



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

RUTE NARA DE JESUS FARIAS DA SILVA

DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES ACUSTOELÁSTICAS PARA A MEDIÇÃO DE
TENSÕES RESIDUAIS EM TRILHOS SOLDADOS POR CENTELHAMENTO

ANANINDEUA

2022

RUTE NARA DE JESUS FARIAS DA SILVA

**DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES ACUSTOELÁSTICAS PARA A MEDIÇÃO
DE TENSÕES RESIDUAIS EM TRILHOS SOLDADOS POR CENTELHAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia de Materiais da
Universidade Federal do Pará, como requisito para
obtenção do título de Engenheira de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cordeiro Machado

ANANINDEUA

2022

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

S586d Silva, Rute Nara de Jesus Farias da.
Determinação das constantes acustoelásticas para a medição de
tensões residuais em trilhos soldados por centelhamento / Rute
Nara de Jesus Farias da Silva. — 2022.
78 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Paulo Cordeiro Machado
Coorientador(a): Prof. Dr. Ednelson da Silva Costa
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua, Curso de
Engenharia de Materiais, Ananindeua, 2022.

1. Trilhos ferroviários. 2. Birrefringência acústica. 3.
Constante acustoelástica. 4. Tensão residual. I. Título.

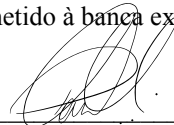
CDD 620.112

RUTE NARA DE JESUS FARIAS DA SILVA

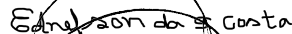
**DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES ACUSTOELÁSTICAS PARA A
MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM TRILHOS SOLDADOS POR
CENTELHAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade
Federal do Pará, como requisito para obtenção do título
de Engenheira de Materiais.

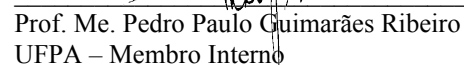
Submetido à banca examinadora constituída por:




Prof. Dr. Paulo Cordeiro Machado
UFPA – Orientador, Presidente



Prof. Dr. Ednelson da Silva Costa
UFPA – Coorientador



Prof. Me. Pedro Paulo Guimarães Ribeiro
UFPA – Membro Interno



Lucas Gabriel de Sousa Albuquerque
Eng. Mecânico – Membro Externo

Julgado em 10 de fevereiro de 2022.

Conceito: **Excelente**

Dedico este trabalho às pessoas mais importantes em minha vida. Meus pais Osmarino e Marzane Laura pelo seu amor incondicional, apoio e orações. E à minha filha Laura Cristina, pela sua compreensão e apoio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder vida, me capacitar e enviar pessoas que me auxiliaram, apoiaram e ajudaram direta e indiretamente.

Ao meu namorado Willian Lucas pelo companheirismo, auxílio e paciência dedicados a mim durante o período de produção deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Cordeiro Machado pela confiança, oportunidade e seu tempo dedicado à orientação.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Ednelson da Silva Costa, por compartilhar seus conhecimentos, por seu apoio que me permitiu alcançar as metas propostas neste projeto e pela sua paciência nas orientações.

A todos os membros e colaboradores do Laboratório de Caracterização de Materiais Metálicos (LCAM), pela parceria desde o estágio e pela ótima recepção e convivência. Em especial aos Engenheiros Tércio Cabral, Francisco Ferreira e Lucas Albuquerque pela ajuda e participação direta.

Ao Prof. Dr. Eduardo Braga, pelos incentivos à busca de conhecimento e pelo compartilhamento de suas experiências acadêmicas e profissionais.

A Universidade Federal do Pará (UFPA), mais especificamente a Faculdade de Engenharia de Materiais (FEMAT), por conceder a mim a realização de um sonho que é esta graduação.

À empresa Vale, pela oportunidade de participar do projeto Cátedra Roda- Trilho, como bolsista de graduação e permitiu a realização deste trabalho.

Obrigada a todos.

“... sendo assim, tudo quanto vier à mão para realizar, faze-o com o melhor das tuas forças...”

Eclesiastes 9:10

RESUMO

A importância econômica das ferrovias tem gerado mais estudos referentes às melhorias nesse modal. O trilho é o componente responsável por guiar os veículos ferroviários e esse contato roda-trilho gera tensões de serviço que, somadas às tensões residuais, podem fazer o trilho entrar em colapso. As regiões próximas às soldas são, no geral, as regiões mais fragilizadas e mais suscetíveis a defeitos macro e microestruturais que podem ou não gerar mais tensões residuais. O presente trabalho teve como objetivo determinar a constante acustoelástica nas regiões da ZAC (Zona termicamente afetada pelo calor) e CS (Centro de Solda) de um trilho de perfil TR68, soldado por solda elétrica topo a topo com centelhamento (*Flash Butt Welding-FBW*), e posteriormente quantificar a diferença de tensão residual ($\sigma_1 - \sigma_2$) existente nessas regiões. Realizou-se ensaio de tração em 6 CP's (3 do boleto e 3 da alma) para a determinação da tensão de escoamento. Para a determinação de B_0 , foram usinados 2 corpos de prova (1 do boleto e 1 da alma) e submetidos ao tratamento térmico de recozimento subcrítico para alívio de tensões. Efetuou-se o ensaio de carregamento fracionado para simultaneamente determinar as birrefringências em cada carga, que, geraram curvas lineares nos gráficos de carga x birrefringência, onde o coeficiente angular é a constante acustoelástica. E, por fim, calculado a diferença de tensão residual. Observou-se que a diferença de tensões na região de ZAC do boleto para os dois trilhos soldados (T1 e T3) são compressivas, assim como na ZAC da alma, sendo as magnitudes máximas de 40,2 MPa e 30,6 MPa.

Palavras – chave: Trilhos ferroviários. Birrefringência acústica. Constante acustoelástica. Tensão residual.

ABSTRACT

The economic importance of railways has generated more studies regarding improvements in this modal. The rail is the component responsible for guiding the rail vehicles and this contact with the rail generates service stresses that, added to the residual stresses, can cause the rail to collapse. The regions close to the welds are, in general, the most fragile regions and more susceptible to macro and micro structural defects that may or may not generate more residual stresses. The present work aimed to determine the acoustoelastic constant in the regions of HAZ and CS of a rail with TR68 profile, welded by electric butt welding with sparking (Flash Butt Welding-FBW). And later quantify the difference of residual tension ($\sigma_1 - \sigma_2$) existing in these regions. Specimens were sectioned and then subjected to subcritical annealing heat treatment for stress relief. A tensile test was performed to determine the yield stress, the initial birefringence of the material was determined, a fractional loading test was performed to simultaneously determine the birefringences in each load, which generated linear curves in the load x birefringence graphs, where the slope is the acoustoelastic constant. Finally, the residual voltage difference is calculated. It was observed that the difference in residual stresses in the HAZ region of the head for the two welded rails (J1 and J3) are compressive, as well as in the HAZ of the web, with maximum magnitudes of 40.2 MPa and 30.6 MPa.

Key words: Rail tracks. Acoustic birefringence. Acoustoelastic constant. Residual stresses.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Estrutura de uma via permanente.....	22
Figura 2 - Geometria do trilho.....	23
Figura 3- Microestrutura perlítica	25
Figura 4-Ilustração da soldagem FBW.....	28
Figura 5- Esquema da soldagem aluminotérmica.....	29
Figura 6- Comportamento das tensões em uma placa de vidro temperado.	31
Figura 7- Esquema de formação de tensões residuais em materiais de engenharia.	32
Figura 8- Tensões residuais geradas após resfriamentos.....	34
Figura 9- Alisamento de rolo na etapa de endireitamento do trilho.	34
Figura 10- Distribuição das tensões residuais após endireitamento.	35
Figura 11- Esquema das diferentes regiões geradas na soldagem FBW.	36
Figura 12- Fluxograma das técnicas de medição de tensão residual.....	38
Figura 13- Propagação de ondas longitudinais.....	40
Figura 14- Propagação de ondas transversais.....	41
Figura 15- Ondas de Rayleigh.....	41
Figura 16- Ondas de Lamb.....	42
Figura 17- Sistema bidimensional da textura anisotrópica e as direções das tensões principais da onda cisalhante ao longo dos eixos.	43
Figura 18- Comparação entre os valores da birrefringência com os transdutores de 2,25, 4,0 e 5,0 MHz	45
Figura 19- Fotografia dos trilhos de perfil TR68	47
Figura 20- (a) Desenho 3D esquemático do trilho indicando boleto e alma de onde os CP's foram usinados. (b) Ilustração das regiões de um CP após soldagem.....	48
Figura 21- Esquema ilustrativo dos CP's usados nos ensaios de tração	49

Figura 22- Sistema ultrassônico utilizado na captura do tempo de percurso da onda ultrassônica.	50
Figura 23- Regiões de determinação dos parâmetros de birrefringência inicial (B0) e CAE	51
Figura 24- CP tracionado uniaxialmente.	52
Figura 25-. Macrografia da região do bolete da solda T1.	55
Figura 26- Macrografia da região do bolete da solda T3.	55
Figura 27- Micrografias das regiões do metal de solda do bolete do trilho T1.....	56
Figura 28- Micrografias das regiões do metal de solda do bolete do trilho T3.....	56
Figura 29-Gráfico da variação dos tempos nas direções longitudinal e transversal durante o ensaio de tração uniaxial em função das cargas aplicadas para a determinação de CAE na ZAC do bolete.....	59
Figura 30- Gráfico da variação de B para obtenção da CAE na ZAC do bolete.....	60
Figura 31- Gráfico da variação dos tempos nas direções longitudinal e transversal durante o	61
Figura 32- Gráfico da variação de B para obtenção da CAE no CS do bolete.	62
Figura 33- Gráfico da variação dos tempos nas direções longitudinal e transversal durante o ensaio de tração uniaxial em função das cargas aplicadas para a determinação de CAE na ZAC da alma.	63
Figura 34- Gráfico da variação de birrefringência x carga para obtenção do CAE na ZAC da alma.....	64
Figura 35- Gráfico da variação dos tempos nas direções longitudinal e transversal durante o	65
Figura 36- Gráfico da variação de birrefringência x carga para obtenção do CA no CS da alma.....	65
Figura 37- (a) Diferença de tensão residual para o trilho T1. (b) Diferença de tensão	

residual para o trilho T3. (Plano de tensão z-y)..... 67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação dos trilhos segundo IHH.	26
Tabela 2- Classificação dos trilhos segundo norma ASTM A1-00.....	27
Tabela 3- Classificação dos trilhos segundo AREMA.	27
Tabela 4- Identificação das amostras dos trilhos.....	53
Tabela 5- Propriedades mecânicas do boleto do trilho soldado por	57
Tabela 6- Propriedades mecânicas da alma do trilho soldado por	57
Tabela 7- Tempos de percurso de onda cisalhante e birrefringência inicial.	57
Tabela 8- Diferença de tensão residual do trilho T1 (resfriado a 1bar).....	66
Tabela 9- diferença de tensão residual do trilho T3 (resfriado a 3bar).....	67

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

AREMA	<i>American Railway Engineering and Maintenance-of-way</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
B0	Birrefringência acústica (inicial) do material como recebido
B	Birrefringência acústica no metal de base após a soldagem
CAE	Constante acustoelástica
CP	Corpo de prova
CS	Centro da solda
DNIT	Departamento Nacional e Infraestrutura e Transportes
FBW	<i>Flash Butt Welding</i>
HB	Dureza Brinell
IHHA	<i>International Heavy Haul Association</i>
L.E	Limite de Escoamento
L.R	Limite de Resistência
kN	Quilonewton
MB	Metal Base
MB ZAC	Fronteira de Metal Base e Zona Afetada pelo Calor
MPa	MegaPascal
RC	Dureza Rockwell
T1	Trilho resfriado à 1 bar
T3	Trilho resfriado à 3 bar
TL	Tempo de percurso da onda cisalhante polarizada longitudinalmente
TT	Tempo de percurso da onda cisalhante polarizada transversalmente
TR68	Classificação do trilho: 68kg/m

ZAC	Zona Afetada pelo Calor
ZAC G	Região de crescimento de grãos
ZAC F	Região de refino de grão

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ_0	Densidade inicial
λ_L e μ_L	Constantes elásticas de segunda ordem
ν	Constante elástica de terceira ordem
C_{jj}	Tensor de rigidez
S_{jj}	Tensor de conformação
$(\sigma_1 - \sigma_2)$	Diferença de tensão residual no plano z-y

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Considerações Gerais	18
1.2	Justificativa e Motivação.....	19
1.3	Objetivos	20
1.3.1	Objetivos gerais	20
1.3.2	Objetivos específicos.....	20
1.4	Estrutura do Trabalho	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1	Considerações Iniciais	22
2.2	Trilhos Ferroviários.....	22
2.2.1	Geometria do Trilho	23
2.2.2	Composição Química e Tratamentos.....	24
2.3	Processos de Soldagem de Trilhos Ferroviários	28
2.3.1	Processo de Soldagem Topo a Topo por Centelhamento - <i>Flash Welding</i> (FW).....	29
2.4	Conceitos Básicos de Tensões Residuais	30
2.4.1	Tensões Residuais em Trilhos Ferroviários.....	33
2.4.2	Tensões de Soldagem	35
2.5	Método de Medição de Tensões Residuais.....	37
2.6	Método Ultrassônico	38
2.6.1	Medição de Tensão Residual por Ultrassom	38
2.6.1.1	Ondas Ultrassônicas.....	39
2.6.1.2	Ondas Longitudinais ou Compressivas	40
2.6.1.3	Ondas Transversais ou Cisalhantes	40
2.6.1.4	Ondas de Rayleigh.....	41

2.6.1.5 Ondas de Lamb	42
2.7 Acustoelasticidade e Birrefringência Acústica.....	42
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1 Considerações Iniciais	46
3.2 Material de Estudo e Descrição dos Corpos de Prova.....	46
3.3 Análise Macroestrutural	48
3.4 Análise Microestrutural	48
3.5 Análise de Resistência Mecânica	49
3.6 Equipamentos e Metodologias utilizados na Avaliação Acustoelástica do Material antes e após a Soldagem de Trilhos por Centelhamento.....	49
3.6.1 Sistema Ultrassônico	49
3.6.2 Obtenção da Birrefringência Acústica Inicial (B0)	50
3.6.3 Obtenção das Constantes Acustoelásticas do Material Soldado (CAE's)	51
3.6.4 Obtenção de Tensões Residuais em Trilhos por Birrefringência Acústica	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1 Considerações Iniciais	54
4.2 Análise Macroestrutural	54
4.3 Análise Microestrutural	55
4.4 Análise de Resistência Mecânica	56
4.5 Birrefringência Inicial do Trilho pós-Tratamento Térmico de Reozimento Subcrítico	57
4.6 Constantes Acustoelásticas	58
4.6.1 Constante Acustoelástica da ZAC do Boleto do Trilho T3	58
4.6.2 Constante Acustoelástica do CS do Boleto do Trilho T3	60
4.6.3 Constante Acustoelástica da ZAC da Alma do Trilho T3	62
4.6.4 Constante Acustoelástica do CS da Alma do Trilho T3	64
4.7 Tensão Residual no Trilho	66

4.7.1 Tensão Residual nos Trilhos T1 e T3	66
5 CONCLUSÕES	69
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
APÊNDICE A	76
APÊNDICE B.....	77

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

O Brasil possui, atualmente, uma malha ferroviária de 30 mil quilômetros, todavia, com os incentivos governamentais, surgirão mais 3,3 mil quilômetros de novos trechos ferroviários com o intuito de tornar os produtos produzidos no Brasil mais competitivos no mercado internacional (GOVERNO DO BRASIL, 2021). Esses dados ressaltam a importância que a ferrovia representa para o crescimento econômico do país, fazendo-se necessárias pesquisas contínuas com relação a sua confiabilidade e segurança, gerando preocupações sobre seus custos de manutenção.

Os elevados esforços mecânicos a que os trilhos são submetidos favorecem a formação de trincas. Vilela (2019), afirma que diversos estudos concluem que a propagação de trincas por fadiga envolvendo o controle de tensão e ou deformação são os maiores limitantes da vida útil dos trilhos, principalmente, nucleação de trincas no boleto que se propagam para as regiões da alma e patim, incluindo as trincas de juntas soldadas.

Essas tensões envolvidas no processo de formação de trincas são denominadas de tensões residuais e tornam-se ainda mais preocupantes quando somadas as tensões em serviço. A quantificação das tensões e seu monitoramento são essenciais para a prevenção de falhas, defeitos em componentes e em estruturas mecânicas, melhorando o processo de manutenção e aumentando a vida útil do componente. (SANTOS, 2013).

Várias técnicas são utilizadas para a medição de tensão residual e são classificadas conforme causam danos ou não ao material. Podem ser destrutivos, como a técnica de furo cego, e não destrutivos como a difração de nêutrons, DRX, entre outros. A técnica usada neste trabalho é o método ultrassônico, classificado como um ensaio não destrutivo (END), que utiliza a birrefringência e acustoelasticidade para a determinação de tensão. O objetivo desse estudo é determinar as constantes acustoelásticas da ZAC e CS de um trilho soldado por centelhamento para obtenção das tensões residuais nessas regiões.

1.2 Justificativa e Motivação

De acordo com a Vale (2017), as ferrovias têm forte participação na economia nacional e mundial, pois, transportam cargas e em sua maioria são matérias-primas para fabricação de aparatos básicos da sobrevivência humana. Em 2012 a Estrada de Ferro Carajás (EFC) foi considerada a ferrovia mais eficiente do país, levantamento feito pelo Instituto de Logística e Supply Chain (Ilos) da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Essa eficiência se deve ao fato de a EFC transportar toneladas de minérios e, também, por fazer o transporte de pessoas, visto como uma ferrovia muito segura. Acrescentando a estes fatos, os novos investimentos no modal ferroviário garantem a construção de novos trechos ferroviários e crescimento da produção ferroviária. Diante da relevância econômica deste modal no Brasil e no mundo, torna-se inerente a necessidade de otimizar o transporte de cargas por meio das ferrovias, e uma das formas de o fazer é reduzir problemas recorrentes nos trilhos a fim de evitar paradas e até mesmo acidentes graves.

A união dos trilhos ferroviários, são, em sua maioria, feitas através da soldagem por centelhamento, também denominada de *Flash Butt Welding* (FBW), de acordo com Nishikawa (2018). Devido ao aporte térmico a que o trilho é submetido durante a soldagem, ocorrem alterações microestruturais provocando e modificando o comportamento de tensões residuais internas do material. Ou seja, as regiões adjacentes à linha de solda recebem diferentes distribuições de temperatura e como consequência ocorrem variações na microestrutura no tocante ao tamanho e forma dos grãos. Essas regiões com diferentes características geram tensões residuais, em razão das dilatações e contrações não uniformes, que produzem tensões trativas ou compressivas no corpo do trilho, tornando-o em certas regiões mais frágeis. Essa fragilidade pode levar ao rompimento do trilho e a acidentes gravíssimos. Essa complexidade das distribuições das tensões deve ser entendida, portanto, faz-se necessário mensurar estes fenômenos.

O ensaio ultrassônico é fortemente utilizado na indústria ferroviária para a determinação de defeitos e discontinuidades como trincas e vazios em trilhos e nas regiões de solda. Porém, determinar e quantificar as tensões residuais na solda, por este método, é bastante complexo em consequência da variação microestrutural existente nas regiões (ZAC e CS) e à sensibilidade do ensaio à essas variações, que podem decorrer em resultados não confiáveis (HIRAO e OGI, 2017). Esses fatores tornam essas duas regiões limitantes para a medição de tensão residual por esse método.

Então é bastante interessante o estudo da técnica para a análise de tensões na região da solda, devido a necessidade que a indústria ferroviária e outros setores industriais possuem, pois, a soldagem é largamente aplicada e garantir que a solda é segura otimiza os processos, evita acidentes e catástrofes. Estes fatos justificam e são a motivação da realização deste trabalho.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos gerais

Determinar a constante acustoelástica e a tensão residual da solda de trilho ferroviário, do tipo *Super Premium*, nas regiões da zona afetada pelo calor (ZAC) e no centro de solda (CS) do boleto e alma.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar a birrefringência acústica inicial B_0 na ZAC e CS do trilho após tratamento térmico para alívio de tensão;
- Determinar a constante acustoelástica CAE na ZAC e CS através do ensaio mecânico de tração;
- Determinar a diferença de tensão ($\sigma_1 - \sigma_2$) na ZAC e CS do boleto e alma dos trilhos.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em 6 capítulos. O capítulo 1 tem a finalidade de apresentar o trabalho através da introdução, justificativa e objetivos e a forma pela qual o trabalho está exposto. O capítulo 2 traz a revisão bibliográfica abordando de forma geral os termos e conceitos que transcorrem o restante do trabalho. Definições e classificações dos trilhos, o processo de soldagem utilizado, tensões residuais, formas de medição das tensões, o método

ultrassônico e os fenômenos físicos que são inerentes ao ensaio. O capítulo 3 apresenta os métodos e os materiais utilizados para o alcance dos objetivos do trabalho. No capítulo 4 são apresentados os resultados e suas discussões embasadas na literatura científica. O capítulo 5 traz as conclusões dos resultados obtidos. O capítulo 6 decorre sobre sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

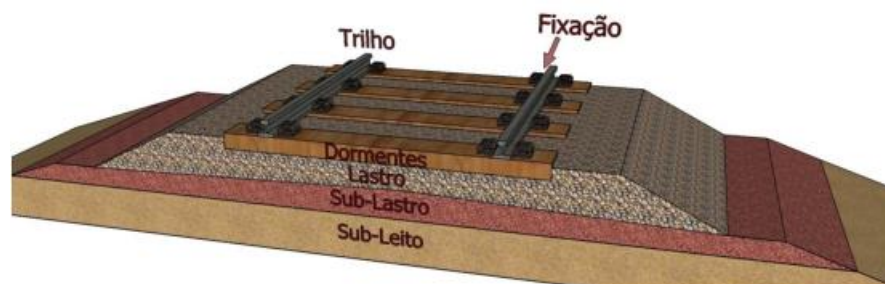
2.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre trilhos ferroviários, suas características e processos de soldagem. Em seguida, são abordados tópicos sobre tensões residuais como consequências dos processos de produção e soldagem dos trilhos, e por último, os tópicos sobre medição de tensão residual através da técnica de ultrassom.

2.2 Trilhos Ferroviários

Trilhos são definidos como perfis de aço com formatos especiais que suportam e guiam veículos ferroviários (DNIT, 2013). Eles estão dispostos sobre uma fundação que é composta por dormente, lastro, sub-lastro e sub-leito, como pode ser visto na Figura 1, e são responsáveis por transferir as tensões existentes no processo de transporte dos veículos ferroviários para a formação, de acordo com Esveld (2001). O autor afirma ainda que as maiores tensões ocorrem entre a roda do veículo e o trilho, e que essas tensões são ordem de 1500 MPa para uma carga de 25 toneladas por eixo.

Figura 1- Estrutura de uma via permanente.



Fonte: Klinevicius, 2010.

Segundo Klinevicius (2010), os limitantes predominantes da vida útil dos trilhos são os desgastes devido ao contato entre a roda e trilho, e a fadiga devido ao carregamento cíclico que promove alterações no arranjo microestrutural do metal podendo ocasionar a sua ruptura.

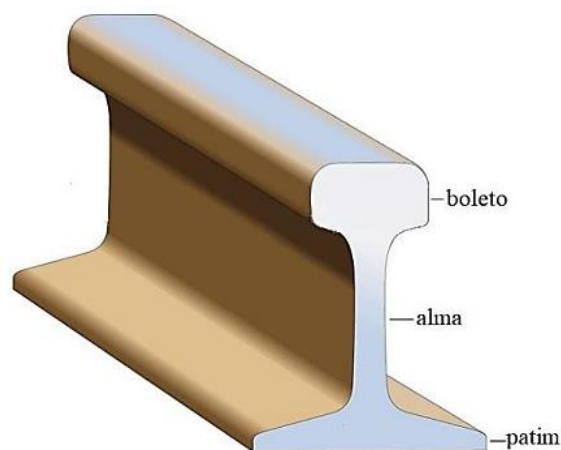
Então, para que o trilho tenha bom desempenho em serviço, ele deve apresentar elevada resistência mecânica à tração, alto limite de escoamento, resistência ao desgaste, à fadiga de contato, boa tenacidade e soldabilidade (VIANA, 2015).

Vicente (2017) afirma que defeitos e descontinuidades nos trilhos são prejudiciais e podem levar a defeitos dinâmicos na via permanente e vibração excessiva nos veículos. De acordo com Callister Junior (2011), o desempenho de um material será uma função de suas propriedades e as propriedades dependem da estrutura do material que será o resultado de seu processamento, logo, sua manufatura deve atender às composições químicas ideais, processamentos e tratamentos que confirmam ao componente, peça ou material bons desempenhos e reduzam falhas micro e macro estruturais.

2.2.1 Geometria do Trilho

O perfil de trilho mais utilizado é o tipo Vignole, que é composto por boleto, alma e patim, visto na Figura 2. Schneider (2005) afirma que essa geometria favorece maior resistência à flexão devido a maior concentração de massa nos pontos onde ocorrem tensões normais superiores.

Figura 2 - Geometria do trilho



Fonte: Costa, 2018 *apud* Pompeu, 2020.

O boleto, a região de contato com a roda do veículo ferroviário, se localiza na parte superior do trilho e é caracterizada pela sua largura, altura e inclinação de sua face. Seu formato

abaulado possui grande importância, não somente pelo contato roda-trilho, mas também pela estabilidade do rolamento.

A alma é a parte central do trilho e mais fina. Viana (2015) diz em seu trabalho que quanto maior for a altura da alma, maior será a distância do boleto e do patim em relação à linha neutra da seção e, dessa forma, será maior o momento de inércia do trilho, gerando estabilidade à estrutura.

O patim é a área localizada na parte inferior do trilho e está assentada sobre o dormente. Segundo Schneider (2005), o patim é largo para garantir que a alma permaneça perpendicular ao dormente durante as solicitações de tensões transversais, como em curvas, onde essas solicitações são mais pronunciadas. Quando a espessura não está adequada ao nível de solicitações das tensões transversais pode ocorrer o acúmulo de deformações permanentes levando à redução da vida útil do trilho, podendo decorrer em acidentes.

2.2.2 Composição Química e Tratamentos

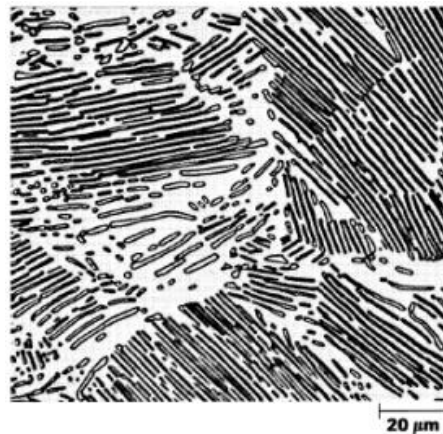
De acordo com Schneider (2005), os progressos nos procedimentos químicos (controle e aperfeiçoamentos na composição das ligas com adição ou não de elementos de liga) e de tratamentos térmicos tem proporcionado melhorias consideráveis nas propriedades mecânicas como resistência, fadiga e dureza. Existem vários tipos de composições químicas de aço para a produção de trilhos ferroviários com o intuito de se obter diferentes microestruturas, propriedades para diferentes fins. A produção de trilhos com níveis altos de carbono e manganês proporcionam uma microestrutura completamente perlítica e isenta de ferrita primária ou pró eutetóide, exibindo valores de dureza e resistência mais interessantes.

Moreira (2015) diz que o carbono é um elemento químico que pode ser facilmente variado, e uma forma economicamente viável para obter melhor resistência ao desgaste e à deformação plástica é o incremento de carbono na liga. Porém, existe um limite no acréscimo de carbono sem que haja alteração de outras propriedades importantes, como a tenacidade (NISHIKAWA, 2018). Então é necessário a utilização de elementos de ligas na composição e/ou aplicação de tratamentos térmicos para que se eleve a dureza sem prejudicar as outras propriedades importantes e, até mesmo, melhorar as outras características esperadas, como a tenacidade, resistência ao desgaste e a fadiga.

Nishikawa afirma que trilhos utilizados em transportes de cargas são usualmente perlíticos com o percentual de carbono em torno de 0,7% C. Essa microestrutura oferece maior resistência ao desgaste e taxa de encruamento, quando comparada com outras microestruturas como a martensita revenida.

A perlita é lamelar e é composta por matriz ferrítica com lamelas de cementita. A ferrita apresenta excelente ductilidade, entretanto possui baixa resistência mecânica, enquanto a cementita apresenta elevado valor de resistência mecânica, esse antagonismo torna a perlita muito atrativa para aplicação em trilhos ferroviários, pois une características diferentes em uma mesma microestrutura tornando viável obter ductilidade, elevada resistência mecânica, a abrasão, ao desgaste e boa tenacidade no material. A Figura 3 ilustra a estrutura perlítica onde a matriz clara é ferrita e as lamelas escuras são compostas de cementita.

Figura 3- Microestrutura perlítica



Fonte: Callister, 2012.

O comportamento mecânico da perlita está diretamente relacionado à espessura das lamelas. Quanto mais refinada forem as lamelas de ferrita e cementita, melhores serão as propriedades mecânicas. O refinamento da perlita pode ser feito através de adição de elementos de liga ou tratamento térmico. (XIAO et al., 2005).

Os trilhos podem ser classificados de acordo com as propriedades, composição química, massa nominal e tratamentos térmicos a que são submetidos. Dentre as diversas classificações de trilhos destaca-se a *International Heavy Haul Association* (IHHA), que classifica os trilhos de acordo com a dureza, processamento e composição. Dessa forma, são denominados como

trilhos *super premium*, *premium* e *standard*. A Tabela 1 exibe a classificação dos trilhos baseada nas propriedades estabelecidas pela associação.

Tabela 1- Classificação dos trilhos segundo IHHA.

Classificação	Característica	Dureza
<i>Super premium</i>	Tratado termicamente (perlita fina)	HB \geq 388;RC \geq 42
<i>Premium</i>	Microligado, perlítico, grão fino	HB=341-388;RC36,5
<i>Standard</i>	Trilho de aço carbono	HB>300-340;RC \geq 32

RC (dureza Rockwell)

Fonte:(IHHA, 2001 *apud* NISHIKAWA,2018)

E segundo a norma ASTM A1, os trilhos são classificados pelo tipo de tratamento térmico a que são submetidos. São 3 as categorias de classificação:

- *Head Hardened* (HH): Tratamento de endurecimento do boleto, com profundidade máxima de 30mm;
- *Deep Head Hardened* (DHH): Boleto profundamente tratado com profundidade máxima de 45mm;
- *Full Head Treated* (FHT): Trilho completamente tratado termicamente.

Além do tipo de tratamento, a norma especifica também os limites dos elementos presentes na liga. A Tabela 2, mostra as faixas que delimitam essa quantidade por peso nominal dos trilhos.

Tabela 2- Classificação dos trilhos segundo norma ASTM A1-00

Elemento	Peso nominal		
	29,8 a 41,7	42,2 a 56,6	Acima de 57
Carbono	0,55 a 0,68	0,70 a 0,80	0,74 a 0,84
Manganês	0,60 a 0,90	0,70 a 1,00	0,80 a 1,10*
Fósforo (máx.)	0,040	0,035	0,035
Enxofre (máx.)	0,050	0,040	0,040
Silício	0,10 a 0,50	0,10 a 0,50	0,10 a 0,50

*O valor máximo de Mn pode ser estender a 1,25% para atender a dureza Brinell especificada. Quando o valor de Mn excede 1,10% o valor residual de liga deve ser de 0,25% de níquel máximo; 0,25% de cromo máximo; 0,10% de molibdênio máximo; e 0,03% de vanádio máximo.

Fonte:(IHHA, 2001 *apud* NISHIKAWA,2018)

A norma *American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association* (AREMA), classifica trilhos usados em transportes de carga pesada baseada na composição química, como é mostrada na Tabela 3.

Tabela 3- Classificação dos trilhos segundo AREMA.

Classificação dos trilhos	Composição química							
	% C	% Mn	%Si	%Cr	%V	%Mo	%Cu	%P e S
<i>Standard</i>	0,82 a 0,76	0,75 a 1,20	0,10 a 0,60	Máx de 0,40	-	-	-	<0,02
Intermediário	0,74 a 0,86	0,70 a 1,25	0,10 a 0,60	-	-	Máx 0,10	-	<0,02
Alto carbono e Microligado	0,65 a 0,82	0,70 a 1,20	0,10 a 0,60	0,40 a 0,70	Máx de 0,05	Máx de 0,05	Máx 0,40	<0,02
<i>Premium</i> (alto carbono/tratado termicamente)	0,72 a 0,86	0,70 a 1,20	0,10 a 0,60	Máx de 0,40	Max de 0,01	Max de 0,06	-	<0,02
<i>Super Premium</i> (Hiperutetóide tratado termicamente)	0,85 a 1	0,80 a 1,30	0,10 a 0,25	0,20 a 0,30	-	-	-	<0,02

Fonte:(AREMA, 2010 *apud* BAURI,2020)

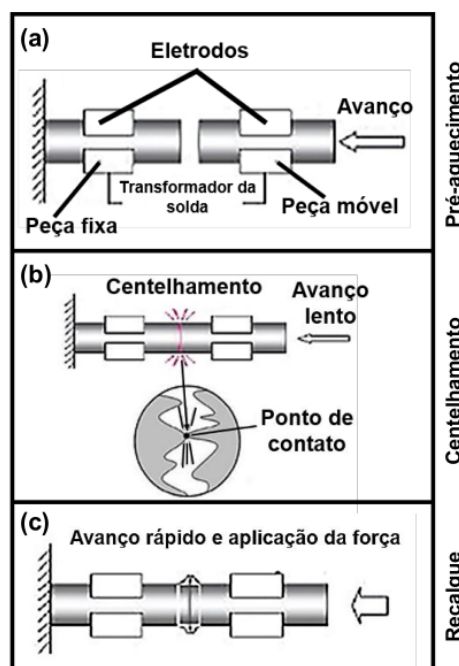
2.3 Processos de Soldagem de Trilhos Ferroviários

Para eliminar problemas de impacto e ruído, e também outros problemas relacionados ao vão entre trilhos ou junções por talas e parafusos, atualmente, os trilhos são soldados, reduzindo custos de manutenção da via (NISHIKAWA, 2018).

Fujii; Nakanowatari; Nariai (2015) afirmam que há dificuldades na soldagem de trilhos, não somente pela geometria complexa do componente, mas também pela composição da liga possuir elevado teor de carbono, devido a resistência ao desgaste do trilho ser prioridade.

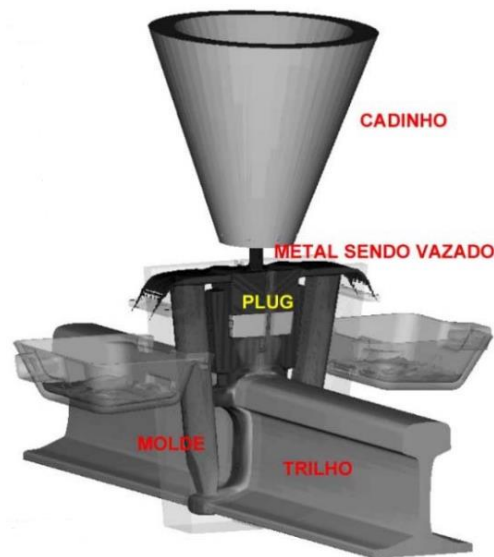
As soldas mais usuais em trilhos são a solda elétrica topo a topo com centelhamento (*flash butt-welding*) e a soldagem aluminotérmica (*thermite welding*). A primeira, Figura 4, é um processo semi-automatizado, geralmente aplicado em estaleiros para unir trilhos novos, embora existam opções recentes para uso em campo (NISHIKAWA, 2018). E a segunda (soldagem aluminotérmica) é aplicada em campo, sendo um processo predominantemente manual com o intuito de fazer a manutenção de trilhos. Este tipo de solda é um processo que ocorre por fundição de material adicional através de uma reação exotérmica autossustentada com pó de alumínio puro como reagente (BOUZAN, 2016). A Figura 5 apresenta um esquema simplificado da soldagem aluminotérmica.

Figura 4-Ilustração da soldagem FBW



Fonte: Fujii e Nakanowarari, 2015.

Figura 5- Esquema da soldagem aluminotérmica



Fonte: Sampaio e Moraes, 2015.

2.3.1 Processo de Soldagem Topo a Topo por Centelhamento - *Flash Welding* (FW)

De acordo com (KOTECKI et al., 2019) a soldagem topo a topo é um processo de união que ocorre através do calor gerado pela resistência à passagem da corrente elétrica (efeito Joule) e a pressão exercida nas regiões de contato das peças a serem soldadas. As extremidades das duas partes a serem soldadas são fixadas através de mordentes-eletrodos, que são conectados ao circuito elétrico secundário de um transformador de soldagem por resistência (VICENTE, 2017).

Para que seja realizada a soldagem, primeiramente é feita a limpeza das partes a serem unidas e do mordente/eletrodo de cobre. O eletrodo deve ser limpo com uma pistola de ar comprimido para expulsar óxidos e outras partículas soltas com o intuito de eliminar falhas na junta soldada (Nishikawa (2018) e Bauri, 2020).

O processo ocorre nas seguintes etapas:

- a) Pré aquecimento (*preheating*): As faces são colocadas em contato e sofrem curto-circuito com passagem de grande densidade de corrente promovendo o aquecimento através do efeito Joule. Nesse momento o mordente móvel que está fixado a um trilho, faz o movimento de aproximação e separação lenta em

direção ao trilho fixo que está preso ao mordente fixo (BAURI, 2020). Essa movimentação ocorre em um tempo pré-determinado e depende das especificações do fornecedor, das características metalúrgicas do material e das temperaturas das faces. O pré-aquecimento é necessário para que se reduza a troca de calor da junta soldada com o ambiente e o trilho não soldado, dessa forma diminuindo a taxa de resfriamento após a solda evitando a formação de martensita.

- b) Centelhamento (*flashing*): Esta etapa inicia-se com a movimentação contínua do trilho em velocidade fixa, seguido do movimento de aproximação e afastamento acelerado do trilho. Devido a irregularidades da superfície das faces a serem unidas, há alguns pontos de contato por onde flui grande quantidade de corrente elétrica gerando o centelhamento.
- c) Recalque (*up-setting force*): nesta etapa ocorre aplicação da força de compressão para que aconteça o forjamento entre as partes. Nesse momento a corrente é desligada. Verifica-se um gradiente de temperatura na região em que as superfícies foram soldadas em relação as regiões adjacentes a solda. A pressão aplicada deve ser suficiente para expulsar metais líquidos, óxidos e impurezas da interface.

Ainda de acordo com Nishikawa, este tipo de soldagem elimina defeitos de solidificação como porosidades, inclusões e falta de fusão, o que a torna superior à soldagem aluminotérmica. A taxa de resfriamento deve ser controlada e quanto maior for o carbono equivalente do aço, menor deve ser a taxa de resfriamento do trilho a fim de evitar a formação de martensita na microestrutura do material.

2.4 Conceitos Básicos de Tensões Residuais

Tensão residual são tensões presentes em uma junta ou material que está livre de forças externas ou gradientes térmicos (A W S, 2010). De acordo com Withers (2007) essas tensões surgem por causa de incompatibilidades existentes entre diferentes regiões de um material ou componente. Uma vez que as tensões residuais existem na ausência de solicitações externas, a força e o momento (M) resultantes destas tensões em uma dada seção da peça devem ser nulos

para manter o equilíbrio mecânico (FRAGA, 2007). As Equações 1 e 2 mostram essa característica auto equilibrante das tensões.

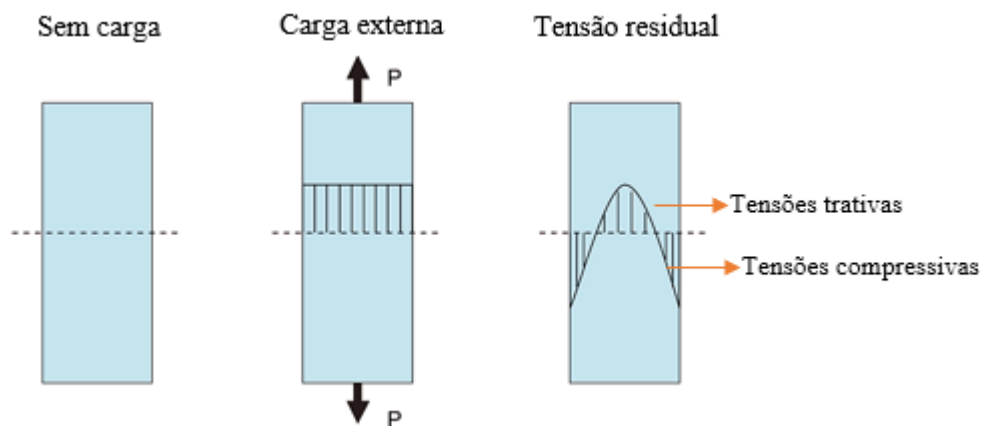
$$\int \sigma \cdot dA = 0 \quad (1)$$

$$\int dM = 0 \quad (2)$$

Onde σ é a tensão, dA é a área e dM é o momento resultante.

A Figura 6 mostra esquematicamente a distribuição de tensão residual através da espessura de uma folha de vidro temperado. Pode ser observado a presença de tensão residual mesmo livre de cargas externas, e as tensões de tração que ocorrem da região central da folha se equilibram com as tensões de compressão que aparecem nas superfícies

Figura 6- Comportamento das tensões em uma placa de vidro temperado.



Fonte: ADAPTADO Schajer e Ruud,2013.

Schajer (2013) diz que quase todos os processos de fabricação criam tensões residuais. Além do mais, as tensões podem se desenvolver durante a vida útil do componente fabricado. Essas tensões se desenvolvem como uma resposta elástica a deformações locais discordantes dentro da peça, como em deformações plásticas não uniformes. As regiões adjacentes devem

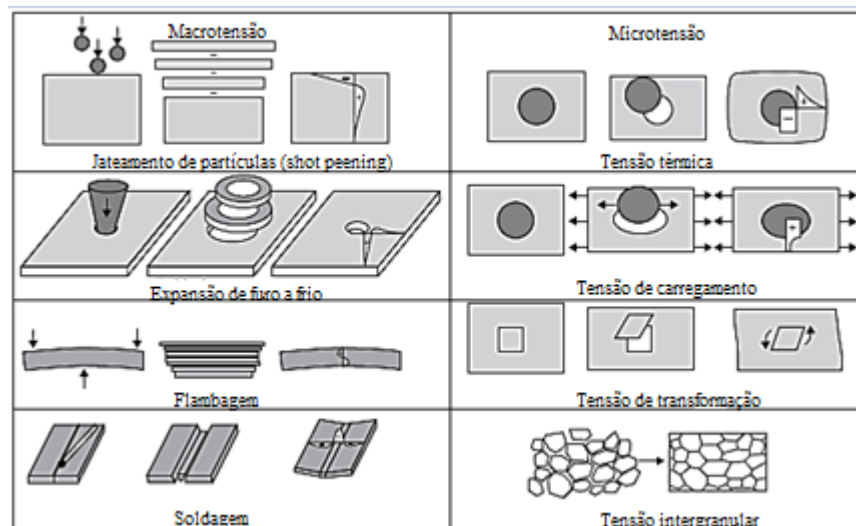
então se deformar elasticamente para preservar a continuidade dimensional, criando assim tensões residuais. Os mecanismos que promovem a criação de tensão residual são as deformações plásticas não uniformes, modificação de superfície e mudança de fase e/ou densidade do material.

De acordo com a escala de comprimento sobre a qual se equilibram, as tensões podem ser classificadas em 3 tipos: (Withers; Bhadeshia, 2001)

- Macrotensões residuais ou tipo I: são tensões residuais macro que se estendem por distâncias de mm para cima, aparecem nos componentes manufaturados;
- Microtensões residuais ou tipo II: são micro tensões residuais que se estendem por distâncias na faixa de microns, por exemplo, entre grãos em metais;
- Microtensões residuais ou tipo III: são tensões residuais que ocorrem na escala atômica em torno de deslocamentos e interfaces dos cristais.

A Figura 7 exemplifica as maneiras pelas quais se formam as tensões residuais em materiais de engenharia. Os diagramas ilustram como mudanças de dimensão localizadas exigem que o material circundante se deforme elasticamente para preservar a continuidade dimensional, criando assim tensões residuais (SCHAJER, 2013).

Figura 7- Esquema de formação de tensões residuais em materiais de engenharia.



Fonte: ADAPTADO Schajer, 2013.

De acordo com Withers (2007), as tensões residuais, devido ao seu caráter de auto equilíbrio podem não ser aparentes imediatamente, logo, podem ser negligenciadas ou

ignoradas durante o projeto de engenharia . Deve-se então, atentar e considerar as tensões residuais como tensões devido ao carregamento, pois, a combinação das duas tensões pode reduzir a vida útil do material causando fratura e corrosão por fadiga, entre outros.

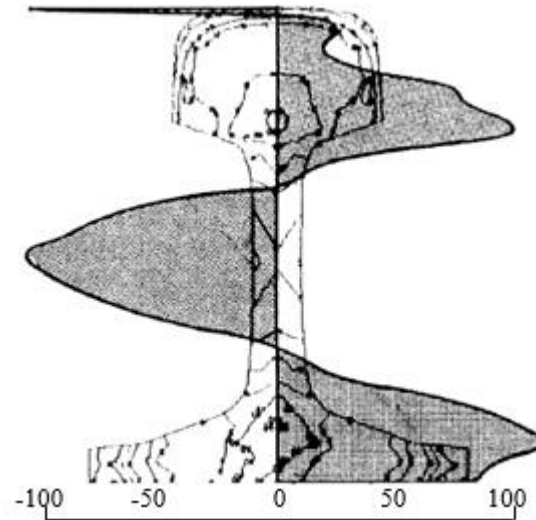
2.4.1 Tensões Residuais em Trilhos Ferroviários

Schneider (2005) afirma que tensões residuais são tensões existentes no trilho sem que haja algum carregamento ou força externa atuando. Essas tensões podem ser trativas ou compressivas e estão distribuídas em toda a geometria do trilho. Existem algumas condições que são geradoras de tensão residual nos trilhos, e estas podem ser de origem:

- Metalúrgica: resultantes de tratamento térmico durante a fabricação;
- Mecânica: resultante de laminação e carregamento em serviço;
- Térmica: resultante de expansão ou contração térmica restringida ou de gradientes de temperatura e soldagem.

De acordo com Mansouri e Monshi, (2004), as tensões residuais existentes nos trilhos são resultantes das etapas do processo de produção. Estas etapas são: Resfriamento, endireitamento e soldagem. Eles ainda citam um estudo numérico de elementos finitos apresentado por (HINTEREGGER, 1990) em sua tese, concluindo que após a laminação à quente, os trilhos esfriam em um leito de resfriamento e como resultado das diferentes taxas de resfriamento em diferentes partes da seção transversal, os trilhos são distorcidos após atingirem a temperatura ambiente e desenvolvem tensões residuais longitudinais, como pode ser visto na Figura 8.

Figura 8- Tensões residuais geradas após resfriamentos durante processo de produção.

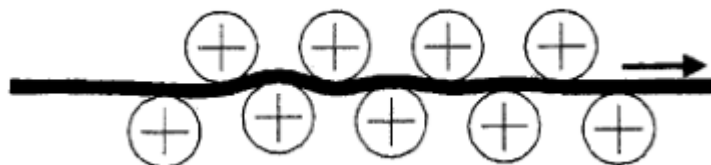


Fonte: ADAPTADO Mansouri e Monshi, 2004.

Observa-se que no topo do boleto e na alma são desenvolvidas tensões compressivas enquanto que no restante do boleto e no patim têm-se tensões trativas.

Ainda de acordo com Mansouri e Monshi, após o processo de resfriamento os trilhos são distorcidos e uma etapa de endireitamento deve ser aplicada. Existem diferentes métodos de endireitamento, o estiramento e alisamento de rolo, mas este último é o mais comumente praticado e pode ser visto na Figura 9 uma ilustração desse método. Neste processo, os trilhos resfriados e distorcidos são puxados através do alisador por uma série de rolos acionados. Assim, a distorção inicial é homogeneizada e diminuída pela deformação plástica causada por uma combinação de tensões de contato de flexão, cisalhamento e rolo. Além disso, sempre há um efeito de retorno elástico quando as forças externas são liberadas após a deformação plástica. Assim, um novo equilíbrio de forças e momentos, causados por tensões residuais, será alcançado.

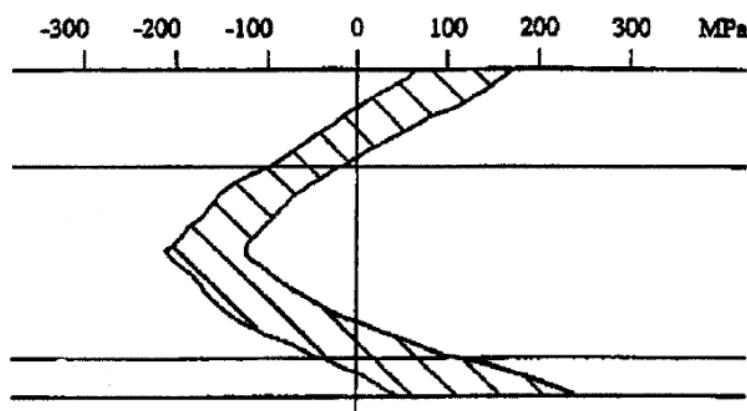
Figura 9- Alisamento de rolo na etapa de endireitamento do trilho.



Fonte: Mansouri e Monshi, 2004.

Um estudo abrangente sobre tensões residuais em trilhos endireitados por rolos foi realizado pelo *Office of Research and Experiments da International Union of Railways (ORE)* em 1987. Eles usaram métodos de seccionamento destrutivos para medir tensões residuais e seus resultados foram resumidos por Hodgson em 1993 como uma faixa de dispersão da tensão residual longitudinal, como mostrado na Figura 10.

Figura 10- Distribuição das tensões residuais após endireitamento.



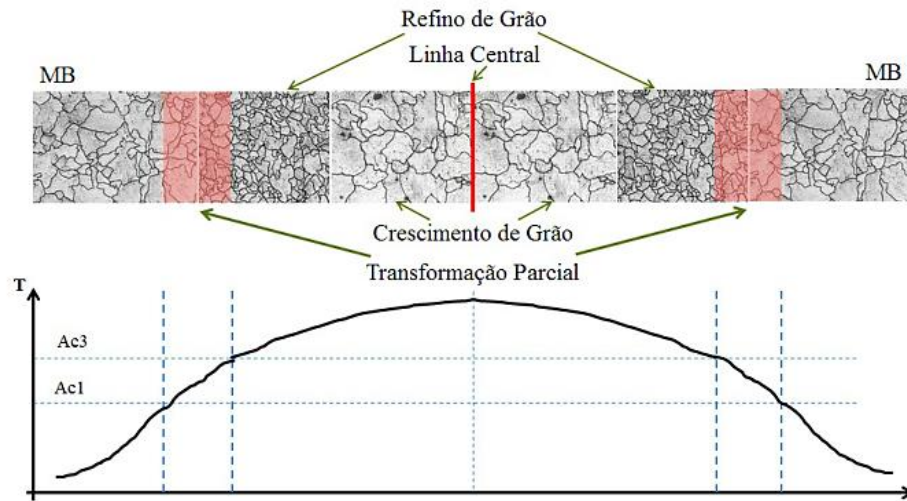
Fonte: Mansouri e Monshi, 2004.

Observa-se uma distribuição de tensões em um perfil em C após o processo de endireitamento do trilho ferroviário, mesmo perfil observado após o resfriamento. Após a soldagem esse perfil é modificado e pode ser visto no tópico a seguir.

2.4.2 Tensões de Soldagem

Em razão do aporte térmico a que é submetido as partes a serem unidas no processo de soldagem, geram-se nas regiões adjacentes à linha de fusão variações microestruturais e com diferentes distribuições de temperaturas (NISHIKAWA, 2018) e (BAURI, 2020). De acordo com o obtido no trabalho do Porcaro *et al*, 2017, ocorre a formação de 5 regiões distintas simétricas com relação a linha central. Na Figura 11 é apresentada essas regiões e suas variações microestruturais.

Figura 11- Esquema das diferentes regiões geradas na soldagem FBW.



Fonte: Porcaro *et al.*, 2017.

De acordo com Bauri (2020) e Nishikawa (2018), as regiões são denominadas como a seguir:

- a) Linha central da solda: ocorre o pico de temperatura, e é a região de união entre as interfaces. Há a presença de ferrita próeutetóide devido a descarbonetação em altas temperaturas e dureza reduzida característica da presença de ferrita próeutetóide;
- b) Crescimento de grão: adjacente a região de fusão, onde os grãos tem a facilidade de crescer em altas temperaturas devido ao fenômeno de difusão;
- c) Refino de grão ou recristalização: adjacente a região de crescimento de grãos, onde ocorre recristalização, dando origem a perlita mais fina (PORCARO *et al.*, 2017);
- d) Região de austenitização parcial: região de ocorrência da esferoidização da cementita (Fe_3C), e redução brusca da dureza;
- e) Metal base: região não afetada pelo calor e com estrutura perlítica.

Como pôde ser visto acima, ocorrem variações microestruturais nas regiões próximas a soldagem, consequência do aporte térmico aplicado. Quando a região a ser soldada aquece, ocorre a dilatação térmica que, ao mesmo tempo, é inibida pelas regiões adjacentes que estão em temperaturas mais baixas. Essas variações térmicas, microestruturais e de densidade promovem o surgimento de tensões residuais de acordo com Scharjer (2013).

Mansouri e Moshi dizem que durante a soldagem, as extremidades dos trilhos são aquecidas e tensões residuais desaparecem e a medida que as novas juntas resfriam, novas tensões residuais se desenvolvem. Os campos de tensões residuais longitudinais nas seções bem afastadas da solda são característicos de muitos trilhos não soldados, sendo geralmente tracionados no boleto e patim com compressão balanceada na alma. No entanto, próximo à solda, os padrões de tensão residual são muito diferentes. No boleto e patim do trilho, o campo de tensão residual longitudinal é fortemente compressivo, o que geralmente é benéfico, pois tenderia a inibir a iniciação e propagação de trincas. Na região da alma, tanto os componentes verticais quanto longitudinais do campo de tensões residuais são fortemente tracionados, o que aumenta a suscetibilidade desta região à iniciação e propagação de trincas por defeitos internos do material.

Schneider também afirma que as tensões compressivas são benéficas e reduzem a taxa de propagação de trincas e as tensões trativas atuam de forma inversa. A quantificação das tensões é um desafio, pois sabe-se que sua distribuição no boleto varia com tempo de serviço e segundo Godefroid *et al.* (2015), a distribuição da tensão residual é muito importante para entender o mecanismo de fratura do trilho.

2.5 Método de Medição de Tensões Residuais

De acordo com Rossini *et al.*, (2012), há vários métodos para medição de tensão, incluindo três categorias principais: métodos destrutivos, semi destrutivos e não destrutivos. Vale ressaltar que alguns autores utilizam três classificações como mencionado e outros autores utilizam duas classificações apenas, os métodos destrutivos e os métodos não destrutivos. As técnicas destrutivas e semi destrutivas, também chamadas de método mecânico, dependem da inferência da tensão original a partir do deslocamento incorrido pelo alívio total ou parcial da tensão pela remoção do material. Enquanto métodos não destrutivos geralmente medem a propagação ou transmissão da forma de onda através do componente que são indiretamente afetados pela tensão residual (JAVADI *et al.*, 2017). A Figura 12 apresenta um fluxograma das técnicas utilizadas para a medição das tensões.

Figura 12- Fluxograma das técnicas de medição de tensão residual.



Fonte: Costa, 2017 *apud* Rossini *et al*, 2012.

2.6 Método Ultrassônico

De acordo com Bond e Ahmad (2018), o método de inspeção ultrassônica é uma técnica não destrutiva em que feixes de ondas ultrassônicas são introduzidas nos materiais a fim de detectar e caracterizar anomalias e falhas superficiais e subsuperficiais. Os sinais de resposta são detectados, exibidos e analisados para fornecer informações que são usadas para definir a presença, localização e características de falhas ou outras discontinuidades. A inspeção ultrassônica mais convencional é realizada usando frequências entre 1,0 e 25 MHz e são vibrações mecânicas em que as amplitudes das vibrações nas peças metálicas inspecionadas impõe tensões que estão bem abaixo do limite elástico evitando efeitos permanentes sobre as partes.

2.6.1 Medição de Tensão Residual por Ultrassom

Para avaliação de tensões residuais são utilizadas diferentes ondas mecânicas como as ondas longitudinais, cisalhantes ou de superfície do tipo Rayleigh (SCHARGER, 2013). O método baseia-se na verificação do tempo de percurso das ondas na textura da estrutura

crystalina do material e utiliza dois fenômenos físicos para determinar as tensões no material: birrefringência acústica e acustoelasticidade.

Na aplicação do ultrassom para determinação da tensão, emprega-se o termo técnica da birrefringência ao introduzir ondas cisalhantes, e, denomina-se birrefringência acústica a diferença fracional da velocidade ou do tempo de trânsito da onda ultrassônica em relação a duas direções perpendiculares, indica a anisotropia do material (BITTENCOURT, 2000). A variação da velocidade da onda ultrassônica depende do estado de tensão do material, da direção de propagação da onda ultrassônica em relação aos planos cristalinos e da direção da movimentação das partículas (polarização) do meio pela passagem da onda. Este fenômeno, da variação da velocidade da onda ultrassônica ao passar através de um material elástico sob tensão, passou a ser chamado de efeito acustoelástico. Sob tensão o sólido torna-se acusticamente anisotrópico e a onda ultrassônica cisalhante é refratada em duas direções com diferentes ângulos de polarização. O material é dito, então, acusticamente birrefringente.

De acordo com Minicucci (2003), os cristais de metais são anisotrópicos e variam o seu módulo de elasticidade nas diferentes direções cristalográficas, alterando as velocidades de propagação do ultrassom nas diferentes direções. Portanto, o estado da microestrutura determina o comportamento elástico do material e também o da velocidade da onda ultrassônica

A incerteza na aplicação do ultrassom para medição de tensão residual é que a velocidade do ultrassom não é apenas afetada pela tensão, mas também é afetada por muitas outras características microestruturais, como tamanho de grão, variação de fases, cristalografia, textura e assim por diante. O efeito dessas outras características compromete a precisão do método de medição de tensão ultrassônica. No entanto, apesar do efeito de variações microestruturais nos produtos manufaturados, o sucesso na aplicação de métodos ultrassônicos para medição de tensões residuais foi alcançado em vários casos específicos (SCHAJER, 2013).

2.6.1.1 Ondas Ultrassônicas

As ondas ultrassônicas são ondas que consistem em oscilações ou vibrações das partículas atômicas ou moleculares de uma substância sobre as posições de equilíbrio dessas partículas (BOND; AHMAD, 2018). Andreucci, (2014) diz que essas ondas estão na faixa de som não audível pelo humano, entre 20 Hz e 20 kHz e assim como uma onda sonora reflete ao incidir num anteparo qualquer, a vibração ou onda ultrassônica ao percorrer um meio elástico,

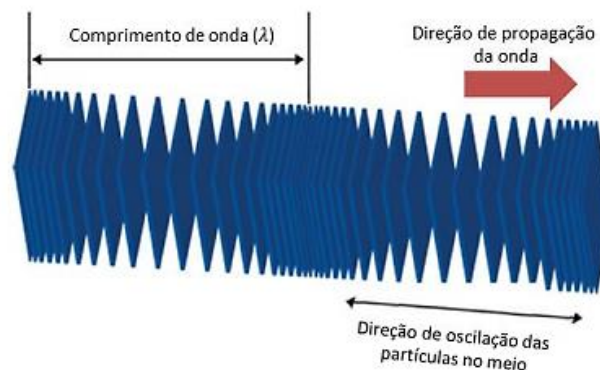
que pode ser um metal, plástico, concreto e etc, refletirá da mesma forma ao incidir numa descontinuidade ou falha interna neste meio considerado.

De acordo com o tipo de vibração e direção de movimento, as ondas ultrassônicas podem ser classificadas em 4 tipos, e suas definições são apresentadas nos tópicos a seguir.

2.6.1.2 Ondas Longitudinais ou Compressivas

Ondas longitudinais ou compressivas, Figura 13, são ondas em que as partículas do material vibram paralelamente na mesma direção de propagação da onda ultrassônica. A velocidade das ondas longitudinais em um sólido depende das dimensões do espécime no qual as ondas estão viajando. As ondas longitudinais apresentam as maiores velocidades de propagação em um determinado meio (SANTOS, 2013).

Figura 13- Propagação de ondas longitudinais.

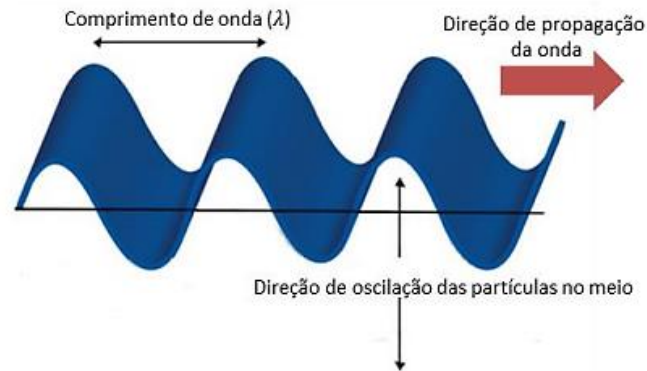


Fonte: Santos, 2013.

2.6.1.3 Ondas Transversais ou Cisalhantes

As ondas transversais ou cisalhantes, representadas na Figura 14, são ondas que possuem como características a oscilação das partículas do material na direção perpendicular à direção de propagação da onda (SANTOS, 2013).

Figura 14- Propagação de ondas transversais.



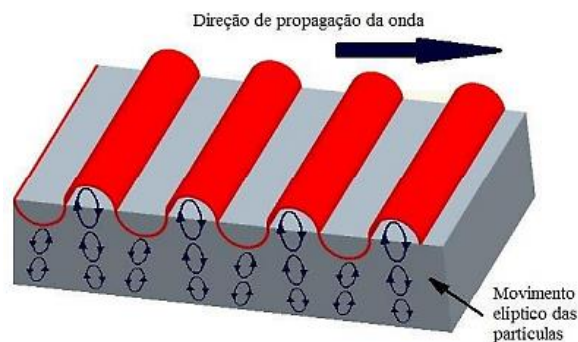
Fonte: Santos, 2013.

2.6.1.4 Ondas de Rayleigh

De acordo Fraga (2007), ondas de Rayleigh são ondas superficiais que se propagam pela superfície de um material sólido com espessura definida, que deve ser maior que o comprimento da onda sonora. Sua penetração no material é cerca de um comprimento de onda, e sua velocidade é 90% da velocidade de onda transversal. Como pode ser visto na Figura 15, as partículas do material seguem uma trajetória elíptica, ou seja, comportamento longitudinal e transversal.

As ondas superficiais são muito úteis nos ensaios por ultrassom, pois são muito sensíveis a defeitos superficiais e, sendo assim, é possível inspecionar áreas que são difíceis de serem analisadas por outros tipos de ondas (FRAGA, 2007).

Figura 15- Ondas de Rayleigh.

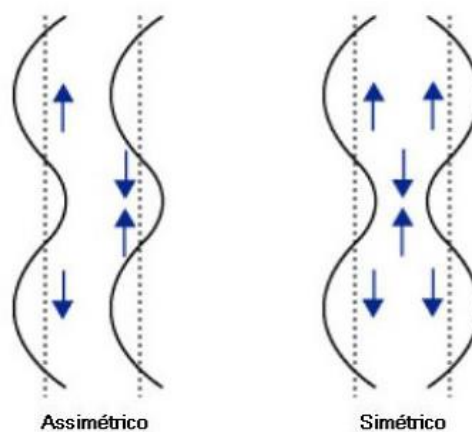


Fonte: Santos, 2013.

2.6.1.5 Ondas de Lamb

As ondas de Lamb são perturbações que apresentam vibrações complexas e que se propagam ao longo de um material com espessura definida (comparável ao comprimento de onda) (FRAGA, 2007). A propagação das ondas de Lamb depende das características do material, como densidade e elasticidade. Vários modos de vibração podem ocorrer nas ondas de Lamb, mas os dois mais comuns são o simétrico e o assimétrico, como pode ser visto na Figura 16. O movimento das partículas nas ondas de Lamb é semelhante ao movimento elíptico das ondas de Rayleigh.

Figura 16- Ondas de Lamb.



Fonte: Fraga, 2007.

2.7 Acustoelasticidade e Birrefringência Acústica

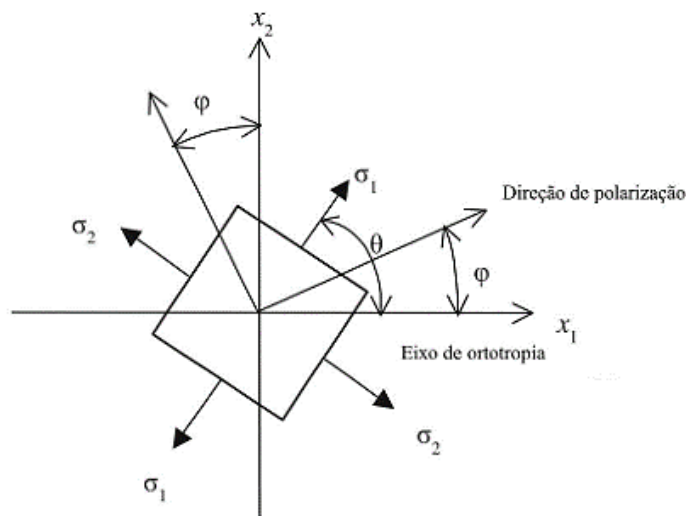
Suponha um material ortotrópico, como uma chapa metálica livre de tensões externas. Utilizando como referência o eixo cartesiano $O - x_1 - x_2 - x_3$, toma-se ondas longitudinais na direção x_3 , que coincidem com umas das direções principais (BITTENCOUT, 2000 *apud* ALBUQUERQUE, 2019). A tensão principal σ_1 faz um ângulo θ com a direção principal x_1 . Nesse caso a velocidade de onda varia com a tensão aplicada, como pode ser visto na Figura 17 e observado na Equação 3.

$$\rho_0 V_L^2 = \lambda_L + 2\mu_L + (\lambda_L + \nu_1 + 2\nu_2)S_{ii} + 2(2\lambda_L + 5\mu_L + 2\nu_2 + 4\nu_3)S_{33} + \bar{C}_{33}$$

$$\left. \begin{array}{l} \rho_0 V_{S1}^2 \\ \rho_0 V_{S2}^2 \end{array} \right\} = \mu + (\lambda_L + \mu_L + \nu_2 + \nu_3) S_{ii} + (2\mu + \nu_3) S_{33} + \frac{1}{2} (\bar{C}_{44} + \bar{C}_{55}) \pm |\mu_L + \nu_3| \sqrt{\left\{ \frac{\bar{C}_{55} - \bar{C}_{44}}{2(\mu_L + \nu_3)} \right\}^2 + 4S_{12}^2} \quad (3)$$

Onde ρ_0 é a densidade inicial, V_L , V_{S1} e V_{S2} são, respectivamente velocidade da onda longitudinal e cisalhante polarizada na direção 1 e 2. λ_L e μ_L são constantes elásticas de segunda ordem ou de *Lamé*. ν_1 , ν_2 e ν_3 são constantes elásticas de terceira ordem, definidos por Hughes e Kelly (1953). S_{ii} o tensor de conformação e C_{ii} o tensor de rigidez utilizando a contração.

Figura 17- Sistema bidimensional da textura anisotrópica e as direções das tensões principais da onda cisalhante ao longo dos eixos.



Fonte: Hirao e Ogi, 2017 apud Albuquerque, 2019.

A birrefringência acústica pode ser descrita conforme a Equação 4.

$$B = 2 \frac{V_{S1} - V_{S2}}{V_{S1} + V_{S2}} = \sqrt{B_0^2 + 2B_0 C_A (\sigma_1 - \sigma_2) \cos(2\theta) + C_A^2 (\sigma_1 - \sigma_2)^2} \quad (4)$$

Onde B_0 é a birrefringência inicial do material livre de tensão e C_A é a constante acustoelástica de birrefringência, dados pela Equação 5.

$$B_0 = \frac{\bar{C}_{55} - \bar{C}_{44}}{2\mu},$$

$$C_A = \frac{1}{\mu} \left(1 + \frac{v_3}{\mu} \right). \quad (5)$$

O ângulo de φ pode ser encontrado através da Equação 6.

$$\tan 2\varphi = \frac{C_A(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\theta}{B_0 + C_A(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta} \quad (6)$$

Como observado acima, a direção de polarização depende da textura do material e da carga aplicada. Pode-se ver que a birrefringência B depende da birrefringência inicial B_0 e da diferença das tensões principais $(\sigma_1 - \sigma_2)$.

Quando $\theta = 0$, as direções das tensões principais coincidem com as direções de ortotropia inicial e a Equação 4 pode ser escrita conforme a Equação 7.

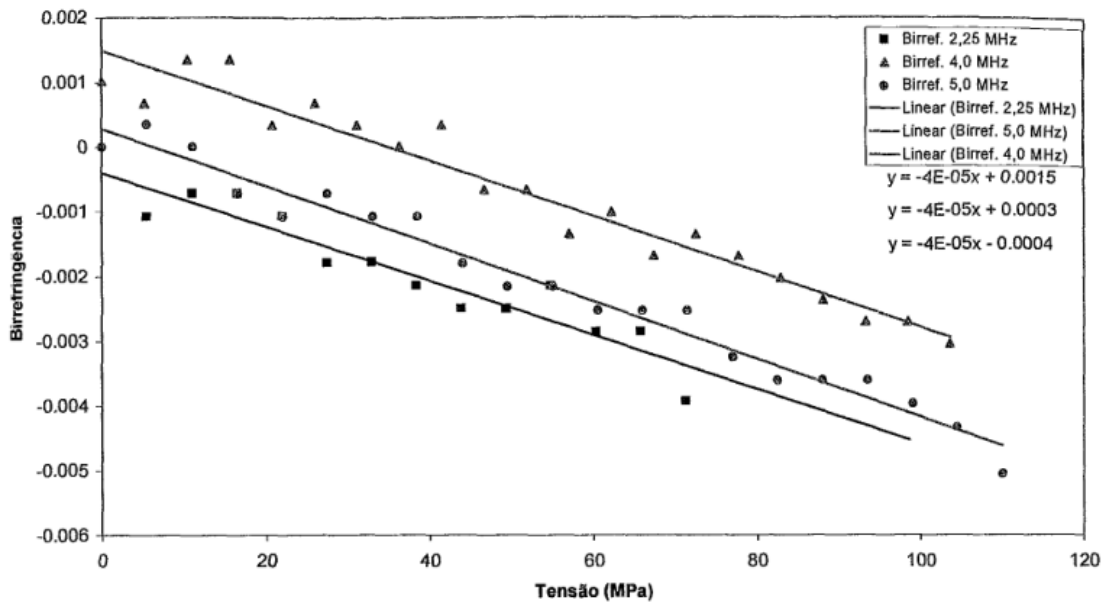
$$B = B_0 + C_A(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (7)$$

Dessa forma, a birrefringência é um somatório da birrefringência inicial e do efeito acustoelástico.

No trabalho de Bittencourt, foi observado o comportamento da onda cisalhante em chapas de AlMg em função da carga aplicada uniaxialmente, notou-se redução da velocidade da onda cisalhante polarizada longitudinalmente a direção de carregamento, enquanto que na polarização perpendicular houve aumento de velocidade com o incremento da carga. Costa (2017), obteve o mesmo comportamento nos tempos de percurso da onda cisalhante polarizada longitudinal e transversalmente em um aço ASTM A-131.

Bittencourt obteve também em seu trabalho um comportamento linear da birrefringência em função da carga aplicada utilizando transdutores com diferentes frequências. Os resultados podem ser vistos na Figura 18.

Figura 18- Comparação entre os valores da birrefringência com os transdutores de 2,25, 4,0 e 5,0 MHz



Fonte: Bittencourt, 2000.

Pode-se inferir a variação da birrefringência ao alinhamento dos grãos, ou seja, a textura do material, como foi observado, os valores de birrefringência alteram com a aplicação da carga. Mas ao se analisar a constante acustoelástica vê-se valores iguais para os três transdutores, isso mostra que a CAE independe da frequência do transdutor usado, mais ainda, indica que esse valor independe da anisotropia inicial imposta pela textura e é o mesmo valor para todos os experimentos com este material, pois a CAE depende do material, não em relação a textura, mas sim das ligações atômicas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Considerações Iniciais

O presente capítulo aborda, inicialmente, sobre o material objeto do estudo, trilho ferroviário soldado por centelhamento, seguido dos métodos usados para a caracterização mecânica e metalográfica desse material. Em seguida, são apresentados os equipamentos que compõem o sistema de medição do sinal ultrassônico, bem como as metodologias de medição da birrefringência acústica inicial (B0), das constantes acustoelásticas (CAE) e das tensões residuais nas regiões de fronteira ZAC e CS. Vale ressaltar que o intuito inicial do trabalho era determinar as CAE e medir as tensões residuais nos trilhos T1, T3 e de outros fabricantes, porém, por problemas técnicos no equipamento foi possível medir apenas o trilho T3. Para o trilho T1 foi utilizado os valores de B0 e CAE do trilho T3 para determinar as tensões nas duas regiões em estudo do T1.

3.2 Material de Estudo e Descrição dos Corpos de Prova

No trabalho foram usadas amostras de trilho de perfil TR68 (Figura 19) soldado por centelhamento, com dimensões de 210 x 300 x 2000 mm.

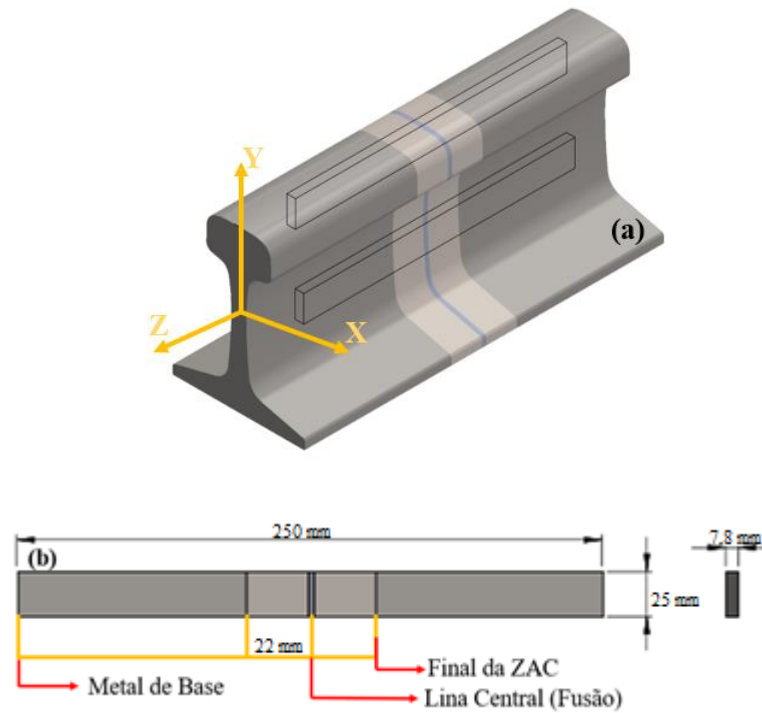
Figura 19- Fotografia dos trilhos de perfil TR68



Fonte: Relatório Técnico 2021, Vale S/A.

Dessas amostras foram usinados 6 corpos de provas (CP's), 3 do boleto e 3 da alma para ensaio de tração. Além disso, foram usinados 2 CP's, um da alma e outro do boleto do trilho, em forma de chapas como pode ser visto na Figura 20 (b), para a determinação da B0 e da CAE, Estes CP's apresentaram dimensões de 27,3 mm x 7,4 mm x 250 mm e passaram por tratamento térmico de recozimento subcrítico para alívio de tensões residuais à 600 °C por uma hora e deixou-se resfriar no forno. O alívio de tensões residuais é uma condição da técnica de birrefringência para a determinação de B0 (Hirao, 2017). Durante o tratamento térmico os CP's foram revestidos por papel carbono e enterrados em areia para evitar a descarbonetação do aço. A Figura 20 (a) ilustra as regiões do trilho e o sentido em que os corpos de prova foram usinados (direção longitudinal z) após soldagem. Pode-se ver também as regiões em estudo, ZAC e CS.

Figura 20- (a) Desenho 3D esquemático do trilho indicando boleto e alma de onde os CP's foram usinados. (b) Ilustração das regiões de um CP após soldagem.



Fonte: Do próprio autor, 2022.

3.3 Análise Macroestrutural

Para a realização da análise macroscópica, foi utilizado uma câmera de celular. Os procedimentos metalográficos objetivaram a revelação das diferentes regiões da solda, metal de base (MB); zona afetada pelo calor (ZAC) e a região central da solda (CS). Para as análises macrográficas o reagente utilizado foi o Nital 2%, a técnica de revelação utilizada foi a de passes.

3.4 Análise Microestrutural

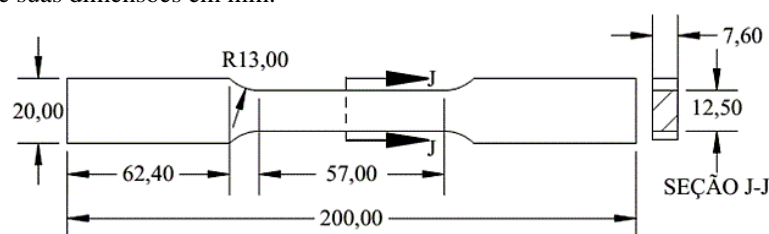
Para a realização da análise por microscopia ótica foram empregadas as normas ASTM E3 (2017) e a ASTM E7 (2017). Foi utilizado o microscópio ótico Axio Lab. A1, da ZEISS. Os procedimentos metalográficos objetivaram a revelação microestrutural das diferentes regiões da solda, metal de base (MB); zona afetada pelo calor (ZAC) e a região central da solda (CS).

Para as análises micrográficas o reagente utilizado foi o Nital 2%, a técnica de revelação utilizada foi a de passes.

3.5 Análise de Resistência Mecânica

A análise de resistência mecânica no tocante a tensão de escoamento foi realizada para balizar a tensão ou carga a ser aplicada na determinação da constante acustoelástica (CAE) do trilho. Para a realização dos ensaios de tração do material soldado foram usinados CP's obedecendo à norma ASTM E8/E8M-15a. O comprimento dos CP's foi paralelo à direção de laminação do material. Além disso, é importante ressaltar que foram usinados 3 (três) CP's, com o objetivo de obter dados médios como respostas das propriedades mecânicas do material. O ensaio foi realizado na máquina de ensaios universal servopulser shimadzu de modelo EHF-EM100KN-20L, a qual possui capacidade máxima de carregamento de 100 kN. A Figura 21 ilustra de forma esquemática os CP's utilizados nos ensaios de tração, além das suas dimensões.

Figura 21- Esquema ilustrativo dos CP's usados nos ensaios de tração e suas dimensões em mm.



Fonte: Costa, 2017.

3.6 Equipamentos e Metodologias utilizados na Avaliação Acustoelástica do Material antes e após a Soldagem de Trilhos por Centelhamento

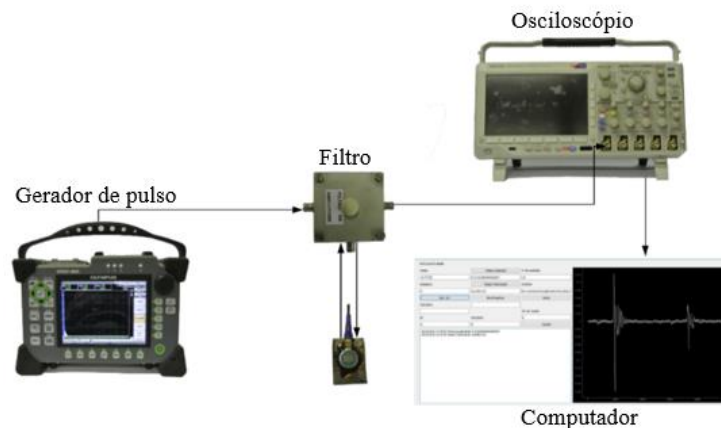
3.6.1 Sistema Ultrassônico

Para a determinação da tensão por birrefringência ou de CAE, há a necessidade da medição da velocidade ou do tempo de propagação da onda através do material. Neste trabalho

foi medido o tempo de percurso da onda ultrassônica, utilizando-se a técnica Pulso-Eco, que se caracteriza por utilizar um único transdutor para a emissão e recepção do feixe sônico. O sistema ultrassônico usado é composto de um ultrassom (Olympus epoch 1000i), um osciloscópio (Tektronix MSO3054) com taxa de amostragem de até 2.5 GS/s, um transdutor piezoelétrico (Olympus V155) de onda cisalhante e incidência normal com diâmetro de 6 mm e frequência nominal de 5 MHz, um filtro de amplitude e um notebook. Albuquerque (2019) desenvolveu um *Software* em *Python*, em seu trabalho de conclusão de curso, para criar a interface entre o osciloscópio, que realiza a medição através da técnica de interpolação e correlação cruzada no sinal obtido para se ter um resultado com maior precisão, e o mesmo foi utilizado neste trabalho.

Na Figura 22 é apresentada a conexão entre os equipamentos do sistema de captura do sinal ultrassônico.

Figura 22- Sistema ultrassônico utilizado na captura do tempo de percurso da onda ultrassônica.



Fonte: Albuquerque, 2019.

3.6.2 Obtenção da Birrefringência Acústica Inicial (B0)

Os dois CP's soldados e já tratados termicamente, foram marcados em 9 pontos, sendo 6 com espaçamento de 20 mm entre si no metal de base (pontos 1, 2, 3, 4, 5 e 6), um no centro da solda e 2 na região de fronteira, isto é, na ZAC, conforme mostra a Figura 23. As medições foram realizadas utilizando o método par-a-par, que consiste em realizar um par de medição no mesmo ponto com o transdutor tendo a direção de polarização da onda defasada de 90° entre si.

Como um dos objetivos do trabalho é a medição da tensão residual no centro da solda e na região de fronteira, então, os valores de B0 foram determinados nessas duas regiões.

Figura 23- Regiões de determinação dos parâmetros de birrefringência inicial (B0) e CAE do cordão de solda.



Fonte: Relatório Técnico 2020, Vale S/A.

3.6.3 Obtenção das Constantes Acustoelásticas do Material Soldado (CAE's)

Os CP's usados para a obtenção das CAE's são apresentados na Figura 23 e tem uma área útil da seção transversal de 193,3 mm². Os CP's foram tracionados uniaxialmente no sentido paralelo ao sentido de laminação.

A metodologia para se determinar as CAE's consistiu, primeiro, em determinar o limite de escoamento do material soldado através de um ensaio de tração, conforme visto no item 3.5. A partir do valor do limite de escoamento, foi calculada a carga total utilizada. Então, para o ensaio de tração fracionado para obtenção das CAE's, foi utilizado aproximadamente 52% dessa carga no boquete e aproximadamente 55% na alma, que gerou uma carga máxima baseado na área útil dos CP's mostrados na Figura 23. A Figura 24 mostra a máquina de ensaios universal e o CP com o transdutor acoplado a ele com o auxílio de um dispositivo.

Figura 24- CP tracionado uniaxialmente.



Fonte: Do próprio autor.

A carga máxima foi fracionada, aproximadamente de 10 em 10 kN, e para cada um dos valores fracionados foram capturados os sinais de percurso da onda ultrassônica. O transdutor foi fixado na região de fronteira (ZAC) do CP, e mantido assim até o fim da aplicação da carga, medindo-se o tempo para cada intervalo de aumento da carga. Após aplicação da carga final, retirou-se a carga para girar o transdutor em 90°, repetindo o processo. Dessa mesma forma foi aplicado o ensaio na região do CS. A partir dos tempos medidos da onda cisalhante na direção longitudinal e transversal ao carregamento, sendo denominados, respectivamente, de tempo longitudinal (TL) e tempo transversal (TT), foi calculado o valor da birrefringência (B) para cada carga. Com o valor de birrefringência e com as cargas, foi gerado o gráfico Carga x Birrefringência, cujo coeficiente angular da reta forneceu o valor da CAE do material soldado nas duas regiões medidas, ZAC e CS.

3.6.4 Obtenção de Tensões Residuais em Trilhos por Birrefringência Acústica

Com os resultados de B0 e CAE do material após o tratamento térmico e com o B medido somente com o trilho soldado e todos esses resultados medidos nas regiões de ZAC e CS, foi determinada a tensão residual, utilizando a Equação 7, nessas duas regiões para o trilho T3. Para o trilho T1 foi determinada a tensão residual utilizando os dados de B0 e CAE do trilho

T3. Os dois trilhos são do tipo *super premium*, porém, com condições de resfriamento diferentes e pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 4- Identificação das amostras dos trilhos.

Amostra	Nomenclatura	Pressão de resfriamento (bar)	Taxa de resfriamento (°C/s)
S17	T1	1	1,5
S16	T3	3	4

Fonte: (Relatório Técnico 2021, Vale S/A.)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

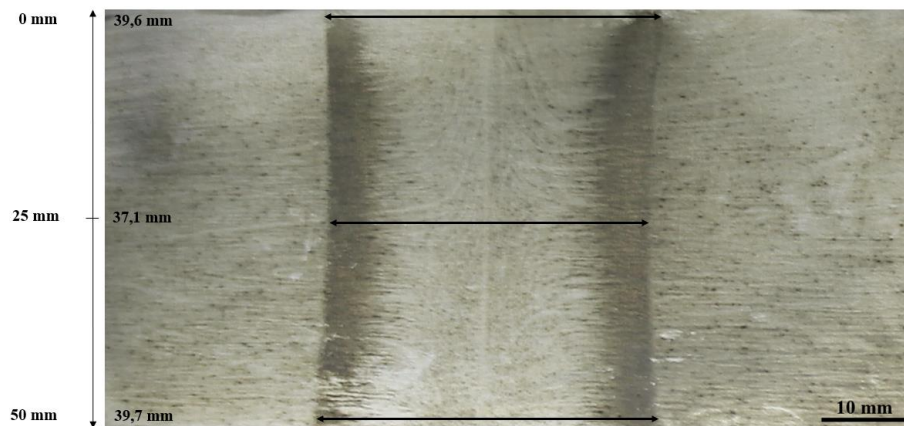
4.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta os resultados obtidos das análises macro e microestrutural do metal de base (MB), ZAC e CS. Assim como os de resistência mecânica do trilho soldado. Posteriormente, mostram-se os resultados da birrefringência acústica inicial (B0) e das constantes acustoelásticas (CAE) desse mesmo material. Por último, mostram-se alguns resultados das tensões residuais obtidas com B0 e CAE medidos no trilho pós-tratamento térmico de recozimento subcrítico para a redução de tensões residuais. **É importante destacar que os resultados de B0 e CAE, inicialmente estavam previstos para serem determinados nos trilhos T1 e T3, porém, por motivo de falha no osciloscópio, foram determinados apenas no trilho T3.**

4.2 Análise Macroestrutural

As Figuras 25 e 26 mostram as macrografias da região do boleto (corte longitudinal) das amostras T1 e T3, respectivamente, e a largura da ZAC em três posições ao longo da altura do boleto (0 mm - subsuperfície; 25 mm e 50 mm). Nessas duas figuras é importante observar a largura da ZAC de forma a verificar a influência da taxa de resfriamento na região tratada. Contudo, visualmente, constata-se que o resfriamento não gera alteração significativa na largura da ZAC. Outro fator relevante que se deve levar em consideração é o aspecto visual da macrografia dessa região, as linhas de escoamento. Em que se observa na região central do cordão as linhas de escoamento inclinadas para cima, resultados da aplicação de pressão no processo de soldagem, enquanto nas regiões de fronteira e metal de base, essas linhas apresentam um comportamento mais linear, esses resultados são semelhantes aos obtidos por Porcaro *et al*, (2017).

Figura 25- Macrografia da região do bolete da solda T1.



Fonte: Relatório técnico 2021, VALE S/A.

Figura 26- Macrografia da região do bolete da solda T3.



Fonte: Relatório técnico 2021, VALE S/A.

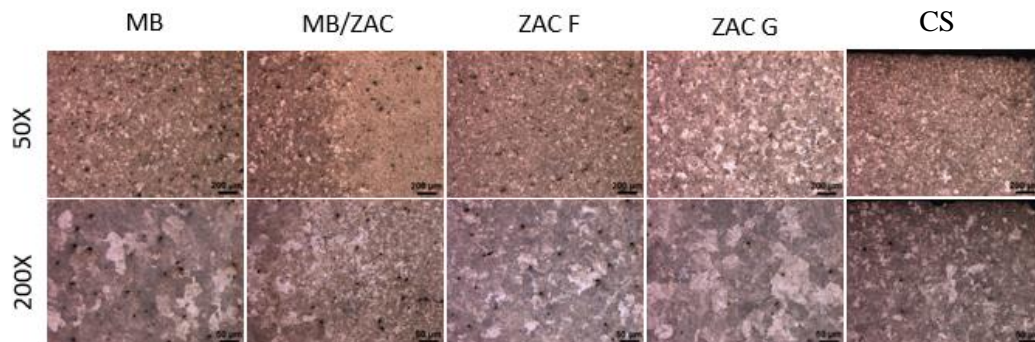
Essa deformação na região do CS de solda, talvez seja um limitante na aplicação do método ultrassônico, devido a onda passar paralela à linha de escoamento, enquanto que nas outras regiões ela passa transversalmente, como na região do metal base.

4.3 Análise Microestrutural

As Figuras 27 e 28 mostram as micrografias do bolete obtidas por microscopia ótica das amostras T1 e T3, respectivamente, para algumas regiões ao longo da solda. As regiões avaliadas foram: Centro de Solda (CS); Crescimento de grão (ZAC G); Refino de grão (ZAC F); Final da ZAC (MB/ZAC) e Metal de base (MB). As magnificações utilizadas para a análise

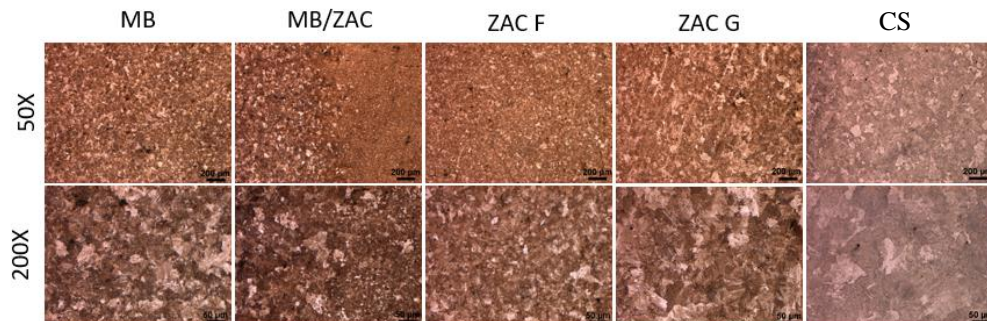
foram 50x e 200x. De modo geral, observa-se que há uma diferença no tamanho de grãos de cada região. Destacando-se as regiões CS e ZAC, as quais são escopo deste trabalho. Nessas duas regiões, constata-se uma diferença significativa no tamanho de grão, característica do processo de soldagem. Essas microestruturas corroboram com os resultados encontrados por Mansouri e Monshi (2004) e Porcaro *et al* (2019).

Figura 27- Micrografias das regiões do metal de solda do boleto do trilho T1.



Fonte: Relatório técnico 2021, VALE S/A.

Figura 28- Micrografias das regiões do metal de solda do boleto do trilho T3.



Fonte: Relatório técnico 2021, VALE S/A.

4.4 Análise de Resistência Mecânica

Os resultados de limite de escoamento e de ruptura do boleto e da alma dos trilhos T1 e T3, pós-soldagem, encontrados à temperatura de 22 °C, aplicando-se uma carga axial uniforme ao longo de uma área útil 95,00 mm² por amostra estão organizados na Tabela 5 e Tabela 6, respectivamente. Os resultados de limite de escoamento e de resistência à tração encontrados para o boleto e alma do trilho em estudo estão dentro dos limites estabelecidos por normas (DNIT, 2015); (PORCARO, *et al* 2019). Desses resultados, o limite de escoamento (em

destaque) é o importante para este trabalho, pois a partir dele determina-se o percentual de carga ideal para ser utilizado no ensaio de tração a fim de gerar o gráfico Carga x Birrefringência e obter as constantes acustoelásticas do trilho a partir da inclinação da curva.

Tabela 5- Propriedades mecânicas do boleto do trilho soldado por centelhamento.

CP	L.E (MPa)	L.R (MPa)
CP1	658,5	1089,8
CP2	660,0	1145,6
CP3	640,3	1154,3
Média	652,9 (±10,9)	1129,9 (±35)

Fonte: (Do próprio autor, 2022).

Tabela 6- Propriedades mecânicas da alma do trilho soldado por centelhamento.

CP	L.E (MPa)	L.R (MPa)
CP1	565,8	991,5
CP2	551,4	989,9
CP3	720,5	996,3
Média	612,5 (±93,7)	992,6 (±3,33)

Fonte: (Do próprio autor, 2022).

4.5 Birrefringência Inicial do Trilho pós-Tratamento Térmico de Recozimento Subcrítico

A Tabela 7 mostra os tempos de percurso da onda cisalhante polarizada nas direções longitudinal e transversal das amostras. Assim como, mostra a diferença entre os tempos nessas direções e a birrefringência acústica inicial. Os valores de tempos de propagação da onda cisalhante e birrefringência da ZAC mostradas na Tabela 4 é a média das duas regiões de fronteira adjacentes à linha de fusão.

Tabela 7- Tempos de percurso de onda cisalhante e birrefringência inicial.

Região	Boleto			B0
	TL (ns)	TT (ns)	TT – TL (ns)	
ZAC	4035,5	4036,2	0,7	1,7603E-04
CS	3938,5	3955,9	17,4	4,4069E-03

Alma				
Posição	TL (ns)	TT (ns)	TT – TL (ns)	B0
ZAC	4109,1	4109,9	0,8	2,0383E-04
CS	4093,2	4111,4	18,2	4,4170E-03

Fonte: (Do próprio autor ,2022).

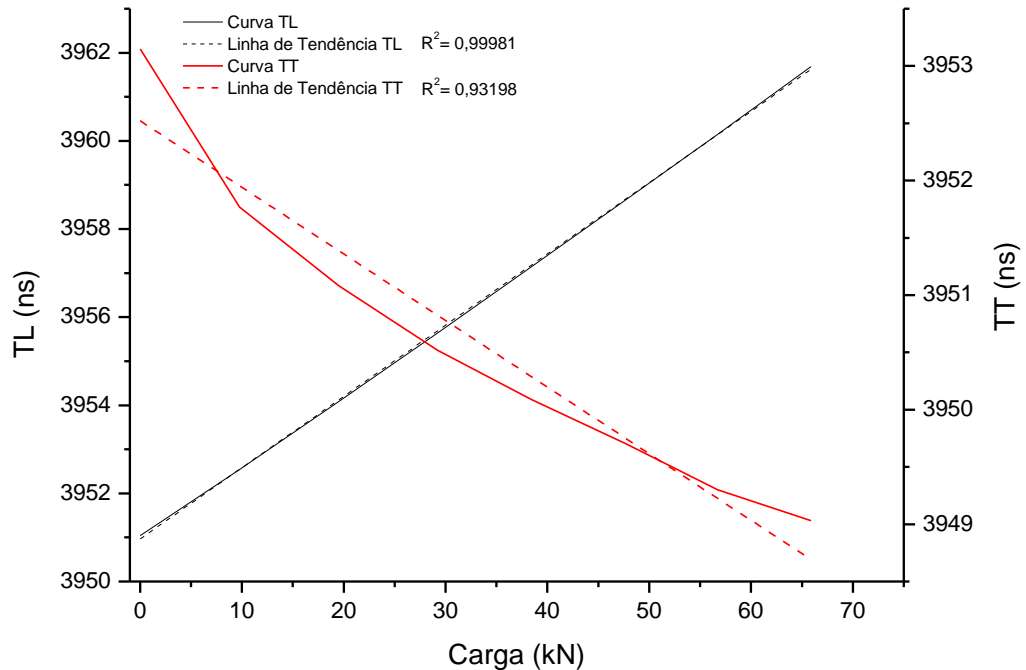
Pela Tabela 7, observa-se que tanto para o boleto, quanto para a alma, a diferença do tempo transversal e longitudinal obtida na ZAC foi menor que 1 ns. Por outro lado, no centro do cordão de solda foi de aproximadamente 18,5 ns. Esses resultados indicam que a ZAC apresenta uma leve anisotropia, diferentemente do centro da solda, onde, provavelmente, a microestrutura complexa dessa região provoque uma anisotropia mais acentuada. Essa diferença da anisotropia entre ZAC e CS geram valores de B0 diferentes, conforme constatado na última coluna da Tabela 7 e que posteriormente serão usados para o cálculo de tensões residuais nessas duas regiões.

4.6 Constantes Acustoelásticas

4.6.1 Constante Acustoelástica da ZAC do Boleto do Trilho T3

No Apêndice A são mostradas as cargas utilizadas para a interrupção durante o ensaio de carregamento e os tempos da onda cisalhante medidos nas direções longitudinal e transversal (TL e TT, respectivamente) à direção do carregamento, assim como a birrefringência acústica. Para o limite de escoamento do boleto, foi empregada uma carga de 126,20 kN, desse valor foi utilizado apenas 52% que gerou a carga de aproximadamente 65 kN, e este foi fracionado de 10 em 10 kN. Esses dados podem ser vistos no Apêndice A e dão origem aos gráficos mostrados nas Figuras 29 e 30.

Figura 29-Gráfico da variação dos tempos nas direções longitudinal e transversal durante o ensaio de tração uniaxial em função das cargas aplicadas para a determinação de CAE na ZAC do boleto.



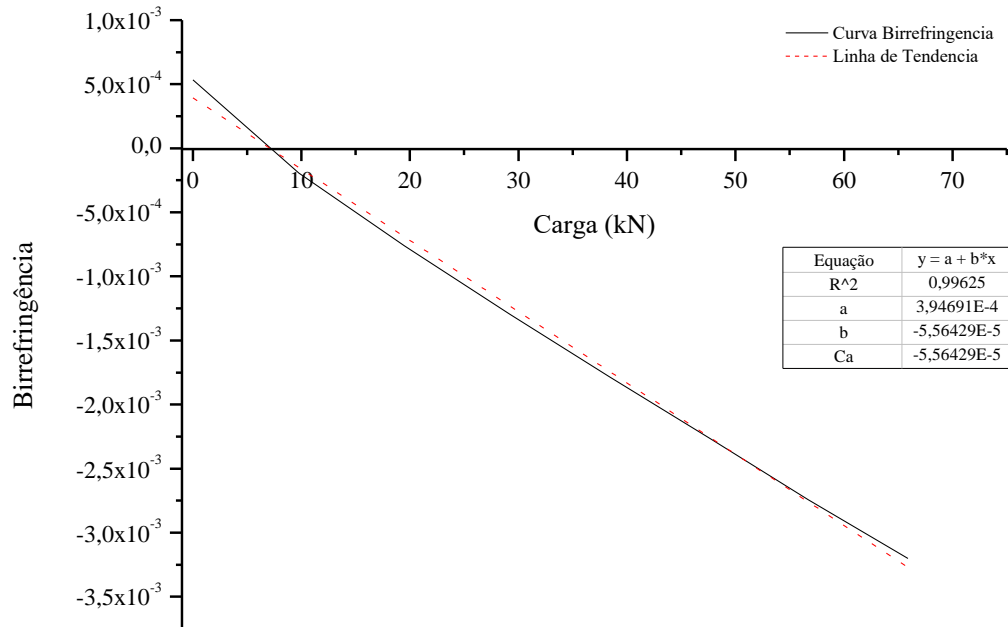
Fonte: Do próprio autor, 2022.

A Figura 29 mostra o comportamento dos tempos longitudinal e transversal à medida que o carregamento progressivo é aplicado. Nesse sentido, verifica-se que ao passo que o carregamento é aumentado linearmente, ocorre um aumento do tempo longitudinal e uma diminuição do tempo transversal, ou seja, quando a onda cisalhante possui direção de polarização paralela ao carregamento, a velocidade sônica diminui. Por outro lado, a polarização da onda transversal ao carregamento, a velocidade sônica aumenta. Esse comportamento é semelhante ao encontrado por Bittencourt (2000) e por Costa (2017).

Na Figura 30 é mostrado o gráfico da birrefringência acústica *versus* a carga, cujo coeficiente angular da reta é a CAE. Esta figura mostra o comportamento linear de B ao longo do ensaio de carregamento realizado, em que se observa uma tendência de diminuição do valor de B com o aumento dos valores da carga. A CAE encontrada para essa região da ZAC foi um valor médio de $-5,56E-05 \text{ (MPa)}^{-1}$, diferente do que se encontra na literatura, pois para muitos aços esse valor compreende a faixa de $-7E-6 \text{ MPa}^{-1}$ a $-9E-6 \text{ MPa}^{-1}$ (HIRAO *et al.*, 1994). Essa faixa de valores de constante acustoelástica sugerida por Hirao e outros, provavelmente, é para o metal de base, onde a microestrutura é mais homogênea do que na ZAC. Entretanto, no trabalho de Szelazek (1992) foi utilizado o método ultrassônico para a determinação de tensão residual em trilhos soldados por centelhamento na ZAC e CS e foram encontrados valores de CAE na mesma escala encontrada neste trabalho. Walaszek, *et al.* (2006), mediu CAE's em

chapas de aço P460 e P265 soldadas com chanfro em X e as constantes acustoelásticas nas regiões de ZAC e CS também apresentaram valores na mesma escala de 10^{-5} .

Figura 30- Gráfico da variação de B para obtenção da CAE na ZAC do boleto.

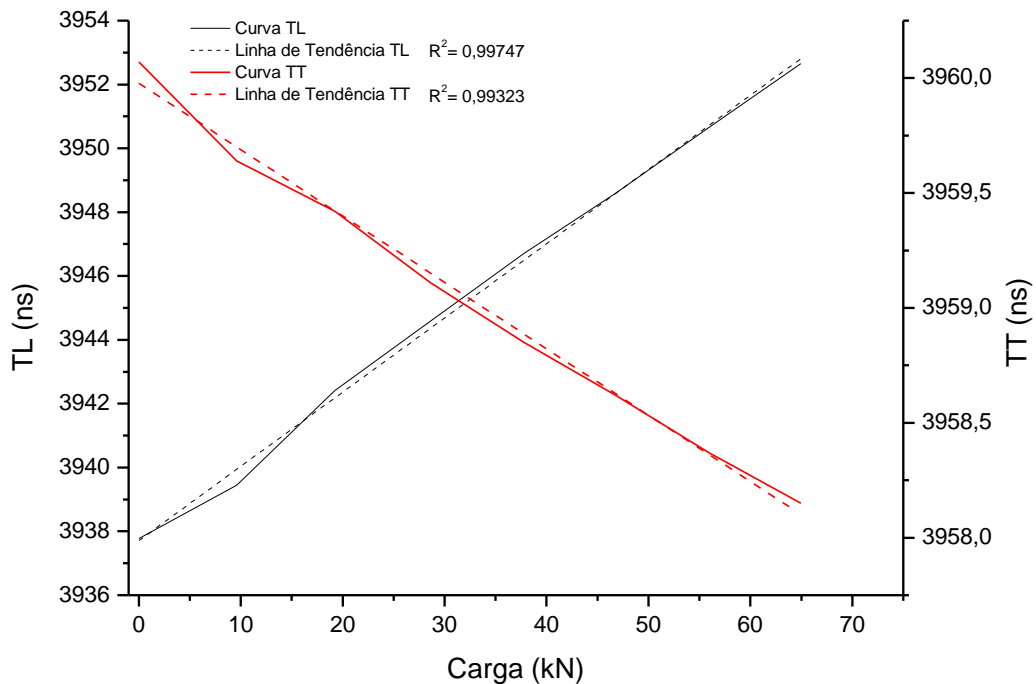


Fonte: Do próprio autor, 2022.

4.6.2 Constante Acustoelástica do CS do Boleto do Trilho T3

O Apêndice A mostra as cargas utilizadas para a interrupção durante o ensaio de carregamento e os tempos de cada corpo de prova medidos nas direções longitudinal e transversal (TL e TT, respectivamente) à direção do carregamento medidos no CS do boleto, assim como, a birrefringência acústica. Desses dados foram gerados os gráficos mostrados nas Figuras 31e 32.

Figura 31- Gráfico da variação dos tempos nas direções longitudinal e transversal durante o ensaio de tração uniaxial em função das cargas aplicadas para a determinação de CAE no CS do boleto.

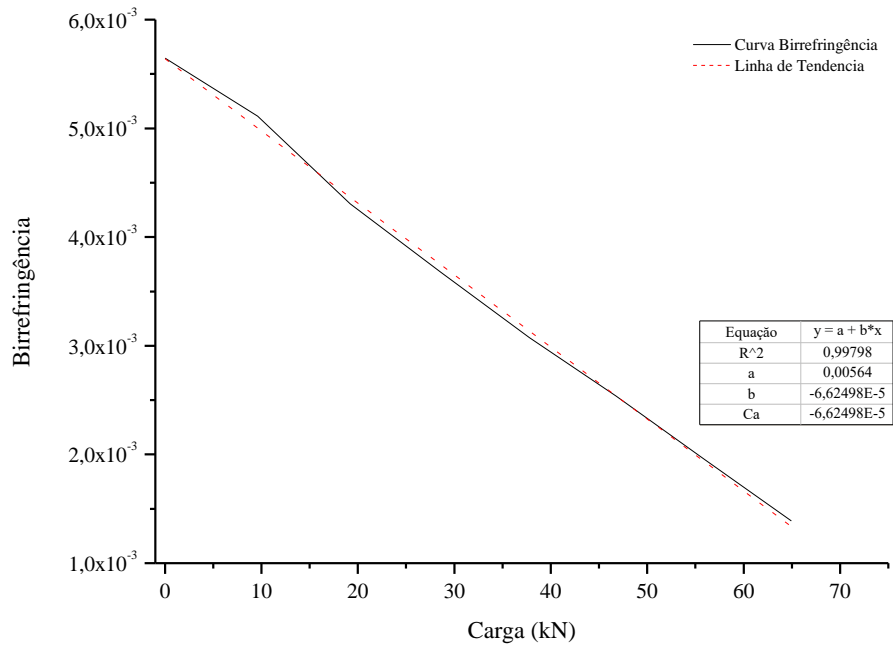


Fonte: Do próprio autor, 2022.

Semelhantemente aos resultados da ZAC no boleto, no CS, o comportamento do tempo medido na direção longitudinal é linearmente crescente com o aumento da carga e decrescente na direção transversal, ou seja, a velocidade sônica diminui com a onda polarizada na direção do carregamento e aumenta com a onda polarizada transversal ao carregamento.

A Figura 32 mostra o comportamento linear de B ao longo do ensaio de carregamento realizado, em que se observa uma tendência de redução do valor de B com o aumento dos valores da carga. A CAE encontrada no CS para o boleto foi um valor médio de $-6,62E-05$ $(\text{MPa})^{-1}$, e está na mesma escala da encontrada na ZAC, 10^{-5} , portanto, mantendo o mesmo comportamento.

Figura 32- Gráfico da variação de B para obtenção da CAE no CS do boleto.

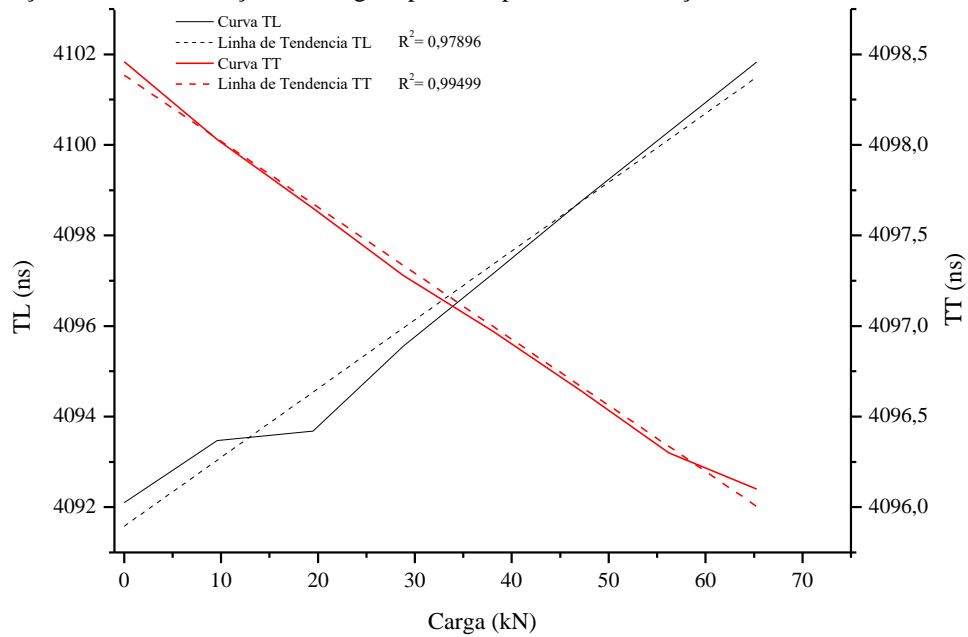


Fonte: Do próprio autor, 2022.

4.6.3 Constante Acustoelástica da ZAC da Alma do Trilho T3

O Apêndice B mostra as cargas utilizadas para a interrupção durante o ensaio de carregamento e os tempos de cada corpo de prova medidos nas direções longitudinal e transversal (TL e TT, respectivamente) à direção do carregamento medidos na ZAC da alma, assim como, a birrefringência acústica. Para o limite de escoamento da alma, foi empregada uma carga de 118,4 kN, desse valor foi utilizado apenas 55% que gerou a carga de aproximadamente 65 kN, e este foi fracionado de 10 em 10 kN. Esses dados podem ser vistos no Apêndice B a partir deles foram gerados os gráficos das Figuras 33 e 34.

Figura 33- Gráfico da variação dos tempos nas direções longitudinal e transversal durante o ensaio de tração uniaxial em função das cargas aplicadas para a determinação de CAE na ZAC da alma.

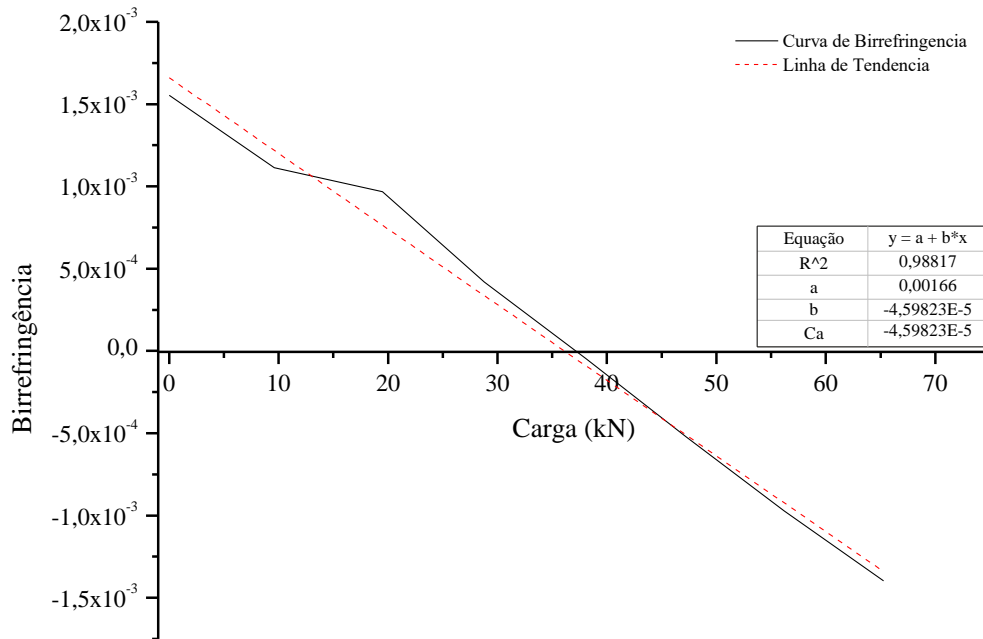


Fonte: Do próprio autor, 2022.

A Figura 33 mostra que o comportamento do tempo medido na direção longitudinal é linearmente crescente (redução de velocidade) com o aumento da carga e decrescente na direção transversal (velocidade crescente). Por outro lado, mostra também que diferentemente do boleto, na ZAC da alma ocorreu um aumento do tempo de propagação da onda. Isso significa que a velocidade da onda diminuiu nessa região, provavelmente, causado pela microestrutura.

A Figura 34 mostra o comportamento linear de B ao longo do ensaio de carregamento realizado, em que se observa uma tendência de diminuição do valor de B com o aumento dos valores da carga. A CAE encontrada para a ZAC da alma do trilho foi de $-4,59E-05 \text{ (MPa)}^{-1}$, cuja escala, 10^{-5} , está mantendo um comportamento semelhante aos encontrados na ZAC e CS do boleto.

Figura 34- Gráfico da variação de birrefringência x carga para obtenção do CAE na ZAC da alma.

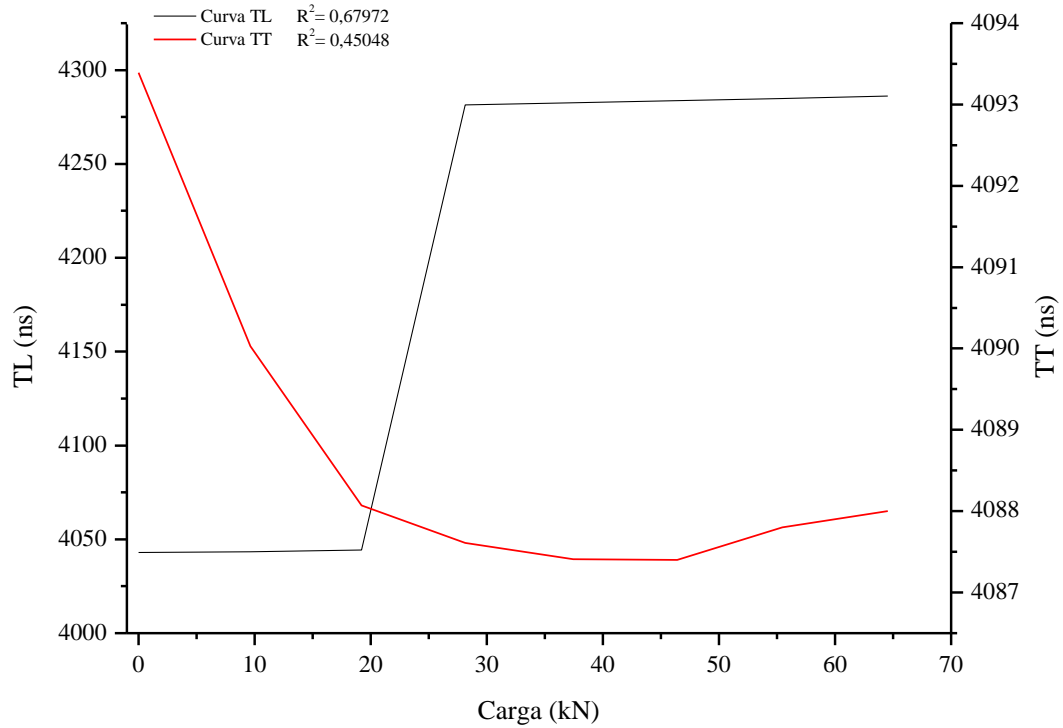


Fonte: Do próprio autor, 2022.

4.6.4 Constante Acustoelástica do CS da Alma do Trilho T3

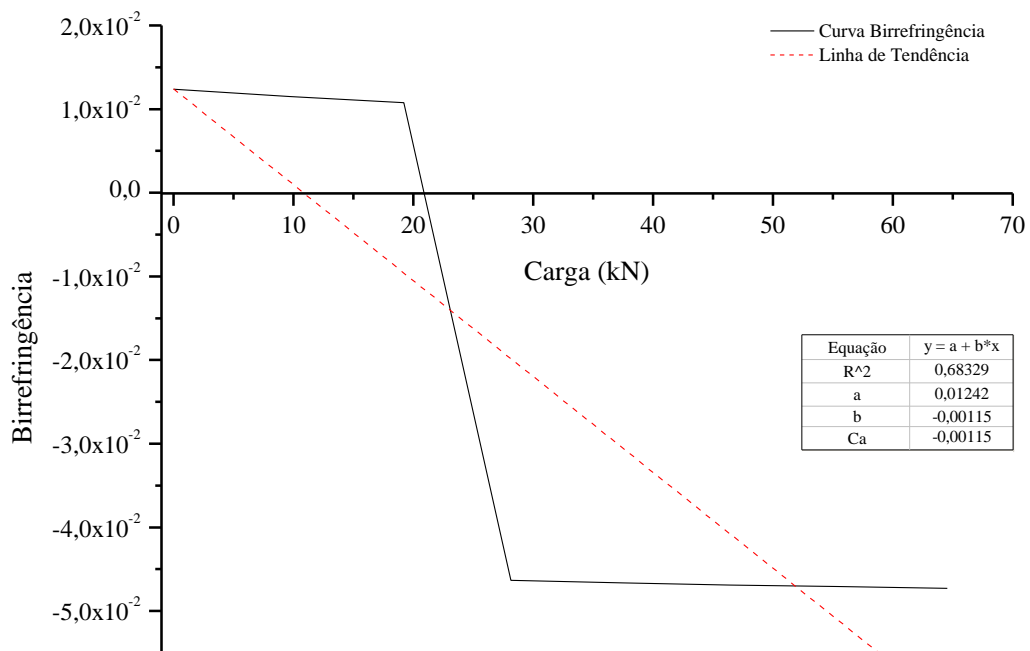
O Apêndice B mostra as cargas utilizadas para a interrupção durante o ensaio de carregamento e os tempos de cada corpo de prova medidos nas direções longitudinal e transversal (TL e TT, respectivamente) à direção do carregamento medidos no CS da alma, assim como, a birrefringência acústica. Desses dados foram geradas as Figuras 35 e 36. Observa-se pelos gráficos da Figura 35 que os tempos medidos nessa região da alma destoaram completamente dos demais tempos medidos no trilho T3, conseqüentemente, a birrefringência em função da carga (Figura 36) apresentou o mesmo comportamento, ou seja, completamente fora de qualquer padrão de análise, como pode ser confirmado pelo valor de CAE, $-1,15E-03$. **Assim, com esse valor, não foi possível medir a tensão residual no centro da solda na alma do trilho.**

Figura 35- Gráfico da variação dos tempos nas direções longitudinal e transversal durante o ensaio de tração uniaxial em função das cargas aplicadas para a determinação de CAE no CS da alma.



Fonte: Do próprio autor, 2022.

Figura 36- Gráfico da variação de birrefringência x carga para obtenção do CA no CS da alma.



Fonte: Do próprio autor, 2022.

4.7 Tensão Residual no Trilho

Um dos objetivos deste trabalho foi determinar a tensão residual nas regiões da ZAC e CS, do boleto e alma de trilhos ferroviários submetidos à tratamentos térmicos no boleto. Nesse contexto, a partir dos valores de B_0 , CAE determinados no trilho T3 e de B final medidos nessas duas regiões (ZAC e CS) e com o uso da Equação 7 foi determinada a diferença de tensão residual ($\sigma_1 - \sigma_2$) no plano z-y dessas regiões dos trilhos T1 e T3.

4.7.1 Tensão Residual nos Trilhos T1 e T3

A Tabela 8 e Tabela 9, mostram a diferença de tensão residual (última coluna) das regiões da ZAC e CS do boleto e somente da ZAC para a alma dos trilhos T1 e T3. Conforme descrito na seção 4.6.4, a tensão residual no CS da alma não foi calculada para nenhum tipo de trilho. **É importante ressaltar que os resultados (B_f , B_0 , CAE e $(\sigma_1 - \sigma_2)$) deste trabalho foram obtidos somente em uma amostra, portanto, não sendo possível aplicação de análises estatísticas nos mesmos, como média e desvio padrão, por exemplo.**

Tabela 8- Diferença de tensão residual do trilho T1 (resfriado a 1bar).

BOLETO				
Região	B_f	B_0	C_A (MPa)⁻¹	$(\sigma_1 - \sigma_2)$ MPa
ZAC	1,5308E-03	1,7603E-04	-5,5643E-05	-24,3
CS	4,1090E-03	4,4069E-03	-6,6250E-05	4,5
ALMA				
Região	B_f	B_0	C_A (MPa)⁻¹	$(\sigma_1 - \sigma_2)$ MPa
ZAC	1,6089E-03	2,0383E-04	-4,5982E-05	-30,6

Fonte: (Do próprio autor, 2022).

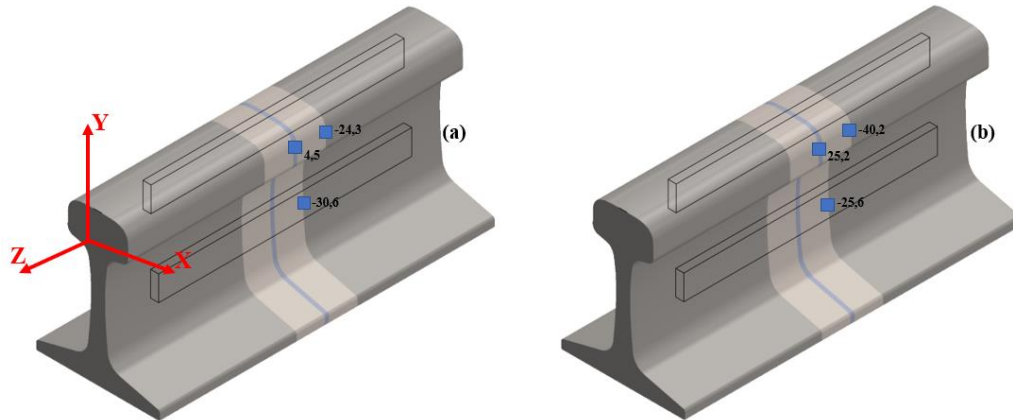
Tabela 9- diferença de tensão residual do trilho T3 (resfriado a 3bar).

BOLETO				
Região	B _f	B ₀	C _A (MPa) ⁻¹	($\sigma_1 - \sigma_2$) MPa
ZAC	2,4234E-03	1,7603E-04	-5,5643E-05	-40,4
CS	2,7388E-03	4,4069E-03	-6,6250E-05	25,2
ALMA				
Região	B _f	B ₀	C _A (MPa) ⁻¹	($\sigma_1 - \sigma_2$) MPa
ZAC	1,3801E-03	2,0383E-04	-4,5982E-05	-25,6

Fonte: (Do próprio autor, 2022).

Para uma melhor visualização, interpretação e análise dos resultados de tensões residuais das Tabelas 8 e 9 foi gerada a Figura 37, que ilustra a posição dessas tensões, em MPa, nos trilhos T1 e T3.

Figura 37- (a) Diferença de tensão residual para o trilho T1. (b) Diferença de tensão residual para o trilho T3. (Plano de tensão z-y).



Fonte: Do próprio autor, 2022.

A Figura 37 mostra que a diferença de tensões residuais na região de ZAC do boleto para os dois trilhos soldados por centelhamento são compressivas, assim como, na ZAC da alma, sendo as magnitudes máximas de -40,4 MPa e -30,6 MPa. No CS a natureza das tensões foi trativa, para o boleto nos dois trilhos, com magnitudes máximas de 25,2 MPa e 4,5 MPa. No trabalho de Oliveira *et al.*, (2020), foi medido tensão residual por difração de raios X na região lateral do boleto e foi encontrada elevada tensão trativa (200 MPa) no CS e baixa magnitude (menos de 10 MPa) de tensão compressiva na ZAC, esta última semelhante às

encontradas neste trabalho. Uma hipótese para os valores obtidos neste trabalho é que, como encontrado na literatura, devido aos valores de tensão vertical serem significativos e os transversais e longitudinais também, nas regiões de solda, pode estar havendo uma subtração que resulta nos valores de baixa magnitude encontrados. Muitas literaturas (Mansouri e Monshi, 2004; Mansouri, Monshi, Hadavinia, 2004; Tawfik et al., 2006; Tawfik et al., 2008; Cal et al., 2011; Porcaro et al., 2019; Ghazanfari e Tehrani, 2019) mostram que após a soldagem, os trilhos apresentam um perfil de distribuição de tensões residuais onde tensões compressivas estão presentes no boleto e trativas na alma, o que não foi constatado neste trabalho.

É importante frisar alguns aspectos que podem ter ocorridos na obtenção dos resultados de tensão deste trabalho. Primeiro, a medição de tensão residual por birrefringência acústica no cordão de solda (ZAC e CS), cuja microestrutura é bastante complexa, pode ser um fator limitante para a aplicação da técnica e segundo, a quantidade de corpos de prova utilizados para a obtenção de B0 e CAE, que foi apenas uma unidade (devido à problemas com o equipamento) pode ter sido insuficiente para obter resultados mais precisos. O estudo sobre tensões residuais é complexo, já que inúmeros fatores interferem na geração de resultados, como, transformação metalúrgica, resfriamento após a soldagem, aporte térmico do processo, parâmetros de soldagem, restrição da junta etc. Além disso, a técnica utilizada para medição também influencia bastante nos resultados. A resolução, profundidade e o tipo de método utilizado podem gerar resultados bem distintos para cada metodologia. São pontos que precisam ser analisados criteriosamente.

Contudo, as CAE's obtidas na ZAC e CS do boleto e ZAC da alma foram constantes, e portanto, esses resultados podem estar de acordo, porém, é interessante fazer mais ensaios utilizando trilhos de outros fabricantes e se for mantido essa constância pode-se dizer que a tensão encontrada neste trabalho está correta, mas por esta técnica, e daí a importância de separar as tensões e comparar com outros métodos como DRX e furo cego.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho que teve como objetivo determinar as constantes acustoelásticas e a tensão residual do trilho ferroviário, do tipo *Super Premium*, nas regiões da ZAC e CS do boleto e alma, e apresentam as seguintes conclusões:

1. A largura da ZAC tanto do boleto quanto para a alma dos trilhos T1 e T3 são semelhantes, ou seja, o tratamento térmico realizado no boleto após a soldagem por centelhamento não influenciou de forma significativa nesse parâmetro.
2. A microestrutura encontrada mostrou as cinco regiões existentes após a soldagem: linha de fusão, recristalização e crescimento dos grãos; recristalização (refino de grão) e final da ZAC (interface ZAC/MB), com esferoidização da cementita.
3. As propriedades mecânicas de limite de escoamento e resistência mecânica apresentaram valores dentro de normas, cujo limite de escoamento foi utilizado para obtenção das CAE's.
4. A B0 e CAE na ZAC e CS após tratamento térmico para alívio de tensões foram determinadas para o boleto e alma. O CS da alma do trilho apresentou valor totalmente fora do padrão de análise.
5. As tensões residuais determinadas no boleto por birrefringência acústica nas regiões da ZAC e CS nos trilhos T1 e T3 apresentaram características compressivas e trativas, porém, de magnitude baixa comparada aos resultados disponíveis na literatura. A ZAC da alma para os dois trilhos apresentou tensões compressivas.
6. Devido aos valores de tensão vertical serem significativos nas regiões de solda e os transversais e longitudinais também, pode estar havendo uma subtração que talvez esteja gerando valores de tensão residual baixas nas regiões em estudo.
7. Em busca de resultados por B e CAE que acompanhe os da literatura há a necessidade de mais experimentos para a obtenção de B0, CAE e B. Assim como, a separação de tensões, que permitirá verificar a natureza e magnitude das tensões de forma individual por direção de eixo medido.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados apresentados e de algumas observações deste trabalho, novas oportunidades de pesquisas e desenvolvimentos dentro desta área podem ser sugeridas, tais como:

- Determinação de B_0 , CAE e B da ZAC e CS do boleto e alma de trilhos de outros fabricantes;

- Determinação de tensão residual por birrefringência acústica do boleto e alma de trilhos de outros fabricantes;

- Fazer a separação de tensões na ZAC e CS de trilhos pela técnica ultrassônica e comparar com diferentes técnicas (difração de raios x e furo cego).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, Lucas Gabriel de Sousa. **Determinação das constantes acustoelásticas de trilho ferroviário**. 2019. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Pará.

ANDREUCCI, R. **Ensaio por ultrassom: Aspectos básicos**. Associação brasileira de ensaios não destrutivos, 2014. Disponível em: [http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/US_maio-2014%20\(1\).pdf](http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/US_maio-2014%20(1).pdf). Acesso em: 28 de jan.2022.

ASM Handbook. **Welding, Brazing and Soldering**. 9 edição. Massachusetts: ASM International 1983. v. 6 . 2873 p.

AWS(American Welding Society). **AWS A30M/A3.0 - Standard Welding Terms and Definitions**. 12 edição. Miami: AWS, 2010.147 p.

BAURI, Luiz Felipe. **Soldagem de topo com centelhamento de trilhos ferroviários: caracterização microestrutural, propriedades mecânicas e desgaste**. 2020. 147 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Escola Politécnica de Universidade de São Paulo.

BITTENCOURT, Marcelo de Siqueira Queiroz. **Desenvolvimento de um sistema de medida de tempo decorrido da onda ultra-sônica e análise do estado de tensões em materiais metálicos pela técnica da birrefringência acústica**. 2000. 123 f. Dissertação (Doutorado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Universidade Federal do Rio de Janeiro.

BOND, Leonard. J.; AHMAD, Aquil. **Fundamentals of Ultrasonic Nondestructiv. Nondestructiv Evaluation of Materials**.v. 17, p. 231 - 277, 2018.

BOUZAN, Beatriz Miranda. **Efeito das variáveis de processo na qualidade de soldas aluminotermicas de trilhos ferroviarios**. 2016. 87 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Juiz de Fora.

CALLISTER JUNIOR, William. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 8 edição. Rio de Janeiro: LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora LTDA, 2012. 809 p.

CAL, Zhipeng et al. Residual stresses in flash butt welded rail. **Transactions of JWRI**, v. 40, n. 1, p. 79-87, 2011.

COSTA, Ednelson da Silva. **Avaliação De Tensões Residuais Em Soldas Gmaw E Gmaw-Cw Por Birrefringência Acústica E Difração De Raio X**. 2017. 235 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais). Universidade Federal do Pará.

DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes). **Glossário dos Termos Ferroviários**. 2013, p. 70.

DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes). **PIMs PIM 01 - Trilho para linha férrea: Procedimentos de Inspeção de Materiais** –. 2015. 59 p.

ESTRADA de Ferro Carajás é considerada ferrovia mais eficiente do país. **Vale, 2013**. Disponível em: < <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/estrada-de-ferro-carajas-e-considerada-ferrovia-mais-eficiente-do-pais.aspx>>. Acesso em: 28 de jan. 2022.

ESVELD, Coenraad. **Modern Railway Track**. 2 edição. Inglaterra: MRT-Productions, 2001. 87 p.

FRAGA, Ricardo dos Santos. **Avaliação da profundidade de penetração de ondas longitudinais criticamente refratadas**. 2007. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas.

FUJII, Mitsuru; NAKANOWATARI, Hiroaki; NARIAI, Kiyoshi. Rail flash-butt welding technology. **JFE Technical Report**, v. 20, n. 20, p. 159–163, 2015.

GHAZANFARI, Mohsen; TEHRANI, Parisa Hosseini. Experimental and numerical investigation of the characteristics of flash-butt joints used in continuously welded rails. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, v. 234, n. 1, p. 65-79, 2020.

GODEFROID, L. B. et al. Failure analysis of recurrent cases of fatigue fracture in flash butt welded rails. **Engineering Failure Analysis**, v. 58, p. 407–416, 2015.

HINTEREGGER, E. **Eigenspannungen e verformungen in schienen nach dem walzen vor dem richten**. Tese PhD, Montanuniversitat Leoben, 1990 (in German)

JAVADI, Y. et al. Comparison Between Using Longitudinal and Shear Waves in Ultrasonic Stress Measurement to Investigate the Effect of Post-Weld Heat-Treatment on Welding Residual Stresses. **Research in Nondestructive Evaluation**, v. 28, n. 2, p. 101–122, 2017.

KLINCEVICIUS, M. G. Y. Estudo de propriedades, de tensões e do comportamento mecânico de lastros ferroviários - Cap 2. Elementos e comportamento mecânico das vias permanentes. p.

12–39, 2010.

MANSOURI, H.; MONSHI, A. Microstructure and residual stress variations in weld zone of flash-butt welded railroads. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 9, n. 3, p. 237–245, 2004.

MANSOURI, H.; MONSHI, A.; HADAVINIA, H. Effect of local induction heat treatment on the induced residual stresses in the web region of a welded rail. **The Journal of Strain Analysis for Engineering Design**, v. 39, n. 3, p. 271-283, 2004.

MINICUCCI, Domingos José. **Avaliação de Tensões por Ultra-som no Aro de Rodas Ferroviárias Forjadas Novas – Classe C**. 2003. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica/ Projeto Mecânico). Universidade Estadual de Campinas.

MOREIRA, Luiza Pessoa. **Efeito de Características Microestruturais na Tenacidade à Fratura e no Crescimento de Trinca por Fadiga de Aços Perlíticos de Aplicação Ferroviária**. 2015. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Ouro Preto.

NISHIKAWA, Lucas Pintol. **Soldagem De Trilhos Ferroviários Perlíticos : Origem Das Microestruturas Soldagem De Trilhos Ferroviários Perlíticos** : 2018. 83 f. Dissertação (Mestrado em em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

NOVA legislação para ferrovias busca atrair investimentos privados para o setor. **Governo do Brasil**, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/transito-e-transportes/2021/09/nova-legislacao-para-ferrovias-busca-atrair-investimentos-privados-para-o-setor>>. Acesso em: 28 de jan. 2022.

OLIVEIRA, Bras Senra de et al. X-Ray Diffraction Analysis of Residual Stresses in the Premium Rails Welded by Flash Butt Process. **Soldagem & Inspeção**, v. 25, 2020.

PORCARO, Rodrigo Rangel et al. Microestrutura e propriedades mecânicas de um aço para trilhos ferroviários soldado por centelhamento. **Soldagem e Inspecao**, v. 22, n. 1, p. 59–71, 2017.

PORCARO, Rodrigo Rangel et al. Simulação do processo de soldagem elétrica por centelhamento de um aço para trilhos ferroviários. Parte 1: análise de tensões residuais via elementos finitos. **Soldagem & Inspeção**, v. 24, 2019.

QOZAM, H *et al.* Ultrasonic Stress Measurement in Welded Component by Using Lcr Waves:

Analysis of the Microstructure Effect. **Materials Science**. v. 524-525, p.453-458, 2006.

ROSSINI, N. S. et al. Methods of measuring residual stresses in components. **Materials and Design**, v. 35, p. 572–588, 2012.

SANTOS, Cleudiane Soares. **Proposta de Sistema Automatizado para Medição de Tensão Utilizando o Efeito Acustoelástico**. 2013. 245 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica/ Área dos sólidos e projeto mecânico). Universidade Estadual de Campinas.

SCHAJER, Gary. S. **Practical Residual Stress Measurement Methods**. 1 edição. Vancouver: John Wiley & Sons Ltd. 2013. 320 p.

SCHNEIDER, Eduardo Luis. **Análise da vida remanescente de trilhos com defeitos transversais desgastados em serviço**. 2005. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Studies concerning the measurement and improvement of the level of residual stresses, ERRI D 156/Report 4, European Rail Research Institute, Utrecht, 1987.

SZELAZEK, J. Ultrasonic measurement of thermal stresses in continuously welded rails. **NDT & E international**. v. 25, n. 2. 1992.

TAWFIK, David et al. Verification of residual stresses in flash-butt-weld rails using neutron diffraction. **Physica B: Condensed Matter**, v. 385, p. 894-896, 2006.

TAWFIK, David; MUTTON, Peter John; CHIU, Wing Kong. Experimental and numerical investigations: Alleviating tensile residual stresses in flash-butt welds by localised rapid post-weld heat treatment. **Journal of materials processing technology**, v. 196, n. 1-3, p. 279-291, 2008.

VIANA, Thiago Gomes. **Estudo comparativo do comportamento de aços (trilhos) premium na tenacidade à fratura e na propagação de trinca por fadiga, de aplicação ferroviária**. 2015. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Universidade Estadual de Ouro Preto.

VICENTE, Bruno Sabadini. **Proposta de especificação de procedimento de soldagem por centelhamento de trilhos ferroviários**. 2017. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Juiz de Fora.

VILELA, Tamara Caroline Guimarães. **Efeito da razão R entre tensões e de sobrecargas na resistência ao crescimento de trinca por fadiga de dois aços perlíticos de aplicação em trilhos ferroviários**. 2019. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais).

Universidade Estadual de Ouro Preto.

WITHERS, P. J. Residual stress and its role in failure. **Reports on Progress in Physics**, v. 70, n. 12, p. 2211–2264, 2007.

APÊNDICE A- Tabelas com os tempos de percurso da onda cisalhante para a determinação da constante acustoelástica (CAE) no boleto do trilho

As Tabelas A1 e A2 apresentam os valores de tempo de percurso de onda cisalhante polarizada no sentido longitudinal e transversal com as respectivas cargas aplicadas no momento da medição do corpo de prova do boleto do trilho. A partir desses tempos obtidos calculou – se as birrefringências para cada tempo através da Equação 4.

Tabela A1- Tempo e birrefringências das respectivas cargas aplicadas na ZAC do boleto do trilho.

Carga (kN)	TL (ns)	TT (ns)	Birrefringência
0	3951,04	3953,15	5,3389E-04
9,76	3952,54	3951,77	-1,9356E-04
19,51	3954,09	3951,08	-7,6026E-04
29,23	3955,64	3950,52	-1,2951E-03
38,41	3957,14	3950,09	-1,7831E-03
47,74	3958,67	3949,70	-2,2684E-03
56,71	3960,15	3949,30	-2,7448E-03
65,9	3961,69	3949,03	-3,2019E-03
Média	3956,37	3950,58	-1,4641E-03

Fonte: Do próprio autor, 2022.

Tabela A2- Tempos birrefringências das respectivas cargas aplicadas no CS do boleto do trilho.

Carga (kN)	TL (ns)	TT (ns)	Birrefringência
0	3937,77	3960,07	5,6471E-03
9,62	3939,45	3959,64	5,1132E-03
19,22	3942,41	3959,42	4,3066E-03
28,61	3944,58	3959,11	3,6767E-03
37,78	3946,70	3958,85	3,0737E-03
46,77	3948,59	3958,62	2,5369E-03
55,92	3950,65	3958,37	1,9534E-03
64,94	3952,65	3958,15	1,3892E-03
Média	3945,35	3959,03	3,4621E-03

Fonte: Do próprio autor, 2022.

APÊNDICE B- Tabelas com os tempos de percurso da onda cisalhante para a determinação da constante acustoelástica (CAE) na alma do trilho

As Tabelas B1 e B2 apresentam os valores de tempo da onda cisalhante polarizada no sentido longitudinal e transversal com as respectivas cargas aplicadas no momento do ensaio do corpo de prova da alma do trilho. A cada carga e tempos obtidos foi calculado a birrefringência acústica através da Equação 4.

Tabela B1- Tempos birrefringências das respectivas cargas aplicadas na ZAC da alma do trilho.

Carga (kN)	TL (ns)	TT (ns)	Birrefringência
0	4092,10	4098,46	1,5530E-03
9,61	4093,47	4098,03	1,1133E-03
19,5	4093,68	4097,65	9,6809E-04
28,8	4095,55	4097,28	4,1987E-04
38,08	4097,16	4096,97	-4,7595E-05
47,22	4098,77	4096,64	-5,2102E-04
56,2	4100,29	4096,30	-9,7357E-04
65,29	4101,83	4096,10	-1,3979E-03
Média	4096,60	4097,17	1,3927E-04

Fonte: Do próprio autor, 2022.

Tabela B2- Tempos birrefringências das respectivas cargas aplicadas no CS da alma do trilho.

Carga (kN)	TL (ns)	TT (ns)	Birrefringência
0	4042,98	4093,39	1,2391E-02
9,63	4043,31	4090,03	1,1487E-02
19,2	4044,23	4088,07	1,0784E-02
28,15	4281,44	4087,61	-4,6321E-02
37,43	4282,56	4087,41	-4,6632E-02
46,41	4283,63	4087,4	-4,6883E-02
55,47	4284,82	4087,8	-4,7062E-02
64,55	4286,09	4088	-4,7310E-02
Média	4193,63	4088,71	-2,4943E-02

Fonte: Do próprio autor, 2022.