOULIS et al., 2011).

Segundo Pal et al. (2012), o fenômeno de fadiga, causado por tensões cíclicas relacionadas à movimentação constante da roda sobre o trilho, acarreta a elevação de tensões localizadas que podem chegar à ordem de 1,5 GPa. Essa elevação nos níveis de tensões atuantes pode propiciar a ocorrência de deformação plástica e, consequentemente, o endurecimento do trilho por meio do encruamento situação na qual a tensão atuante excede a tensão de escoamento do material do trilho.

O fenômeno denominado *Rolling Contact Fatigue* ou Fadiga de Contato por Rolagem (FCR) é a fadiga causada por tensões alternadas associadas ao contato de corpos rolantes. A Figura 3.9 representa de forma esquemática esse processo (EKBERG; KABO, 2005).

Figura 3.9 – Representação da deformação plástica resultante da interação entre a roda e o trilho, na qual as linhas tracejadas indicam planos antes e após a deformação.



Fonte: EKBERG, KABO, 2005 (traduzido).

A FCR surge em função da interação da roda girando e deslizando na superfície do trilho que pode levar à fragmentação do boleto ou a total falha do componente. As tensões cíclicas não são completamente reversíveis, resultando em uma deformação plástica próxima à superfície de contato do trilho (WEN et al., 2008).

O contato rolante leva o trilho a diferentes respostas dependendo do seu nível e da natureza. Para baixos níveis de tensões, a resposta é elástica e não há alterações permanentes após ciclos repetidos. Por outro lado, ao atingir um dado valor de tensão, ocorre o escoamento ou deformação plástica do material. Nesse caso, entretanto, uma vez que a deformação plástica leva ao encruamento, a ocorrência de mais deformação plástica pode ser impedida de modo que os ciclos subsequentes se deem elasticamente. Este processo, conhecido como *elastic shakedown*, é uma espécie de assentamento elástico (PAL et al., 2012).

Alwahdi; Franklin; Kapoor (2005) e Franklin et al. (2009) consideraram que um material dúctil sujeito a carregamento cíclico, tal como um trilho, pode responder de quatros maneiras conforme a listagem a seguir:

 para situações nas quais a tensão cíclica for menor que o limite elástico do material, a resposta será puramente elástica e poderá ocorrer fadiga de alto ciclo;

- para situações nas quais a tensão cíclica estiver acima do limite elástico e abaixo do elastic shakedown limit, haverá algum fluxo plástico, que protegerá o material de tensões residuais e, também, poderá causar encruamento. A resposta, ainda, será puramente elástica, podendo ocorrer falha também por fadiga de alto ciclo;

 para situações nas quais a tensão cíclica estiver acima do *elastic shakedown limit* e abaixo do *plastic shakedown limit* não haverá mais recuperação elástica ocorrendo deformação plástica a cada ciclo. Em alguns casos, para a referida situação, a deformação plástica pode ser totalmente reversível, sendo a falha ocasionada por fadiga de baixo ciclo;

 para situações nas quais a tensão cíclica estiver acima do plastic shakedown limit, também denominado ratchetting threshold, haverá a cada ciclo acúmulo de deformação plástica denominado plastic ratchetting. Nesse caso, a falha também deverá ser por fadiga de baixo ciclo.

A quebra do boleto por fadiga é tipicamente associada aos processos de rolamento e deslizamento, conforme a representação da Figura 3.10, na qual podem ser observados esforços de características diversas. Esse contato, com possível contribuição ainda de carga térmica, causa a deformação plástica na superfície do material excedendo a deformação de fratura e formando trincas superficiais (EKBERG; ÅKESSON; KABO, 2014).

A propagação de uma falha por fadiga em um trilho, segundo Zerbst et al. (2009), é estimulada não apenas pelas tensões de contato, mas também por tensões de flexão e de cisalhamento, resultantes da carga durante a passagem da roda. Estas tensões são ainda somadas a outros componentes de carga, tais como tensões residuais de fabricação e tensões térmicas que dependem da temperatura ambiente. A temperaturas maiores que a ambiente, tensões de compressão são formadas e, ao contrário, em temperaturas mais baixas que a ambiente prevalece a formação de tensão de tração.

Ainda no aspecto tensões térmicas, segundo Zerbst; Schödel; Heyder (2009) deve-se levar em conta que o crescimento de trincas por fadiga térmica é um processo baseando na média de temperaturas diárias enquanto a fratura deve ser controlada pelos picos de temperaturas mínimas.



Figura 3.10 – Diferentes tipos de carga por contato que resultam em formação de trincas.

(a) carga vertical pulsada – trincas superficiais e subsuperficiais; (b) carga vertical e lateral oscilante – trincas superficiais, com superfície desgastada e quebrada; (c) carga vertical – trincas sub - superficiais por fadiga causada por contato por rolamento; (d) carga cisalhante deslizante (freadas e tracionadas) – deformação plástica e consequente surgimento e crescimento de trinca; (e) contato com superfície irregular – situação particular do caso (c) apresentando ascensão da trinca com concentração de tensão e início de trinca superficial.

Fonte: EKBERG, ÅKESSON, KABO, 2014.

Li et al. (2013) investigaram as causas de falha de trilho ferroviário do tipo GB P60U75V, unidos por processo aluminotérmico e utilizado por aproximadamente seis anos. Concluiu-se que a sobrecarga foi a causa primordial para a falha e que, supostamente, a trinca encontrada originou-se de redes de ferritas fragilizadas e fragmentadas localizando-se internamente à colônia de perlita (Figura 3.11). A referida fragilização se deu em função do processo de soldagem inadequado sendo, portanto, necessário o desenvolvimento de um processo de soldagem adequado (aplicando, por exemplo, o processo de pré e pós-aquecimento do material).

No entanto, o papel do fenômeno de fadiga não pôde deixar de ser levado em conta considerando o longo período de utilização do componente. E, nesse contexto, o controle de carga do trem foi apontado como importante fator de forma a garantir a preservação do trilho.





Fonte: LI et al., 2013.

Para Ekberg; Kabo (2005), se o endurecimento do material e as tensões residuais não foram suficientes para evitar um novo acúmulo de deformações plásticas, haverá o aparecimento de trincas no momento em que a deformação de fratura é excedida. Esses autores destacaram também que em superfícies de trilhos o processo de surgimento de trincas, devido à deformação plástica da superfície do material, é tipicamente identificado nos cantos, como apresentado pela Figura 3.12.



Figura 3.12- Microestrutura deformada e crescimento de trinca por RCF.

Fonte: EKBERG; KABO, 2005.

Uma série de fatores influenciam na formação e propagação de trincas em um trilho tais como: a presença de fluidos, corrosão, rugosidade, esforços térmicos, composição química, velocidade e qualidade metalúrgica. Esses fatores são descritos a seguir:

 - ação de fluidos que possam entrar na trinca (Figura 3.13): a ação de lubrificantes diminui o atrito da superfície próxima à trinca. Porém, aumenta as forças na superfície interna da trinca fazendo o fluido aprisionado a forçar a região, distribuindo a pressão de contato e originando uma pressão hidráulica interna (EKBERG, KABO, 2005);

Figura 3.13 – Mecanismo de propagação de trinca pela pressão de um fluido aprisionado.



Fonte: EKBERG; KABO, 2005 (traduzido).

 - corrosão: suspeita-se que o crescimento de trinca em trilhos possa ser promovido pela formação de corrosão na ponta da mesma. A influência de corrosão pode ser maior no caso de trincas profundas, onde a penetração de fluidos lubrificantes em toda extensão é improvável (EKBERG, KABO, 2005);

- rugosidade (Figura 3.14): com a ocorrência do pressionamento de duas superfícies em conjunto, somente a de maior rugosidade será inicialmente pressionada fazendo com que as trincas surjam e propaguem em campos de tensões abaixo da superfície rugosa. Assim, um ponto de carga local é formado causando tensões de tração e compressão radial podendo levar à formação de trincas (EKBERG, KABO, 2005);


Figura 3.14 – Rugosidade de superfície de um material em diferentes escalas e carregamento em uma rugosidade causando cone de trinca.

Fonte: EKBERG, KABO, 2005 (traduzido).

 - carga térmica: para trilhos danos térmicos são raros podendo ocorrer pela elevação de temperatura das rodas em frenagens para parada (EKBERG, KABO, 2005);

 - composição química: bolhas características por presença de hidrogênio em altas proporções podem ocasionar microtrincas. O fósforo leva à diminuição da tenacidade à fratura similarmente ao enxofre que, em forma de inclusões como sulfeto de manganês, além de reduzir a tenacidade, diminui resistência à fadiga (SCHNEIDER, 2005);

- velocidade: a menor velocidade em uso implica em melhor distribuição de carga verificando-se, assim, menores níveis de tensões no contato (SCHNEIDER, 2005);

 qualidade metalúrgica: as inclusões metálicas são pontos preferenciais para nucleação de trincas sendo de suma importância a determinação do tamanho e forma limites em relação ao carregamento imposto (SCHNEIDER, 2005);

 propriedades mecânicas: o fator dureza do trilho tem grande influência na instalação dos defeitos de fadiga, sendo que os de mais baixa dureza, se comparados aos de alta dureza na mesma condição de utilização, apresentam menor resistência ao desgaste (SCHNEIDER, 2005).

3.5. Estudos Relacionados à Ocorrência de Deformação Plástica em Trilhos

Estudos experimentais e teóricos vêm sendo realizados no intuito de compreender o comportamento estrutural de trilhos submetidos a cargas elevadas.

Alwahdi; Kapoor; Franklin (2013), a partir de amostras de linha ferroviária (quatro amostras de trilhos utilizados por dez anos e uma amostra de trilho novo), realizaram um trabalho de caracterização de tais materiais empregando ensaios de cisalhamento e de dureza além de análise microestrutural. Na Figura 3.15 são apresentadas imagens obtidas por microscopia óptica do canto do boleto dos trilhos novo e usado. Ao observar a amostra do canto do boleto do trilho novo, foi percebida a existência de uma camada superficial descarbonetada (\approx 120 µm de espessura), com tamanho de grão ferrítico reduzido não sendo verificado nenhum indício de deformação no material associado ao processo de fabricação (Figura 3.15-a). Por outro lado, na mesma região de uma das amostras do trilho usado evidenciou-se a ocorrência de deformação plástica que excedeu uma profundidade de 30 µm em relação ao topo do boleto (Figura 3.15-b).



Figura 3.15 – Fotomicrografias do canto do boleto de um trilho ferroviário novo e usado.

(a)



(a) trilho novo, (b) trilho usado.

Fonte: ALWAHDI; KAPOOR; FRANKLIN, 2013 (traduzido).

Alwahdi; Kapoor; Franklin (2013) constataram, em uma amostra observada longitudinalmente da porção central do topo do trilho, a formação de uma fina superfície branca (denominada *White Etching Layer* – WEL), de elevada dureza (até

1040 HV), destacada na Figura 3.16. A formação dessa camada foi justificada pela introdução de tensão concentrada na fase ferrítica promovendo deformação e refinamento de grãos na matriz.



Figura 3.16 – Fotomicrografia da seção do canto do boleto de um trilho usado.

Fonte: ALWAHDI; KAPOOR; FRANKLIN, 2013.

No mesmo trabalho, a partir da realização de um perfil de dureza, Alwahdi; Kapoor; Franklin (2013) observaram que na região central da superfície dos boletos usados os valores de dureza eram superiores aos demais (Figura 3.17). Tal fato foi relacionado ao encruamento em virtude da deformação plástica produzida pelo contato da roda com o trilho.

Figura 3.17 – Perfis de dureza de duas amostras distintas de trilhos usados.



Fonte: ALWAHDI; KAPOOR; FRANKLIN, 2013 (traduzido).

Já o trilho novo apresentou valores de dureza mais baixos, tanto na região central da superfície como no canto do boleto, nos sentidos transversal e longitudinal. Tais resultados (Figura 3.18) são atribuídos à descarbonetação.



Figura 3.18 – Perfis de dureza da amostra de trilhos novo.

Fonte: ALWAHDI; KAPOOR; FRANKLIN, 2013.

Ainda no aspecto dureza de trilhos, Ahlstrom; Karlsson (2005) também verificaram a distribuição da referida propriedade em um trilho novo. Na oportunidade, constataram uma leve variação dos valores em função da posição sendo observado maiores valores nas laterais e valores um pouco mais baixos na porção central da região próximo à superfície central do boleto (Figura 3.19). As variações de segregação e da taxa de resfriamento foram os fatores que justificaram a assimetria apresentada nos valores de dureza.



Figura 3.19 – Perfis de dureza da amostra de trilho novo.

Fonte: AHLSTROM; KARLSSON, 2005

Por meio da avaliação visual em trilhos ferroviários desgastados, Franklin et al. (2009) observaram inúmeras microfissuras superficiais e trincas visíveis nos cantos e na superfície do boleto (Figura 3.20). Essas descontinuidades foram atribuídas ao fenômeno de FCR evidenciando, por meio de detalhadas análises metalográficas e de simulações de contato que contribuíram em compreender que a nucleação e a propagação de trincas associadas à fadiga de contato por rolagem são fortemente influenciadas pela microestrutura para uma dada condição de contato. Foi constatado, também, o aumento de dureza e alterações microestruturais no material com a deformação plástica.

Figura 3.20 – Visão de trinca e região de desgaste de um trilho usado de alto teor de carbono.



Fonte: FRANKLIN et al., 2009 (traduzido).

Com o objetivo de investigar o comportamento quanto a desgastes e danos de trilhos ferroviários Wang et al. (2013) e Beynon, Garnham, Sawley (1996) constataram pequenas fissuras resultantes do processo de fadiga e deformações plásticas nos trilhos devido ao trabalho de endurecimento. Wang et al. (2013) concluíram, ainda, que o desgaste lateral e fragmentação superficial foram os mecanismos predominantes de falha do componente em questão. Valores de desgastes medidos mensalmente da ordem de grandeza de 1,98 mm e 4,16 mm de desgastes (médio e máximo respectivamente) foram registrados.

Similarmente ao trabalho desenvolvido por Alwahdi; Kapoor; Franklin (2013), Lo; Mummery; Buttle (2010) observaram em uma amostra de trilho ferroviário novo, do tipo BS113A grau 220, a ocorrência de grãos de perlita e ferrita aproximadamente equiaxiais (Figura 3.21-a) e grãos deformados tanto na região do canto quanto na região central da superfície do boleto de um trilho usado (Figura 3.21-b).



Figura 3.21 – Análise da microestrutura do trilho ferroviário BS113A grade 220.

Em um trabalho experimental abordando o contato entre a roda e o trilho, Krause; Poll (1986) buscaram conhecer a qual carga se iniciam deformações plásticas e o escoamento, bem como os efeitos de cargas longitudinal e tangencial adicionais quando comparada a uma carga normal pura. Na oportunidade, foi observado que as deformações plásticas ocorriam de forma mais intensa pela ação da força de atrito lateral seguida por forças de atrito longitudinal, sendo de pequena magnitude ao levar em conta somente a rolagem pura.

Segundo Bower; Johnson (1991), a deformação plástica é impulsionada pela alta carga normal e tensões tangenciais oriundas da interação entre roda e trilho. A cada passe sucessivo da roda ao longo desse trilho, pequenos incrementos de deformação plástica são causados que continuam a acumular ao longo de milhares de ciclos levando ao fenômeno *plastic ratcheting* já mencionado. Esses autores explicitaram, ainda, que há cada vez mais evidências de que tanto o desgaste pelo contato quanto o aparecimento de trincas podem ser atribuídos à deformação plástica na superfície, sugerindo que essa nucleia vazios e microtrincas. À medida que a deformação

⁽a) microestrutura trilho novo, (b) microestrutura trilho usado. Fonte: LO; MUMMERY; BUTTLE, 2010.

prossegue, as microtrincas crescem e se juntam umas às outras, até que uma lâmina desgastada é formada na superfície ou dá início a uma falha por fadiga.

3.6. Tensões Residuais

3.6.1. Características gerais

"De uma forma simples e geral, entende-se por tensões residuais aquelas existentes em um corpo sem que estejam agindo sobre ele quaisquer forças externas" (AMOROS, 2008). Essas tensões surgem em um componente, por exemplo, quando a deformação plástica através da seção transversal total da parte deformada não é uniforme (DIETER, 1981).

De acordo com Lasmis (2002), qualquer processo de fabricação que altere a forma de um sólido ou que envolva gradientes severos de temperatura leva à geração de tensão residuais. Nesse contexto, todos os processos de produção introduzem tensões residuais que influenciam no comportamento do material à fadiga, na resistência à fratura e, até mesmo, na resistência à corrosão, dentre outros fatores (LASMIS, 2002).

A Figura 3.22 representa de forma esquemática dos efeitos da tensão residual no desempenho de um material.





Fonte: LASMIS, 2002.

A ocorrência de tensões residuais pode, dessa forma, prejudicar as propriedades do material, afetando a reação desse a esforços aplicados externamente, podendo levar até mesmo à ocorrência de distorções e à instabilidade dimensional no componente em questão (DIETER, 1981).

Por outro lado, podem ser observados também efeitos favoráveis especialmente no caso da resistência mecânica, dependendo se as tensões residuais geradas agem na direção oposta à da tensão resultante de um carregamento externo (SCHWARZ; KOCKELMANN apud MONDARDO, 2012). No entanto, segundo Damasceno (1993), "tais efeitos na maior parte dos casos são nocivos, uma vez que podem causar deformações, aumentando a velocidade das transformações de fase e de processos de corrosão".

O estado de tensões residuais em um componente pode ser um dos mais importantes parâmetros influenciando no comportamento do material em relação a tensão de escoamento. Para a avaliação da influência das tensões residuais no comportamento à fadiga, a estabilidade das tensões residuais e o quantitativo de deformação plástica cíclica são considerados os mais importantes parâmetros (LOHE; LANG; VOHINGER, 2002).

Para materiais deformáveis plasticamente, as tensões residuais somente podem ser somadas diretamente até atingirem o limite elástico ser alcançado, podendo acelerar ou retardar o início da deformação plástica. As tensões residuais, ainda, podem aumentar ou diminuir as tensões médias. Na fase dúctil, as pequenas deformações são absorvidas pela plasticidade não causando grandes efeitos nessa situação. Ao longo do ciclo de vida, o aumento de uma tensão residual trativa eleva os valores das tensões médias. Não havendo danos ao material, a amplitude pode ser reduzida. Em grandes valores médios, as tensões residuais trativas ainda podem provocar fratura estática durante o ciclo de vida do material (WITHERS; BHADESHIA 2001).

No que diz respeito à origem, além dos processos de fabricação, especialmente aqueles envolvendo deformação, como já mencionado, tensões residuais podem ser desenvolvidas em função de características estruturais específicas do material e da sua utilização. Especificamente nas situações nas quais são desenvolvidos campos

de tensão considerados nocivos, o fenômeno é relacionado tanto a processos de fabricação em si como a operações de reparo e a condições de uso dos componentes consideradas inadequadas ou abusivas (LASMIS, 2002).

Na Figura 3.23 é apresentada uma representação da origem das tensões residuais.



Figura 3.23 – Origem das tensões residuais.

Fonte:

http://mercury.kau.ac.kr/welding/Welding%20Technology%20II%20%20Welding%20Metallurg y/Chapter%203%20-%20Residual%20Stresses.pdf (adaptado), acesso em 11/05/2015.

Quanto à magnitude, segundo Withers; Bhadeshia (2001) e Nunes (2008), as tensões residuais são classificadas como macroscópicas (tipo I), intergranulares (tipo II) ou em escala atômica (tipo III). As tensões residuais macroscópicas são aquelas que variam continuamente ao longo de grandes distâncias, equilibrando-se por todo o componente e impedindo-o de manter a dimensão durante os processos de fabricação

(distorção remanescente). Essas tensões são ocasionadas principalmente por fatores externos como, por exemplo, deformação plástica não uniforme no material durante os processos de fabricação ou gradientes de temperatura que proporcionam expansões não uniformes no componente. As tensões residuais intergranulares são as que variam ao longo do grão, quase sempre ocorrendo em materiais policristalinos pelo simples fato de que as propriedades elásticas e térmicas são diferentes para grãos vizinhos ou adjacentes, uma vez que esses são orientados de forma distinta. Por último, as tensões residuais em escala atômica são aquelas que incluem tipicamente tensões residuais associadas a defeitos cristalinos, tais como discordâncias e lacunas.

Eventualmente, a fonte ou as causas das tensões residuais não são evidentes e, portanto, se faz necessário realizar uma análise envolvendo a determinação de seus valores (LASMIS, 2002).

Segundo Gonzales (2009), as técnicas de medição de tensões residuais são divididas em grupos, em função da natureza dos mecanismos utilizados para medir essas tensões, conforme descrição a seguir:

- técnicas baseadas no relaxamento de tensões:

- ✓ técnicas não-destrutivas e semidestrutivas: furo passante, furo cego incremental, fotoelasticidade e holografia;
- ✓ técnicas destrutivas: curvatura, Rosenthal e Norton, Gunnert e Ueda;
- ✓ técnicas de difração: raios-x, sincrotron, nêutrons e elétrons.

- técnicas baseadas na sensibilidade de algumas propriedades à tensão:

- ✓ técnicas magnéticas e ultrassom;
- ✓ técnicas como espectroscopia Raman e termoelástica.

Por ser um método utilizado há muitos anos e os resultados serem considerados de relativa facilidade de interpretação e por possuir procedimento definido (norma ASTM E837–13a), dentre as técnicas experimentais para medição de tensões residuais, a técnica de ensaio de furo cego, conduzida por meio de extensometria, é aquela mais largamente utilizada (FILHO, 2004).

Kandil et al. (2001) apresentaram uma classificação que sugeria a popularidade de cada técnica de medição de tensões residuais sendo que a técnica de furo cego foi apontada com 30 % de aplicação, seguida de difração de raio-x (26%), difração de nêutron (19%), remoção de camada (16%) e outras técnicas, incluindo magnética, ultrassônica e Raman (9%)

Outro aspecto a ser considerado é que os danos causados ao corpo de prova (um pequeno furo) são muitas vezes toleráveis ou reparáveis, sendo a técnica aplicada, em geral, a todos os grupos de materiais usináveis, isotrópicos e elástico e de parâmetros conhecidos. O método permite determinar tensões macro residuais (ROSSINI et al., 2012).

Os demais métodos, por não ser alvo de estudo neste trabalho, não serão descritos detalhadamente nesse trabalho.

3.6.2. Determinação das tensões pelo método do furo cego

O princípio da medição de tensões residuais pelo método do furo cego *(hole-drilling technique)* envolve a introdução de um pequeno furo de aproximadamente 1,8 mm de diâmetro e 2,0 mm de profundidade no local onde as tensões residuais serão medidas. Devido à perfuração, as tensões residuais retidas são aliviadas e as tensões correspondentes na superfície são medidas por meio de *Strain Gages (SG's)* do tipo roseta colados na superfície ao redor do furo (Figura 3.24). A partir das deformações medidas em torno do orifício, as tensões residuais são calculadas usando constantes de calibração adequadas para o tipo particular de SG utilizado (ROSSINI et al.,2012).

Kandil et al. (2001) descreveram e caracterizaram os três tipos de rosetas (Figura 3.25) que podem ser usadas na medição de tensões residuais por meio do método do furo cego. A roseta do tipo "A" é a mais comumente utilizada, sendo recomendada para o uso geral. A roseta do tipo "B" é indicada para uso onde há obstáculos, tais como cordão de solda. A roseta tipo "C" utiliza 6 graus e, segundo Nunes (2008), é recomendada para situações onde é necessária grande sensibilidade e estabilidade térmica.





Fonte: ROSSINI et al., 2012 (traduzido).

Figura 3.25 – Tipos de rosetas.



ROSETA TIPO AROSETA TIPO BROSETA TIPO CFonte: ROSSINI, 2012 (traduzido).

Norcino (2013) considera três recursos necessários para aplicar a técnica do furo cego: um condicionador de sinais para a leitura das deformações identificadas pelos *strain gages*, uma máquina capaz de atingir elevadas rotações de forma que durante a execução do furo o processo não interfira no campo de tensões e a roseta para medir as deformações em três direções principais.

Em geral, o procedimento envolve as seguintes etapas básicas:

- a roseta é instalada na região de teste no ponto em que as tensões residuais serão determinadas;

- os terminais da roseta são ligados e conectados a um indicador multicanal de deformação;

- uma guia de usinagem de precisão é posicionada sobre o material, sendo precisamente centrada e perpendicular sobre o alvo de perfuração na roseta;

 - após o balanceamento dos circuitos da roseta, um pequeno e raso orifício é perfurado através do centro geométrico da roseta;

 leituras das deformações aliviadas são realizadas correspondendo à tensão residual inicial;

- perfuração de forma incremental;

 - cálculo das tensões residuais principais a partir das deformações utilizando as relações apresentadas na norma ASTM E837–13a.

Para o cálculo das tensões residuais, dois possíveis casos são de interesse. A primeira possibilidade ocorre quando as tensões no plano não variam com a profundidade a partir da superfície da amostra. Nesse caso, tem-se tensões uniformes e as tensões residuais em três planos podendo ser identificadas a partir de três medidas de alívio de deformações mensuradas. Assim, o orifício é perfurado diretamente a partir de zero até a profundidade total.

O método de furo cego também é capaz de determinar a variação de tensões residuais com a profundidade. Este processo é muitas vezes chamado de *stress profiling*, sendo este o segundo caso possível de interesse no referido método. Para este caso, assume-se que a variação de deformações σ_x , σ_y e τ_{xy} ocorre somente na direção de profundidade, sem variações nas direções no plano. (SCHAJER, 2008).

Somente tensões uniformes são especificadas para peças finas. Conforme o item 1.1.1 da norma ASTM E837–13a, são consideradas peças finas aquelas que a espessura do corpo de prova é muito menor que o diâmetro do furo realizado (D_0).

No item 6.1.1 da norma ASTM E837–13, a classificação da peça como "fina" se dá em função do diâmetro do círculo da roseta (*D*), destacado na Figura 3.26, associado ao tipo de roseta aplicada. Assim, considera-se uma peça fina que a espessura é ser menor que 0,2*D* para as rosetas tipo "A" e "B" ou menor que 0,24*D* para roseta tipo "C".

Tensões uniformes e não uniformes são especificadas para peças espessas.



Figura 3.26 – Representação da geometria típica de uma roseta de três elementos.

Fonte: ASTM E837-13a, 2013.

De forma geral, em extensometria, as deformações de cada SG são calculadas pela Equação 3.1.

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R.k_t} \tag{3.1}$$

Sendo: *R*: resistência de cada *SG* da roseta [ohm] e k_t : constante característica de cada resistência da roseta que normalmente vem especificada nas embalagens das mesmas, também denominada de *Gage Factor* (G*F*).

Para peças finas, as deformações uniformes são determinadas pelas Equações 3.2, 3.3 e 3.4 e as tensões residuais por 3.5, 3.6 e 3.7.

$$p = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1}{2} \tag{3.2}$$

$$q = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{2} \tag{3.3}$$

$$t = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2}{2} \tag{3.4}$$

$$P = \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} = -\frac{Ep}{\bar{a}(1+\nu)}$$
(3.5)

$$Q = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} = -\frac{Eq}{\bar{b}}$$
(3.6)

$$T = \tau_{xy} = \frac{Et}{\bar{b}}$$
(3.7)

Sendo: ε_1 , ε_2 e ε_3 : deformações calculadas em função das leituras nos *strain gages* conforme numeração (Figura 3.26); *p*: deformação isotrópica uniforme (equibiaxial); *q*: deformação uniforme a 45°; *t*: deformação cisalhante em *x-y*; *P*: tensão isotrópica (equibiaxial) [MPa]; Q: tensão cisalhante a 45°isotrópica (equibiaxial) [MPa]; *T*: tensão cisalhante xy [MPa]; *E*: módulo de Young [GPa]; \overline{a} e \overline{b} : constantes da Tabela 3 da norma ASTM E837–13a.

Em corpos de prova espessos, determina-se o conjunto de ε_1 , ε_2 e ε_3 dadas pelas Equações 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 e calcula-se as combinações de deformações correspondentes utilizando-se as Equações 3.8, 3.9 e 3.10 que representam as médias das tensões.

$$P = -\frac{E}{(1+\nu)} \frac{\sum \bar{a}p}{\sum \bar{a}^2}$$
(3.8)

$$Q = -E \frac{\sum \bar{b}q}{\sum \bar{b}^2}$$
(3.9)

$$T = -E \frac{\sum \bar{b}t}{\sum \bar{b}^2}$$
(3.10)

As aplicações das Equações 3.8, 3.9 e 3.10, segundo a norma ASTM E837–13a, são preferidas por representar valores de tensões baseadas nas médias de todas as a medidas de tensões reduzindo o efeito de erros de medições.

As tensões no plano cartesiano, as tensões principais e o ângulo no qual estão direcionadas as tensões principais, a mais trativa (ou menos compressiva) ou mais compressiva (menos trativa), são apresentadas nas Equações 3.11, 3.12, 3.13, 3.14 e 3.15.

$$\sigma_x = P - Q \tag{3.11}$$

$$\sigma_y = P + Q \tag{3.12}$$

$$\tau_{xy} = T \tag{3.13}$$

$$\sigma_{max}, \sigma_{min} = P \pm \sqrt{Q^2 + T^2} \tag{3.14}$$

$$\beta = \frac{1}{2}\arctan\left(\frac{-T}{-Q}\right) \tag{3.15}$$

Sendo: σ_x : tensão normal uniforme na direção x [MPa]; σ_y : tensão normal uniforme na direção y [MPa]; τ_{xy} : tensão de cisalhamento no plano xy [MPa]; σ_{max} : máxima tensão principal (maior tração) [MPa]; σ_{min} : mínima tensão principal (maior compressão) [MPa]; β = ângulo no sentido horário para o eixo x (gage 1) para a direção da tensão máxima principal [°].

Para se conseguir medir tensões não uniformes em profundidades usa-se a técnica do furo incremental, que consiste na realização de pequenos incrementos, até se obter

a profundidade desejada do furo" (CARDOSO, 2012). Cardoso (2012) ainda afirma que: "para se calcular o valor das tensões residuais que foram aliviadas, existem três métodos de maior relevância: método integral, método da tensão média e método da série de potências"

O método da integral é aqui destacado pela escolha de sua utilização. Além do mais, este é o método explicitado na norma de referência ASTM E837–13a.

"Neste método assume-se que as deformações medidas durante a furação são os resultados acumulados da relaxação das tensões residuais existentes na zona de cada um dos sucessivos incrementos de profundidade, ao longo da profundidade do furo, ou seja, consiste na identificação da contribuição das tensões existentes em cada incremento para a tensão total [...]. O procedimento de cálculo das tensões residuais não uniformes é apresentado na norma ASTM E 837-13a, sendo idêntico ao processo de cálculo das tensões uniformes, [...]. Os coeficientes de calibração podem ser aplicados a rosetas normalizadas na norma ASTM E837–13a" (CARDOSO, 2012).

A deformação total medida é a soma das deformações causadas pela relaxação das tensões existentes em cada incremento (CARDOSO, 2012). É um método mais complexo por se trabalhar com matrizes. A Figura 3.27 representa um perfil típico de tensões residuais aliviadas pelo método do furo cego incremental (MARTINS et al., 2004)





Fonte: MARTINS et al., 2004 (modificado).

Também, como *input*, utiliza-se as Equações 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4. As Equações 3.16, 3.17 e 3.18 são aplicadas para os cálculos das tensões residuais. Nota-se que as mesmas são equações matriciais.

$$(\bar{a}^T.\bar{a} + \alpha_P.c^T.c).P = \frac{E}{1+\nu}.\bar{a}^T.p$$
(3.16)

$$\left(\bar{b}^{T}.\bar{b} + \alpha_{Q}.c^{T}.c\right).Q = E.\bar{b}^{T}.q$$
(3.17)

$$(\overline{b}^T \cdot \overline{b} + \alpha_T \cdot c^T \cdot c) \cdot T = E \cdot \overline{b}^T \cdot t$$
(3.18)

Sendo: $\bar{a}^T \in \bar{b}^T$: matrizes transpostas das matrizes $\bar{a} \in \bar{b}$ respectivamente; α : fator de regularização da ordem de 10⁻⁴ a 10⁻⁶, c: matriz tri-diagonal² 20x20 ou 25x25 conforme tipo de roseta aplicado tendo a primeira e última colunas contendo zero e as outras colunas [-1 2 -1] centrada ao longo da diagonal; *v*: coeficiente de Poisson.

As deformações *p*, *q* e *t*, nesse caso, são representadas por uma matriz 20x1 para rosetas tipo *A* ou *B* ou 25x1 quando se utiliza roseta tipo *C*. Da mesma forma, as constantes $\overline{a} \in \overline{b}$ podem assumir uma matriz de 20x20 ou 25x25 de acordo com a roseta aplicada nos ensaios. Nesse caso, os valores de cada constante $a_{jk} \in b_{jk}$ são disponíveis nas Tabelas 5, 6 e 7 da Norma ASTM E837–13a.

As constantes de calibração a_{jk} e b_{jk} (o índice *j* denota linha e *k* coluna de uma matriz) indicam fisicamente a deformação aliviada em um furo com profundidade *j* devido à tensão residual no interior associado ao incremento *k* (Figura 3.28).

² Matriz tri-diagonal é uma matriz quadrada na qual todos os elementos fora da diagonal central e das diagonais imediatamente superior e inferior a ela são nulos.





Em função da regularização (constante α) as tensões *P*, *Q* e *T* não correspondem exatamente às deformações *p*, *q* e *t*. Assim, valores ajustados dessas deformações são calculados pelas Equações 3.19, 3.20 e 3.21.

$$p_{ajust} = p - \frac{1+\nu}{E} . \bar{a}P \tag{3.19}$$

$$q_{ajust} = q - \frac{1}{E} . \, \bar{b}Q \tag{3.20}$$

$$t_{ajust} = t - \frac{1}{E} . \bar{b}T$$
(3.21)

Sendo: *p_{ajust}, q_{ajust}* e *t_{ajust}*: deformações ajustadas.

As médias quadráticas dos valores de deformações padronizadas são determinadas pelas Equações 3.22, 3.23 e 3.24

$$p_{raj}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (p_{ajust})_j^2$$
(3.22)

$$q_{raj}^{2} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} (q_{ajust})_{j}^{2}$$
(3.23)

$$t_{raj}^{2} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} (t_{ajust})_{j}^{2}$$
(3.24)

Sendo: p_{raj}^2 , q_{raj}^2 e t_{raj}^2 : médias quadráticas dos valores das deformações ajustadas.

Os erros padronizados na combinação de deformações são dados pelas equações 3.25, 3.26 e 3.27:

$$p_{pad}^{2} = \sum_{j=1}^{n-3} \frac{\left(p_{j} - 3p_{j+1} + 3p_{j+2} - p_{j+3}\right)^{2}}{20(n-3)}$$
(3.25)

$$q_{pad}^{2} = \sum_{j=1}^{n-3} \frac{\left(q_{j} - 3q_{j+1} + 3q_{j+2} - q_{j+3}\right)^{2}}{20(n-3)}$$
(3.26)

$$t_{pad}^{2} = \sum_{j=1}^{n-3} \frac{\left(t_{j} - 3t_{j+1} + 3t_{j+2} - t_{j+3}\right)^{2}}{20(n-3)}$$
(3.27)

Sendo: p_{pad}^2 , q_{pad}^2 e t_{pad}^2 : erros padronizados na combinação de deformações.

A Norma ASTM E837–13a preconiza que os valores de p_{raj}^2 , q_{raj}^2 e t_{raj}^2 estejam dentro de 5% dos valores de p_{pad}^2 , q_{pad}^2 e t_{pad}^2 de forma a aceitar os valores de *P*,

$$(\alpha_P)_{novo} = \frac{p_{pad}^2}{p_{raj}^2} (\alpha_P)_{velho}$$
(3.28)

$$\left(\alpha_Q\right)_{novo} = \frac{q_{pad}^2}{q_{raj}^2} \left(\alpha_Q\right)_{velho}$$
(3.29)

$$(\alpha_T)_{novo} = \frac{t_{pad}^2}{t_{raj}^2} (\alpha_T)_{velho}$$
(3.30)

E, finalmente, no caso de tensões residuais não uniformes, as tensões no plano cartesiano, as tensões principais e o ângulo no qual estão direcionadas as tensões principais, a mais trativa (ou menos compressiva) ou mais compressiva (menos trativa), são apresentadas nas Equações 3.31, 3.32, 3.33, 3.34 e 3.35.

$$(\sigma_x)_j = P_j - Q_j \tag{3.31}$$

$$\left(\sigma_{y}\right)_{j} = P_{j} + Q_{j} \tag{3.32}$$

$$\left(\tau_{xy}\right)_{j} = T_{j} \tag{3.33}$$

$$(\sigma_{max})_k, (\sigma_{min})_k = P_k \pm \sqrt{Q_k^2 + T_k^2}$$
 (3.34)

$$\beta_k = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{-T_k}{-Q_k}\right) \tag{3.35}$$

Sendo: $(\sigma_x)_{j}$: tensão normal na direção *x* na profundidade *j* [MPa]; $(\sigma_y)_{j}$: tensão normal na direção *y* na profundidade *j* [MPa]; $(\tau_{xy})_{j}$: tensão de cisalhamento no plano *xy* na

profundidade *j* [MPa]; $(\sigma_{max})_k$: máxima tensão principal (maior tração) no incremento *k* [MPa]; $(\sigma_{min})_k$: mínima tensão principal (maior compressão) [MPa]; P_j , $Q_j \in T_j$: tensões na profundidade *j* [MPa]; P_k , $Q_k \in T_k$: tensões no incremento *k* [MPa]; β_k : ângulo formado entre σ_{max} e o eixo *x* [⁰].

3.6.3. Tensões residuais no processo de laminação

O processo de laminação é caracterizado pela passagem do material entre dois cilindros que giram de forma a levar à redução da área de sua seção transversal e ao aumento de seu comprimento.

Na Figura 3.29 é apresentada, de forma esquemática, a operação denominada laminação de produtos planos que é menos complexa em termos de distribuições de deformação e tensão que a laminação de perfis.





 (a) deformação heterogênea na laminação de chapa fina, (b) representação esquemática da distribuição resultante de tensão residual longitudinal ao longo da espessura de chapa.
 Fonte: DIETER, 1981.

Nesse caso, as condições são tais que o escoamento do material ocorre apenas próximo à superfície da chapa. Os grãos nessa região são deformados e tendem a alongar, enquanto os grãos na região central permanecem praticamente inalterados.

Uma vez que a peça deve exibir continuidade, uma espécie de acomodação da deformação deve ocorrer: a região central tende a limitar ou restringir o alongamento da superficial e vice-versa. O resultado desse processo é a geração de um estado de tensões residuais, consistindo em um elevado nível de tensões compressivas na superfície da chapa e trativas no centro (DIETER, 1981).

Similarmente à deformação plástica, a alteração de temperatura, ou seja, o resfriamento, para o caso da laminação a quente, pode levar à geração de tensões residuais. Nessa situação, observa-se expansão ou contração térmica não uniformes devido ao aquecimento ou resfriamento heterogêneo.

3.6.4. Tensões residuais em trilhos

Trilhos são produzidos por laminação a quente e são resfriados ao ar até à temperatura ambiente.

Como em todo processo de laminação, durante a geração do perfil do produto final, "o material é submetido a tensões compressivas elevadas, resultantes da ação de prensagem e das tensões cisalhantes superficiais, geradas pelo atrito entre os rolos e o material" (AMOROS, 2008).

A última etapa da fabricação é o desempeno por uma série de rolos (Figura 3.30).

Alvarez et al. (1999) descreveram trilhos como "componentes susceptíveis a altos níveis de tensões decorrentes da pressão de contato cíclica imposta pela carga vertical distribuída entre as rodas. Também estão sujeitos a efeitos tais como temperatura, processo de fabricação, assentamento da via, esforço de flexão, etc. que quando combinados podem agravar o nível de tensões principalmente na região do boleto, levando o componente ao colapso. Durante a manufatura do trilho são introduzidas tensões compressivas denominadas tensões residuais iniciais. Estas tensões são modificadas em serviço devido ao efeito da pressão de contato. Como este contato ocorre no boleto do trilho, a maioria das falhas surgem nesta região. Esta região de contato é função do perfil do boleto e do ângulo relativo entre o ângulo de assentamento do trilho e o de usinagem da pista de rolamento da roda. A variação da inclinação do trilho resultará em novas regiões de contato e consequentemente de novas distribuições de tensões no boleto. As tensões no interior do trilho, decorrentes do contato sob carga vertical, são tensões de flexão e tensões adicionais de contato."



Figura 3.30 – Desempeno dos trilhos laminados.



(a) imagem, (b) representação esquemática.Fonte: BIEMPICA et al., 2009 (traduzido).

O trilho já desempenado não deve exceder um determinado valor de tensões residuais, uma vez que as tensões residuais de tração próximas ao boleto podem levar à nucleação e propagação de trincas. Considerando o fato de que a etapa de desempeno é a última fase do processo de fabricação, a mesma terá uma grande influência sobre as propriedades finais do trilho (SCHLEINZER; FISCHER, 2000).

O conhecimento da magnitude, da direção e do sinal da tensão residual é de extrema importância para a adequada manutenção e prevenção de falhas de trilho. As regiões do trilho que estão sob a ação de tensões residuais são as mais propensas à formação e crescimento de trincas (LO; MUMMERY; BUTTLE, 2010). Nesse contexto, as tensões residuais podem aparecer em cada uma das três etapas do processo de fabricação de trilhos: laminação a quente, resfriamento e desempeno (RINGSBERG; LINDBACK, 2003). Após ser laminado, o trilho passa por um processo de resfriamento

em leitos até adquirir uma temperatura próxima ao ambiente (Figura 3.31). Neste processo, a forma longitudinal do trilho se altera devido às diferentes velocidades de arrefecimento das suas diferentes partes. Dessa forma, o trilho é levado à fase de desempeno sendo submetido a ciclos de flexão a fim de remover deslocamentos e curvaturas.

Figura 3.31 – Perfil do trilho a alta temperatura seguindo para o leito de resfriamento e desempeno por rolos para compensação por alteração de curvatura.



Fonte: RINGSBERG; LINDBACK, 2003 (traduzido).

É comprovado numérica e experimentalmente que a etapa desempeno é aquela caracterizada pelas mais elevadas tensões residuais. Tem-se após a etapa de acabamento um perfil de tensões residuais em forma de curva em C (Figura 3.32), no qual o boleto e o patim apresentam tensões residuais de tração longitudinal e a alma tensões de compressão (BIEMPICA et al., 2009). Este perfil de tensões residuais é desfavorável quando o trilho está em serviço, uma vez que as tensões de operação em conjunto com as tensões residuais podem causar o aparecimento de fissuras e seu crescimento subsequente por fadiga.

Pyzalla et al. (2001) também constataram em um trilho ferroviário perlítico usado, as máximas tensões residuais na superfície de rolamento. As tensões de contato, em função de cargas de serviços, mudaram gradualmente a distribuição das tensões residuais nos boletos dos trilhos e combinada com esforços de tração e de frenagem fizeram acumular uma deformação plástica permanente que propiciando a formação de defeitos no componente.



Figura 3.32 – Gráfico da tensão residual após desempeno e modelo apresentando as linhas de tensões.

Fonte: SCHLEINZER; FISCHER, 2001 (traduzido).

No mesmo trabalho, Pyzalla et al. (2001) verificaram uma elevação do nível de tensões residuais na região branca de maior dureza denomina WEL (*White Etching Layer*) definida por Alwahdi; Kapoor; Franklin (2013) no item 3.3.2 deste trabalho. A correlação dos níveis de tensões residuais com tal região é destacada na profundidade de 15 mm a aproximadamente 27,5 mm em relação à superfície de um trilho (cota de grande incidência de região branca). A Figura 3.33 retrata de forma gráfica tal fato.





Fonte: PYZALLA et al., 2001 (traduzido).

Como afirmado por Schleinzer; Fischer (2001), após o desempeno prevalecem as tensões residuais trativas no boleto e compressivas na alma e no patim. Zerbst et al. (2009) destacaram que após algumas passadas da roda sobre o trilho as tensões no boleto alteram para compressivas devido à deformação plástica (Figura 3.34).



Figura 3.34 – Efeito do desempeno e da utilização nas tensões residuais no trilho.

Fonte: ZERBST et al., 2009 (traduzido).

Buscando compreender a relação da tensão residual com as falhas de trilhos ferroviários, Lo; Mummery; Buttle (2010) mapearam as tensões residuais, as microestruturas e formas de propagação de trincas em um trilho novo e em quatro usados em tempos e condições de carregamento diferentes. Percebeu-se que os grãos de maior dureza (fruto do encruamento) se apresentavam fortemente deformados e com numerosas trincas. Foi constatada também que o crescimento de trincas é influenciado pelos níveis de tensões residuais e que as cargas de contato também induziram mudanças nos padrões de tensões residuais.

Corroborando com o trabalho de Lo; Mummery; Buttle (2010), Orringer et al. (1996) ao utilizar-se de modelos, indicaram que para defeitos internos no boleto do trilho o crescimento lento de trincas é bastante sensível à magnitude das tensões residuais. No entanto, na discussão de resultados de seu trabalho, Wang et al. (2013) confirmaram, ao avaliar a amostra de um trilho ferroviário de transporte pesado novo e usado, que as tensões residuais compressivas podem melhorar a resistência a

fadiga e prevenir a iniciação de trincas subsuperficial do trilho podendo, dessa forma, aliviar danos relacionados à fadiga do mesmo.

Zerbst; Schödel; Heyder (2009) obtiveram resultados considerados como primeiras estimativas para a identificação de tendências e dos efeitos de determinados fatores, como a carga local e a temperatura na propagação de trincas por fadiga e vida residual de trilhos (Figura 3.35).



Figura 3.35 – Configuração típica de carregamento de um trilho.

A respeito do fator temperatura, Pyzalla et al. (2001) ressaltaram o aparecimento de tensões compressivas quando a temperatura de trabalho é maior que a temperatura ambiente. Nesse caso, o trabalho não foi conduzido experimentalmente, mas sim por meio do método de elemento finitos. Foi verificada uma menor taxa de propagação de trincas para os trilhos desgastados, bem como a relação direta entre a variação de temperatura e as tensões geradas nos trilhos.

De forma específica, o método do furo cego foi aplicado incrementalmente por Alvarez et al. (1999), para medir as tensões residuais em trilho de 600 mm de comprimento na região central a 6 mm e a 8mm (Figura 3.36) abaixo da superfície.

Fonte: ZERBST; SCHÖDEL; HEYDER, 2009 (traduzido).

Broek apud Alvarez et al. (1999) apontam para uma zona de inversão de tensões residuais compressivas para trativas, abaixo da superfície, que explicaria a nucleação de trincas naquela região do boleto. Para o cálculo das tensões foi utilizado o método integral abordando-as como não uniformes. Os trilhos ensaiados foram do tipo TR68 novo e com oito anos de serviço e os resultados obtidos descreveram de forma qualitativa as tensões na região de contato do boleto do trilho com a roda.

Alvarez et al. (1999) observaram os valores das tensões que excediam limite de escoamento do material dando um indicativo da existência da deformação permanente. Foi verificada a ocorrência de maiores valores de tensões aliviadas logo abaixo da superfície de rodagem (boleto), indicados pelos pontos 1, 2 e 3 da Figura 3.36, se comparadas às tensões aliviadas a 6 mm e a 8 mm abaixo da mesma região.





Fonte: ALVAREZ et al.,1999.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Descrição Geral do Trabalho

Neste trabalho foi realizada a análise de amostras³ de trilhos tipo A100 da norma DIN 536/1991 empregados como via de movimentação de Carro de Transferência de Aço Líquido em ambiente siderúrgico. A seção transversal do respectivo trilho é apresentada na Figura 4.1 (norma DIN 536/1991).





Fonte: DIN 536/1991.

Na Figura 4.2 é apresentado o carro mecânico de transporte de aço líquido com as principais dimensões.

Na Figura 4.3 são apresentadas as regiões nas quais os trilhos foram extraídos. Nesse caso é ilustrada, de forma simplificada, uma visão geral de parte da planta da área de atuação do carro de transferência e a área de interesse do estudo em destaque (Detalhe X da Figura 4.3). Da região central (região "quente") foi extraída uma amostra de trilho A100 de 1000 mm de comprimento. Em tal região, além dos esforços mecânicos resultantes da ação do carro transferidor e da panela de aço por ele transportado, há constante incidência de calor em função da queda de material incandescente oriunda do processo do sopro do convertedor e da limpeza rotineira de material solidificado na região superior do convertedor que cai sobre o trilho. Em uma região mais afastada da região central (região "fria"), retirou-se, também, uma amostra do mesmo trilho de 500 mm de comprimento. Nessa região é razoável considerar que

³A partir do item 4 desse trabalho, o termo amostra, a todo momento, irá referir-se ao componente trilho tal qual o mesmo foi retirado da região onde estava instalado (para o caso dos trilhos usados) ou a uma parte de trilhos novos cortados do comprimento total do componente fornecido originalmente pelo fabricante.

não há influência do calor sobre a mesma podendo, assim, considerar a atuação de somente esforços mecânicos resultantes da ação do carro transferidor e da panela de aço por ele transportado.



Figura 4.2 – Representação do carro mecânico de transporte de aço líquido com as principais dimensões.

(b)

 (a) visão geral do CTAL, (b) ampliação do conjunto trilho e roda do CTAL dimensões em mm.

Fonte: produzido pelo autor.



Figura 4.3 – Regiões de extração das amostras dos trilhos usados para ensaios.

(a) visão geral, (b) área ampliada.

Fonte: produzido pelo autor.

Considerando a situação descrita anteriormente, denominou-se as amostras dos trilhos associando-as ao estado (novo ou usado) à posição (região "quente" ou região fria") das quais foram retiradas (Figura 4.3) e à composição química de cada uma delas, estabelecendo as seguintes denominações e codificações:

- Trilho Novo com teor de 0,50% de carbono: refere-se a uma amostra em seu estado inicial com teor próximo a 0,5% de carbono sendo abreviado com o código TN05;

- Trilho Usado Região Quente com 0,50% de carbono: refere-se a uma amostra usada com teor próximo a 0,50% e localizada em uma região de maior temperatura sendo abreviado com o código TURQ05;

- Trilho Novo com teor de 0,80% de carbono: refere-se a uma amostra em seu estado inicial com teor próximo a 0,80% de carbono sendo abreviado com o código TN08;

 Trilho Usado Região Fria com 0,80% de carbono: refere-se a uma amostra usada com teor próximo a 0,80% localizada em uma região de temperatura próxima à ambiente sendo abreviado com o código TURF08.

Na Figura 4.4 são apresentados os perfis térmicos das regiões de onde foram extraídas as amostras. Para tal foi utilizado uma câmara termográfica FLIR T400 de resolução 320x240 pixels. Essas informações foram direcionadoras para o estabelecimento das denominações região "fria" e região "quente".

A análise foi iniciada pela determinação da composição química de cada material. Deve-se ressaltar que, no momento da retirada das amostras *in loco*, não havia a certeza quais as composições estavam associadas a cada trilho usado (região "quente" e região "fria") uma vez que não há a preocupação com tal aspecto no ato da substituição dos trilhos avariados.

No sequenciamento dos trabalhos, foi considerada a preservação do comprimento do material até o momento no qual se fez necessário o corte em seções para medição de dureza e posterior corte para a realização de embutimento para análise da microestrutura. Na Figura 4.5 é representado, de forma esquemática, os cortes das amostras para a realização dos ensaios.

Dessa forma, estabeleceu-se a seguinte ordenação de ensaios e caracterização: avaliação geométrica, observação da superfície, ensaios para a análise das tensões residuais, dureza Rockwell, caracterização da microestrutura por microscopia óptica dureza Vickers (microdureza). Na Figura 4.6 é apresentado um fluxograma com as etapas experimentais do trabalho realizado.

As avaliações iniciais no que se diz respeito à homogeneidade do aspecto físico (perdas significativas de materiais) associado ao aspecto dimensional (deformações) foram os pontos chaves para definição do quantitativo de caracterizações para cada

amostra extraída. Então, considerando este critério estabelecido, optou-se por uma análise com maior quantidade de caracterizações em relação à amostra TURQ05, na qual foi observada uma superfície mais heterogênea quanto ao estado físico se comparada com as demais (Tabela 4.1).







(b)

a) amostra região fria, (b) amostra região quente.

Fonte: produzido pelo autor.



Figura 4.5 – Sequenciamento de corte das amostras.

Observação da superfície, avaliação geométrica e ensaios de tensões reisudais

Fonte: produzido pelo autor.





Fonte: produzido pelo autor.

Nos itens subsequentes deste trabalho há para cada tipo de caracterização e ensaio um maior detalhamento, utilizando-se de descrição e figuras, quanto às técnicas e termos utilizados na Tabela 4.1.

Amostras	Caraterizações / Ensaios	Quantidade de Amostras	Quantidade de seções por amostra (esp. 20 mm)	Partes embutidas analisadas por seção	Total de linhas verticais nas partes embutidas
TN05 TN08 TURF08	Tensões residuais, avaliação geométrica e observação da superfície	1para cada trilho	N.A	N.A	N.A
	Dureza	N.A	2	N.A.	N.A.
	Microdureza	N.A	1	3	5
	Microestrutura	N.A	2	6	N.A.
TURQ05	Tensões residuais, avaliação geométrica e observação da superfície	1	N.A	N.A	N.A
	Dureza	N.A	3	N.A.	N.A.
	Microdureza	N.A	2	5	9
	Microestrutura	N.A	2	10	N.A.

Tabela 4.1 – Descrição (quantitativa) de caracterizações para cada amostra.

Legenda: N.A. = Não Aplicável.

Fonte: produzido pelo autor.

4.2. Condições de Trabalho das Amostras e Propriedades de Trilhos A100 Oriundas de Referências Normativa e de Fabricante

O trilho tipo A100 da norma DIN 536/1991 que foi investigado (Figura 4.1), esteve sujeito a um ciclo de produção 4760 corridas⁴ em um período de 193 dias excetuandose eventuais paradas de manutenção preventivas ou corretivas durante o período considerado. A carga média computando a panela de aço, o aço líquido transportado e a massa do CTAL totalizam 376.226 kgf por corrida (aproximadamente 47 ton aplicada em cada uma das oito rodas do CTAL).

As composições químicas dos trilhos foram determinadas por meio de um espectrômetro de emissão óptica Shimadzu modelo Foundry Master Xpert. A análise foi realizada tanto nos materiais novos quanto nos materiais usados, com o objetivo

⁴ No ramo siderúrgico, entende-se como "corrida" o momento em que um material no estado líquido está sendo vazado, seja em um carro torpedo para o caso de altos fornos (gusa líquido) ou na panela de recebimento do CTAL (aço líquido) para o caso de aciarias.
de garantir que as amostras de trilho no estado como recebido pela empresa fossem de material similar ao do trilho usado retirado após o período estabelecido.

Na Tabela 4.2 são apresentados os valores de referência das propriedades dos trilhos. Na mesma tabela encontra-se destacada a especificação dos trilhos investigados e as faixas de composição que os mesmos podem ser fabricados. Como a norma DIN 536/1991 não disponibiliza valores de referências de dureza, da tensão limite de resistência e da tensão de escoamento, buscou-se tais informações em documentação de um dos principais fabricantes do produto⁵. As demais propriedades da Tabela 4.2 (limite de resistência e composição química) e as dimensões para cada tipo de trilho são oriundas na referida norma.

Tabela 4.2 – Limite de resistência e composição química para trilhos (norma DIN 536/1991 e informações de fabricante).

	Limite de	Limite de	Dureza	Со	mposição	química	(% em pe	so)	
Especificação	resistência (MPa) (mín.)	escoamento (MPa) (mín.)	(HB) (mín.)	С	Si (máx.)	Mn	P (máx)	S (máx.)	
A45, A55,						0.90			
A75 <u>A100,</u> A100, A120, A150	690	355	200	0,40 a 0,60	0,35	0,80 a 1,20			
A75.A100				0,60 a	0.50	0,80	0,045	0,045	
A73, A100	880	000 440		0,80	0,50	а 1,30			
	880	440	200	0 55 a		1,30			
A120, A150				0,75	0,50	a 1,70			

Fonte: Norma DIN 536/1991 (traduzido e adaptado).

4.3. Avaliação Geométrica

Foi realizada avaliação dimensional dos trilhos novos e usados, de forma a quantificar as alterações que ocorrem em função da deformação plástica, desgaste ou perda de material. Nesse caso, foram analisadas as cotas h₁ e k da Figura 4.7, ou seja, a largura do boleto e a altura do trilho. Utilizou-se para tal paquímetro digital da marca Mitutoyo.

⁵ArcelorMittal Commercial RPS (Document ref. CRTS01.1) – Technical Specification for Delivery of Crane Rails From ArcelorMittal Rodange (Lux.), Poland (Krolewska) and Asturias (Spain), (2014 edition)

Figura 4.7 – Dimensões nominais trilho A100.



dimensões em mm.

Fonte: DIN 536/1991.

Para a cota k foram medidos 10 pontos equidistantes no sentido longitudinal de cada amostra. Já para a cota h_1 foram realizadas as medições nas duas extremidades de cada amostra considerada. Na Figura 4.8 encontram-se ilustrados os pontos que foram tomados como referência para as medições dos dois parâmetros considerados.

Figura 4.8 – Pontos de medição dos trilhos (avaliação geométrica).



Fonte: produzido pelo autor.

4.4. Observação da Superfície

As superfícies dos trilhos foram avaliadas por meio de registro fotográfico. Para os trilhos usados foram feitas comparações com as descontinuidades e defeitos superficiais descritos no capitulo 3. Para os trilhos novos, buscou-se observar o acabamento superficial e descontinuidades visíveis.

4.5. Ensaio de Tensões Residuais

Para avaliar a existência de correlação entre a variação das propriedades mecânicas dos trilhos com as tensões residuais foram realizadas análise das tensões residuais pelo método do furo cego em todas as amostras. Previu-se no planejamento inicial realizar três furações equidistantes e centradas transversal e longitudinalmente na superfície do boleto em cada uma das amostras consideradas para os trilhos novos e usados conforme apresentado na Figura 4.9

Figura 4.9 – Planejamento inicial do posicionamento das furações na superfície dos trilhos.



dimensões em mm.

Fonte: produzido pelo autor.

No entanto, ao longo da preparação das superfícies para colagem das rosetas, percebeu-se a necessidade de realizar pequenas adequações em relação às posições em função do estado final (acabamento) extremamente irregular em ambas amostras usadas. A preparação da superfície e a colagem das rosetas seguiu os procedimentos recomendados pelo fabricante.

Para as medições das deformações foram coladas rosetas modelo KFG-1,5-120-28-11 da marca KYOWA Strain Gages. Como orientação da roseta (Figura 4.10), adotouse o eixo longitudinal do trilho como eixo "x". Seguiu-se, assim, a numeração de cada SG da roseta em concordância com a Norma ASTM E837-13a.



Figura 4.10– Roseta colada com orientações dos SG's, eixos e tensões principais (montagem típica).

Fonte: produzido pelo autor.

O equipamento utilizado para a furação é dotado de parafusos que servem para nivelamento do equipamento, parafusos para ajuste paralelo à superfície e um anel para impedir o movimento após a centralização do equipamento em relação ao centro da roseta. Para a verificação da correta centralização, o equipamento é dotado de uma lente de aumento micrométrica. O equipamento possui, também, anel antirotação e as molas de lâmina. Para o sistema de furação foi utilizado o equipamente da marca Vishay, modelo RS-200 (Figura 4.11). Para a aquisição de dados (leitura de cada valor de resistência em cada furação incrementada) foi utilizado multímetro digital Agilent modelo 3440A, conforme apresentado na Figura 4.12.

Todo o aparato utilizado é de propriedade do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN). Todas as medições de tensões residuais foram realizadas na mesma instituição.

Figura 4.11 – Sistema de furação (e seus componentes) utilizado no ensaio de tensões residuais por furo cego.



(a) componentes do equipamento de furação, (b) equipamento montado com o microscópio.Fonte: produzido pelo autor.



Figura 4.12 – Sistema de aquisição de dados.

Fonte: produzido pelo autor.

Na Figura 4.13 é apresentada a montagem típica dos ensaios dando destaque à caneta de alta rotação acoplada à mangueira de ar comprimido. Utilizou-se na perfuração brocas odontológicas Carbide FG 37, KG SORENSEN, de 1/16" de diâmetro, acionadas pneumaticamente com a pressão variando de 6,5 kgf/cm² a 7,0 kgf/cm².



Figura 4.13 – Montagem típica do ensaio.

Fonte: produzido pelo autor.

Em cada ponto de colagem da roseta, foram realizados vinte furos incrementados a cada 0,05 mm (conforme preconizado na Norma ASTM E837–13a) após estabelecer a altura "zero". A partir da altura "zero" e a cada incremento de furo, anotava-se em um formulário o valor de resistência (em ohm) apresentados em cada um dos três canais do multímetro. Foram, assim, obtidas as resistências R_1 , R_2 , e R_3 , que são dados de entrada para determinação das deformações nas direções 1, 2 e 3 e, posteriormente, das tensões residuais em cada um dos três furos das três amostras consideradas.

Dois pontos obrigatórios foram definidos antes da determinação dos valores de tensões residuais pelo furo cego: em qual categoria de espessura o material se enquadrava e forma de distribuição das tensões residuais a ser considerada.

A Tabela 1 da norma ASTM E837–13a estabelece os valores de D (diâmetro do círculo da roseta) para cada tipo de roseta. Para este trabalho no qual foi aplicada roseta tipo "A" e broca de 1/16" de diâmetro, tem-se que D = 5,13 mm. No item 6.1.2 do referido

documento é tido como uma peça grossa, no caso de aplicação de roseta tipo "A", aquela que possui uma espessura equivalente a pelo menos *D*. Como o valor nominal da espessura do trilho, dada pela cota h_1 , equivale a 95 mm (sendo, portanto, maior que *D*) a amostra, então, foi enquadrada como uma peça grossa.

Levando em conta que pela referida norma é cabível o cálculo de tensões uniformes e não uniformes para amostras espessas, optou-se em determinar tensões residuais não uniformes para este trabalho por não haver informações prévias disponíveis embasadas na geometria ou no processo de fabricação que garanta a uniformidade das mesmas (conforme orientações descritas nos itens 9.1.1 e 9.1.2 da Norma ASTM E837–13a).

Após a determinação das deformações ε_1 , ε_2 , e ε_3 (Equação 3.1) que levam em conta as variações das resistências R_1 , R_2 , e R_3 fornecidas pelo multímetro digital (Figura 4.12) a cada incremento e os coeficientes K_t (*Gage Factor*) para cada resistência, deuse sequenciamento aos cálculos das tensões residuais.

Como a roseta utilizada foi a do tipo "A", foram utilizados para os cálculos de *P*, Q e *T* os elementos $a_{ij} e b_{ij}$ na formação das matrizes $\overline{a} e \overline{b}$ descritos na Tabela 5 da norma ASTM E837–13a. A formação da matriz "*c*" teve seu embasamento na mesma norma: tendo a primeira e última colunas contendo zero e as outras colunas [-1 2 -1] centrada ao longo da diagonal. O fator de regularização *a* foi estipulado inicialmente em 10⁻⁶ (seguindo orientação da Norma ASTM E837–13a que sugere um valor inicial compreendido entre 10⁻⁴ a 10⁻⁶).

Vinte valores para as variáveis p, q e t foram calculados pelas Equações 3.2. 3.3 e 3.4 possibilitando determinar vinte valores de tensões residuais (relativo a vinte incrementos) P, Q e T pelas Equações 3.16, 3.17 e 3.18 respectivamente.

A Equação 4.1 exemplifica de forma genérica a estruturação da operação matricial para o cálculo da tensão residual *P* (Equação 3.16) levando em conta as ordens das matrizes e, portanto, podendo visualizar a compatibilidade operacional entre elas.

Para Q e *T* a estruturação semelhante é aplicada. No entanto, foram utilizadas as Equações 3.17 e 3.18 respectivamente.

$$\begin{pmatrix} \begin{bmatrix} & \cdots & \\ \vdots & \bar{a}^{T} & \vdots \\ & \cdots & \vdots \end{bmatrix}_{20X20} \begin{bmatrix} & \cdots & \\ \vdots & \bar{a} & \vdots \\ & \cdots & \vdots \end{bmatrix}_{20X20} + \alpha_{P} \begin{bmatrix} & \cdots & \\ \vdots & \bar{c}^{T} & \vdots \\ & \cdots & \vdots \end{bmatrix}_{20X20} \begin{bmatrix} & \cdots & \\ \vdots & c & \vdots \\ & \cdots & \vdots \end{bmatrix}_{20X20} \end{pmatrix} P$$

$$= \frac{E}{1+\nu} \begin{bmatrix} \vdots & \cdots & \\ \vdots & \bar{a}^{T} & \vdots \\ & \cdots & \vdots \end{bmatrix}_{20X20} [p]_{20X1}$$

$$(4.1)$$

Para a realização dos cálculos e geração dos gráficos das tensões residuais aliviadas foi utilizado uma planilha cedida pelo CDTN. As informações de entrada para essa planilha foram:

- espessura da peça em milímetros;
- tipo de peça (grossa ou fina);
- módulo de elasticidade em MPa;
- -limite de escoamento em MPa;
- coeficiente de Poisson (adimensional);
- modelo da roseta (fabricante);
- tipo da roseta ("A", "B" ou "C");

 valores das constantes de cada uma dos três SG's disponíveis da embalagem da roseta (adimensional)

- diâmetro característico da roseta em milímetro

- a anotação de cada valor de cada uma das três resistência em ohm para cada incremento realizado.

Considerou-se para os cálculos os valores teóricos de módulo de elasticidade E = 210GPa e coeficiente de Poisson v = 0,29.

A partir de tais informações a planilha é preparada para interagir todas as equações e critérios apresentados no item 3.4.2.

Como referência de parâmetros de resultados, foram adotadas as premissas preconizadas na norma ASTM E837-13a que são relacionados à espessura da amostra (peça fina ou peça grossa).

Para peças grossas (o caso do trilho investigado), segundo a norma ASTM E837–13a, admite-se como resultados satisfatórios tensões residuais limitadas a 80% do valor da tensão de escoamento do material. Para esse trabalho específico os valores de referência são apresentados na Tabela 4.3.

Especificação	%C	Limite de resistência (MPa) (mín.)	Limite de escoamento (MPa) (mín.)	Valor referência para peça grossa ⁶ (MPa)
A100	0,40 a 0,60	690	355	284
	0,60 a 0,80	880	440	352

Tabela 4.3 – Tensões residuais limites para as amostras do trabalho

Fonte: produzido pelo autor

No item 4.4.7 da norma ASTM E837-13a é declarado que a técnica do furo cego possui resultados confiáveis somente próximos à superfície

4.6. Caracterização Mecânica

4.6.1. Ensaios de dureza

Ensaios de dureza Rockwell B foram realizados na seção transversal de amostras retiradas dos trilhos ao longo de todo o boleto e parte da alma e do patim, como apresentado na Figura 4.14, e quantitativos definidos na Tabela 4.1. No caso do boleto, os ensaios foram espaçados de 5 mm nas direções horizontal e vertical e para a alma e o patim, a distância foi de 10 mm. Seções de 20 mm de espessura foram cortadas, de forma simétrica, a partir do centro do furo oriundo do ensaio de tensões residuais conforme descrito na Figura 4.5.

Figura 4.14 – Representação esquemática das posições de medições de dureza Rockwell B no boleto, na alma e na região central do patim de todas as seções consideradas.



dimensões em mm.

Fonte: produzido pelo autor.

Considerando os trilhos novos, a análise da distribuição de dureza possibilitou verificar homogeneidade ou não da propriedade mecânica em virtude do processo de fabricação do componente. Para os trilhos usados, os resultados vieram a permitir a verificar alterações decorrentes do emprego do componente como via para movimentação do carro.

Os experimentos foram iniciados com o corte das amostras ou seções dos trilhos com aproximadamente 20 mm de espessura em uma serra Franho modelo FM 1600. Após o corte, as superfícies foram retificadas em um equipamento Zocca Como modelo RETT RPV 650 C ZOCCA. Os ensaios foram realizados em um durômetro Rockwell IGV modelo RM401A utilizando a escala B (penetrador esférico de 1/16" de diâmetro e carga de 100 kgf).

4.6.2. Ensaios de microdureza

Ensaios de microdureza foram realizados em áreas menores embutidas (definidas de A1 até A5) próximos à superfície superior dos trilhos (Figura 4.15) em diferentes regiões, em conformidade com as regiões nas quais foram conduzidas, também, as análises de microestrutura (item 4.7). Assim, o emprego dessa técnica, em complementação aos ensaios de (macro) dureza, permitiu verificar alterações em porções menores dos componentes. As distribuições das 5 linhas para as seções TN05, TN08 e TURF08 e das 9 linhas para a seção TURQ05 são apresentadas na Figura 4.15.

Para a distribuição dos pontos, distou-se 0,05 mm da superfície superior do boleto totalizando 10 medidas com essa variação (até a cota de 0,95 mm) e prosseguindo com a variação de 0,5 mm entre cada penetração até atingir o limite máximo 9,95 mm de distância da referência inicial. Nas seções usadas houve variações de quantidade de medições realizadas nas linhas 1, 2 e 3 em função da deformação ou da ausência de material.

Os testes foram conduzidos em um microdurômetro Shimadzu modelo HMV-2T, com penetrador Vickers, empregando carga de 200 gf e tempo de aplicação de 15 s. As áreas foram as mesmas utilizadas para a análise microestrutural.



Figura 4.15 – Representação esquemática das linhas verticais nas quais foram realizadas as medições de microdureza.

dimensões em mm.

Fonte: produzido pelo autor.

4.7. Caracterização Microestrutural

A caracterização microestrutural consistiu na análise micrográfica por meio de microscopia óptica (MO) aproveitando-se as partes embutidas das amostras. As regiões empregadas na MO são apresentadas na Figura 4.16

Dessa forma, em cada área embutida foram digitalizadas uma ou duas regiões para análise (em uma extremidade, por exemplo, foram consideradas duas regiões denominadas A e B e na área seguinte apenas uma região, denominada C). Ainda, em uma mesma região, foram observadas as características efetivamente próximas à superfície do trilho e próximas à porção inferior da área, que representariam o trilho como um todo.

Para as áreas das amostras TN05, TN08 e TURF08 foram digitalizadas imagens das regiões de "A" até "D" ao passo que para as áreas das amostras TURQ05 foram digitalizadas imagens das regiões de "A" até "H"





Fonte: produzido pelo autor.

A preparação das áreas, a partir das seções utilizadas para os ensaios de dureza, envolveu corte em uma cortadeira Arotec modelo COR 80/2, embutimento a quente com baquelite em uma prensa Arotec modelo PRE 30 MI, lixamento (lixas #120, #240, #320, #400, #600) e polimento com pasta de diamante (9µm, 3µm e 1µm) em lixadeiras / politrizes marca Arotec modelos AROPOL VV200-PU e 2V200. O ataque químico foi realizado por imersão com o reagente Nital 3% (3ml de HNO₃, 97ml de álcool etílico). A microestrutura foi observada e digitalizada em um microscópio Fortel com sistema de captura de imagens Kontrol modelo M713.

5. RESULTADOS

5.1. Composição Química dos Trilhos

Na Tabela 5.1 são apresentados os resultados da análise química dos trilhos investigados. Verifica-se que a composição química das peças é similar (TN05 e TURQ05, TN08 e TURF08) àquela prevista em norma, sendo que a discreta diferença observada pode estar associada à técnica de análise utilizada.

Elementos	TN05 (%)	TURQ05 (%)	TN08 (%)	TURF08 (%)
С	0,486	0,533	0,796	0,830
Si	0,232	0,297	0,247	0,263
Mn	0,861	0,985	1,090	1,170
S	0,0192	0,0302	0,0075	0,0065
Cr	0,0352	0,0288	0,0735	0,2004
Ni	0,0223	0,0169	0,0234	0,0049
Cu	0,0152	0,0284	0,0549	0,0102

Tabela 5.1 – Composição química (% em peso) do trilho novo.

Fonte: Produzido pelo autor

5.2. Avaliação Geométrica

A Tabela 5.2 traz os valores das cotas $k \in h_1$ para as amostras consideradas. As variações para as medidas realizadas das cotas para os trilhos novos podem ser consideradas discretas, dado aos desvios padrão apresentados.

Ao comparar a média dos valores das cotas medidas na respectiva amostra ($K_{médio} = 100,34 \text{ mm e } h_{1médio} = 95,40 \text{ mm}$), em relação aos valores nominais apresentados na norma DIN 536/1991, constatou-se a variação (acréscimo) de 0,34% para cota k e 0,42% para h_1 . Ressalta-se que a norma DIN 536/1991admite variações de ± 1,0 mm e ± 1,5 mm para as cotas k e h_1 , respectivamente, quando se trata de valores absolutos.

A análise baseada na média dos valores medidos, também, foi realizada para a amostras TURQ05 ($K_{médio}$ = 104,67 mm e $h_{1médio}$ = 92,98 mm) e TURF08 ($K_{médio}$ = 104,29 mm e $h_{1médio}$ = 92,91 mm) constatando, inicialmente, variações significativas

em termos de valores absolutos para ambos os casos quando comparados aos valores nominais da norma pertinente.

	TN (m	édio)	TUR	Q05	TURF08			
Medida	k	h₁	k	h1	k	h₁		
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		
1	100,33	95,58	103,77	92,74	104,15	92,76		
2	100,44	95,21	104,29	93,22	104,08	93,06		
3	100,13		104,71		104,26			
4	100,38		105,03		104,45			
5	100,29		104,90		104,35			
6	100,72		104,60		104,49			
7	100,40		105,04		104,32			
8	100,12		105,59		104,34			
9	100,32		104,80		104,03			
10	100,26		103,93		104,38			
Média	100,34	95,40	104,67	92,98	104,29	92,91		
Desvio Padrão	0,16	0,19	0,24	0,52	0,15	0,15		

Tabela 5.2 – Medidas das amostras.

Fonte: produzido pelo autor.

Da mesma forma (comparações baseadas na média dos valores medidos), para a cota *k* foi verificada acréscimo de 4,67% e 4,29% TURQ05 e TURF08 respectivamente. Por outro lado, a cota h_1 apresenta decréscimo de 2,13% para TURQ05 e 2,20% para TURF08.

De forma geral, os valores das deformações das amostras TURQ05 e TURF08 se apresentaram em ordem de grandeza semelhantes não havendo, portanto, relação direta com as condições de trabalho (quente ou fria) aos quais foram retiradas cada uma das amostras.

Em uma análise complementar, foram realizadas medidas selecionadas para cota *k* na amostra TURQ05 mirando as proximidades de onde houve perda significativa de material. O máximo valor determinado foi de 106,26 mm resultando em acréscimo de 6,26% em relação à medida nominal. Tal situação é apresentada na Figura 5.1. Os demais valores permaneceram na mesma ordem de grandeza daqueles apresentados na Tabela 5.2.



Figura 5.1 – Máxima deformação plástica para amostra TURQ05.

Fonte: produzido pelo autor.

5.3. Observação da Superfície

5.3.1. TN05 e TN08

Ainda que a norma DIN 536/1991 não faça nenhuma menção a um padrão de acabamento superficial esperado para a superfície de um trilho novo não havendo, portanto, um referencial de comparação e análise, foi percebido na respectiva amostra um aspecto final bem apropriado resultante de um processo robusto de fabricação como o de laminação a quente.

Regiões levemente oxidadas foram observadas na superfície (como exemplificado na Figura 5.2), considerando que não há nenhum procedimento diferenciado quanto ao armazenamento do componente, que fica em grande parte do tempo ao ar livre para garantir a imediata disponibilização para aplicação no processo produtivo. Não foi observada a ocorrência de deformações excessivas do boleto nas amostras.



Figura 5.2 – Acabamento superficial das amostras TN's.

Fonte: produzido pelo autor.

5.3.2. TURF08

As descontinuidades verificadas na amostra TURF08 denotaram ser condizentes com aquelas descritas por Schneider (2005), Petroni (2006) e Coimbra em trilhos ferroviários usados descritas no item 3.3.

Na análise da superfície de 500 mm da região fria foram percebidas duas descontinuidades típicas: deformação plástica (*rail plastic flow*) e escamação (*flaking*) conforme ilustrado na Figura 5.3.

A deformação plástica (Figura 5.3-a) foi bem associada pela visível alteração geométrica e dimensional do contorno do boleto não afetando a integridade física da região citada correlacionando com a definição de Schneider (2005).



Figura 5.3 – Descontinuidades na amostra TURF08.

(b)

(a) descontinuidade tipo deformação plástica (*rail plastic flow*), (b) descontinuidade tipo escamação (flaking)

Fonte: produzido pelo autor.

A descontinuidade denominada *flaking* (Figura 5.3-b) ocorreu predominantemente no canto do boleto, conforme Schneider (2005), resultando em leve perda de material apresentando lâminas agrupadas próximas à referida região. Também, em toda extensão da superfície do boleto foi observada uma superfície dita corrugada bastante irregular (destacada na Figura 5.3-b) resultante do esforço mecânico das rodas do CTAL sobre o componente.

5.3.3. TURQ05

Na amostra TURQ05 foram observadas, similarmente à amostra TURF08, descontinuidades típicas de trilhos ferroviário usados.

Em uma amostra de 1000 mm de um trilho usado retirado da região quente foram observadas perdas significativa de material em forma de concha e concentrada no canto do boleto tornando-o incapaz de satisfazer uma mínima aceitação do padrão do perfil do trilho sendo caracterizado, portanto, um defeito. Assim, na Figura 5.4 é registrado o despedaçamento (*shelling*) destacado



Figura 5.4 – Defeito tipo despedaçamento (shelling) na amostra TURQ05.

Ao longo da mesma amostra pôde ser percebida a presença de um material agregado à lateral do trilho (Figura 5.5). Acredita-se que o referido material tenha sido fruto da solidificação do aço e/ou escória gerada que caem sobre o trilho no momento da transformação do gusa liquido em aço líquido ou no momento do enchimento de aço liquido na panela de aço que fica sobre o CTAL.

Assim como em TURF08, também foram observadas em TURQ05 as duas descontinuidades típicas: deformação plástica (*rail plastic flow*) apresentada na Figura 5.5 e escamação (*flaking*) apresentada na Figura 5.6.

Fonte: produzido pelo autor.



Figura 5.5 – Descontinuidade tipo deformação plástica (rail plastic flow) na amostra TURQ05.

Fonte: produzido pelo autor.



Figura 5.6 – Descontinuidade tipo escamação (*flaking*) na amostra TURQ05.

Fonte: produzido pelo autor.

5.4. Caracterização Mecânica e Microestrutural dos Trilhos

Em função dos resultados se revelarem similares para a caraterização mecânica, é apresentado no texto corrente uma seção de dureza Rockwell B e uma imagem associando dureza Vickers (microdureza) com a microestrutura. Os demais resultados são apresentados no Apêndice sendo este procedimento aplicado a todos os trilhos.

Assim, o quantitativo de seções (dureza Rockwell B), partes embutidas analisadas (microestrutura e dureza Vickers) tornam-se coerentes com a Tabela 4.1.

5.4.1. TN05

Nas Figuras 5.7 e A.1 são apresentados os resultados de dureza Rockwell B em seções transversais da amostra TN05.

Verifica-se que, em geral, não há diferenças consideráveis na propriedade tanto ao longo do boleto como na alma e no patim na referida seção. Os valores distintos não apresentam nenhuma tendência de comportamento e os mesmos atendem, na maioria dos pontos, o valor mínimo estabelecido na especificação do fornecedor (200 HB ≈94 HRB).

A microestrutura do material, como um todo, apresenta-se condizente com a composição química apresentada, caracterizando-se um aço hipoeutetóide com grãos de ferrita proeutetóide (formados acima da temperatura eutetóide) situados entre as colônias de perlita (regiões escuras), como apontado na Figura 5.8-c. As imagens apresentadas da Figuras A.2 (seção 1) e A.4 (seção 2) retratam a região próxima à superfície de forma completa.

Em adição aos constituintes presentes, observa-se a ocorrência de grãos de ferrita em maior proporção na região próxima à superfície do trilho representada pela área clara das micrografias. Esse fenômeno pode estar relacionado à ocorrência de descarbonetação do material durante o processo de fabricação do componente (Figura 5.8-b). Como essa operação é a laminação a quente, os níveis de temperatura utilizados certamente foram elevados o suficiente para permitir a difusão dos átomos de carbono do trilho para a atmosfera, levando durante o resfriamento ao desenvolvimento de uma microestrutura típica de um teor de reduzido de carbono com grande quantidade de ferrita pró-eutetoide. Resultados similares foram observados no trabalho realizado por Alwahdi; Kapoor; Franklin (2013).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Α	88	96	95	95	96	95	95	96	95	95	95	96	96	95	98	99	98	96	85
В	95	95	97	97	95	95	97	98	97	98	98	98	99	99	98	98	99	99	99
С	98	98	95	97	97	95	97	97	97	97	97	97	96	96	97	97	97	97	98
D	95	96	96	95	95	95	96	96	96	95	96	96	96	94	96	96	96	96	97
Е	96	95	95	95	95	96	96	95	96	96	96	97	96	97	97	97	98	99	99
F	97	97	96	96	94	97	97	98	97	98	98	96	97	97	97	97	98	98	98
G	97	96	97	97	95	96	99	97	97	98	97	96	96	97	97	99	<mark>98</mark>	98	98
H.	<mark>96</mark>	95	96	96	93	95	96	97	96	96	97	97	97	96	97	97	97	98	99
1			97	96	96	95	95	97	96	96	96	97	98	94	96	95	96		
J						94		96		96		97		95					
K						95		95		95		95		94					
						06		05		06		00		07					
-						90		90		90		92		97					
м						98		98		97		97		98					
111						50		50		51		51		50					
Ν						100		98		99		90		99					

Figura 5.7 – Perfil de dureza Rockwell B (HRB) na seção transversal amostra TN05 (seção 1).

Fonte: produzido pelo autor.

Ainda sobre o processo de descarbonetação em TN05, ao comparar imagens de mesma ampliação das Figuras A.2 e A.4, é percebido, em geral, que tal fenômeno é mais intenso na seção 1 dando indícios de heterogeneidade microestrutural na região do boleto (superfície) ao longo do produto trilho.

Quanto à dureza Vickers, cujos resultados são apresentados na Figura 5.8-a, não é possível perceber uma relação clara da propriedade em função da posição das linhas medidas (linhas 1, 2, 3, 4 e 5). Tal situação contraria ao descrito por Ahlstrom; Karlsson (2005), que relatou maiores durezas nas regiões das bordas, ou seja, próximo às linhas 1 e 2.



Figura 5.8 – Perfil de dureza Vickers X microestrutura a partir da superfície da amostra TN05.

Dureza Vickers - TN05

 (a) dureza Vickers, (b) MO região B próximo à superfície seção 1, (c) MO região B interno seção 1.

Fonte: produzido pelo autor.

No entanto, assim como é observado no presente trabalho, esses autores perceberam a ocorrência de valores de dureza mais baixos próximos à superfície associados ao processo de descarbonetação (primeiros pontos de todas as linhas). Nesse caso, verifica-se uma ligeira tendência de aumento (com oscilações) dos valores de microdureza à medida que o ponto de medição se afasta da superfície relacionandose de forma lógica com a maior presença das colônias do constituinte perlita (região escura da micrografia) na parte mais interna da amostra (Figuras A.3 e A.5).

5.4.2. TURQ05

Como mencionado (Tabela 4.1), três seções de dureza Rockwell B foram consideradas para TURQ05. A seção 1 da amostra (Figura 5.9) apresentava-se com perda significativa de material na superfície parecendo ter passado por um processo

de utilização mais agressivo durante o seu ciclo de aplicação se comparada às seções 2 (Figura A.6) e 3 (Figura A.7).

Observa-se nas três seções a ocorrência de valores de dureza mais elevados na superfície, região na qual há a constante troca de calor com o material incandescente gerado durante o processo de conversão do ferro gusa em aço e ainda o contato com a roda do carro de transporte de aço líquido. Essa tendência é sustentada até a linha horizontal marcada como "B". À medida que as medições se afastam da superfície, na alma e no patim, os valores de dureza Rockwell B vão se a apresentando menores em relação à superfície e ao mesmo tempo revelando-se na mesma ordem de grandeza medidos na amostra TN05.

Nas Figuras A.8, A.9, A.10 e A.11 são apresentadas na totalidade as imagens obtidas por microscopia óptica da microestrutura do material na seção 1. Para o caso das regiões de A até D, tanto próximas à superfície (Figuras A.8 e A.9) quanto às regiões mais internas (Figuras A.10 e A.11), verifica-se a ocorrência de grãos de ferrita e colônias de perlita, similarmente ao que foi observado para o trilho novo TN05.

Em relação ao aspecto visual dos grãos, percebe-se na região próxima à superfície a incidência de microestrutura alongada, caracterizando a deformação do material (Figura 5.10-b). Essa deformação é resultante do frequente trabalho mecânico da roda durante o ciclo de utilização do trilho. Esses resultados são corroborados pelos trabalhos de Alwahdi; Kapoor; Franklin (2013) e Lo; Mummery; Buttle (2010).

Por outro lado, para o caso das demais regiões da seção 1 avaliada da amostra TURQ05 (Figura A.9), é verificado aspecto diferenciado e atípico quando comparada a regiões simétricas da amostra TN05 (Figura A.2). Foi constatada a incidência de grãos ferríticos de formatos não bem definidos e com tamanho de grãos maiores, destacados na Figura 5.10-c, situando-se adjacente às colônias de perlita. Ressalta-se que essa região foi aquela na qual foi observado o despedaçamento do canto do boleto (Figura 5.1).

Figura 5.9 – Perfil de dureza Rockwell B (HRB) na seção transversal amostra TURQ05 (seção

1).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Α	103	102	104	105	103	104	103	105	102	100	104	105	95	95					
В	101	101	103	101	101	100	100	100	101	100	100	100	98	95	93	95	96	91	95
С	98	98	98	99	99	98	99	98	99	98	98	99	98	97	96	97	95	92	98
D	95	96	96	97	98	97	96	96	95	94	94	9 5	95	95	95	95	93	94	93
Е	95	93	95	95	95	96	95	95	94	94	94	92	93	93	94	94	94	93	93
F	94	94	95	96	96	95	95	95	94	93	94	93	94	93	95	94	93	92	90
G	94	95	95	97	97	95	95	95	94	92	94	96	95	95	92	94	93	90	90
Н	95	95	97	96	95	96	95	95	94	92	94	92	95	95	95	93	90	90	90
I			96	98	98	98	96	94	94	95	95	96	95	96	96	96			
J						97		96		94		96		97					
K						96		96		97		97		98					
L						98		97		96		97		99					
						00		00		07		00		00					
IVI						98		98		97		90		90					
N						02		02		04		05		06					
IN						95		90		94		90		90					

Fonte: produzido pelo autor.

A imagens das regiões mais internas da seção 1 da amostra TURQ05, em destaque na Figura 5.10-d e apresentadas de forma mais ampla nas Figuras A.10 e A11, revelam características semelhantes da respectiva região na amostra TN05 no que se diz respeito à estrutura, tamanho e forma de grãos. Assim, para seção 1, exceto a região próxima à superfície (Figura A.9), resultados relativamente similares (no entanto, com menor intensidade de deformação nos grãos) podem ser verificados na seção 2 analisada (Figuras A.12, A13, A15 e A.15).

Na Figura 5.10-a são apresentados os resultados de dureza Vickers, na qual é observada uma significativa dispersão dos valores. Em geral, os patamares do perfil de dureza Vickers da amostra TURQ05 seção 1 são mais elevados quando comparados à TN05. Isso torna-se coerente ao levar em conta, como citado anteriormente, o encruamento da superfície em virtude da deformação plástica produzida pelo contato da roda com o trilho fazendo elevar tais valores como relatado por Alwahdi; Kapoor; Franklin (2013) e Lo; Mummery; Buttle (2010). No entanto, os

maiores valores de dureza esperados na região central (linha 5), região na qual o contato roda e trilho são mais intensos, não foram observados, contrariando os mesmos autores.

As linhas 1, 2 e 3 (Figuras 5.10-a) estão associadas aos maiores valores de dureza em uma região (Figura 5.10-b) cuja a microestrutura apresenta-se deformada fruto do trabalho mecânico acrescida do fator temperatura não presentes na amostra TN05. É observada, ainda, a redução dos valores de dureza da linha 6 à 9, relacionando-se com a incidência de grandes grãos ferríticos de tamanhos maiores nessa região (Figura 5.10-c).

E, finalmente, na Figura 5.10-d uma estrutura típica associada à composição da amostra é destacada para uma região mais interna.

Exceto a ocorrência do aspecto alongado de grãos na região da superfície (Figura 5.11-b), assim como revelado na seção 1 da mesma amostra (Figura 5.10-b), em geral, as microestruturas da seção 2 (Figuras A.12, A.13, A.14 e A.15), dita uma região menos agredida se comparada à seção 1 da mesma amostra, não apresentam nenhum aspecto notoriamente diferenciado para composição química em questão.

Os perfis de dureza Vickers da seção 2 da amostra TURQ05 (Figura 5.11-a) demonstram ter menor dispersão de valores se comparados à seção 1 apresentando uma tendência mais clara quanto a referida propriedade. As linhas 1, 8 e 9 são aquelas com patamares mais distintos. As demais linhas que se situam em uma faixa bem mais definida sendo maiores, também, quando comparadas à TN05. Fatos esses, esperados para um trilho usado.



Figura 5.10 – Perfil de dureza Vickers X microestrutura a partir da superfície amostra TURQ05 (seção 1).

(a) dureza Vickers, (b) MO região B próximo à superfície seção 1, (c) MO região G próximo à superfície seção1, (d) MO região E interno seção1.
 Fonte: produzido pelo autor.

O confronto entre a dispersão da dureza Vickers e a diferença de microestrutura entre as seções 1 e 2 de TURQ05 leva-se a inferir a presença de fatores que influenciam de forma significativa nesses aspectos como, por exemplo, um gradiente de temperatura entre as partes e ainda um trabalho mecânico de intensidade distinta na amostra considerada.

Uma microestrutura relacionada à composição e patamares de dureza mais estável da seção 2 contribui em compreender o quão atípico são os achados na seção 1.

Figura 5.11 – Perfil de dureza Vickers X microestrutura a partir da superfície da amostra TURQ05 (seção 2).



(a) dureza Vickers, (b) MO região A próximo à superfície seção 2, (c) MO região H interno seção 2.

Fonte: produzido pelo autor.

5.4.3. TN08

Na Figuras 5.12 e A.16 são apresentados os perfis de dureza Rockwell B em seções transversais da amostra TN08.

Nota-se a homogeneidade da amostra quanto à propriedade em questão sendo ela bem condizente com o maior percentual de carbono na referida amostra. Os valores apresentados encontram-se razoavelmente próximo ao mínimo (260 HB) preconizado pelo fornecedor (262 HB ≈ 103 HRB). Nas Figuras A.17 e A.18 são apresentadas as imagens das microestruturas da superfície e região mais interna respectivamente para seção 1 prevalecendo a mesma lógica de observação para a seção 2 nas Figuras A.19 e A.20.

É verificada a predominância de perlita na microestrutura (Figura 5.13-b) com as fases ferrita (região clara) e cementita (região escura), fato que está de acordo com a composição química do componente e ainda com os resultados obtidos nos ensaios de dureza.

No entanto, observa-se nas camadas mais superficiais (Figura 5.13-b) a presença de ferrita pró-eutetóide, cuja quantidade diminui à medida que se afasta do topo do boleto. Acredita-se que, da mesma forma que ocorre em TN05, esse resultado está associado à ocorrência do fenômeno de descarbonetação durante a fabricação (por laminação a quente) e resfriamento do trilho.

A presença de ferrita pró-eutetóide com a perlita na superfície não é evidenciada pelos resultados de dureza, em virtude da distância adotada para a realização das primeiras impressões.

Na Figura 5.13-a são apresentados os perfis de dureza Vickers da amostra TN08. Verifica-se que para as cinco linhas, o primeiro valor de dureza é inferior aos demais. Este resultado parece estar relacionado, mais uma vez, à porção superficial descarbonetada do boleto sendo que o efeito da descarbonetacão, destacado na Figura 5.13-b é mais significativo aqui do que na amostra TN05 em função do maior teor de carbono (maiores diferenças de dureza do primeiro para os demais pontos) em TN08.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
А	100	103	102	102	101	100	101	102	102	101	100	104	100	102	102	102	103	104	103
В	101	102	101	101	98	98	100	98	100	102	100	104	100	101	100	99	100	101	101
С	102	101	102	98	102	102	101	102	102	102	103	103	103	100	102	102	101	99	102
D	103	101	104	103	105	103	103	104	103	103	103	103	103	102	103	102	103	105	102
Е	103	102	103	103	105	104	104	104	103	103	104	105	101	103	100	104	101	103	105
F	102	101	104	104	106	105	103	104	105	104	105	102	104	103	102	103	103	103	103
G	102	101	103	102	104	102	101	104	102	104	104	102	103	103	102	102	101	101	102
H	104	103	103	102	104	102	102	102	101	102	102	100	102	103	102	102	102	104	104
I			102	101	104	102	101	104	103	104	101	100	101	101	102	101	101		
J						105		105		104		103		104					
ĸ						103		104		104		102		102					
L						104		104		104		105		104					
Μ						101		104		104		104		103					
Ν						103		106		105		104		105					

Figura 5.12 – Perfil de dureza Rockwell B (HRB) na seção transversal amostra TN08 (seção 1).

Fonte: produzido pelo autor.

Em geral, da mesma forma que na amostra TN05, é percebida uma relativa manutenção no patamar dos valores em cada linha (menor dispersão dos valores) associando uma ligeira tendência de aumento dos valores de microdureza à medida que o ponto de medição se afasta da superfície relacionando-se de forma lógica com a microestrura predominantemente perlítica.



Figura 5.13 – Perfil de dureza Vickers X microestrutura a partir da superfície da amostra TN08.

Dureza Vickers - TN08

(a) dureza Vickers, (b) MO região B próximo à superfície seção 1, (c) MO região C interno seção1.

Fonte: produzido pelo autor.

5.4.4. TURF08

Nas Figuras 5.14 e A.21 são apresentados os perfis de dureza Rockwell B nas seções transversais da amostra TURF08.

Verifica-se que, diferentemente da amostra TN08, os resultados não parecem ser uniformes. Foram verificados maiores valores na superfície do boleto. Esse fato prevalece até a linha C. Ainda em comparação com TN08, os valores de dureza na região mais interna do boleto, na alma e no patim guardam certa semelhança.

No aspecto microestrutural o ponto a destacar em TURF08 em relação à TN08 é o aspecto deformado permanente na região próxima à superfície resultante do trabalho mecânico da roda do carro na respectiva região como destacado nas Figura 5.15-b. Ainda na mesma figura é apontada uma região que, em função do aspecto físico

constatado, sugere ser a camada branca (*White Etching Layer* – WEL) referenciada por Pyzalla et al. (2001).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
А	110	109	109	109	108	109	109	108	108	108	107	105	106	106	107	107	108	106	105
В	108	107	106	106	105	106	105	106	106	106	106	104	104	104	104	104	105	105	103
С	102	103	103	104	105	106	106	105	106	105	104	104	105	104	105	104	104	104	103
D	103	101	102	102	102	103	102	102	101	102	102	102	102	102	102	101	101	101	102
Е	104	101	101	102	102	103	103	102	103	104	103	103	103	103	103	103	102	104	103
F	103	102	102	102	103	103	102	103	104	103	103	102	103	102	102	102	102	102	103
G	103	102	102	103	102	102	101	103	101	104	102	103	101	101	101	102	103	102	102
Н			104	105	103	103	102	103	103	105	102	102	102	102	102	102	103	102	103
Т					102	103	103	103	101	103	101	101	103	103	102	103	103		
J						104		102		102		103		103					
Κ						105		103		105		104		104					
L						105		104		104		104		105					
						105		105		105				105					
M						105		105		105		104		105					
NI						405		400		400		405		405					
IN						105		106		106		105		105					

Figura 5.14 – Perfil de dureza Rockwell B (HRB)	na seo	ção transvers	al TURF08	(sec	ão 1`	۱.
		110 300	çao transvers		Jacy	αυ ι	J٠

Fonte: produzido pelo autor.

O aspecto delgado dos grãos da região da superfície de TURF08 (Figura 5.15-b) se difere do aspecto da microestrutura de regiões similares de TURQ05 (Figura 5.10-b). Isso pode estar relacionado a diferenças pontuais de resistência, ao teor de carbono e as condições de operação (ALWAHDI; KAPOOR; FRANKLIN ,2013). Na região interna (Figura 5.15-c), o material apresenta-se com uma estrutura típica para a composição química em questão.

Nas Figuras A.22 e A.23 são apresentadas as micrografias completas das regiões da superfície e mais interna respectivamente da seção 1 de TURF08. Já as Figuras A.24 e A.25 retratam as micrografias das mesmas para a seção 2 de TURF08 não havendo nesses casos atipicidades a serem destacadas. Os perfis de microdureza da amostra TURF08 são apresentados na Figura 5.15-A. Apesar da presença de ferrita pró-eutetóide nas camadas mais superficiais do componente, os valores de dureza não aparecem reduzidos nessas regiões, uma vez que o efeito do encruamento parece ter sido superior às diferenças de microconstituintes.

A tendência de maior dureza na região central de um trilho usado (linha 5), relatada por Awahdi; Kapoor; Franklin (2013) foi evidenciada neste caso. Diferentemente do TURQ05, a utilização típica de um trilho associada somente a esforços mecânicos parece explicar tal questão.





(a) dureza Vickers, (b) MO região B próximo à superfície seção 1, (c) MO região B interno seção 1.

Fonte: produzido pelo autor.

Ao comparar com os valores apresentados na amostra TN08, a dureza Vickers para amostra TURF08 mostrou-se maior nas regiões internas em função do maior percentual de carbono que associado aos efeitos do encruamento, como citado anteriormente, elevou ainda mais os valores próximos à superfície.

5.5. Tensões Residuais

As análises de tensões residuais foram realizadas comparando os fatores condições de utilização e de composição química entre as amostras.

Buscando normalizar os gráficos gerados e, assim, permitir uma comparação adequada entre os valores de tensões aliviadas, foram adotados nos eixos das ordenadas os valores máximos das tensões principais ($\sigma_{max} e \sigma_{min}$) e dos ângulos das tensões principais (β) em relação ao *strain gage* 1 (Figura 4.10.)

Apesar de terem sido feitos 20 incrementos (1 mm de profundidade) adotou-se nos gráficos valores correspondentes a pontos de 10 incrementos (0,5 mm de profundidade). Esses ajustes nas escalas visaram propiciar uma melhor visibilidade na medida de tensões residuais próximo à superfície. Na maioria das medições foram obtidos perfis semelhantes ao apresentado por Martins et al. (2004) que aplicou a técnica de análise de tensões residuais.

As tensões residuais próximas as regiões de rodagem nas amostras novas TN05 (Figura 5.16) e TN08 (Figura 5.17) apresentaram valores maiores que 80% da tensão de escoamento mínima de referência do fabricante. Assim, tais amostras denotam, já no estado inicial, a forte tendência de geração e propagação de trincas. Tal fato é indesejável por constituir mais um fator que coopera na redução da vida útil do componente já que as regiões do trilho que estão sob a ação de tensões residuais são as mais propensas à formação e crescimento de trincas segundo Lo; Mummery; Buttle, (2010).

Foi observada em ambos os casos a forte incidência de elevadas tensões compressivas na região do boleto resultante do processo de prensagem de rolos sobre a matéria prima durante a formação do produto final por meio do processo de laminação (AMOROS, 2008). Assim, a expectativa em se ter tensões

predominantemente trativas para um trilho novo desempenado não foi confirmada divergindo em relação a literatura (SCHLEINZER; FISCHER, 2001).

Corroborando com a literatura (BIEMPICA et al., 2009), o pico das tensões residuais, que corresponde ao ponto de alívio das tensões residuais, ocorre próximo à superfície. Esse comportamento é bem caracterizado ocorrendo próximo à superfície do boleto à 0,05 mm como observado nas Figuras 5.16-a, 5.16-b, 5.17-a e 5.17-c.

A extremidade 2 da amostra TN05 (Figura 5.16-c) parece não ter tido a tensão superficial aliviada corretamente. Na medição central da amostra TN08 (Figura 5.17-b) foi constatado um alivio de tensão residual deslocada à 0,1 mm de profundidade diferenciando-se das demais situações (0,05 mm).

Conforme Garnham; Davis (2009), as variações de composição química do material do trilho associadas ao processo de laminação podem afetar o grau de homogeneidade da microestrutura, além do tamanho e da distribuição de inclusões frágeis e dúcteis.

Quanto à composição química, é percebido na Tabela 4.2 as variações percentuais dos elementos normatizadas pela norma DIN 536/1991. Essas variações foram constatadas quando comparadas as composições dos materiais investigados (TN05 com TURQ05 e TN08 com TURF08) apresentadas na Tabela 5.1.

As microestruturas, apresentadas na totalidade nas Figuras A.2, A.3, A.4 e A.5 para TN05 e nas Figuras A.17, A.18, A.19 e A.20 para TN08, confirma a heterogeneidade intrínseca ao processo de laminação. É percebida nas figuras citadas a variação do tamanho de grão e do quantitativo de constituintes presentes.

Então, a dispersão dos resultados revelados nos ensaios de tensões residuais dos trilhos novos (ambas composições) torna-se mais compreensível em função das caracterizações realizadas. Essa dispersão também é revelada pelas variações do ângulo β apresentadas em todos os gráficos dos trilhos novos (ambas composições)



Figura 5.16 – Tensões residuais amostra TN05.

Fonte: produzido pelo autor.

(a) extremidade 1, (b) centro, (c) extremidade 2


Figura 5.17 – Tensões residuais amostra TN08.



A comparação entre amostras novas e usadas que possuem composição química semelhante permitiu verificar as tendências das tensões residuais ao levar em conta a inserção de fatores externos (carga mecânica pura e carga mecâcnica associada à temperatura).

Quando comparada as amostras TN05 (Figura 5.16) e TURQ05 (Figura 5.18), no qual há a associação de carregamento mecânico e temperatura impondo tensões térmicas ao componente, é percebido a elevação dos patamares dos picos de tensões residuais compressivas para as amostras TURQ05. A mesma observação pode ser constatada na comparação das tensões residuais para as amostras TN08 (Figura 5.17) e TURF08 (Figura 5.19). Na amostra TURQ05 ficou, ainda, correlacionada a influência das tensões térmicas ligada ao aspecto de partes fraturadas observado ao longo da mesma (ZERBST; SCHÖDEL; HEYDER, 2009)

A ausência de tensão residual trativa, constatado e salientado inicialmente para as amostras novas, fez elevar de forma significativa os patamares de tensões compressivas nas regiões próximas à superfície do boleto para as amostras usadas.

As altas tensões residuais verificadas na amostra TURF08 (Figura 5.19) estão associadas a deformações plásticas permanentes acumulada destacadas por Alvarez et al. (1999) e Pyzalla et al. (2001)

Apesar da magnitude dos patamares de tensões residuais da amostra TURF08 terem sido maiores quando comparado aos valores da amostra TURQ05 foi percebida nessa última, defeitos caracterizados pela perda de material. Nesse caso o efeito das tensões térmicas foi predominante como já dito anteriormente. Destaca-se, também, nesse ponto, a tendência das tensões compressivas (TURF08), segundo Wang et al. (2013), atuarem de foram a melhorar a resistência a fadiga e prevenindo a iniciação de trincas reduzindo a ocorrência de danos relacionados à fadiga do mesmo.



Profundidade (mm)

📥 σmax 🔶 σmin 🗡 β

Figura 5.18 – Tensões residuais amostra TURQ05.



-753,4

-400 -600

-800

-1000

-1200

110

10 (°) oluguê Ângulo (°)

-20

-30

-40

-50



Figura 5.19 – Tensões residuais amostra TURF08.

A Tabela 5.3 contém os picos das tensões principais aliviadas máximas (trativas), mínimas (compressivas) e ângulo β para os pontos de cada amostra.

Amostra	Posição do furo	σ _{máx.} (MPa)	σ _{mín} . (MPa)	β (°)
	1	-32	-445	-29
TN05	Centro	-451	-582	32
	2	14	-308	-5
	1	-112	-1139	-44
TURQ05	Centro	-321	-1011	-27
	2	-336	-753	37
	1	-943	-2396	28
TN08	Centro	-124	-326	-12
	2	-201	-357	-9
	1	-343	-752	40
TURF08	Centro	-1891	-7982	45
	2	-964	-1803	-43

Tabela 5.3 – Tensões principais aliviadas e ângulo β correspondentes.

Fonte: produzido pelo autor.

Algumas inferências a considerar:

- a heterogeneidade microestrutural retratada para as amostras novas não permite avaliar de forma linear e proporcional as tensões residuais quanto ao aspecto dureza. No entanto, ao comparar diretamente amostras novas e de percentuais de carbono diferentes entre si, ou seja, TN05 e TN08, a tendência prevista por Pyzalla et al. (2001) que atribuiu maiores níveis de tensões residuais para materiais de maior valor de dureza parece ocorrer de forma mais acentuadas nas tensões compressivas (σ_{min});

- nas amostras usadas (TURQ05 e TURF08) onde ocorreram o trabalho mecânico, a deformação plástica permanente evidenciada pela micrografia óptica e o endurecimento por encruamento constatado pela dureza Vickers, a constatação de Pyzalla et al. (2001) é percebida de forma mais evidente a tendência das tensões residuais serem maiores para esses casos. Em geral, os valores de tensões residuais aliviadas para as amostras usadas revelaram-se maiores que os valores de tensões residuais para as amostras novas. Ressalta-se, novamente, que não foi revelada linearidade e proporcionalidade nessas medições. No caso das amostras novas, além

da heterogeneidade microestrutural, os fatores diferenciados de carga mecânica e térmica pode ter contribuído na dispersão dos valores encontrados.

- as tensões térmicas parecem ter cooperado no sentido de elevar as tensões residuais na amostra TURQ05 quando comparada a TN05. Isso vai de encontro a Pyzalla et al. (2001) e Zerbst; Schödel; Heyder (2009) que destacam a geração de tensões compressivas em trilhos ferroviários que possuem temperatura de trabalho maior do que a ambiente;

 torna-se mais compreensível o melhor estado da amostra TURF08 mesmo dotada de maior dureza, e portanto, suscetível a geração de maiores tensões residuais.
Nesse ponto a atuação de carga mecânica pura fez gerar somente tensões residuais compressivas que atuaram como inibidor de geração de trincas não proporcionando descontinuidades associadas a perda de materiais (WANG et al., 2013).

6. CONCLUSÕES

Sustentada pela revisão bibliográfica sobre trilhos ferroviários, a metodologia desse trabalho proporcionou resultados de caracterizações próximas a superfícies de trilhos utilizados como via de CTAL nos estados inicial (conforme fabricado) e final (pós utilização em um ciclo definido) que constituíram em instrumentos de grande valia no sentido de promover um entendimento das transformações ocorridas na região supracitada.

A avaliação visual da superfície das amostras permitiu verificar que as descontinuidades superficiais nos trilhos de via de CTAL se assemelham àquelas disponíveis nas literaturas para trilhos ferroviários. A presença de descontinuidades e defeitos foram evidencias de forma macroscópica nas amostras usadas. Com a aplicação dessa metodologia foi possível verificar o quão prejudicial foi a constante incidência de material incandescente sobre uma das amostras durante o ciclo de 193 dias de utilização. Fato este verificado por microscopia óptica que permitiu observar na região próxima à superfície da seção mais agredida da amostra TURQ05 (seção 1), uma maior heterogeneidade das propriedades evidencia por uma microestrutura atípica no que se diz respeito ao maior tamanho de grão ferrítico somado aos elevados patamares dos valores de dureza Rockwell e Vickers. Em geral, as deformações plásticas evidenciadas nas amostras das regiões quente e fria foram da mesma ordem de grandeza.

Os perfis de dureza foram medidos e demonstraram haver considerável modificação na referida propriedade pós utilização em cada condição de composição química e da região extração das amostras. Incialmente, de forma macro, com utilização da dureza Rockwell foi possível vislumbrar, a homogeneidade da propriedade para os trilhos novos e indiciar alterações dessa propriedade na região mais próxima à superfície dos trilhos usados. Em um segundo momento, de forma pontual, a dureza Vickers (mcrodureza) propiciou compreender e correlacionar as consequências associados à utilização nas regiões mais próximas à superfície de cada amostra de trilhos a partir da constatação do aumento da dureza função do trabalho mecânico ou relacionada à microestrutura presente. A técnica de microscopia óptica foi de grande valia ao permitir correlacionar a composição química e microestrutura das amostras. Como citado anteriormente, uma microestrutura atípica foi encontrada em TURQ05. Esse achado foi de grande utilidade no sentido de permitir compreender de forma mais clara a grande dispersão das medidas das linhas de dureza Vickers na amostra. Assim, foi reforçado o conceito de que as regiões de onde foram extraídas as amostras dos trilhos representavam uma variável relevante no trabalho. Além dos aspectos relativos à microestrutura relacionados à composição química de cada material, a microscopia óptica evidenciou entre TURQ05 e TURF08 a variabilidade dos formatos de grãos próximos à superfície deformados de forma plástica e permanente.

A aplicação da técnica do furo cego para análise de tensões residuais na superfície das amostras dos trilhos atingiu o propósito de aliviar as tensões oriundas do processo de fabricação e de utilização dos mesmos. A influência de um processo de fabricação do trilho, no qual esforços de compressão a quente é mandatório, parece ter influenciado de na presença de trações compressivas na superfície contrariando expectativas quanto ao tipo de tensão esperada (trativa) em função de um processo de desempeno característico em produtos longos. Foi, assim, verificada em todas as situações altos níveis de tensões compressivas sendo possível fazer inferências dos valores relacionando-os quanto à composição química e às condições de utilização.

APÊNDICE

Fi	Figura A.1– Perfil de dureza Rockwell B (HRB) na seção transversal amostra TN05 (seção 1).																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
А	92	95	95	94	96	96	96	96	95	95	95	97	96	95	<mark>98</mark>	97	95	96	94
В	87	90	85	91	94	97	98	96	96	95	96	98	97	97	93	89	93	90	85
С	91	98	83	91	91	94	87	96	94	86	94	96	98	96	96	96	95	95	97
D	97	96	96	95	96	95	95	98	96	94	97	95	97	96	95	96	96	96	95
Е	94	95	96	96	96	95	96	97	96	95	97	95	96	95	94	95	96	96	95
F	96	95	97	96	96	95	94	97	94	96	95	95	95	97	97	92	94	93	95
G	98	97	95	96	96	97	96	98	96	95	96	96	97	96	96	94	95	94	96
H.	96	96	95	96	94	95	97	96	96	96	95	96	94	95	96	97	97	97	98
I			96	96	95	95	96	97	97	96	96	97	95	95	96	95	95		
J						<mark>9</mark> 5		<mark>9</mark> 6		97		97		96					
K						97		95		96		95		95					
L						97		95		96		92		97					
М						97		99		95		96		97					
Ν						98		98		97		96		97					



Figura A.2 – Micrografia das regiões (A-D) próximas à superfície na amostra TN05 (seção 1).

(a) e (b) região A, (c) e (d) região B, (e) e (f) região C, (g) e (h) região D.Fonte: produzido pelo autor.



Figura A.3 – Micrografia das regiões (A-D) mais internas do boleto amostra TN05 (seção 1).

(a) e (b) região A, (c) e (d) região B, (e) e (f) região C, (g) e (h) região D. Fonte: produzido pelo autor.

Figura A.4– Micrografia das regiões (A-D) próximas à superfície do boleto amostra TN05 (seção 2).

(b) 200µm 100µm (c) (d) 200µn 100µm (e) (f) 200µm 100µm (h)

(a) e (b) região A, (c) e (d) região B, (e) e (f) região C, (g) e (h) região D. Fonte: produzido pelo autor.



(a) e (b) região A, (c) e (d) região B, (e) e (f) região C, (g) e (h) região D. Fonte: produzido pelo autor.

2).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Α	98	95	103	95	97	96	103	102	103	102	105	104	104	104	105	99	101	102	102
в	99	98	98	99	102	104	103	102	102	103	102	104	103	102	103	101	101	101	100
С	98	99	101	102	101	101	101	100	100	100	99	101	100	101	101	101	100	100	96
D	96	97	99	100	99	99	100	99	98	99	99	98	97	99	97	97	95	96	97
Е	96	94	92	94	95	94	95	95	93	93	95	91	93	95	95	95	95	95	95
F	94	96	95	94	95	96	91	95	95	95	90	93	92	94	95	93	94	94	98
G	93	96	95	95	94	94	95	94	95	94	96	94	93	96	90	92	92	92	93
н	95	96	98	98	97	94	97	92	95	95	95	94	94	91	92	91	92	90	92
1			96	97	95	95	93	94	96	97	95	96	97	97	90	93	94		
						96		96		91		96		97					
						97		94		93		100		95					
						97		94		94		98		99					
						98		97		97		98		95					
						96		94		96		96		96					
Ear	to: n	roduz	ido n	مام مر	itor														

Figura A.7 – Perfil de dureza Rockwell B (HRB) na seção transversal amostra TURQ05 (seção

3).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
А	102	100	102	103	104	105	102	103	103	103	104	105	105	104	103	103	102	102	104
В	100	102	101	101	102	102	100	101	103	101	101	101	102	100	102	102	102	102	102
С	97	99	100	101	100	101	102	102	100	101	98	101	102	102	101	100	99	100	96
D	93	97	97	98	98	98	99	98	98	97	95	98	97	97	97	98	97	97	97
Е	95	97	98	98	99	99	98	98	98	98	97	98	98	97	97	98	98	96	96
F	95	97	98	97	98	98	99	99	97	96	95	96	96	98	98	98	98	97	96
G	94	95	97	97	98	97	97	98	98	94	93	94	96	97	96	97	96	95	96
Н	94	94	97	98	98	96	97	98	98	95	93	94	93	95	95	96	93	94	94
1			98	98	98	97	97	96	97	97	93	95	96	97	98	99	99		
J						96		98		99		99		96					
Κ						97		99		97		96		97					
L						99		98		97		97		97					
Μ						98		98		99		98		99					
Ν						95		96		96		95		96					
Enr	to n	-odu-	ido na		itor														



Figura A.8 – Micrografia das regiões (A-D) próximas à superfície do boleto amostra TURQ05 (seção 1).

(a) e (b) região A, (c) e (d) região B, (e) e (f) região C, (g) e (h) região D. Fonte: produzido pelo autor.

Figura A.9 – Micrografia das regiões (E-H) próximas à superfície do boleto amostra TURQ05 (seção 1).



(a) e (b) região E, (c) e (d) região F, (e) e (f) região G.Fonte: produzido pelo autor.



Figura A.10 – Micrografia das regiões (A-D) mais internas do boleto amostra TURQ05 (seção 1).

(a) e (b) região A, (c) e (d) região B, (e) e (f) região C, (g) e (h) região D. Fonte: produzido pelo autor.



Figura A.11 – Micrografia das regiões (E-H) mais internas do boleto amostra TURQ05 (seção 1).

(a) e (b) região E, (c) e (d) região F, (e) e (f) região G. Fonte: produzido pelo autor.



Figura A.12–Micrografia das regiões (A-D) próximas à superfície do boleto amostra TURQ05 (seção 2).

(a) e (b) região A, (c) e (d) região B, (e) e (f) região C, (g) e (h) região D. Fonte: produzido pelo autor.

Figura A.13 – Micrografia das regiões (E-H) próximas à superfície do boleto amostra TURQ05 (seção 2).



(a) e (b) região E, (c) e (d) região F, (e) e (f) região G, (g) e (h) região H. Fonte: produzido pelo autor.



Figura A.14 – Micrografia das regiões (A-D) mais internas do boleto amostra TURQ05 (seção 2).

(a) e (b) região A, (c) e (d) região B, (e) e (f) região C, (g) e (h) região D. Fonte: produzido pelo autor.



Figura A.15 – Micrografia das regiões (E-H) mais internas do boleto amostra TURQ05 (seção 2).

(a) e (b) região E, (c) e (d) região F, (e) e (f) região G, (g) e (h) região H. Fonte: produzido pelo autor.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
А	101	102	102	103	102	101	96	103	98	102	101	105	101	102	103	104	104	105	102
В	100	102	102	102	100	102	101	99	101	103	101	105	101	102	101	100	101	101	102
С	103	102	103	99	103	103	102	102	103	101	104	102	103	100	103	103	102	100	103
D	102	102	105	103	103	103	102	101	104	103	102	104	102	103	103	103	102	103	103
Е	102	101	101	102	103	104	102	100	103	104	104	103	101	101	103	102	103	102	104
F	103	101	102	104	103	102	101	103	102	101	100	100	103	102	102	103	102	103	101
G	102	102	102	101	103	103	103	103	102	102	101	104	103	101	104	102	102	102	103
Н	103	104	104	102	103	102	101	103	102	102	103	101	103	102	103	102	102	104	103
I			103	101	103	103	103	104	104	100	102	102	102	103	102	101	102		
J						104		105		104		104		104					
K						104		105		104		103		104					
L						103		104		105		104		103					
М						102		103		104		103		103					
Ν						104		105		105		105		104					



Figura A.17 – Micrografia das regiões (A-D) próximas à superfície do boleto amostra TN08 seção 1). (

(a) e (b) região A, (c) e (d) região B, (e) e (f) região C, (g) e (h) região D. Fonte: produzido pelo autor.



Figura A.18 – Micrografia das regiões (A-D) mais internas do boleto amostra TN08.(seção 1)

(a) e (b) região A, (c) e (d) região B, (e) e (f) região C, (g) e (h) região D. Fonte: produzido pelo autor.

Figura A.19 – Micrografia das regiões (A-D) próximas à superfície do boleto amostra TN08 seção 2). (



(a) e (b) região A, (c) e (d) região B, (e) e (f) região C, (g) e (h) região D. Fonte: produzido pelo autor.



Figura A.20 – Micrografia das regiões (A-D) mais internas do boleto amostra TN08 (seção 2).

(a) e (b) região A, (c) e (d) região B, (e) e (f) região C, (g) e (h) região D. Fonte: produzido pelo autor.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Α	105	103	106	104	106	106	106	106	107	107	106	106	107	107	106	106	106	106	108
в	106	105	105	105	105	105	106	105	107	106	106	105	105	105	105	105	106	107	106
С	104	105	104	105	104	106	106	105	106	105	105	106	105	105	105	103	105	105	106
D	105	106	103	102	104	104	105	104	104	104	105	104	104	104	103	102	104	102	105
Е	103	101	102	100	102	102	103	104	102	103	103	103	102	103	102	101	101	101	104
F	103	103	102	101	103	102	101	102	103	101	102	101	102	101	102	102	102	103	104
G	101	104	103	103	102	103	102	102	101	101	101	102	102	102	102	103	103	102	104
н.	102	103	104	104	104	103	103	102	102	102	104	102	104	103	102	104	105	104	
Т					105	105	103	104	102	104	101	100	101	103	104				
J						104		103		101		103		103					
ĸ						105		104		107		104		105					
L						106		105		105		103		103					
М						105		105		105		103		103					
Ν						104		105		105		105		104					

Figura A.21 – Perfil de dureza Rockwell B (HRB) na seção transversal TURF08 (seção 2).



Figura A.22 – Micrografia das regiões (A-D) próximas à superfície do boleto amostra TURF08 (seção 1).

(a) e (b) região A, (c) e (d) região B, (e) e (f) região C, (g) e (h) região D. Fonte: produzido pelo autor.



Figura A.23 – Micrografia das regiões (A-D) mais internas do boleto amostra TURF08 (seção 1).

(a) e (b) região A, (c) e (d) região B, (e) e (f) região C, (g) e (h) região D. Fonte: produzido pelo autor.



Figura A.24 – Micrografia das regiões (A-D) próximas à superfície do boleto amostra TURF08 (seção 2).

(a) e (b) região A, (c) e (d) região B, (e) e (f) região C, (g) e (h) região D. Fonte: produzido pelo autor.

200um

100µm



Figura A.25 – Micrografia das regiões (A-D) mais internas do boleto amostra TURF08 (seção 2).

(a) e (b) região A, (c) e (d) região B, (e) e (f) região C, (g) e (h) região D. Fonte: produzido pelo autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHLSTROM, J.; KARLSSON, B. Fatigue behavior of rail steel – a comparison between strain and stress controlled loading. **Wear**. Goteborg, v. 258, n. 7-8, p. 1187-1193, mar. 2005.

ALVAREZ, E. D. et al. Análise de tensões em trilho ferroviário. XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. Porto Alegre, nov. 1999.

ALWAHDI, F. A. M.; FRANKLIN, F. J.; KAPOOR, A. The effect of partial slip on the wear rate of rails. **Wear**. Sheffield, v. 258, n. 7-8, p. 1031-1037, mar. 2005.

ALWAHDI, F. A. M; KAPOOR, A.; FRANKLIN, F. J. Subsurface microstructural analysis and mechanical properties of pearlitic rail steels in service. **Wear**. Elbyada, v. 302, n. 1-2, p. 1453-1460, abr. 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) **E837–13a** Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method, 2013

AMOROS, R. T. Avaliação de tensões residuais em chapas planos de aço carbono, destinadas a processos de corte a laser, pelo método da anisotropia planar.2008, 147 f. Dissertação (Mestrado) – Desenvolvimento em Tecnologia, Instituto de Engenharia do Paraná (IEP), Curitiba.

BEYNON[,] J.H; GARNHAM[,] J.E.; SAWLEY[,] K.J. Rolling contact fatigue of three pearlitic rail steels. **Wear**, Leicester, v. 192, n.1-2, p. 94-111, mar. 1996.

BIEMPICA, C. B. '. Nonlinear analysis of residual stresses in a rail manufacturing process by FEM. **Applied Mathematical Modelling**, Oviedo, v. 33, n. 1, p. 34-53, jan. 2009.

BOWER, A. F.; JOHNSON, K. L. Plastic flow and shakedown of the rail surface in repeated wheel-rail contact. **Wear**, Cambridge, v. 144, n. 1-2, p. 1-18, 1991.

BROUZOULIS, J. et al. Prediction of wear and plastic flow in rails – Test rig results, model calibration and numerical prediction. **Wear**, Gothenburg, v. 271, n. 1-2, p. 92-99, mai. 2011.

CARDOSO, F. A. A. **Medição de tensões residuais a partir de um ensaio de flexão em quatro pontos**.2012, 107 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Universidade do Porto, Porto.

COIMBRA, M. V.**Modos de falha dos componentes da via permanente ferroviária e seus efeitos no meio ambiente**. 2008, 165 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

DAMASCENO, D. Análise das tensões residuais após torneamento e retificação do aço ABNT 52100 endurecido.1993, 140 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 536/1991**: crane rails: hot rolled flat bottom crane rails (type A) – dimensions, section parameters and steel grades, 1991.

DIETER, G. E. Metalurgia mecânica. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 653.

EKBERG, A.; ÅKESSON, B.; KABO, E. Wheel/rail rolling contact fatigue – probe, predict, prevent. **Wear**, Gothenburg, v. 314, n. 1-2, p. 2-14, jun. 2014.

EKBERG, A.; KABO, E. Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading – an overview. **Wear**, Gothenburg, v. 258, n. 7-8, p. 1288-1300, mar. 2005.

FILHO, F. T. P. **Avaliação de sistemas de medição de tensões e tensões residuais em dutos.** 2004, 105 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica (EMC), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis.

FRANKLIN, F. J. et al. The evolution and failure of pearlitic microstructure in rail steel – observations and modelling, **Wheel-Rail Interface Handbook**, Birmingham, p. 311-348, 2009.

GARNHAM, J.E.; DAVIS, C.L. Rail materials, **Wheel- Rail Interface Handbook**, Birmingham, 2009, p. 125-171.

GONZALES, M. A. C Análise numérico-experimental das tensões residuais induzidas por jateamento com granalha em molas automotivas. 2009, 215 f. Tese (Doutorado) – Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **DIN 536** part I: Crane rails – hot rolled flat bottom crane rails (type A) – dimensions, sections parameters and stell grades, 1991.

KANDIL, F. A. et al. A review of residual stress measurement methods – a guide to technique selection. NPL report MATC (A) 04. **Research Gate**. Teddington, jan. 2001.

KRAUSE, H; Poll, G. Plastic deformations of wheel-rail surfaces. **Wear**, Aachen, v. 113, n. 1, p. 123 – 130, dez. 1986.

LASMIS, J. L. Prestress engineering of structural material: a global design approach to the residual stress problem. In: TOTTEN, G; HOWES, M; INOUE, T. **Handbook of Residual stress and deformation of steel**. Ohio: ASM International, 2002, p. 11-26. LI, Y. D et al. A failure study of the railway rail serviced for heavy cargo trains. **Wear**, Shandong, v.1, n. 4, p.243-248, out. 2013.

LO, K.H.; MUMMERY, P.; BUTTLE, D.J. Characterization of residual principal stresses and their implications on failure of railway rails. **Engineering failure analysis,** Macau, v. 17, n. 6, p. 1273–1284, set. 2010.

LOHE, D; LANG, K. H.; VOHINGER, O. Residual stresses and fatigue behavior. In: TOTTEN, G; HOWES, M; INOUE, T. Handbook of Residual stress and deformation of steel. Ohio: ASM International, 2002, p. 27-53.

MARTINS, C. O. D. et al. Comparação entre técnicas de análise de tensões residuais em anéis de rolamento do aço ABNT 52100. **Matéria**, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 23-31, 2004.

MACÊDO, F. B. **Estudo do desgaste de trilhos ferroviários.** 2009, 50 f. Monografia (Graduação) – Engenharia de Produção, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.

MONDARDO, M. M. Análise de parâmetros do processo de trefilação de barras cilíndricas de aço AISI 1045 via simulação numérica computacional. 2012, 95 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

NORCINO, A. B. **Uma contribuição ao estudo das tensões residuais no fresamento**. 2013, 101 f. Dissertação (mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira.

NUNES, R. M. Análise de tensões residuais no processo de trefilação combinada do aço AISI 1048 visando proporcionar distorções pós processamento. 2008, 124 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre.

ORRINGER, O. et al. Residual stress and its consequences on both sides of the wheelrail interface. **Wear**, Cambridge, v. 191, n. 1-2, p. 25-34, jan. 1996.

PAL, S. et al. Surface damage on new AS60 rail caused by wheel slip. **Wear**, Brisbane, v. 22, p. 152-165, jun. 2012.

PAU, M.; AYMERICH, F.; GINESU, F. Distribution of contact pressure in wheel-rail contact area. **Wear**, Cagliari, v. 253, n. 1-2, p. 265-274, jul. 2002.

PETRONI, C. V. Estudo da performance dos diversos tipos de trilhos assentados na via da MRS, critérios de desgaste, fadiga de contato. 2006, 57 f. Monografia (Especialização) – Transporte Ferroviário de Carga, Instituto Militar de Engenharia Academia MRS, Rio de Janeiro.
PYZALLA, A. et al. Changes in microstructure, texture and residual stresses on the surface of a rail resulting from friction and wear. **Wear**, Berlin, v. 251, n. 1-12, p. 901-907, out. 2001.

RINGSBERG, J. W.; LINDBÄCK, T. Rolling contact fatigue analysis of rails including numerical simulations of the rail manufacturing process and repeated wheel-rail contact loads. **International Journal of Fatigue**, Goteborg, v. 25, n. 6, p. 547-558, jun. 2003.

ROSSINI, N.S. et al. Methods of measuring residual stresses in components. **Materials & Design,** Bari, v. 35, p. 572-588, mai. 2012.

SANTOS, F. C. Análise do contato roda-trilho e sua influência na vida em serviço de rodas ferroviárias. 2000, 177 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SCHAJER, G. S. Advances in hole-drilling residual stress measurements. , Orlando, v. 50, n. 2, p. 159-168, jun. 2008.

SCHILKE, M. **Degradation of Railway Rails from a Materials Point of View.** 2013, 55 f. (Doutorado) – Department of Materials and Manufacturing Technology, Halmers University of Technology, Göteborg.

SCHLEINZER, G.; FISCHER, F.D. Residual stresses in new rails. **Materials Science** and Engineering A, Leoben, v. 288, n. 2, p.280–283, set. 2000.

SCHLEINZER G.; FISCHER F.D. Residual stress formation during the roller straightening of railway rails. **Mechanical Sciences**, Leoben, v. 4, n. 10, p. 2281–2295, out. 2001.

SCHNEIDER, L. E. Análise da vida remanescente de trilhos com defeitos transversais desgastados em serviço. 2005, 115 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre.

SEMPREBONE, P. S. **Desgastes em trilhos ferroviários – um estudo teórico**. 2006, 153 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SOKEI, C. R. et al. Avaliação da integridade de trilhos ferroviários soldados por caldeamento. **20º CBECIMAT**, Florianopolis, p. 9048-9055, nov. 2012.

STEENBERGEN, M.; DOLLEVOET, R. On the mechanism of squat formation on train rails – part II: growth. **International Journal of Fatigue**, Utrecht, v. 47, p.373–381, fev. 2013.

TARAF, M. et al. Numerical analysis for predicting the rolling contact fatigue crack initiation in a railway wheel steel. **Tribology International**, Metz, v. 43, n. 3, p. 585–593, mar. 2010.

WANG, W. J. et al. Investigation on the damage mechanism etand prevention of heavy-haul railway rail. **Engineering Failure Analysis**, Chengdu, v. 35, p. 206-218, dez. 2013.

WEN, Z. et al. Effect of a scratch on curved rail on initiation and evolution of plastic deformation induced rail corrugation. **International Journal of Solids and Structures**, Chengdu, v. 45, n. 7-8, p. 2077-2096, abr. 2008.

WITHERS, P. J.; BHADESHIA, H. K. D. H. Residual stress part 1 – Measurement techniques. **Materials Science and Technology**, v. 17, n. 4 p. 355-365, Abr. 2001.

ZERBST, U. et al. Introduction to the damage tolerance behavior of railway rails – a review. **Engineering Fracture Mechanics**, Geesthacht, v. 76, n. 17, p. 2563–2601, set. 2009.

ZERBST, U; SCHÖDEL, M.; HEYDER, R. Damage tolerance investigations on rails Original. **Engineering Fracture Mechanics**, Geesthacht, v. 76, n. 17, p. 2637-2653, nov. 2009.