UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

INFLUÊNCIA DA TAXA DE RESFRIAMENTO NAS TENSÕES RESIDUAIS DE SOLDA POR CENTELHAMENTO DE TRILHO FERROVIÁRIO

IURY KLAY PERES BARILE

BELÉM – PA
2021

IURY KLAY PERES BARILE

INFLUÊNCIA DA TAXA DE RESFRIAMENTO NAS TENSÕES RESIDUAIS DE SOLDA POR CENTELHAMENTO DE TRILHO FERROVIÁRIO

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará como requisito para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Industrial.

Orientador: Profº. Dr. Paulo Cordeiro Machado
Co Orientado: Profº. Dr. Ednelson da Silva Costa

Belém – PA
2021

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)

B252i Barile, Iury KlayPeres.
INFLUÊNCIA DA TAXA DE RESFRIAMENTO NAS TENSÕES RESIDUAIS DE SOLDA POR CENTELHAMENTO DE TRILHO FERROVIÁRIO / Iury KlayPeres Barile. — 2021.
XCII f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Paulo Cordeiro Machado
Coorientador(a): Prof. Dr. Ednelson da Silva Costa
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Belém, 2021.

1. Tensões residuais. 2. Trilhos Ferroviarios . 3. Solda por centelhamento. I. Título.

CDD 621.7

AGRADECIMENTOS

Gostaria de deixar meus agradecimentos a minha família pelo apoio, minha mãe Sandra Peres e meu pai Kennedy Barile, gostaria de agradecer todos os ensinamentos, paciência e colaboração.

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Machado pela oportunidade, ensinamentos, experiencia e paciência, por poder proporcionar todo uma estrutura e condições de poder realizar um excelente trabalho da melhor maneira possível durante todo esse período.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Ednelson Costa por toda ajuda prestada durante todos os experimentos, ensinamentos e colaboração como um todo.

Ao Prof. Dr Eduardo Braga por todo o apoio e suporte no Laboratório de caracterização de materiais metálicos (LCAM), ao Prof. Dr. Leonardo Dantas pelo apoio e colaboração com os ensinamentos para operação da técnica de furo cego.

Aos amigos que fiz durante esse período como colaborador do projeto cátedra roda trilho e membro do LCAM, Lucas Albuquerque, Paola Oliveira, Wendel Taufner, Dalmir Matos, Janaina Raiane, Letícia Assunção, Msc. Sammy Pompeu, Msc Matheus Santos, Msc. Danyella Cardoso, Dr. Tarcio Cabral, Dr. Cristian Loyaza, que sempre se ajudaram e deram apoio durante o período do mestrado.

Aos integrantes da VALE S.A., Wagner Flores (engenheiro metalúrgico do estaleiro de solda de São Luís-MA), Ricardo Souza (Engenheira São Luís), Jun Kina (Centro de Excelência Vitória-ES), Luciano Oliveira (Centro de Excelência Vitória-ES) e André Franca (Inovação e Tecnologia de Ferrosos - Vitória-ES).

“Quando o mundo te empurra, você só tem que se levantar e empurrar de volta. Ninguém vai te salvar se você começar a murmurar desculpas”

One Piece

“Um é tudo e tudo é um”

Fullmetal Alchemist

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGEI/UFPA como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Industrial (Me. Eng.).

INFLUÊNCIA DA TAXA DE RESFRIAMENTO NAS TENSÕES RESIDUAIS DE SOLDA POR CENTELHAMENTO DE TRILHO FERROVIÁRIO

IURY KLAY PERES BARILE
Orientador: Prof. Dr. Paulo Cordeiro Machado

O processo de fabricação e soldagem de trilhos ferroviários induzem tensões residuais que podem atuar de forma deletéria à integridade estrutural destes componentes, principalmente nos casos em que as tensões são trativas, as quais podem favorecer a nucleação e propagação de trincas que, poderão causar a falha prematura dos trilhos. Este trabalho tem como objetivo avaliar as tensões residuais de trilhos soldados por centelhamento com e sem ciclo de resfriamento por ar forçado no boleto pós soldagem. As técnicas de medição de tensões residuais utilizadas foram as de ultrassom com ondas cisalhantes para análise do metal de base e furo cego para o centro da solda e zona afetada pelo calor (ZAC). As técnicas apresentaram resultados similares aos encontrados na literatura, para o boleto foram encontradas tensões trativas na região do metal de base, e tensões compressivas na ZAC e centro da solda do boleto. Na alma foram encontradas tensões trativas na ZAC e centro da solda.

Palavras chaves: Tensões residuais, solda por centelhamento, trilho ferroviário.

Abstract of the Dissertation presented to PPGEI/UFPA as part of the necessary requirements to obtain the Master's degree in Industrial Engineering (Msc. Eng.).

INFLUENCE OF THE COOLING RATE ON RESIDUAL STRESS OF FLASH BUTT WELDING IN RAILWAY RAIL

IURY KLAY PERES BARILE
Orientador: Prof. Dr. Paulo Cordeiro Machado

The process of manufacturing and welding in rail induces residual stresses that can act in a deleterious way to the structural integrity of this component, especially in cases where the tractive stresses, can favor the nucleation and propagation of cracks, may cause premature rail failure. The objective this work is evaluate the residual stresses of rails welded by flash butt welding (FBW) with and without heat treatment post welding with forced air cooling. The techniques measurement of residual stress ultrasound using shear waves in the metal base and hole Drilling in the center of the weld and in the zone thermally affected (HAZ). The techniques presented similar results to those found in the literature, for the head, tensile stresses were found in the base metal region, and compressive stresses in the HAZ and center of the weld. In the web, tensile stresses were found at the HAZ and the center of the weld.

Key words: Residual stresses, flash butt welding, rail.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Trilho fraturado por propagação de trinca. 15
Figura 2. Gráfico do tempo de manutenção de cada componente da via permanente. 15
Figura 3. Componentes da via permanente. 18
Figura 4. Dimensões do trilho TR68 19
Figura 5. Processo de soldagem por centelhamento. 21
Figura 6. Microestrutura em MEV do centro e 10 mm abaixo da superfície do boleto após a soldagem. (a) Metal Base, 18 mm da linha central; (b) Transformação Parcial, 12mm da linha central; (c) Refino de Grão, 8 mm da linha central; (d) Crescimento de grão, 2 mm da linha central. Aumento original de 20000x (a,d,c) e 15000x (b). 22
Figura 7. Formato da microestrutura no metal de base e região soldada. 23
Figura 8. Esforços atuantes no trilho durante o contato roda trilho 24
Figura 9. Interação dos fatores que induzem tensões residuais 25
Figura 10. Formas de gerar tensões residuais macro e microestruturais. 26
Figura 11. Roseto com extensômetros. 28
Figura 12. Tipos de Rosetas. 28
Figura 13. Extensômetro de resistência elétrica. 29
Figura 14. Geometria do furo e tensões residuais uniformes em (a) e não uniformes em (b).. 29
Figura 15. Faixa de frequência para diferentes níveis de sons 32
Figura 16. Transdutores piezoelétricos 33
Figura 17. Transdutores piezelétricos a) técnica de pulso eco b) técnica de transparência. 34
Figura 18. Comportamento da onda cisalhante. 35
Figura 19. Comportamento da onda Longitudinal. 36
Figura 20. Deformação na superfície do boleto na região soldada. 38
Figura 21. Fratura ocasionada pelo agravamento de *head shecks.* 38
Figura 22. Corrugação na superfície do boleto. 39
Figura 23. Procedimento de análise por furo cego na base do patim. 40
Figura 24. Trilhos após o corte transversal. 40
Figura 25. Tensões longitudinais na metade de uma seção transversal do trilho. 41
Figura 26. Trilho no desempeno vertical. 42
Figura 27. a) Modelagem de elementos finitos das tensões residuais do trilho após o processo de endireitamento, b) comparação dos dados recebidos com outros autores. 42
Figura 28. Tensões adquiridas na superfície do boleto após em certo tempo de serviço 43
Figura 29. Distribuição de tensões no trilho após a soldagem 44

Figura 30. Macrografia da Secção da largura da ZAC. 44
Figura 31. Tensões verticais na alma para amostras com e sem estreitamento e aplicação do tratamento térmico de alívio de tensões. 45
Figura 32. Efeito da variação da ZAC sob as tensões residuais a) verticais b) longitudinais. . 45
Figura 33. Distribuição de tensões após tratamento de resfriamento pós soldagem a) por ar e b) por água 46
Figura 34. Fluxograma do processamento das amostras 47
Figura 35. a) Máquina de soldagem por centelhamento, b) equipamento de resfriamento por ar forçado. 48
Figura 36. Modelo das amostras utilizadas. 48
Figura 37. Equipamento utilizado. 49
Figura 38. Componentes para anallises de ultrassom 50
Figura 39: Interface do software utilizado para a medições de ultrassom 50
Figura 40. Pontos de medições pela técnica de ultrassom. 51
Figura 41. Posição do transdutor em relação ao trilho. 51
Figura 42. Componentes do equipamento de furo 52
Figura 43. a) Equipamento de furo cego e b) D4Link 53
Figura 44. a) Roseta Excel Sensors do tipo B e b) roseta Kywoa do tipo A 54
Figura 45. Visão da lupa do centro da roseta da Excel Sensors. 54
Figura 46. a) Rosetas cabeadas, b) software para recebimento dos dados de deformação. 54
Figura 47. Vista das brocas a) frontal e b) superior. 55
Figura 48. Regiões de análise pela técnica de Furo cego. 56
Figura 49. Distância de cada avanço do micrometro. 56
Figura 50. Macrografia da região soldada da alma. 57
Figura 51. Tensões residuais ao longo do boleto da amostra N0 59
Figura 52. Tensões residuais ao longo do boleto da amostra N1. 60
Figura 53. Tensões residuais ao longo do boleto da amostra N3. 60
Figura 54. Tensões residuais ao longo da alma na amostra N0 62
Figura 55. Tensões residuais ao longo da alma na amostra N1 62
Figura 56. Tensões residuais ao longo da alma na amostra N3 63
Figura 57: Gráfico de tensões residuais longitudinais obtidas via técnica de furo cego na região do centro da solda a ZAC do boleto e alma. 66
Figura 58: Gráfico de tensões verticais e transversais obtidas via técnica de furo cego na região do boleto e alma. 66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação dos trilhos conforme normas. 19
Tabela 2. Comparação dos processos de soldagem de trilhos. 20
Tabela 3. Particularidades de algumas técnicas de medição. 27
Tabela 4. Colocação do angulo principal β. 30
Tabela 5. Velocidade das ondas Longitudinal (V_L) e Transversal (V_T) em diferentes tipos de aços. 34
Tabela 6. Tensões residuais longitudinais (MPa) antes e após o desempeno 42
Tabela 7. Nomenclatura e taxa de resfriamento das amostras. 48
Tabela 8. Composição química do material. 49
Tabela 9. Média das tensões nos pontos espaçados de 3 em 3 cm no boleto. 61
Tabela 10. Média das tensões nos pontos espaçados de 10 em 10 cm no boleto 61
Tabela 11. Média das tensões nos pontos espaçados de 3 em 3 cm na alma. 64
Tabela 12. Média das tensões nos pontos espaçados de 10 em 10 cm na alma 64
Tabela 13. Dados de tensão residual da amostra N0 65
Tabela 14. Dados de tensão residual da amostra N1 65
Tabela 15. Dados de tensão residual da amostra N3 65

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

Símbolos	Definição
ABNR	Associação brasileira de Normas Regulamentadoras
ANTT	Associação Nacional de Transporte Terrestre
ANTF	Associação Nacional de Transporte Ferroviário
FBW	*Flash Butt Welding*
B	Símbolo Representante da Birrefringência para onda cisalhante
AREMA	*American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association*
IHHA	*Internetional Heavy Haul Assossiation*
ZAC	Zona afetada pelo calor
RCF	*Rail Contact Fatigue*
AWS	American Welding Society
ASTM	American Society for Testing and Materials
E	Símbolo representante da Deformação
P	Deformação isotrópica uniforme (equi-biaxial)
P	Tensão isotrópica uniforme (equi-biaxial
Q	Deformação de cisalhamento uniforme 45˚
Q	Tensão de cisalhamento uniforme 45˚
N	Deformação de cisalhamento x-y
N	Tensão de cisalhamento uniforme x-y
E	Modulo de Young
Σ	Símbolo representante da Tensão
D	Diâmetro do círculo interno da roseta
D_0	Diâmetro da broca
Y	Coeficiente de Poisson
V	Símbolo representante da Velocidade (m/s)
C_a	Constante Acustoelástica do material pela onda Compressiva $(MPa)^{-1}$
C_r	Constante Acustoelástica do material pela onda Cisalhante $(MPa)^{-1}$
F	Símbolo representante da Frequência da onda (Hz)
Λ	Símbolo Representante do Comprimento da onda (m)
EMAT	Transdutor acústico eletromagnético
PZT	Piezelétrico
R	Símbolo representante da Birrefringência para onda compressiva
P	Símbolo representante da massa específica
T	Símbolo representante de tempo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14

2 OBJETIVOS 16

2.1 OBJETIVO GERAL 16

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICO 16

3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA 17

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 17

3.2 FONTES DE PESQUISA 17

3.3 TRILHOS FERROVIÁRIOS 17

3.3.1 Soldagem aplicada em trilhos 20

3.3.2 Microestruturas e propriedades mecânicas de trilhos 21

3.4 DEFEITOS 23

3.5 TENSÕES RESIDUAIS 24

3.5.1 Tipos de tensões residuais 25

3.6 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS 26

3.6.1 Extensômetria 27

3.6.2 Técnica Ultrassônica 31

3.6.3 Tipos de defeitos 37

3.7 TENSÕES RESIDUAIS EM TRILHOS FERROVIARIOS 39

3.7.1 Regulamentação do nível de tensões dos trilhos ferroviários. 39

3.7.2 Distribuição das tensões do trilho como fabricado 41

3.7.3 Distribuição das tensões no trilho após a soldagem FBW 43

3.7.4 Influência da taxa de resfriamento nas tensões residuais 46

4 MATERIAIS E MÉTODOS 47

4.1 MATERIAIS 47

4.2 MÉTODOS 49

4.2.1 Bancada de Ultrassom 49

4.2.2 Bancada de furo cego 52

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 58

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 58

5.1.1 Birrefringência acústica e constante acustoelástica do material como recebido 58

5.2 ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS DOS TRILHOS VIA BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA 58

5.3 ANÁLISES DE TENSÕES RESIDUAIS DA SOLDA VIA FURO CEGO 64

6 CONCLUSÕES 67

7 CONCLUSÕES TECNOLÓGICAS 68

8 SUGESTÕES PARAR TRABALHOS FUTUROS 69

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS 70

ANEXO A. TABELA DE TENSÕES RESIDUAIS NA REGIÃO DO METAL DE BASE 75

ANEXO B. TABELA DE TENSÕES RESIDUAIS NA REGIÃO DA ZAC 76

ANEXO C. TABELA DE TENSÕES RESIDUAIS NO CORDÃO DE SOLDA 77

APÊNDICE A. TABELA COM OS DADOS DE BIRREFRINGÊNCIA DAS AMOSTRAS N0, N1 E N3 78

APÊNDICE B. GRÁFICOS DA DEFORMAÇÃO EM FUNÇÃO DOS INCREMENTOS DURANTE O PROCESSO DE FURAÇÃO RESPECTIVAMENTE NA ZTA E NO CENTRO DA SOLDA. 90

APÊNDICE C. GRÁFICO DAS MÉDIAS MÓVEIS DA REGIÃO DO BOLETO. 91

APÊNDICE D. ANOVA DAS MEDIÇÕES DE ULTRASSOM. 92

1 INTRODUÇÃO

Um dos principais meios de transporte terrestre utilizado para deslocamento de cargas é o transporte ferroviário, que tem grande capacidade de transporte de carga, reduzindo custos. Em ferrovias onde existe alta solicitação de carga por eixo, nesses casos a ferrovia é conhecida como *heavy haul*.

Segundo a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2021), os principais acontecimentos no setor ferroviário ocorreram entre 1922 e 1974, com a revolução industrial, evoluindo da locomotiva a vapor até o sistema diesel-elétrico.

Entre 1996 e 2019 foram investidos cerca de R$ 113 bilhões na melhoria e recuperação da malha ferroviária através de: compra e reforma do material rodante, aquisição de novas tecnologias, capacitação profissional e qualificação das operações. Desde o começo da exploração do minério de ferro no Brasil em 1997, a produção se manteve de forma crescente até 2018, tendo uma queda de 10% no ano de 2019. Ainda assim, tendo um crescimento de 167% em relação ao início da exploração, transportando cerca de 366 Toneladas por quilometro útil (ANTF, 2021). Um dos fatores que influencia na propagação de tricas são as tensões residuais, gerada pelo processo de fabricação principalmente na etapa do desempeno (straightening) ou pelo processo de união dos trilhos (soldagem) (Saita *et al*., 2013). As tensões residuais podem ser prejudiciais ou não, dependendo do tipo de serviço a que o componente estará sujeito e do tipo de tensão residual presente, trativa ou compressiva. A estimativa de tensões residuais é um tema de interesse científico e tecnológico considerável em uma grande variedade de aplicações de engenharia.

Após a soldagem dos trilhos ocorre uma alteração dos valores de tensões residuais ao longo da região soldada, formando um complexo plano de tensões que pode formar pontos concentradores de tensões. Essas regiões influenciam na formação e propagação de micro trincas que se agravam devido ao contato roda-trilho podendo levar o trilho a falha. Na Figura 1, mostra-se a imagem de um trilho fraturado por fratura frágil, no qual a trinca surgiu na solda, região da alma, onde foi encontrado uma descontinuidade geométrica do reforço da solda que provocou concentração de tensões no local.

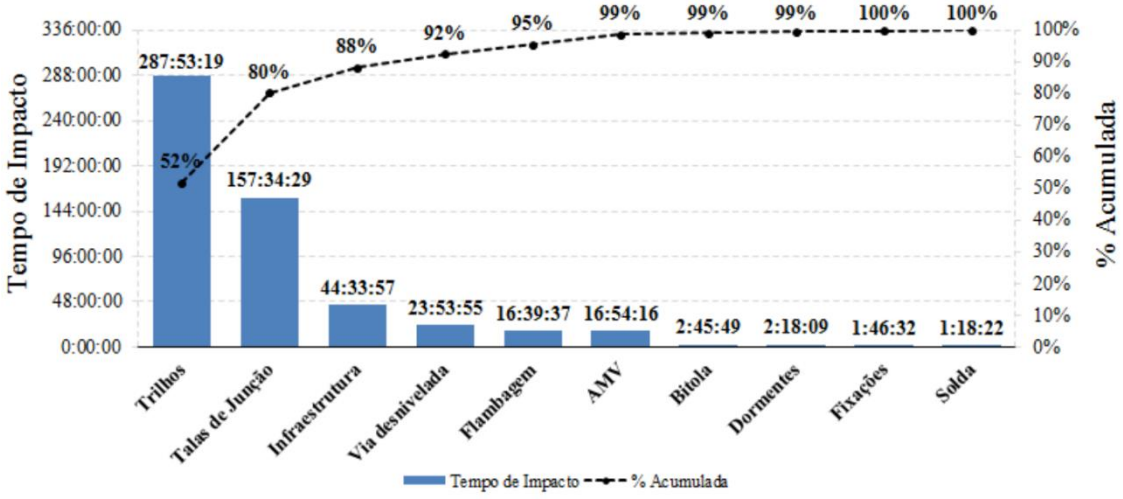
Figura 1. Trilho fraturado por propagação de trinca.



Fonte: Godefroid (2015).

Denardi (2018) mostrou via Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) o índice de falhas nos principais componentes da via férrea, em um trecho entre Rondonópolis-MT a Santos-SP, para um período de oito meses, onde observou que houve 566 ocorrências de falhas em trilhos, o equivalente a 52 % das falhas na via permanente, e acrescentou ainda que 80% das falhas estão diretamente ligadas aos defeitos em trilhos. A Figura 2 apresenta um gráfico com a porcentagem acumulada de falhas e o tempo total de manutenção no período de janeiro a agosto de 2018.

Figura 2. Gráfico do tempo de manutenção de cada componente da via permanente.



Fonte: Dernadi (2018).

Nesse contexto, este trabalho visa medir experimentalmente a tensão residual em trilhos ferroviários submetidos a diferentes taxas de resfriamento do boleto após a soldagem por centelhamento usando a técnica ultrassônica de birrefringência acústica e a técnica de furo cego através da extensômetria.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Determinação experimental das tensões residuais de solda elétrica (FBW – *Flash Butt Welding*) tratada termicamente com diferentes taxas de resfriamento pós soldagem.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICO

- Avaliar as tensões residuais nas proximidades da solda via técnica não destrutiva de birrefringência acústica para as diferentes taxas de resfriamento da solda;
- Análise do efeito da taxa de resfriamento pós soldagem nas tensões residuais no centro da solda e no final da ZAC via técnica de furo cego.

3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo será apresentado o conteúdo necessário para o entendimento e discussões sobre o estado de tensões nos trilhos e soldas, a exemplo da etapa de desempeno (*straightening*) durante a fabricação, e do processo de soldagem (FBW), que são responsáveis pela indução, alteração ou formação das tensões residuais em trilhos. Também serão apresentados os estados de tensões de trilho como encontrado na literatura e a descrição das técnicas de ultrassom e furo cego para determinar as tensões residuais através do método de birrefringência acústica e extensômetria.

3.2 FONTES DE PESQUISA

A busca pela literatura utilizada para basear os tópicos abordados ao longo deste trabalho foi realizada nas seguintes bases de dados: SCIENCE DIRECT®; SPRINGER®; TAYLOR & FRANCIS®; IEEE XPLORER®; SCIELO®; e GOOGLE ACADÊMICO®. A elaboração da pesquisa baseou-se na norma NBR 14724:2011.

3.3 TRILHOS FERROVIÁRIOS

Trilhos, dormentes, fixadores, lastro, sub-lastro, entre outros, são componentes que constituem a via permanente de uma ferrovia, o trem locomove-se sobre os trilhos que são especificados de acordo com o tipo de carga. É de suma importância ter uma manutenção preditiva e preventiva a fim de evitar falhas que podem levar ao descarrilhamento (Zerbst *et al*. 2009(a)). A Figura 3 apresenta os componentes da via férrea.

Figura 3. Componentes da via permanente.



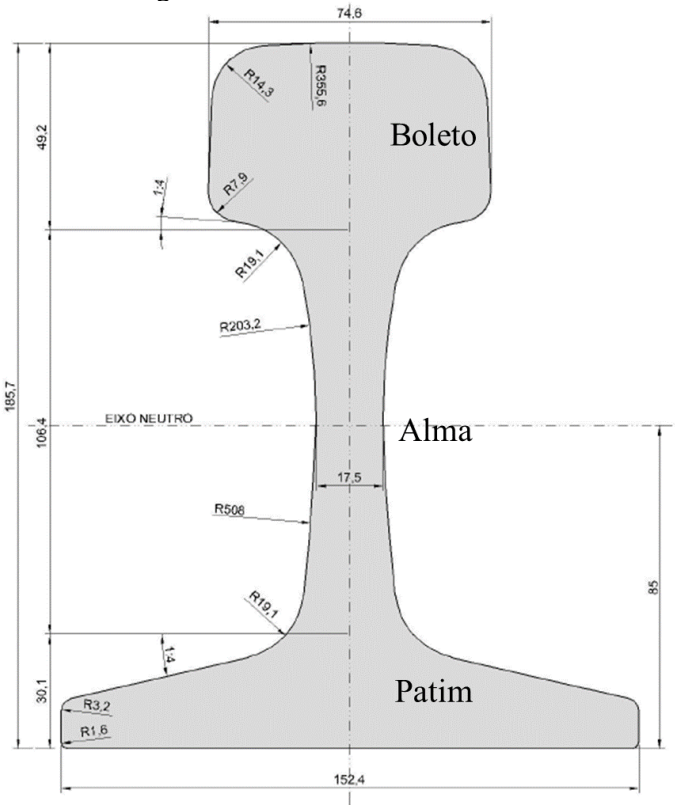
Fonte: Zerbst *et al.*, (2009a).

O trilho é um dos elementos da via férrea que guia a composição a partir da interação roda-trilho e transmite os esforços mecânicos para os componentes posicionados abaixo, tais como, dormente e lastro, devido a complexa geometria do trilho, ele pode ser dividido em três regiões, são elas: boleto, alma e patim. A Figura 4 mostra cada região.

Os esforços aos quais os trilhos são submetidos durante sua vida útil, pode gerar diversos defeitos levando a falha e resultando no descarrilhamento do trem. O desgaste é um dos fatores que influencia na formação de defeitos causados pelo contato de fadiga roda trilho (RCF). O desgaste torna-se mais severo quando o contato ocorre em velocidades elevadas e com cargas pesadas (SEMPREBONE 2005).

As dimensões do trilho podem variar de acordo com a carga solicitada. Segundo a norma ABNT NBR 7590 (2012), os trilhos são enumerados de acordo com o seu peso por metro de comprimento, por exemplo, TR57 é um trilho com massa de 56,9 kg/m, quanto maior o peso por metro maior as dimensões do trilho. A Figura 4 apresenta as dimensões de um trilho TR68.

Figura 4. Dimensões do trilho TR68



Fonte: ABNT NBR 7590 (2012).

A norma AREMA (2010), apresenta as nomenclaturas dos trilhos conforme o peso por comprimento, por TR68 representa que o trilho possui 68 Kg por metro de comprimento. A AREMA e o IHHA também classificam o trilho quanto a sua dureza, sendo eles denominados como: *standard*, *premium* e *super premium*. A Tabela1 apresenta a classificação dos trilhos conforme o nível de dureza.

Tabela 1. Classificação dos trilhos conforme normas.

Associação	Tipo de trilho	Dureza mínima da superfície do boleto (HB)	Condição
AREMA	*Standart*	310	-
	Intermediate	350	
	High Strength	370	-
IHHA	*Standart*	300-340	Aço carbono Perlita grosseira
	Premiun	341-388	Microligado Perlita fina
	Superpremiun	>388	Tratamento térmico Perlita ultrafina

Fonte: Barbosa (2021).

3.3.1 Soldagem aplicada em trilhos

A união de trilhos ferroviários pode ocorrer por talas de junção ou soldagem por centelhamento, aluminotermia, arco fechado ou por pressão com gás de aquecimento; os dois primeiros processos de soldagem são mais utilizados em ferrovias de alta carga por eixo, sendo que o processo por centelhamento pode ser utilizado tanto no estaleiro de solda para fabricação dos trilhos longos soldados (TLS) quanto na união dos TLS no campo. O processo de aluminotermia geralmente é utilizado apenas em campo, a Tabela 2 apresenta mais detalhes sobre esses métodos de união de trilhos (SAITA; KARIMINE; UEDA, 2013; GARNHAN and DAVIS,2009; STEENBERGEN, 2009).

Tabela 2. Comparação dos processos de soldagem de trilhos.

Processo	Aquecimento	Temperatura (°C)	Tempo de soldagem (minutos)	Largura da ZAC (mm)	Qualidade
Centelhamento (autógeno)	Efeito joule	1300-1400	1,5 - 4	30 - 45	Excelente
Aluminotermia	Reação química	>2000	30	Metal de Solda: 70 ZAC: 20	Boa
Arco fechado	Arco elétrico	-	60	Metal de Solda: 20 ZAC: 50	Boa
Por pressão a gás (autógeno)	Oxiacetileno	1200 – 1300	6 - 7	~100	Excelente

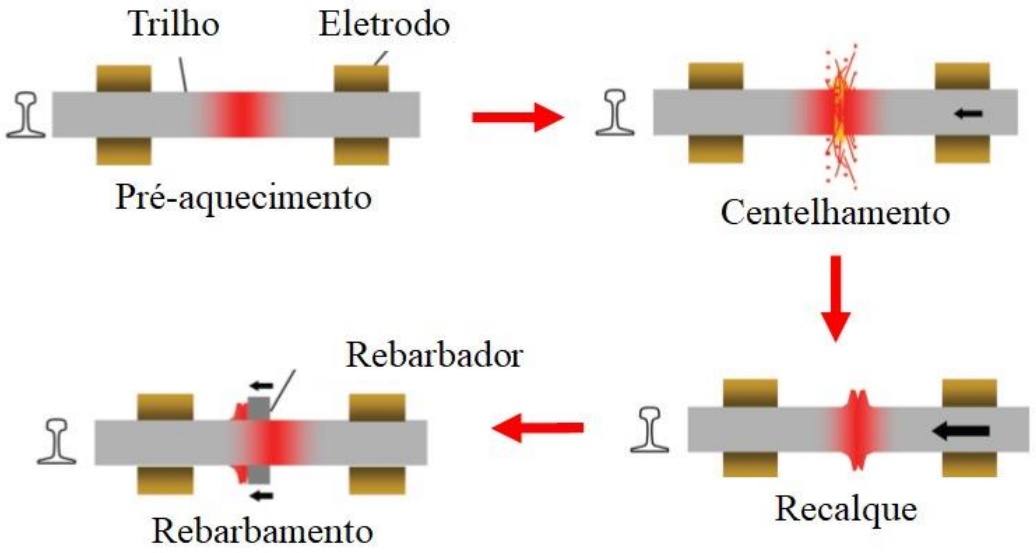
*** valores considerados para um trilho jis60.

Fonte: Barbosa (2021).

3.3.1.1 Soldagem de Topo por centelhamento

A solda de topo por centelhamento *(flash butt welding)* é um processo no qual a união dos trilhos ocorre por resistência elétrica. A soldagem ocorre em quatro etapas, na primeira os trilhos são aproximados sem que suas faces estejam em contato e em seguida uma carga elétrica é aplicada sob eles, na segunda um trilho se mantem fixo e o outro oscila de forma que comece a formar arcos elétricos (centelhas), a terceira etapa ocorre o recalque onde um trilho é pressionado contra o outro, e por último um, o excesso de material é removido por um processo de rebarbamento. (Saita *et al.* 2013). A Figura 5 ilustra um esquema desse processo de soldagem.

Figura 5. Processo de soldagem por centelhamento.



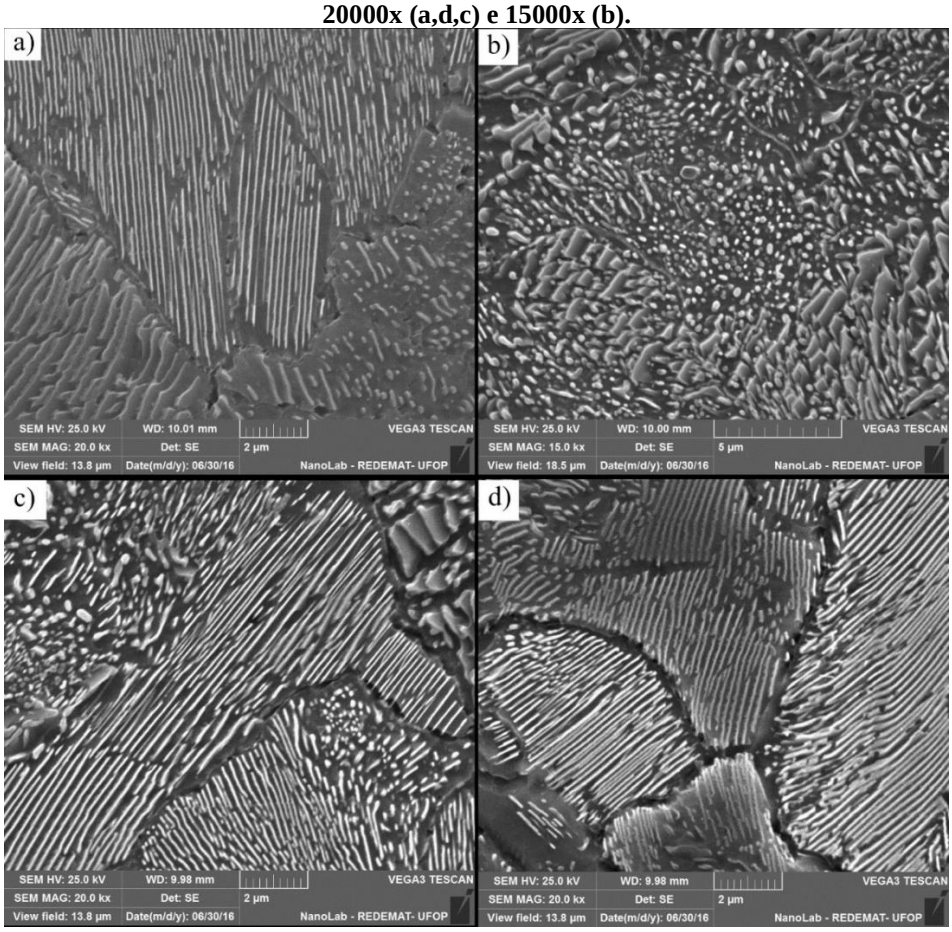
Fonte: Adaptado de Saita *et al*., (2013).

O processo de centelhamento é o principal método usado para soldagem dos trilhos, pois sua utilização permite um maior controle sobre os parâmetros de soldagem, ocasionando uma solda com mais qualidade. Contudo, após a união, a região da solda apresenta uma descontinuidade na sua microestrutura, assim como também o processo induz um alto nível de tensões residuais que podem ser associadas as falhas (SAITA *et al.*, 2013).

3.3.2 Microestruturas e propriedades mecânicas de trilhos

De acordo com a AREMA (2010), a microestrutura na região do boleto dos trilhos é predominantemente composta por perlita. Após a soldagem ocorre uma alteração dessa microestrutura na região soldada, apresentando cementita esferoidizada na extremidade da zona afetada pelo calor (ZAC), seguido de uma região de refino e crescimento do grão no centro da solda (PORCARO, 2017). A Figura 6 mostra as microestruturas encontras no metal de base, ZAC e na região central da solda. Segundo Barbosa (2021), a região de cementita esferoidizada ocorre devido a temperatura na região da extremidade na ZAC para o metal de base não ser suficientemente alta para transformar completamente a perlita em austenita, causando assim apenas uma transformação parcial ou esferoidização parcial da cementita.

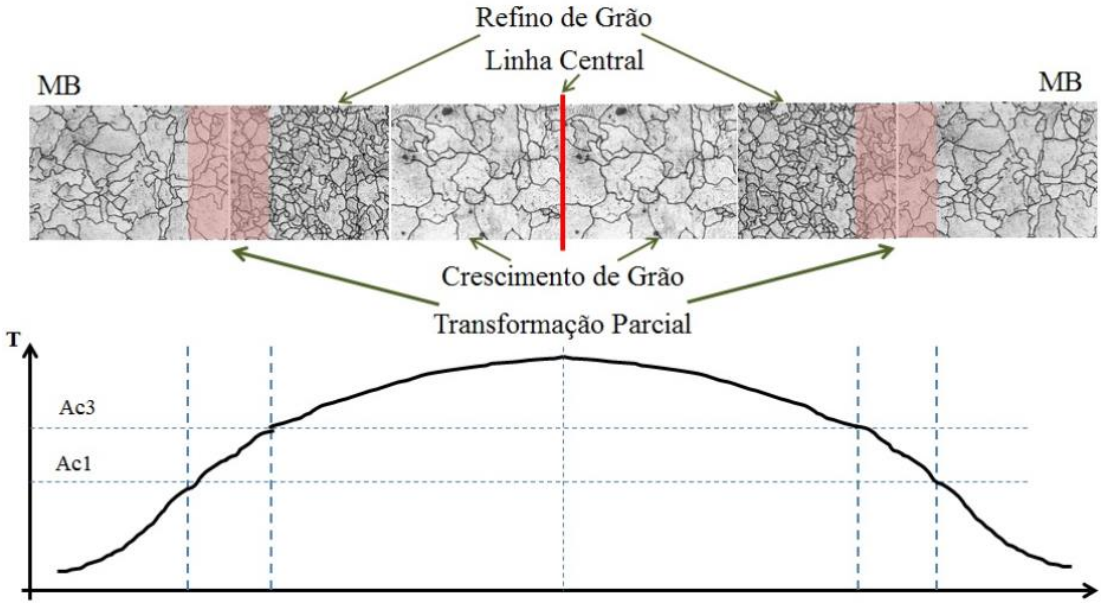
Figura 6. Microestrutura em MEV do centro e 10 mm abaixo da superfície do boleto após a soldagem. (a) Metal Base, 18 mm da linha central; (b) Transformação Parcial, 12mm da linha central; (c) Refino de Grão, 8 mm da linha central; (d) Crescimento de grão, 2 mm da linha central. Aumento original de 20000x (a,d,c) e 15000x (b).



Fonte: Porcaro (2019).

A Figura 7 mostra as regiões que passam por alteração microestrutural no processo de soldagem FBW, na imagem observa-se as regiões do metal de base, uma região de transição onde ocorre a formação da cementita esferoidizada, a região de refino de grão, e no centro da solda a região de crescimento de grão.

Figura 7. Formato da microestrutura no metal de base e região soldada.

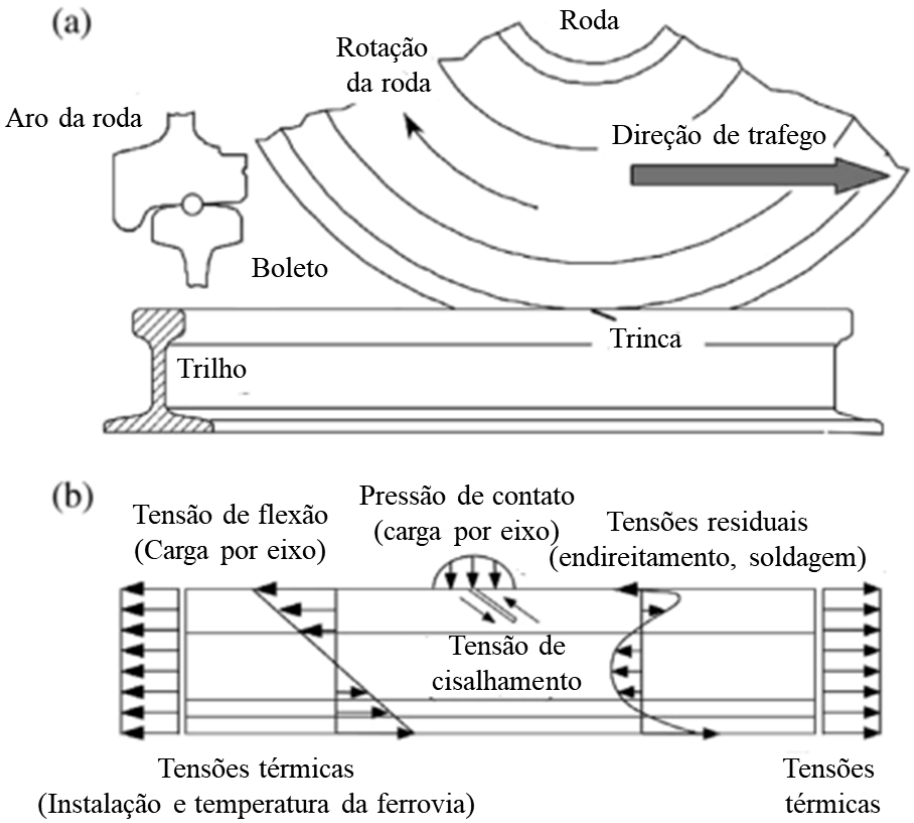


Fonte: Porcaro (2019).

3.4 DEFEITOS

Os trilhos podem apresentar diversos tipos de defeitos superficiais e transversais, alguns defeitos se formam por consequência do processo de soldagem, outros pelo desgaste contínuo e são agravados pela fadiga do contato de rolamento (*Rolling Contact Fatigue* – RCF), (ORRINGER, *et al.* 1998). Segundo Zerbst *et al.* (2009), as tensões residuais influenciam no nível de tensão total, no qual as tensões de contato, flexão e cisalhamento são sobrepostas pelas tensões residuais e térmicas, podendo ocorrer o desalinhamento do trilho, nucleação de trincas ou formação de defeitos. A Figura 8 mostra as tensões que o trilho está sujeito durante a operação ferroviária.

Figura 8. Esforços atuantes no trilho durante o contato roda trilho



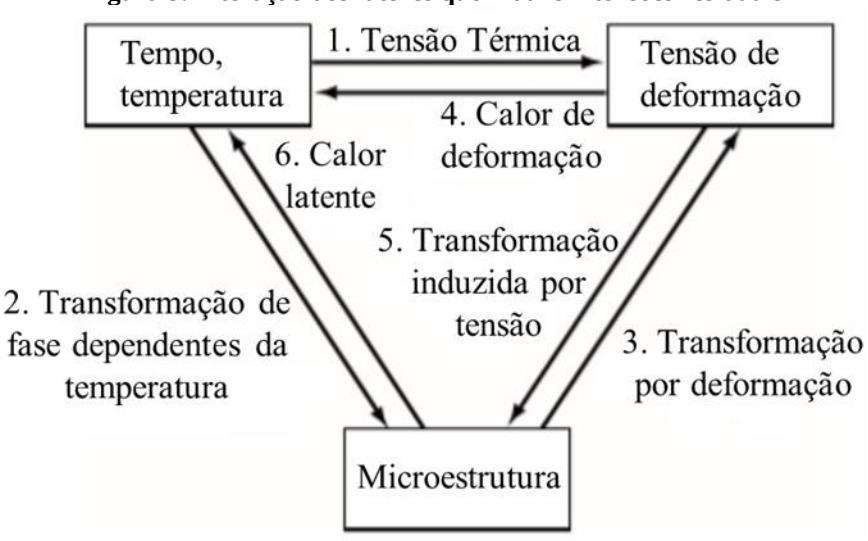
Fonte: Adaptado Zerbst *et al.,* (2009).

3.5 TENSÕES RESIDUAIS

As tensões residuais são tensões internas em um material e são adquiridas durante o processo de fabricação (AWS 2010). Essas tensões internas podem ser elásticas, trativas ou compressivas e são auto equilibrantes, ou seja, a soma dos seus esforços nos três eixos é nula. Quando ocorre uma deformação plástica em um ponto do material, as tensões residuais rearranjam-se para se auto equilibrarem novamente e, dependendo da solicitação mecânica em serviço, as tensões podem ser benéficas ou deletérias (LU, J. 2005).

As tensões residuais surgem da decorrência de uma interação entre o tempo, temperatura, microestrutura e deformação. Essas interações influenciam na alteração de algumas das propriedades dos materiais como condutividade, capacidade térmica, expansividade térmica, plasticidade, termodinâmica e cinética das transformações de fases, cada uma dessas alterações influenciam o estado de tensões residuais (Totten, 2002). A Figura 9 ilustra a interação entre o tempo, temperatura, microestrutura e deformação no material na geração de tensão residual.

Figura 9. Interação dos fatores que induzem tensões residuais

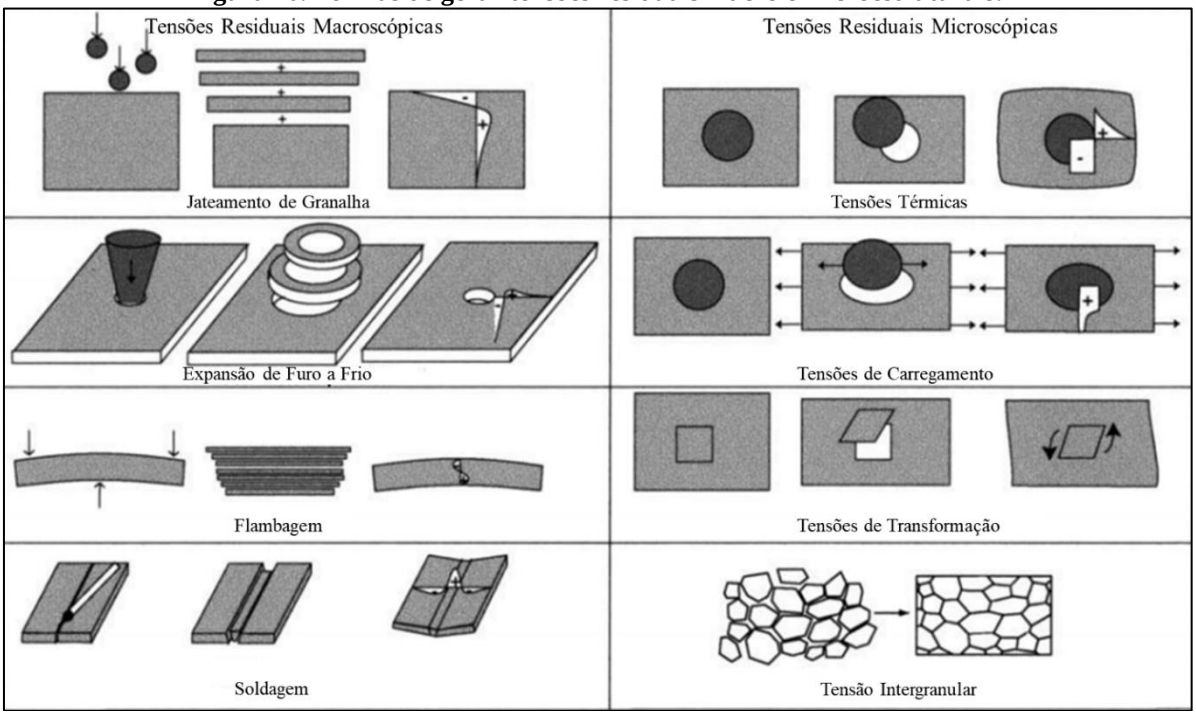


Fonte: Adaptado Totten (2002).

3.5.1 Tipos de tensões residuais

Um corpo material pode adquirir tensões residuais quando submetido a processos de união e/ou conformação como soldagem, extrusão, usinagem etc., os quais provocam deformação plástica do material, para P.J. Withers e Bhadeshia (2001), esse tipo de tensão é caracterizada como tipo I. Quando o processo envolve uma alteração na microestrutura e nas propriedades termomecânicas do material criando uma tensão de baixo nível entre diferentes orientações cristalográficas, as tensões residuais são do tipo II. E quando as tensões ocorrem em uma escala atômica, de forma pontual no interior de um cristal, associada a um defeito, as são classificadas como tipo III. A Figura 10 mostra algumas formas de indução de tensões residuais nos materiais.

Figura 10. Formas de gerar tensões residuais macro e microestruturais.



Fonte: Adaptado P.J. Withers & H.K.D.H. Bhadeshia (2001).

3.6 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS

Ao existir tensões residuais trativas e compressivas em um material que receberá um carregamento em serviço, esse carregamento será sobreposto aos valores de tensões residuais e dependendo do sentido e intensidade de cada tensão, a resultante pode ser benéfica ou deletéria (SOARES, 1998). O estudo do comportamento das tensões residuais pode promover o conhecimento do estado de tensões de componentes usados em engenharia, possibilitando um desempenho operacional mais confiável e eficiente (GONZALES, 2009).

Nesse sentido, o diagnóstico correto das tensões residuais em componentes mecânicos é de fundamental importância. Existem diversas técnicas de análises de tensões residuais, cada qual com sua particularidade. Para a escolha da técnica mais adequada para uma aplicação deve-se observar alguns parâmetros como: geometria, tipo de tensão residual a ser analisada, máximo gradiente de tensão, ambiente (campo ou laboratório), viabilidade, custo e precisão (GONZALES, 2009).

A Tabela 3 demonstra algumas das propriedades das técnicas utilizadas para análises de tensões residuais comparando-as com suas limitações. Neste trabalho será abordado somente as técnicas de furo cego e ultrassom.

Tabela 3. Particularidades de algumas técnicas de medição.

	Ultrassom	Furo cego	Difração de raio-x	Difração de nêutrons
Profundidade da medição	100 mm	0.02 - 15 mm	0.025 mm	0.1 – 150 mm
Incerteza da medição	± 20 MPa	± 20 MPa	± 20 MPa	± 30 MPa
Tempo de medição	Alguns segundos	2 horas	5 - 10 minutos	Alguns minutos ou mais que uma hora
Portabilidade	Sim	Sim	Sim	Não
É preciso preparo da superfície?	Não (Para EMAT)	Sim	Sim	-

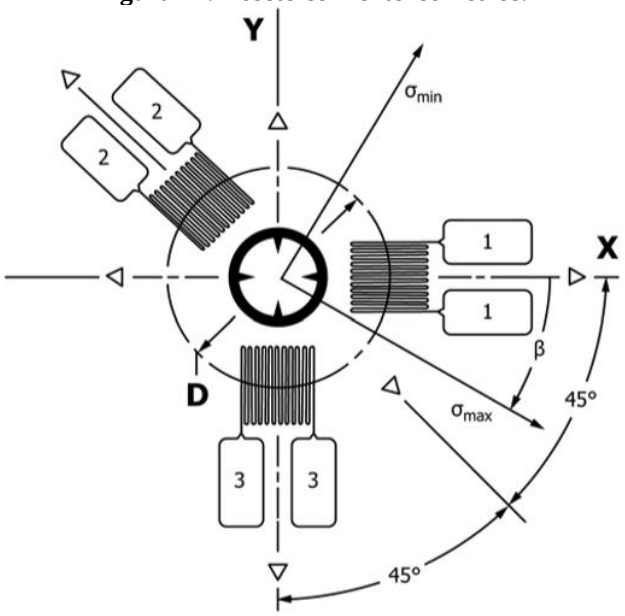
Fonte: Adaptado Schajer, 2013; Lu, 1996

3.6.1 Extensômetria

A extensômetria é uma técnica no qual extensômetros de resistência elétrica são fixados em um material para medir a deformação do material após aplicação de uma força externa. O experimento pode conter diversos extensômetros variando conforme as direções que se pretende verificar (OMEGA, 2017ª). A técnica possui muita confiabilidade devido a sua sensibilidade e os resultados geralmente demonstram pouca variação com análises e simulações (MINELA, 2017).

Os extensômetros medem deformações em um único sentido, quando é necessário determinar deformação em mais de uma direção utiliza-se rosetas, assim é possível medir deformações em três ou mais direções (ε_{xx}, ε_{yy}, ε_{xy}), e com esses dados pode-se medir as tensões normais e cisalhantes. A Figura 11 mostra uma roseta com extensômetros fixados em diferentes angulações.

Figura 11. Roseto com extensômetros.



Fonte: ASTM E837-20.

As rosetas podem ser de três tipos: A, B e C, Figura 12 (Kandi *et al*., 2001). A roseta tipo A pode ser usada para uso geral, a tipo B são mais usadas quando houver limitações geométricas, como filetes de solda, e a tipo C é a que apresenta uma maior confiabilidade, pois utiliza uma quantidade maior de *strain gages*. Para as análises desta pesquisa foram utilizadas as rosetas dos tipos A e B.

Figura 12. Tipos de Rosetas.



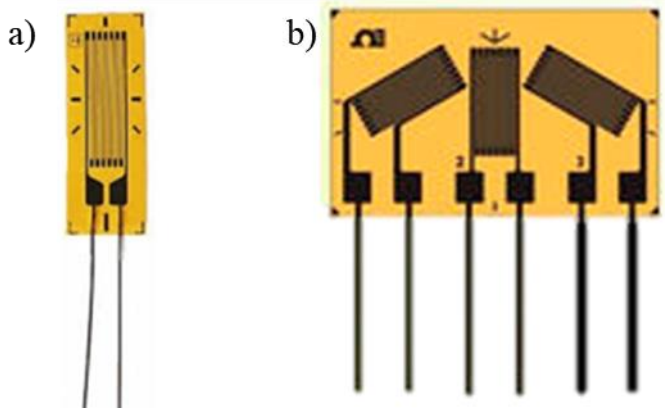
Fonte: Adaptadoz ASTM E837-20.

3.6.1.1 Técnica do Furo Cego

Conforme Rossini (2012), o método de furo cego mede o relaxamento das tensões na superfície do material, a técnica é padronizada conforme a norma ASTM E 837-20, ela consiste em anexar sensores de resistência elétrica denominado de extensômetros para medir as deformações que são causadas durante a perfuração de um furo com diâmetro de 1,8 ou 2,0 mm. A Figura 13 mostra o formato de um extensômetro de resistência elétrica em (a) e uma roseta tipo

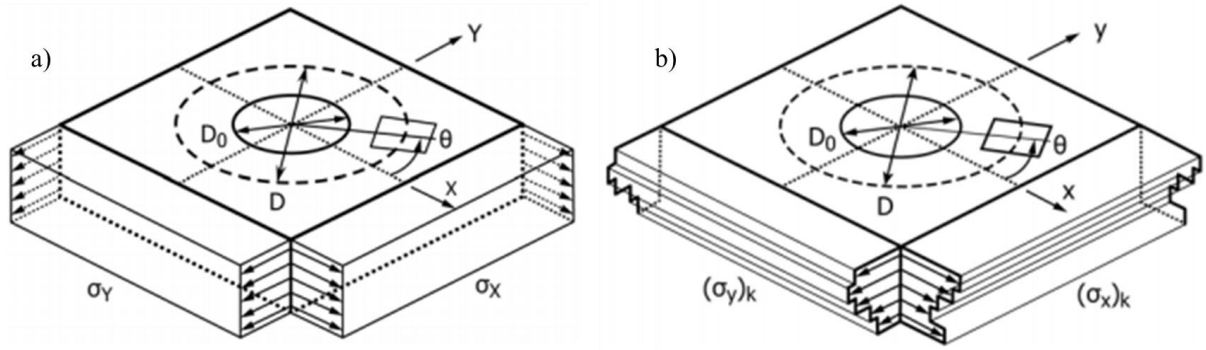
b em (b). A Figura 14 apresenta um esquema de como as tensões podem se comportar ao longo da profundidade do furo, podendo elas apresentar um padrão uniforme (a) ou não uniforme (b).

Figura 13. Extensômetro de resistência elétrica.



Fonte: Ensus (2016).

Figura 14. Geometria do furo e tensões residuais uniformes em (a) e não uniformes em (b)



Fonte: ASTM E837-20.

Segundo SCHAJER, (1988), a técnica de furo cego é comumente utilizada nos casos em que as tensões residuais do material não variam de acordo com a profundidade da superfície analisada, no entanto, existem diversos métodos de análise para casos em que as tensões não sejam uniformes. Para o trabalho será adotado o método da extensômetria para um furo não passante.

3.6.1.2 Cálculo das tensões pelo método de furo cego

No procedimento de medições de tensões residuais via furo cego é considerado que as deformações obtidas na região de análises do material são uniformes, sendo assim possível mensurar a média das tensões existentes próximas ao furo. As deformações lidas pela roseta para materiais isotrópicos são calculadas pelas eq. (1), (2), e (3)

$$p = \frac{(\varepsilon_3 + \varepsilon_1)}{2} \quad (1)$$

$$q = \frac{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)}{2} \quad (2)$$

$$n = \frac{(\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)}{2} \quad (3)$$

Onde:
p = Deformação isotrópica uniforme (equi-biaxial)
q = Deformação de cisalhamento uniforme 45˚
n = Deformação de cisalhamento x-y
ε = Símbolo representante da deformação

As tensões combinadas P, Q e T, correspondentes as deformações p, q e t; são obtidas a partir das eq. (4), (5), (6).

$$P = \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} = -\frac{Ep}{\bar{a}(1+v)} \quad (4)$$

$$Q = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} = -\frac{Eq}{\bar{b}} \quad (5)$$

$$N = \tau_{xy} = -\frac{En}{\bar{b}} \quad (6)$$

Onde:
E = Módulo de Young
P = Tensão isotrópica uniforme
Q = Tensão cisalhante em 45º
N = Tensões cisalhantes em xy
$\bar{b}$ = Constante de calibração para tensões de cisalhamento
τ_{xy} = Tensão xy de cisalhamento uniforme
σ_x = Tensão normal na direção x
σ_y = Tensão normal na direção y

As constantes de calibração $\bar{a}$ e $\bar{b}$ tem valores tabelados e dependem do diâmetro do furo e tipo de roseta utilizada, a Tabela 4.

Tabela 4. Colocação do angulo principal β.

Roseta	Coeficiente	D/D0 = 0,30	D/D0 = 0,40	D/D0 = 0,50
A	$\bar{a}$	-0,090	-0,160	-0,250
	$\bar{b}$	-0,289	-0,478	-0,664
B	$\bar{a}$	0/096	-0,170	-0,266
	$\bar{b}$	-0,331	-0,542	-0,743
C	$\bar{a}$	-0,265	-0,471	-0,736
	$\bar{b}$	-0,554	-0,806	-0,877

Fonte: Norma ASTM E837 (2013).

Para determinar as tensões nos planos e cisalhamento σ_x, σ_y, e τ_{xy} utiliza-se das eq. (7,8 e 9).

$$\sigma_x = P - Q \quad (7)$$

$$\sigma_y = P + Q \quad (8)$$

$$\tau_{xy} = T \quad (9)$$

Os cálculos permitem determinar as tensões principais (σ_{max} σ_{min}), que é a variação das tensões ao longo do furo realizado, sendo calculado pela eq. (10). Essas tensões possuem um ângulo β em relação ao plano de tensões como mostrado na Figura 13, esse ângulo é calculado pela eq. (11).

$$\sigma_{max}, \sigma_{min} = P \pm \sqrt{Q^2 + N^2} \quad (10)$$

$$\beta = \frac{1}{2}\arctan\left(\frac{-T}{-Q}\right) \quad (11)$$

Caso as tensões avaliadas excedam 50% da tensão de escoamento do material, a medição pode ser considerada incorreta devido a um possível escoamento do material na região. Nesse caso, os dados obtidos não são considerados quantitativos e servem apenas como indicativos.

Em casos de variação da profundidade do furo, pode-se determinar as tensões uniformes e cisalhantes pela eq. (12, 13 e 14)

$$P = -\frac{E}{(1+v)}\frac{\sum \bar{a} \cdot p}{\sum \bar{a}^2} \quad (12)$$

$$Q = -\frac{\sum \bar{b} \cdot q}{\sum \bar{b}^2} \quad (13)$$

$$N = -\frac{\sum \bar{b} \cdot n}{\sum \bar{b}^2} \quad (14)$$

Onde

Σ = somatória das tensões em cada profundidade.
$\bar{a}$ = constante para calibração de tensões isotrópicas
ν = coeficiente de Poisson

3.6.2 Técnica Ultrassônica

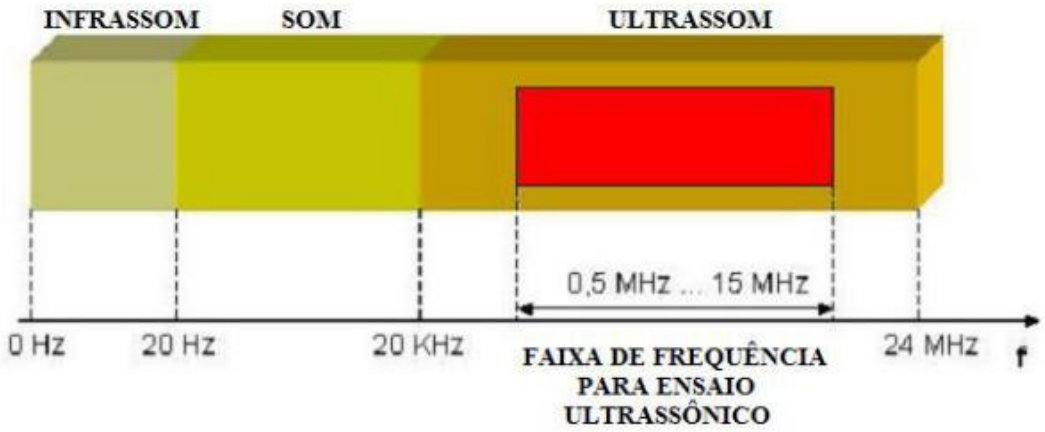
A técnica de ultrassom é um método de análise não destrutivo que utiliza uma faixa de frequência não audível como visto na Figura 15, que pode ser utilizada para detecção de defeitos superficiais ou internos nos materiais. Esse ensaio pode ser realizado por dois métodos que se complementam: **método de transparência** e **método de reflexão,** o primeiro utiliza vibrações ultrassônicas constantes sendo mais indicado para placas de metal, chapas e perfis metálicos de peças planas; o segundo utiliza pulsos ultrassônicos aplicados a barras, perfis metálicos de

maior escala, forjadas ou fundidas, e pode encontrar a área ou profundidade do defeito o (ANDREUCCI, 2014).

Esta técnica foi usada na avaliação de tensão de reatores nucleares no Brasil e nos trilhos do Shinkansen (Japão) (SCHAJER, 2013; LU, 1996). Após a calibração e obtenção das constantes para o material estudado, o uso das técnicas torna simples e rápida.

Segundo Garcia *et al*. (2001) a escolha do método varia conforme a geometria do material, tipo de material e o defeito a ser detectado. Este trabalho é focado apenas no estudo das ondas longitudinais aplicadas nas análises de tensões residuais.

Figura 15. Faixa de frequência para diferentes níveis de sons



Fonte: Fraga (2007)

3.6.2.1 Propagação das ondas

A técnica de ultrassom utiliza ondas mecânicas que tem como característica a propagação em meios materiais, ela pode ser do tipo longitudinais ou compressivas, transversais ou cisalhantes e superficiais. A velocidade de propagação de cada onda varia dependendo do meio ou do material, o comprimento da onda pode ser calculado pela eq. (15) (GARCIA *et al*., 2001).

$$V = \lambda \cdot f \tag{15}$$

Onde:
V = Velocidade da onda (m/s)
λ = Comprimento da onda (m)
f = Frequência da onda (Hz)

Para a determinação da variação da velocidade da onda em um material de estado solido tensionado pode-se utilizar a eq. (16) (LU, 1996).

$$V = V_0 + K \cdot \sigma \tag{16}$$

Onde:

V_0 = Velocidade da onda no material sem tensão (m/s)
K = Constante acustoelástica do material $(MPa)^{-1}$

σ = Tensão (MPa).

3.6.2.2 Transdutores Piezoelétricos

Segundo Garcia *et al*. (2001), transdutores são objetos metálicos que contém um cristal de lâmina geralmente de quartzo que quando aplicado uma carga elétrica converte a eletricidade em energia acústica para se propagar nos materiais, esse processo é conhecido como o efeito piezoelétrico. Magina (2009) comenta que os transdutores podem ser do tipo EMAT (Transdutor Acústico Eletromagnético) e piezelétricos (PZT).

Costa (2017) cita que existem 4 modelos de transdutores piezelétricos: Normal ou reto, angular, duplo cristal e *phazed-array*. Os transdutores do tipo normal ou reto, são característicos por possuírem um cabeçote monocristal gerando ondas normais a superfície, ou seja, ao longo da espessura do material, já o angular utiliza dois transdutores em ângulo que pode ser entre (35º, 45º, 60º, 70º e 80º). Nesses casos, a varredura ocorre de forma superficial sendo de um transdutor ao outro. Os transdutores do tipo duplo cristal são similares ou normal ou reto com a diferença que, no duplo cristal existem dois tradutores sendo um do tipo emissor e outro receptor (ANDREUCCI, 2014).

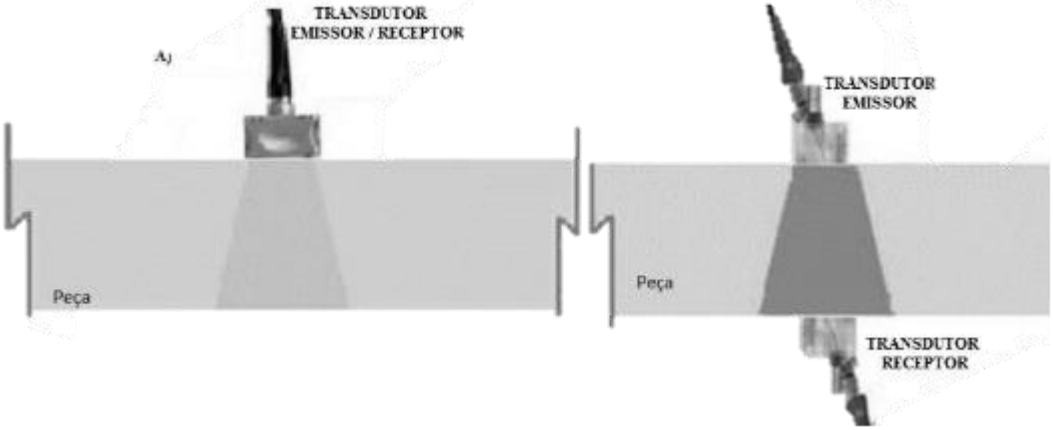
Existem diversos tamanhos de transdutores com diferentes frequências e tipos de ondas, dependendo do equipamento e técnica utilizada é possível utilizar um ou mais transdutores. A técnica de transparência utiliza dois transdutores uma para emitir e outro para receber o sinal enquanto a técnica do pulso eco utiliza apenas um transdutor para emitir e receber o sinal. A Figura 16 mostra diferente modelos de transdutores e a Figura 17 apresenta um esquema das técnicas de inspeção realizada pelos transdutores (ANDREUCCI, 2014).

Figura 16. Transdutores piezoelétricos



Fonte: Autoria Própria.

Figura 17. Transdutores piezelétricos a) técnica de pulso eco b) técnica de transparência.



Fonte: Costa (2017).

3.6.2.3 Técnica da correlação cruzada

Existem diversos métodos de processar o sinal recebido pelas ondas ultrassônicas, o método da correlação cruzada determina o atraso da onda ultrassónica através da interpolação entre dois sinais recebidos, o método leva em consideração as condições do pulso (frequência, largura da banda, relação sinal-ruido entre outros). Esse método apresenta maior confiabilidade nos resultados pois verifica o eco do sinal por completo (COSTA E. 2017; BITTENCOURT 2001; FERREIRA *et al.*, 2010). A Tabela 5 apresenta uma comparação das velocidades das ondas transversais e longitudinais utilizando a técnica de correlação cruzada comparando com a velocidade da onda definida pela norma ASTM E494-20.

Tabela 5. Velocidade das ondas Longitudinal (V_L) e Transversal (V_T) em diferentes tipos de aços.

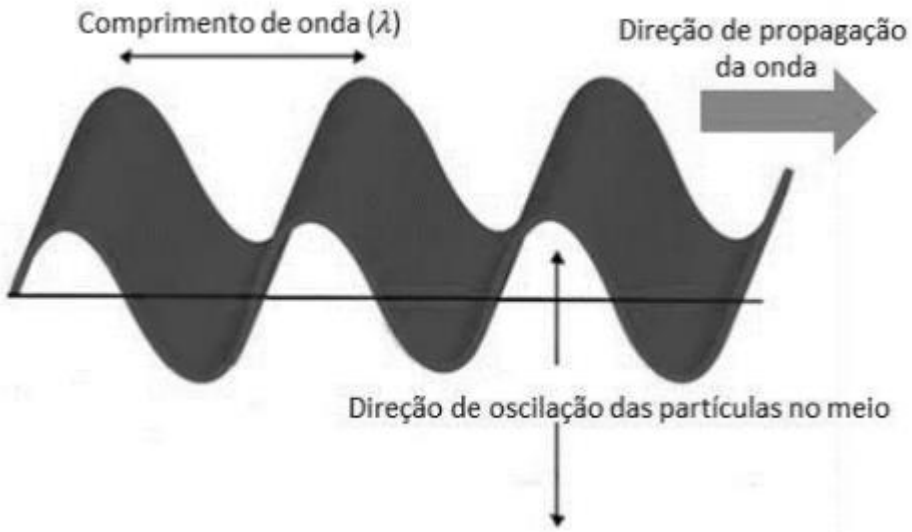
	V_L (m/s)		V_T (m/s)	
	Valores segundo a norma ASTM E495-95	Correlação Cruzada	Valores segundo a norma ASTM E495-95	‘Correlação Cruzada
Aço Martensítico	5900	6016 ± 13,53	3300	3334,45 ± 7,35
Aço Austenítico	5790	5880,50 ± 6,00	3100	3195,38 ± 3,86
Aço Duplex	-	5809,28 ± 5,51	-	3240,36 ± 4,27
Aço Carbono 1020	5900	5901,76 ± 6,52	3230	3241,99 ± 2,37

Fonte: Ferreira, *et al*., (2010).

3.6.2.4 Ondas transversais ou cisalhantes

As ondas transversais ou ondas cisalhantes tem a sua direção de propagação perpendicular ao sentido de oscilação como mostrado na Figura 18. Esse tipo de onda pode ser aplicado para detectar defeitos em materiais metálicos e sua velocidade de propagação (Cc) em aços chega a 3200 m/s podendo ser calculada pela eq. (17) (GARCIA, 2001).

Figura 18. Comportamento da onda cisalhante.



Fonte: Santos (2013).

$$C_c = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\upsilon)}} \tag{17}$$

Onde:
C_c = velocidade da onda cisalhante
E = modulo de elasticidade
υ = coeficiente de Poisson
ρ = massa específica

Segundo Hirao (2017), a onda cisalhante pode ser utilizada para medição de tensões residuais através da técnica de birrefringência acústica, que é a variação da velocidade da onda ou através da textura do material, que é gerada pela tensão residual, pela direção dos grãos etc.

A diferença de tensões (σ_z - σ_y), calculada pela eq. (18), depende de dois termos: a birrefringência sem textura (B_0), que é a birrefringência inicial do material sem a presença de tensões;' e a constante acustoelástica, que relaciona a variação da tensão com a variação da velocidade da onda.

$$B = B_0 + C_a\,(\sigma_z - \sigma_y) \tag{18}$$

Onde:
B = Birrefringência
B_0 = Birrefringência inicial

C_a = Constante acustoelástica

A Birrefringência (B) e a Birrefringência inicial (B_0) são encontradas conforme a eq. (19), elas podem ser determinadas tanto em função da velocidade (V), quanto em função do tempo(t). A diferença entre as birrefringências é que B_0 é calculado após o material sofrer um alívio das tensões, para assim ter um padrão de referência.

$$B = \frac{V_1 - V_2}{(V_1 + V_2)/2} = \frac{t_1 - t_2}{(t_1 + t_2)/2} \quad (19)$$

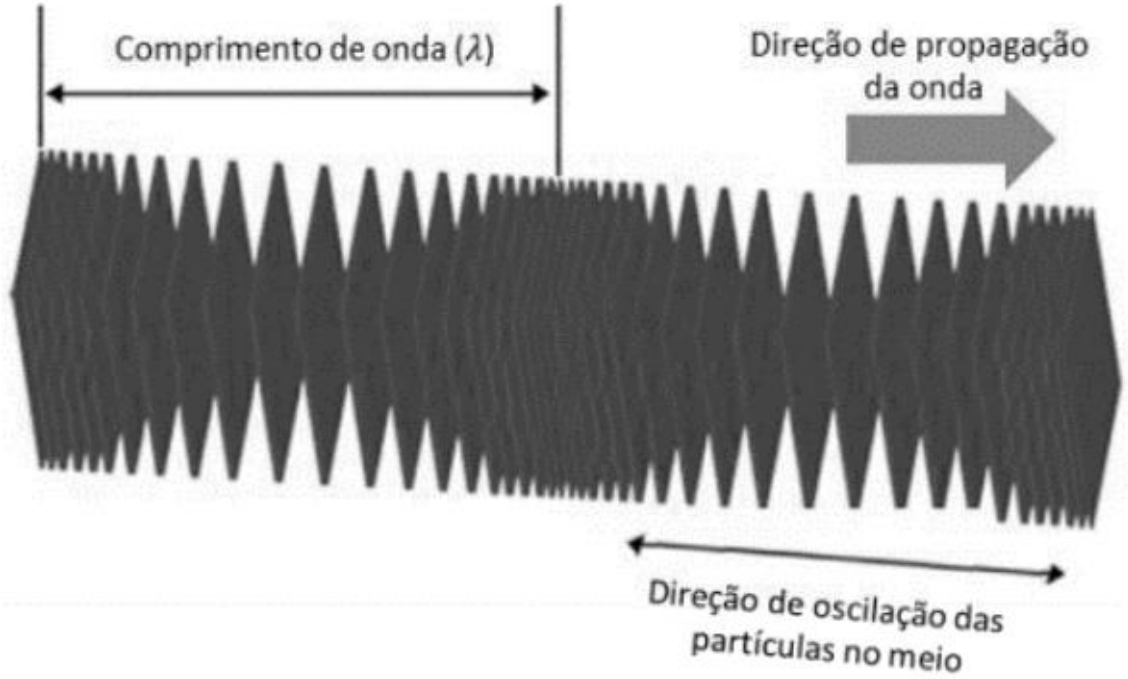
Onde:

V_1 = Velocidade de propagação da onda cisalhante na direção 1
V_2 = Velocidade de propagação da onda cisalhante na direção 2
t_1 = Tempo de propagação da onda na direção 1
t_2 = Tempo de propagação da onda na direção 2

3.6.2.5 Ondas longitudinais ou compressivas

A norma ASTM E494-20, mostra que, as ondas longitudinais ou compressivas propagam-se e vibram no mesmo sentido conforme ilustrado na Figura 19, em aços a sua velocidade de propagação é de 5908 m/s, dentre as ondas mecânicas esta é a que possui maior velocidade de propagação.

Figura 19. Comportamento da onda Longitudinal.



Fonte: Hirao (2017).

Segundo Hirao (2017), pode-se determinar a velocidade da onda longitudinal (V_L) em um solido pela eq. (20).

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}\frac{(1-v)}{(1+v)(1-2v)}} \tag{20}$$

As tensões residuais obtidas determinadas da técnica de birrefringência com ondas longitudinais são encontradas pela razão (R) entre a velocidade longitudinal e de cisalhamento como proposto na eq. (21).

$$R = \frac{V_L}{(V_{S1} + V_{S2})/2} = R_0 + C_R(\sigma_1 + \sigma_2) \tag{21}$$

Onde:
V_L = velocidade da onda longitudinal
V_{S1} = velocidade da onda cisalhante na direção 1
V_{S2} = velocidade da onda cisalhante na direção 2
C_R = constante acustoelástica para a onda longitudinal
R_0 = Razão entra a velocidade da onda longitudinal e cisalhante sem a presença de tensões.

Segundo Hirao (2017), o tratamento térmico pode alterar os valores de B_0, mas não afetam a constante acustoelástica independente se for de onda cisalhante ou longitudinal, pois a constante é originada a partir das ligações atômicas, que permanece inalterada após o tratamento. Logo, C_a pode ser determinada variando o nível de tensões residuais presentes no material, enquanto B_0 ´encontrada no material livre de tensões.

Como visto na eq. 18, a diferença das tensões ($\sigma_z - \sigma_y$), representa a diferença proporcional ao valor de tensão presente na região analisada, e que, o valor encontrado não mostra a magnitude isolada das tensões σ_z e σ_y. Hirao (2017) propõe uma formulação através da medição do tempo de percurso da onda cisalhante e compressiva no mesmo ponto, com isso é possível realizar a separação das tensões principais através de um sistema algébrico da sobreposição das tenções principais entre as equações (18 e 21). Este método não será implementado neste trabalho pois ele está em fase experimental, mas será sugerido para trabalhos futuros.

3.6.3 Tipos de defeitos

Os trilhos ferroviários estão sujeitos a diversos tipos de defeitos tais como: *squats, head checks, tach ovale* e corrugações.

Os *squats* são deformações ou achatamentos formadas na superfície do boleto devido a fadiga de contato por rolamento. Esse defeito geralmente ocorre em uma região de baixa dureza formada na extremidade da ZAC, caracterizada por uma alteração da perlita que sofreu esferoidização parcial após o processo de soldagem. A Figura 20 mostra a superfície do boleto deformado (MUTTON *et al*., 2016).

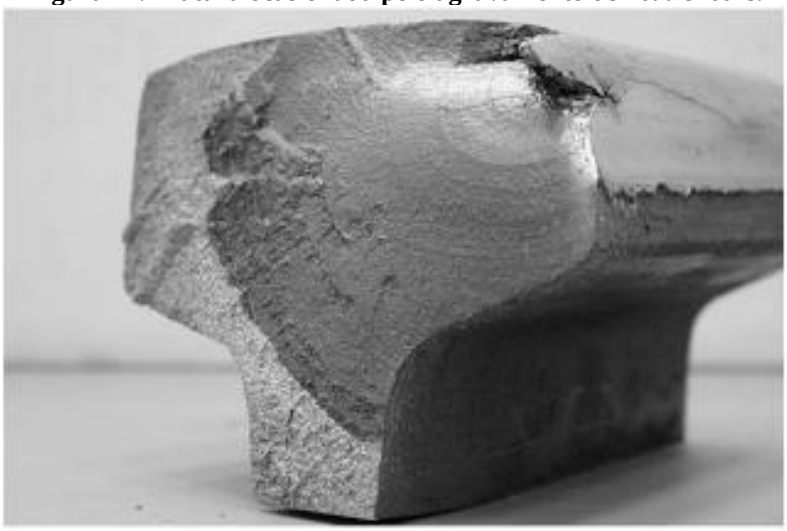
Figura 20. Deformação na superfície do boleto na região soldada.



Fonte: Steenbergen (2013).

Head checks são trincas normalmente causadas pelo movimento cíclico do canto de bitola do trilho com a flange da roda, ocorre principalmente em curvas, esse defeito pode ser agravado quando houver presença de um fluido como água ou óleo. Em seu estágio inicial torna-se quase imperceptível a olho nu, mas com o avanço do defeito a trinca pode desenvolver-se causando escamação, estilhaçamento e arrancamento de parte do boleto levando o material até a falha, como é mostrado na Figura 21 (SEMPREBONE, 2005; ZERBST *et al*., 2009).

Figura 21. Fratura ocasionada pelo agravamento de *head shecks.*



Fonte: Zerbst *et al*., (2009).

As corrugações são defeitos formados pelo desgaste causado durante o RCF, com o tempo o trilho começa a apresentar irregularidades em forma de ondulações como mostrado na Figura 22. Esse tipo de desgaste agrega diversos efeitos negativos tais como: fadiga dos trilhos

com a consequente formação e propagação de defeitos internos, folga das fixações, desenvolvimento de tricas e falha dos dormentes (SCHNEIDER, 2005; SEMPREBONE, 2005).

Figura 22. Corrugação na superfície do boleto.



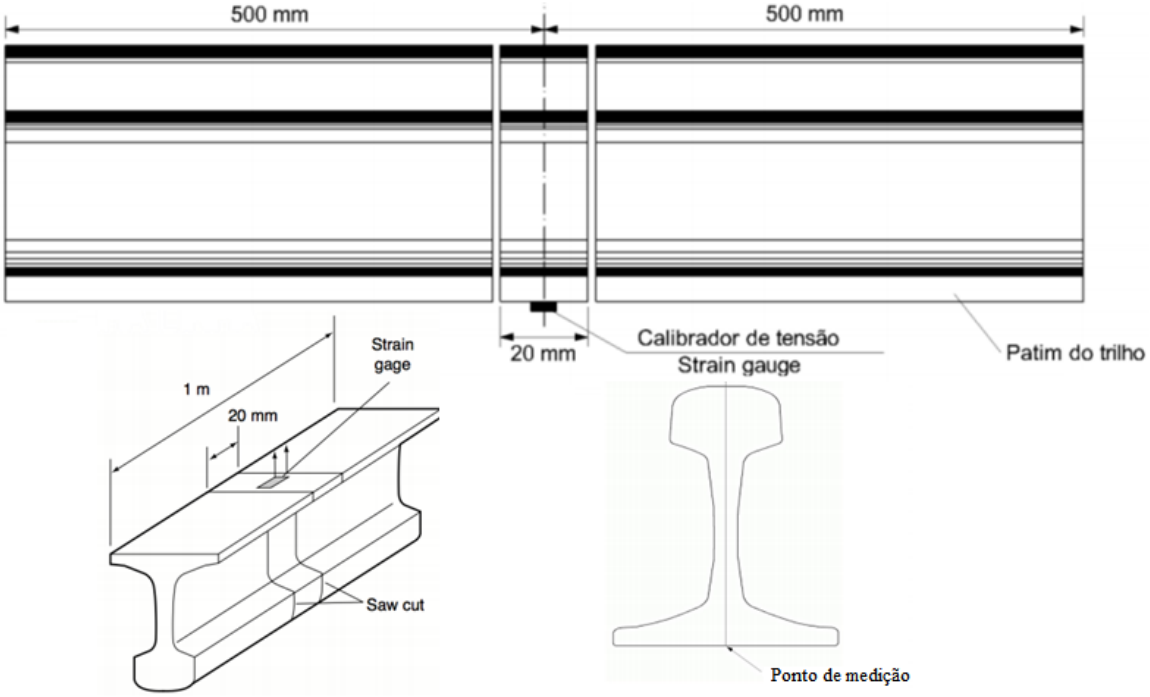
Fonte: Schneider (2005).

3.7 TENSÕES RESIDUAIS EM TRILHOS FERROVIARIOS

3.7.1 Regulamentação do nível de tensões dos trilhos ferroviários.

Alguns órgãos regulamentadores determinam o nível máximo de tensão residual no trilho em certas regiões. O Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT) determina que as tensões residuais para trilhos da linha férrea devem ser no máximo 150 MPa para ferrovias de alta solicitação de carga por eixo e até 250 MPa em ferrovias de baixa carga por eixo (NBR7590:2012). A Figura 23 demonstra a técnica e onde é realizado a medição.

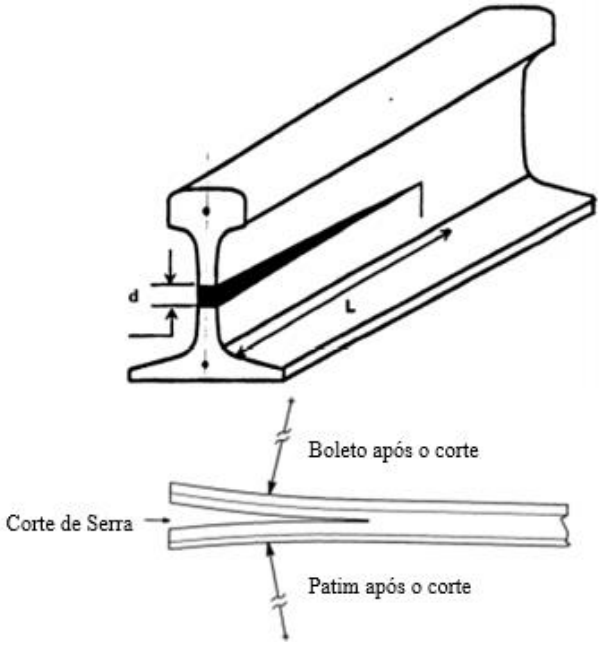
Figura 23. Procedimento de análise por furo cego na base do patim.



Fonte: Totten, G., Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel, (2001).

A AREMA (2010), estabelece um limite para os níveis de tensões do trilho obtidos via técnica destrutiva de corte de serra (*web saw cut*), onde é feito um corte horizontal de 0,4 m na alma de uma amostra de trilho de 0,61 m. A abertura ou fechamento do corte é proporcional ao alívio das tensões do trilho, logo essa deformação não deve exceder 3,75 mm. A Figura 24 mostra uma ilustração referente a técnica.

Figura 24. Trilhos após o corte transversal.

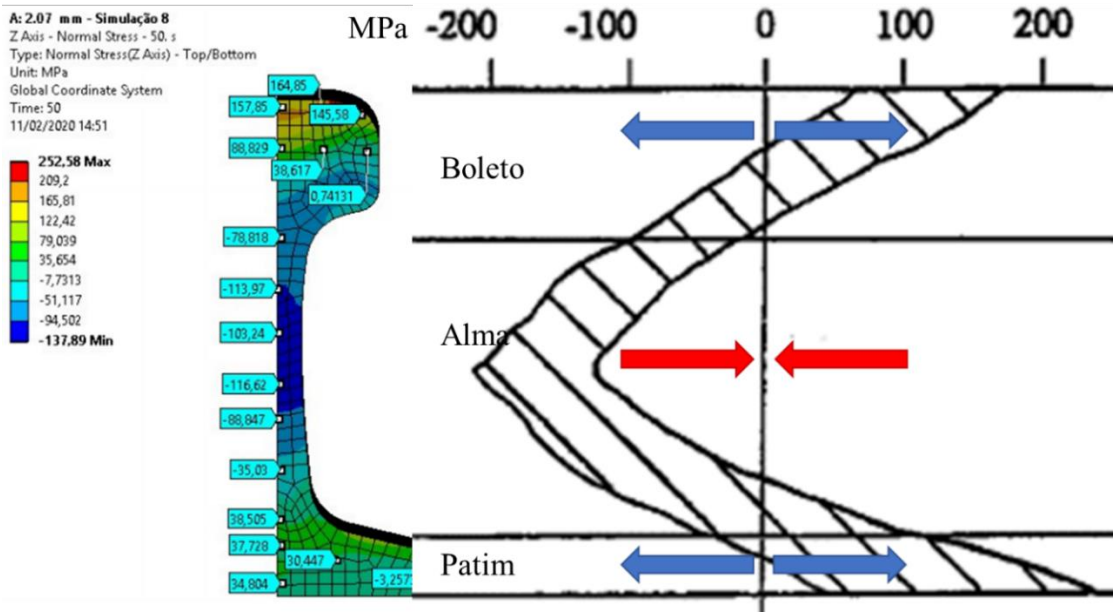


Fonte: Adaptado de AREMA (2010).

3.7.2 Distribuição das tensões do trilho como fabricado

Os trilhos apresentam complexo estado de tensões residuais causados por fatores térmicos e mecânicos relacionados aos processos de fabricação, soldagem e uso. As tensões residuais existentes no trilho podem influenciar o desenvolvimento de trincas e defeitos que podem levar a falha do trilho (Cannon. *et al.,* 2003). A Figura 25 mostra a distribuição de tensões residuais longitudinais no trilho após a etapa de desempeno obtidas via simulação numérica (Carvalho, 2020). Observa-se que o padrão da distribuição tem tensões trativas no boleto e patim, sendo que na alma as tensões são compressivas, esse padrão de tensões quando visualizado graficamente mostra um perfil em "C" (SCHLEINZER, G.; FISCHER, F. D., 2001).

Figura 25. Tensões longitudinais na metade de uma seção transversal do trilho.



Fonte: Adaptado Carvalho, (2020) e Hodgson (1993).

Carvalho (2020) define que a etapa de desempeno é a que introduz maiores níveis de tensões residuais na fabricação de trilhos devido a deformação plástica inerente ao processo., Figura 26. Biempica *et al*. (2009) avaliaram as tensões geradas nesse processo, os resultados mostram o aumento dos níveis de tensões para o boleto, ambos os lados da alma e patim, como mostrado na Tabela 6.

Figura 26. Trilho no desempeno vertical.



Fonte: Carvalho (2020).

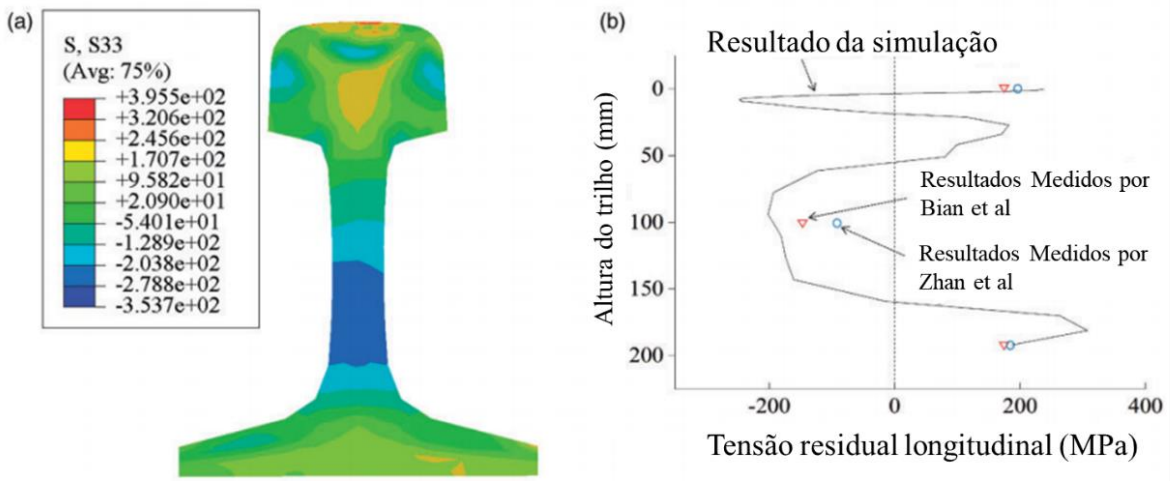
Tabela 6. Tensões residuais longitudinais (MPa) antes e após o desempeno.

Estado	Tensão Residual (MPa)			
	Boleto	Alma1	Alma2	Patim
Antes do desempeno	-17	11	-5	103
Depois do desempeno	231	-180	-123	225

Fonte: Adaptado Biempica *et al.*, (2009).

Li *et al.* (2020) através da simulação de elementos finitos, mostraram que o estado de tensões do trilho após o processo de desempeno, os autores ainda compararam os resultados de suas simulações com valores experimentais realizados por Bian *et al.*, (2018) e Zhan *et al*., (2009). Observa-se na Figura 27 que o estado de tensões mostrado por Li *et al*., (2020) possui a mesma tendência que os resultados de simulação de Carvalho (2020).

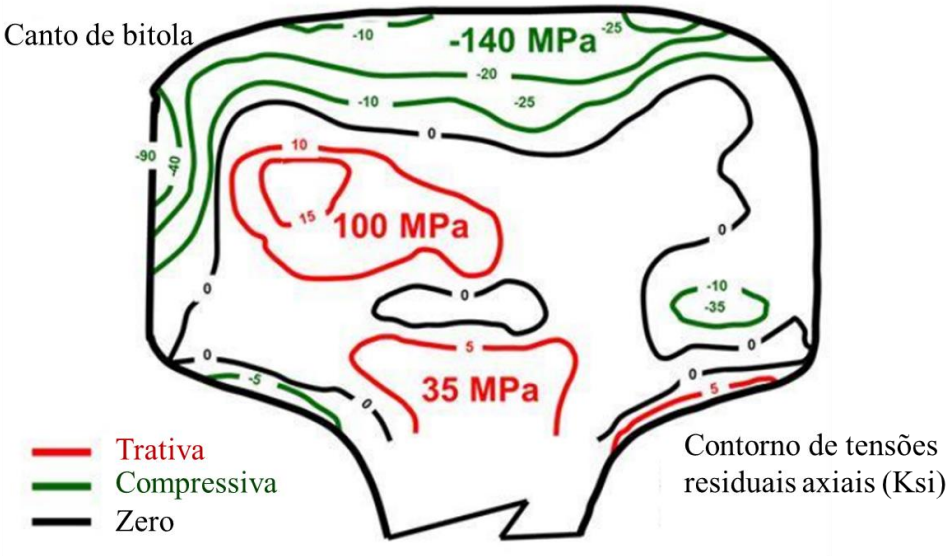
Figura 27. a) Modelagem de elementos finitos das tensões residuais do trilho após o processo de endireitamento, b) comparação dos dados recebidos com outros autores.



Fonte: Adaptado de Li *et al.*, (2020).

Outra alteração da distribuição de tensões do trilho é observada durante sua aplicação na via, na qual tem-se carregamentos cíclicos durante o contato roda-trilho (Rakoczy, 2017). A Figura 28 mostra que o sentido das tensões residuais longitudinais na subsuperfície do boleto é alterado, o mesmo ocorre na lateral do boleto devido em curvas onde pode ocorrer o contato com a flange (RAKOCZY., 2017).

Figura 28. Tensões adquiridas na superfície do boleto após em certo tempo de serviço

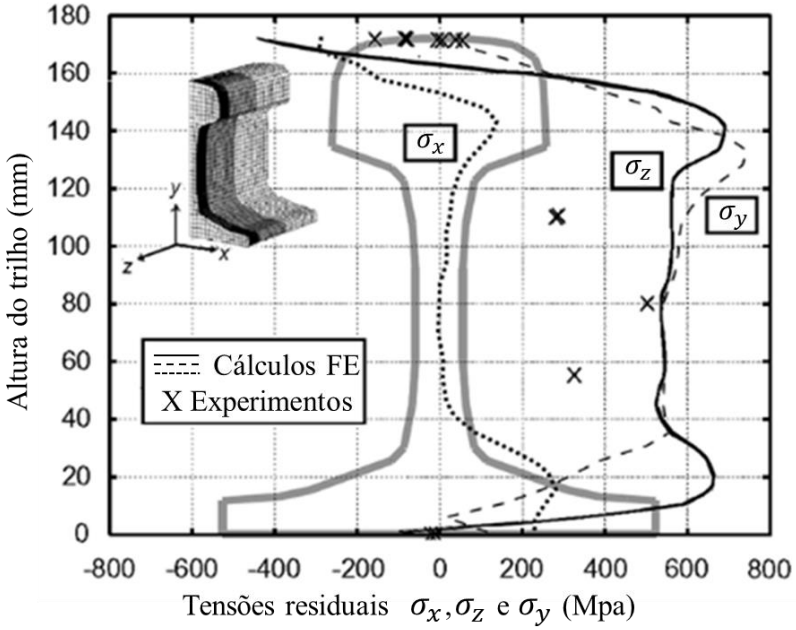


Fonte: Adaptado Rakoczy (2017).

3.7.3 Distribuição das tensões no trilho após a soldagem FBW

A distribuição de tensões residuais do trilho é alterada por processos mecânicos e térmicos. Assim, os processos de soldagem, usados para unir as barras de trilhos e fabricar os trilhos longos soldados, alteram o estado de tensões local. O padrão em "C" observado após o desempeno é invertido, havendo tensões compressivas no boleto e patim; e trativas na alma. Além disso, os valores na alma para o sentido vertical podem chegar a 337 MPa como mostrado por Porcaro (2019). A Figura 29 mostra a distribuição de tensões após a soldagem, onde o sentido longitudinal (z) e vertical (y), possuem valores mais elevados.

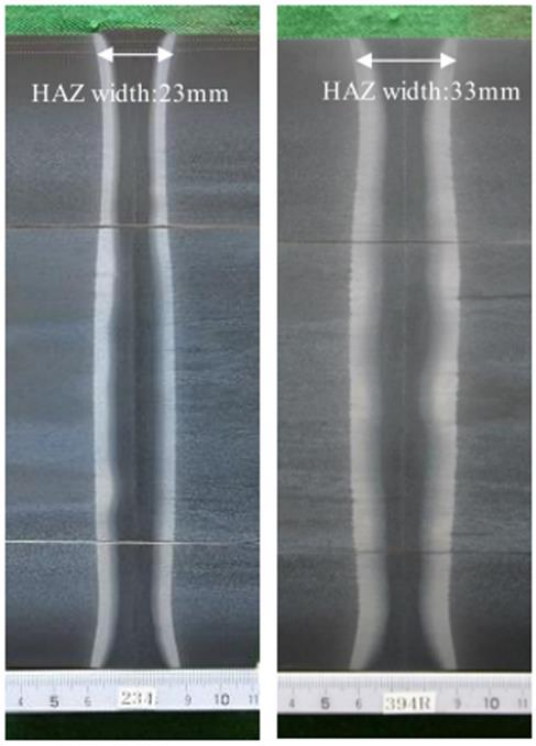
Figura 29. Distribuição de tensões no trilho após a soldagem



Fonte: Adaptado Siboniso *et al.*, (2019).

Cada etapa da soldagem *FBW* possui parâmetros que podem ser alterados, influenciando assim nas características da solda. Saita *et al.* (2017) mostraram que com algumas modificações desses parâmetros foi possível reduzir a largura da ZAC de 33 para 23 mm como mostrado na Figura 30.

Figura 30. Macrografia da Secção da largura da ZAC.



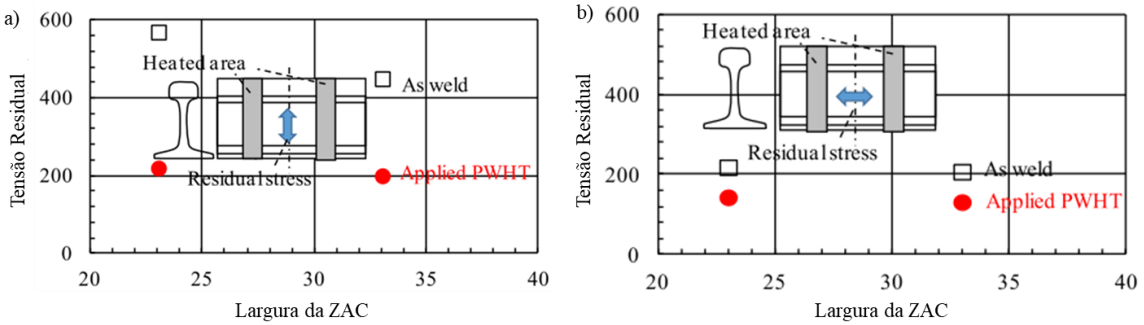
a) Condição de estreitamento da ZAC

b) Condição convencional

Fonte. Adaptado Saita *et al.*, (2017).

Saita *et al.* (2017), comentam que com o processo de estreitamento da ZAC é possível reduz a área de formação de *squats* na superfície do boleto ocasionada pelo contato roda-trilho. Já nas tensões residuais o estreitamento tem um efeito negativo, elevando as tensões verticais na alma para 570 MPa, no entanto essas tensões podem ser reduzidas através de tratamento térmico de alívio de tensões. A Figura 31 a) mostra o nível de tensão vertical para o trilho soldado nas condições de estreitamento e convencional, com e sem tratamento de alívio de tensões por indução térmica, a Figura 31 b) mostra as tensões longitudinais na mesma condição.

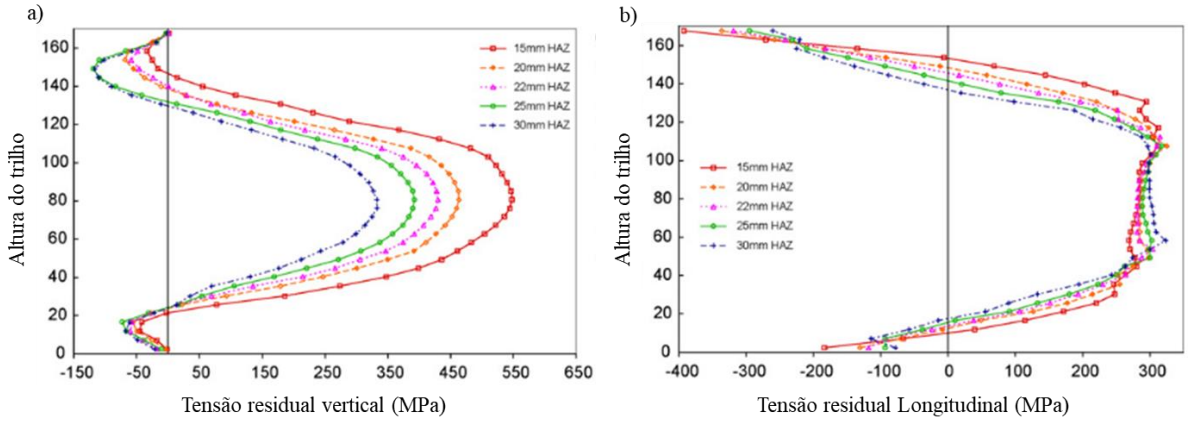
Figura 31. Tensões verticais na alma para amostras com e sem estreitamento e aplicação do tratamento térmico de alívio de tensões.



Fonte. Adaptado Saita *et al.*, (2017).

Tawfik *et al.* (2008) mostraram que a variação das condições de soldagem, as quais promovem variação da largura da ZAC, tem efeito significativo nas tensões residuais verticais da solda. A Figura 32 a) mostra que o estreitamento da ZAC eleva as tensões residuais verticais, enquanto a Figura 32 b) demonstra que as condições avaliadas exerceram pouca influência nas tensões longitudinais. Desta forma, o procedimento de solda FBW que objetiva estreitar a ZAC deve seguir de acompanhamento dos níveis de tensões e, possivelmente, de um tratamento sub-crítico para alívios das tensões residuais, modelo semelhante ao de Saita *et al.*, (2017).

Figura 32. Efeito da variação da ZAC sob as tensões residuais a) verticais b) longitudinais.

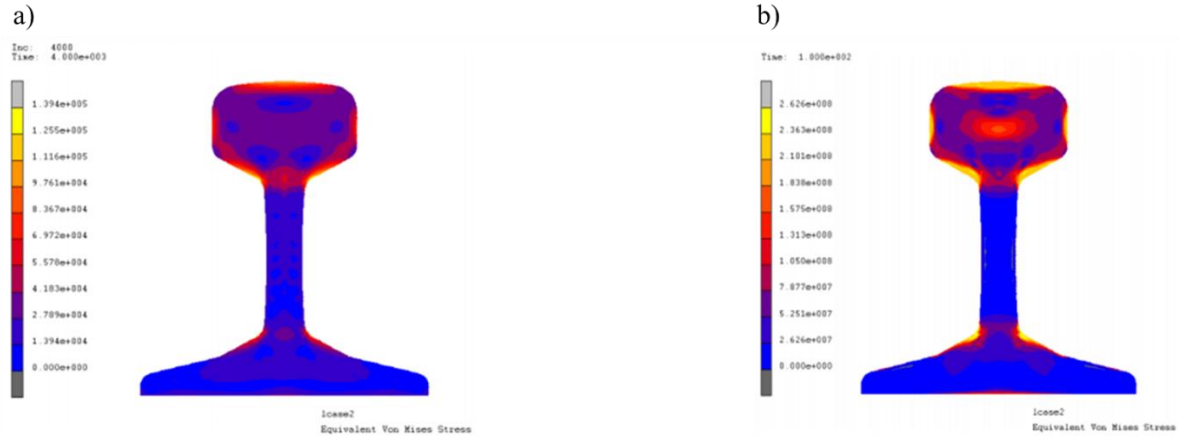


Fonte. Adaptado Tawfik *et al.*, (2008)

3.7.4 Influência da taxa de resfriamento nas tensões residuais

Segundo Yu (2015) os níveis de tensões residuais podem ser alterados quando aplicado um tratamento de resfriamento controlado pós processo de soldagem. A Figura 33 mostra o estado de tensões após o resfriamento por ar e água. Observa-se que o resfriamento por água apresentou valores mais elevados de tensões, principalmente na superfície do boleto e no patim.

Figura 33. Distribuição de tensões após tratamento de resfriamento pós soldagem a) por ar e b) por água



Fonte: Yu (2015).

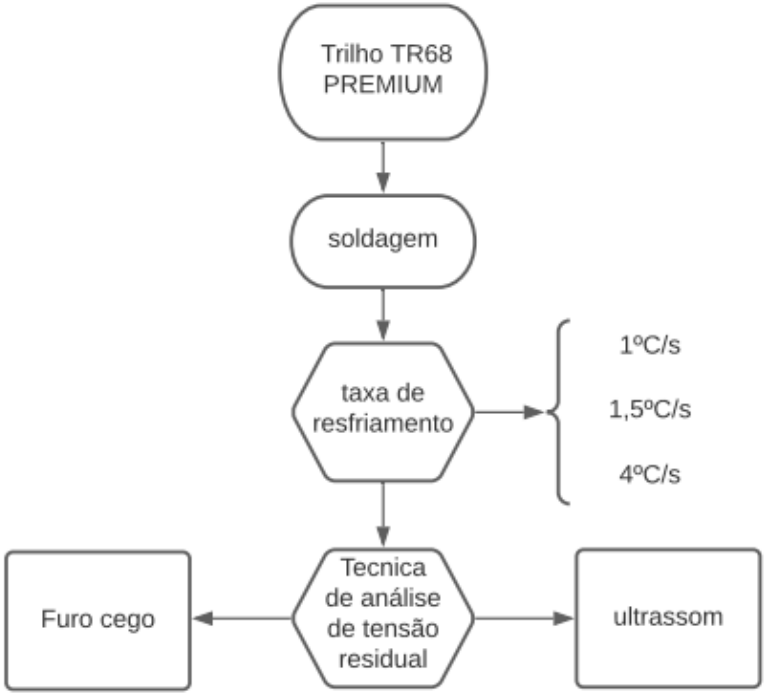
Yu (2015) em sua simulação observou ainda que o tempo de resfriamento influencia no campo de tensões de forma desigual, cada região do trilho demonstra um estado de tensão diferente dependendo do tempo de resfriamento.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentado os processos pelos quais as amostras foram submetidas, e a metodologia utilizada para medir as tensões residuais nas amostras.

O Fluxograma apresentado na Figura 34 apresenta de forma resumida as etapas de realização do trabalho.

Figura 34. Fluxograma do processamento das amostras

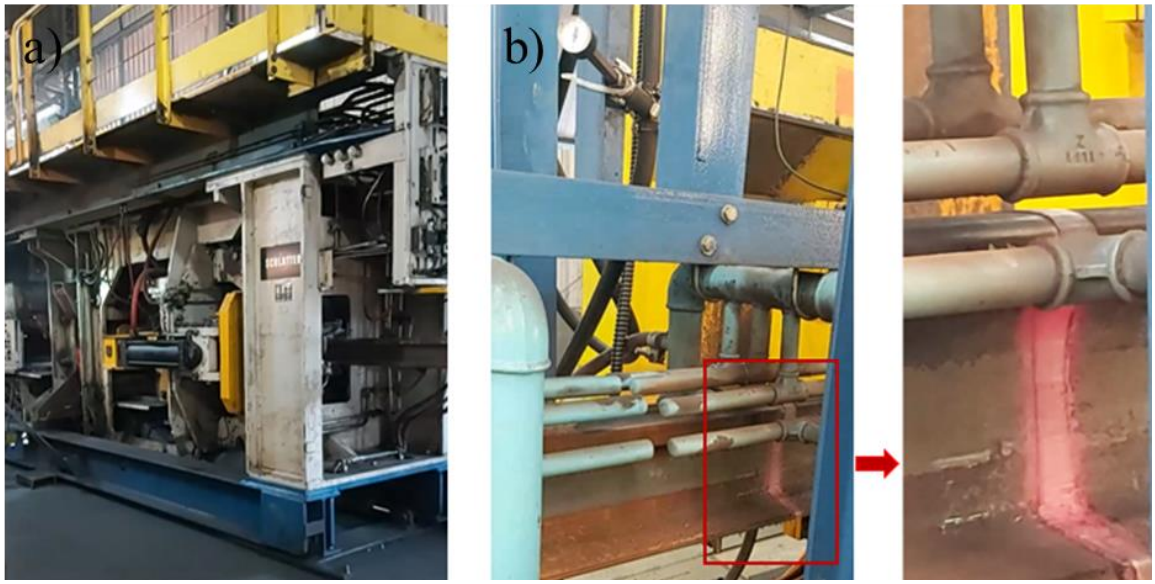


Fonte: Autoria Própria

4.1 MATERIAIS

Para a execução do trabalho foram obtidas três amostras de trilhos *premium,* de perfil TR68, com as dimensões conforme especificado pela AREMA 2010 Vol. 1. As amostras foram soldadas pelo processo de centelhamento no estaleiro da VALE S.A. em São Luís – MA. Os parâmetros de soldagem adotados no processo foram os mesmos em todas as amostras, sendo que após a soldagem ocorreu o resfriamento por ar forçado com diferentes pressões de ar e com resfriamento ao ar ambiente. As etapas subsequentes ao resfriamento são: i. esmerilhamento do boleto para retirada do ressalto do recalque e ii. desempenho da solda com prensagem (flexão a 3 pontos). No entanto, o ressalto do recalque foi mantido para análise microestrutural referente as atividades do projeto Cátedra Roda-Trilho. A Figura 35 mostra a máquina de soldagem modelo Fixed Schlatter GAAS 80/580 e o sistema de resfriamento.

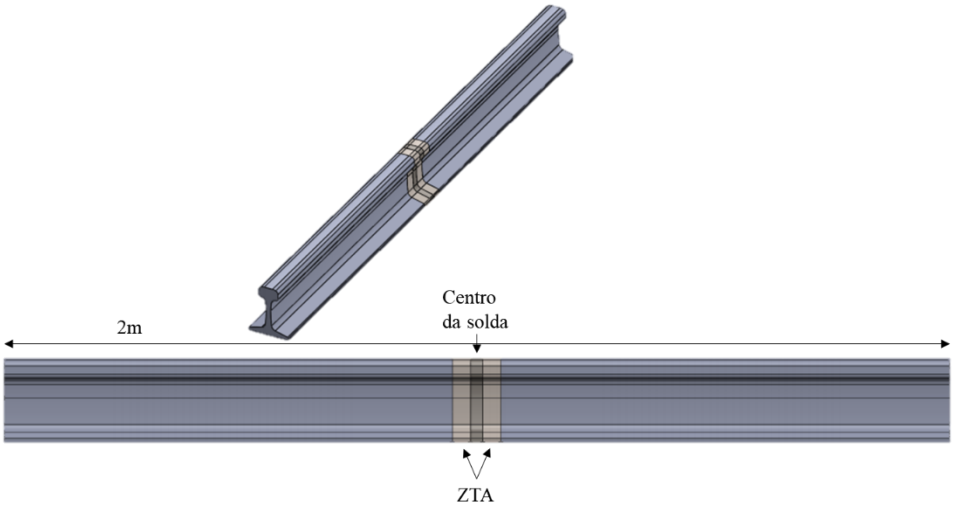
Figura 35. a) Máquina de soldagem por centelhamento, b) equipamento de resfriamento por ar forçado.



Fonte: Autoria Propria.

As amostras possuem 2 m de comprimento como exemplificado na Figura 36, a Tabela 7 apresenta a nomenclatura utilizada de acordo com a pressão e taxas de resfriamento pós soldagem. A Tabela 8 mostra a composição química do material característico de trilhos *premium*.

Figura 36. Modelo das amostras utilizadas.



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 7. Nomenclatura e taxa de resfriamento das amostras.

Amostra	Tratamento térmico	Pressão (Bar)	Taxa de resfriamento (ºC/s)
N0	Não	---	1
N1	Sim	1	1,5
N3	Sim	3	4

Fonte: Projeto Cátedra.

Tabela 8. Composição química do material.

C	Mn	Si	Cr	P	S	Ni	V	CE
0,7	1,02	0,21	0,22	0,01	0,01	0,02	0	1

Fonte: Projeto Cátedra.

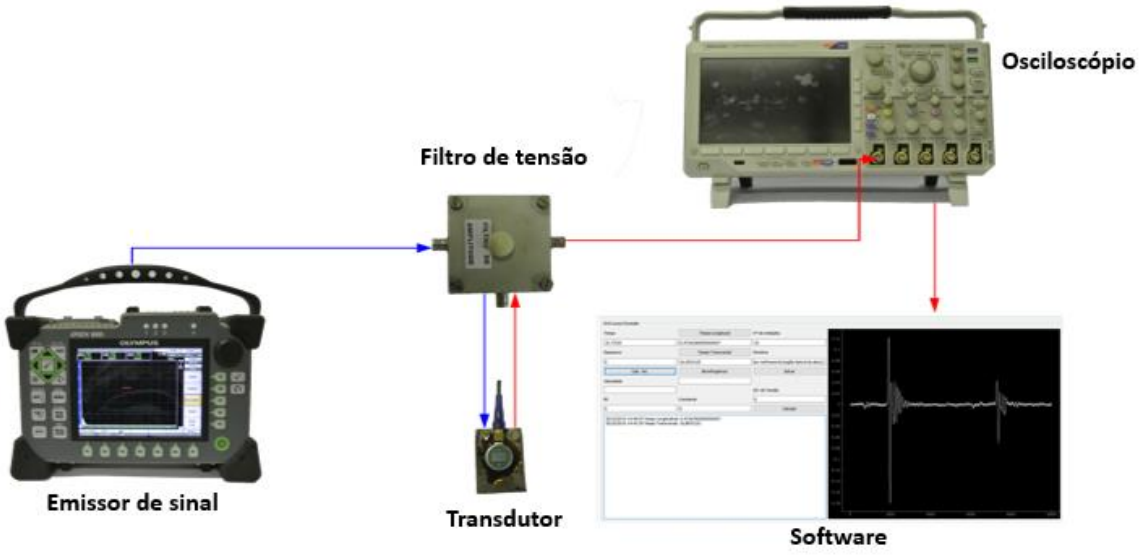
4.2 MÉTODOS

A metodologia de trabalho visa tentar avaliar de forma experimental as tensões residuais dos trilhos através das técnicas de ultrassom e furo cego, sendo a primeira aplicada no metal de base e a segunda no centro da solda e ZAC.

4.2.1 Bancada de Ultrassom

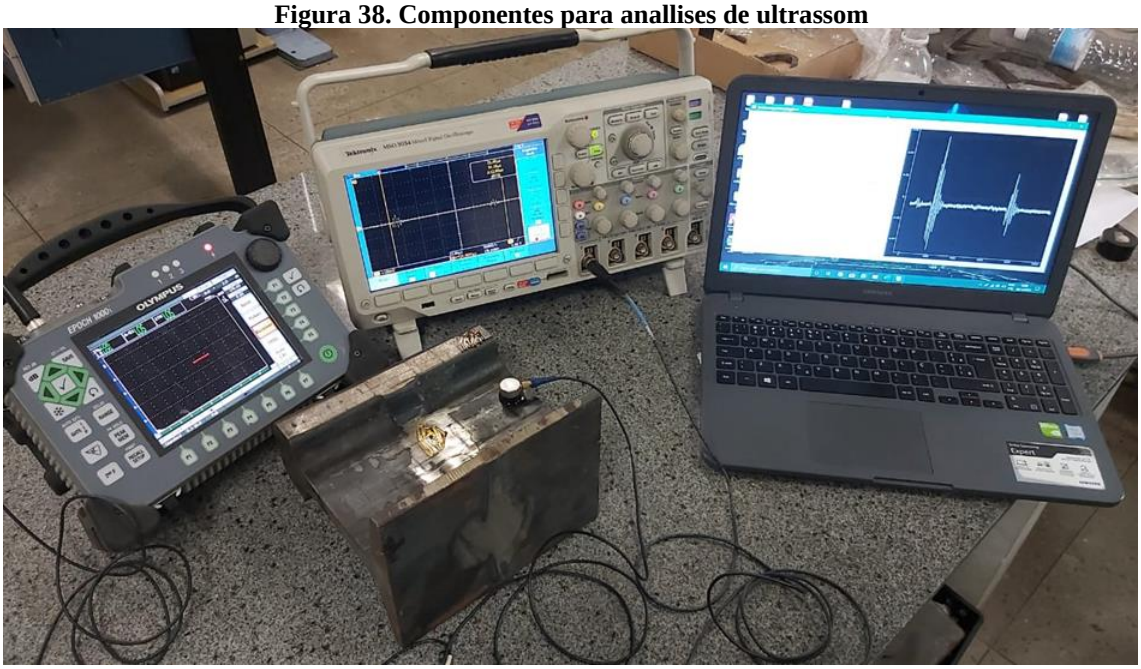
Para realizar as medições de ultrassom foi utilizado um conjunto de equipamentos composto por: Emissor de sinal, osciloscópio, transdutor piezelétrico de onda transversal e filtro de amplitude que conectava todos os componentes tendo uma saída de baixa tensão para o osciloscópio e uma de alta tensão para o transdutor. Cada componente foi configurado para obter o melhor sinal possível, visto que a geometria do trilho dificultava a resposta da onda. A Figura 37 mostra os equipamentos conectados e o software utilizado e a Figura 38 demonstra os equipamentos conectados durante a medição.

Figura 37. Equipamento utilizado.



Fonte: adaptado Albuquerque, (2019).

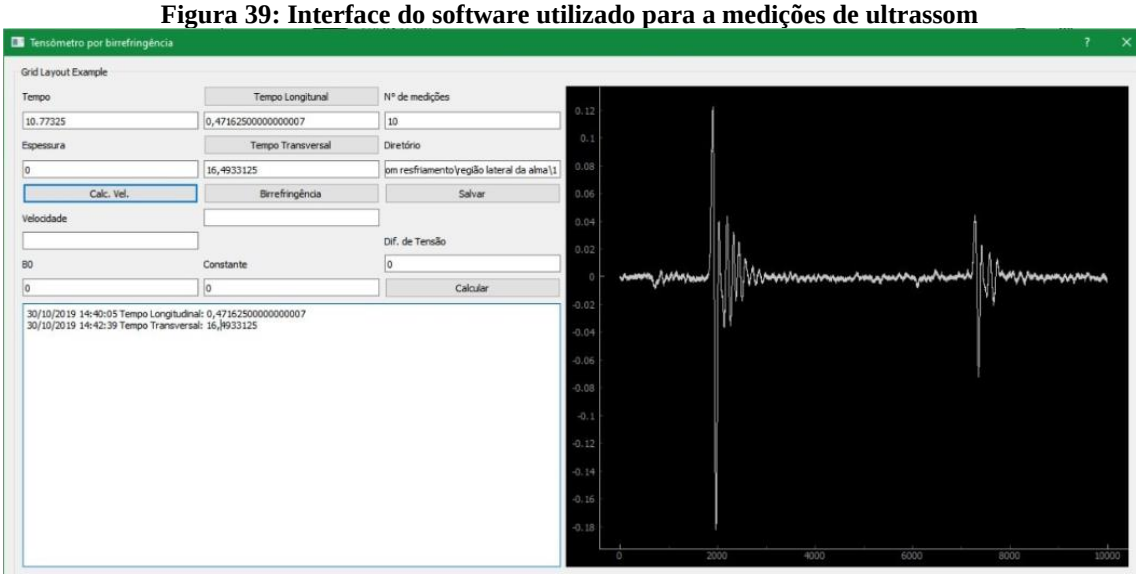
Figura 38. Componentes para anallises de ultrassom



Fonte: Autoria Própria.

Para otimizar o processo de medições foi utilizado um software desenvolvido em *python*, que determina o tempo da onda através da correlação cruzada e interpolação dos sinais ultrassónicos. O software foi configurado para obter uma média de 10 medições do tempo de percurso da onda no mesmo ponto, sendo a propagação pelo método de pulso eco (somente um transdutor emitindo e recebendo o sinal). A Figura 39 mostra a interface do software.

Figura 39: Interface do software utilizado para a medições de ultrassom

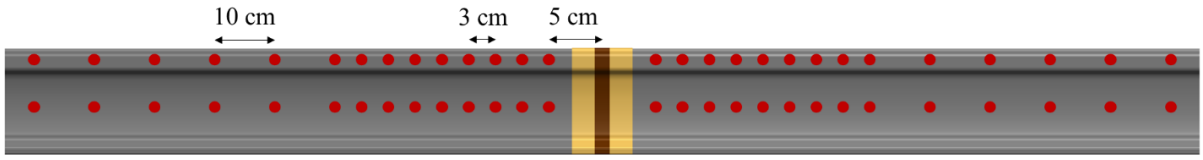


Fonte: Autoria Própria.

4.2.1.1 Medições de ultrassom

As medições foram realizadas somente no metal de base na lateral do boleto e alma, ao todo ocorreram 28 medições em cada amostra, todas no metal de base, sendo 14 em cada lado do trilho. O primeiro ponto foi medido a 5 cm do centro da solda, nos próximos 9 pontos a partir do centro da solda o espaçamento variava de 3 em 3 cm cada, e nos 5 pontos mais afastados de 10 em 10 cm. A Figura 40 esquematiza como e onde foram realizados os pontos.

Figura 40. Pontos de medições pela técnica de ultrassom.

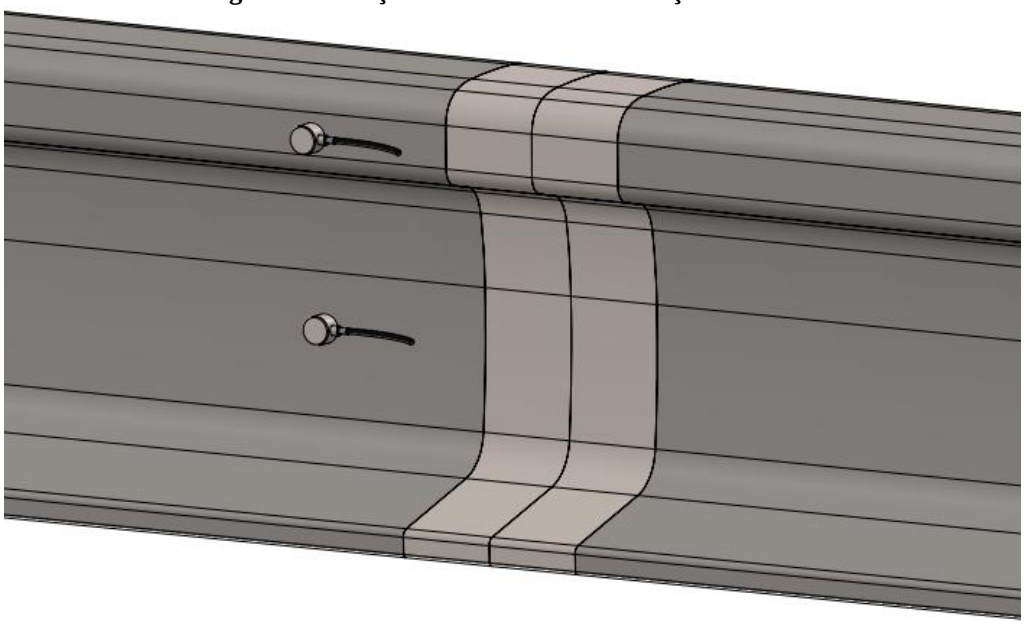


Fonte: Autoria Própria.

Como a região da ZAC e do centro da solda possuem uma anisotropia e microestrutura diferente em relação ao metal de base, os valores da birrefringência inicial e da constante acustoelástica também são diferentes, logo não foi possível determinar as tensões nessa região, pois essas variáveis ainda não foram determinadas.

Os transdutores de ondas cisalhantes foram fixados com acoplante sugerido pela norma ASTM E494, e posicionados de forma longitudinal e vertical ao sentido de laminação do trilho, na lateral do boleto e no centro da alma. A Figura 41 demonstra a posição do transdutor no sentido longitudinal, a região mais acinzentada representa a solda.

Figura 41. Posição do transdutor em relação ao trilho.



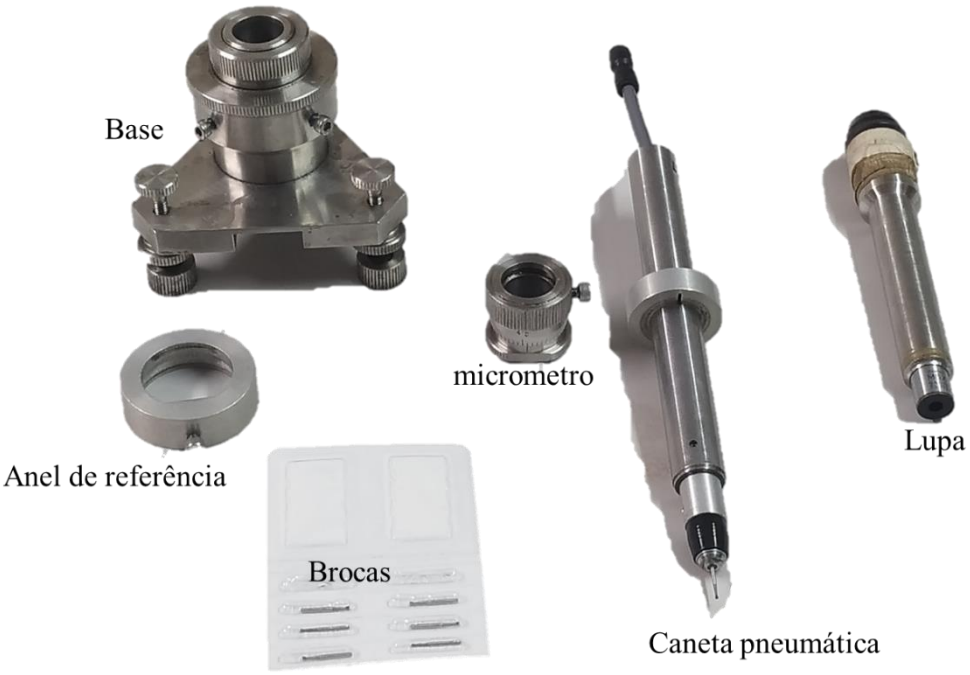
Fonte: Autoria Própria.

Os possíveis erros na medição da técnica de birrefringência acústica são associados aos seguintes fatores: operação de manuseio, geometria do trilho, descontinuidades da microestrutura ou inclusões de sulfeto de manganês. Esses erros podem ocasionar valores extremamente altos que não condizem com o nível de tensão encontrado nas literaturas. Outro fator que pode acrescentar erros são o B_0 e C_a utilizados, pois ambos pertencem a um material similar e foram determinados somente para o boleto.

4.2.2 Bancada de furo cego

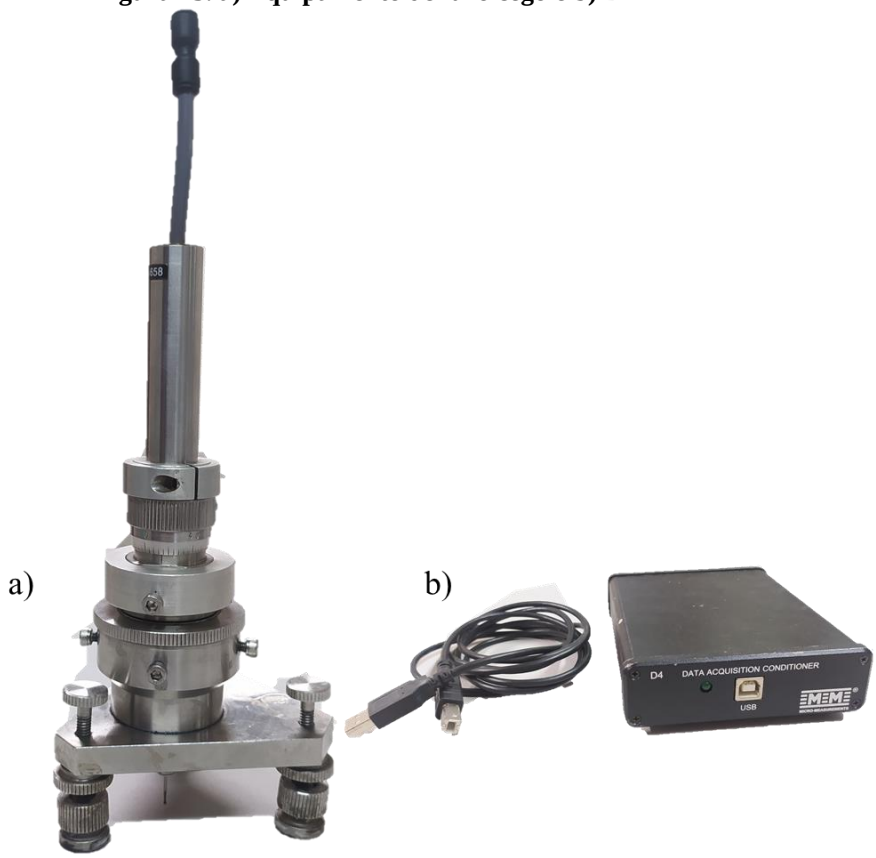
Para a técnica de furo cego foi utilizado um equipamento composto por uma base com três apoios reguláveis, micrometro, anel de referência, lupa, caneta pneumática, broca e compressor. A Figura 42 mostra os componentes do equipamento de furo cego enquanto a Figura 43 exibe o equipamento montado, o cabo de conexão e o Hardware (D4link) utilizado para medir as deformações.

Figura 42. Componentes do equipamento de furo



Fonte: Autoria Própria.

Figura 43. a) Equipamento de furo cego e b) D4Link

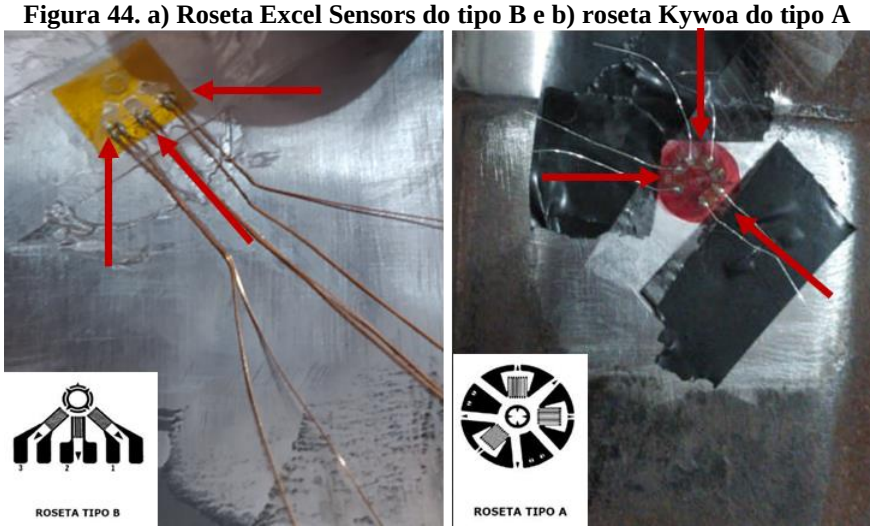


Fonte: Autoria Própria.

4.2.2.1 Medições de Furo cego

Para a execução do furo foram utilizadas rosetas do tipo A e B, de diferentes fabricantes. A Figura 44 mostra as rosetas da Excel Sensors (tipo b) e Kywoa (tipo a), as setas em vermelho indicam as posições e orientações dos extensômetros em cada roseta. A Figura 45 mostra uma visão aproximada do centro da roseta observada pela lupa durante a calibração e alinhamento, enquanto na Figura 46, são mostrados os cabos conectados a roseta e o software utilizado para registrar as deformações.

Figura 44. a) Roseta Excel Sensors do tipo B e b) roseta Kywoa do tipo A



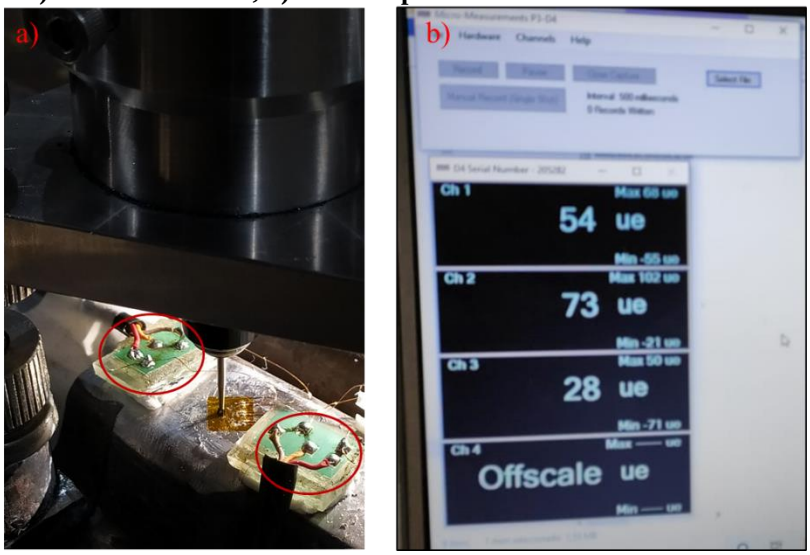
Fonte: Autoria Própria.

Figura 45. Visão da lupa do centro da roseta da Excel Sensors.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 46. a) Rosetas cabeadas, b) software para recebimento dos dados de deformação.



Fonte: Autoria Própria.

A preparação do trilho até a realização do furo consiste em diversas etapas, tais como:

- Lixamento da superfície com lixas d'agua até a granulometria de 220;
- Limpeza da região com álcool isopropílico;
- Fixação da roseta e base do equipamento com cola de cianoacrilato;
- Nivelamento e Calibração do equipamento em relação à roseta;
- Cabeamento através de solda elétrica dos cabos da roseta para leitura da deformação;
- Montagem do anel de referência, micrometro e caneta pneumática.

Para evitar erros no processo de medição algumas precauções foram tomadas:

- Aguardar cerca de 1h após a colagem da roseta;
- Utilização de proteção de silicone na roseta para reduzir erros por influências externas.

Devido a elevada dureza do material as brocas foram trocadas a cada dois furos, o desgaste ocasionado pelo processo poderia interferir nas medições. A Figura 47 mostra de forma comparativa a broca nova e usada, após o primeiro e segundo furo.

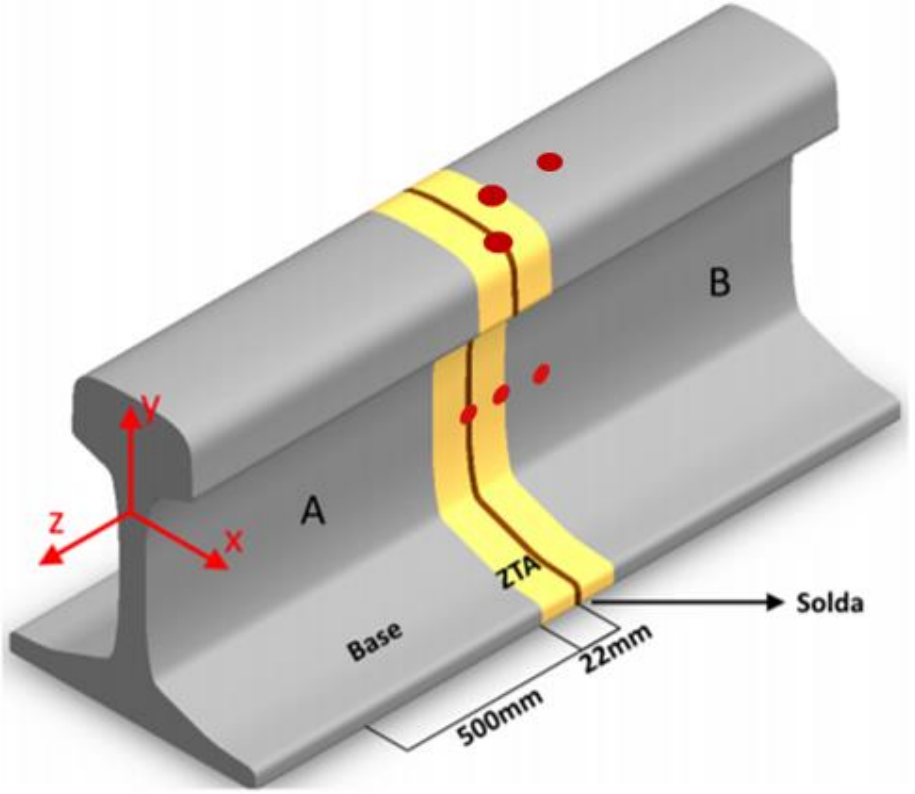
Figura 47. Vista das brocas a) frontal e b) superior.



Fonte: Projeto Cátedra.

Os furos foram realizados conforme determinado pela norma ASTM E837-20, no qual estabelece que a profundidade do furo deve ter cerca de 1mm, os furos foram realizados no centro da solda e na extremidade da ZAC, na superfície do boleto e centro da alma, para regular a profundidade do furo o micrômetro avançava de 0,05 em 0,05 mm até completar 1 mm, esse processo resultava no total de 20 incrementos. A Figura 48 mostra onde ocorreram os furos enquanto a Figura 49 ilustra o espaçamento percorrido a cada incremento do micrometro.

Figura 48. Regiões de análise pela técnica de Furo cego.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 49. Distância de cada avanço do micrometro.



Fonte: Autoria Própria.

Para determinar o ponto de medição na extremidade da ZAC, foi realizado um ataque químico com reagente a base de 12% H_2SO_4 + 38% HCL + água, para revelar a macroestrutura superficial, como mostrado na Figura 50, permitindo a visualização de uma região mais escura entre a transição do metal de base e a ZAC.

Figura 50. Macrografia da região soldada da alma.



Fonte: Autoria Própria.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo é apresentado os resultados da birrefringência inicial (B_0) e da constante acustoelática (Ca) do trilho considerado sem tensão. Em sequência, apresenta-se os resultados da diferença de tensões residuais por birrefringência acústica, sendo elas nas direções longitudinais (σ_z) e verticais (σ_y) dos trilhos ferroviários. Por fim, mostram-se as tensões residuais obtidas pela técnica de furo cego na região da solda e ZAC.

5.1.1 Birrefringência acústica e constante acustoelástica do material como recebido

A birrefringência inicial (B_0) utilizada nos cálculos de tensões residuais é o mesmo utilizados por Albuquerque (2019), ele determinou o valore do B_0 através da análise de seis chapas retiradas da região do boleto de um trilho similar ao estudado neste trabalho, todas as amostras foram submetidas a tratamento térmico de alívio de tensão para respeitar a condição do material sem tensão, sendo o valor de B_0 igual a 1,476 E-3. De forma semelhante, a constante acustoelástica (C_a) utilizada no cálculo das tensões foi determinada por Albuquerque (2019), sendo o valor igual a -7,95812 E-6 (MPa-1).

5.2 ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS DOS TRILHOS VIA BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA

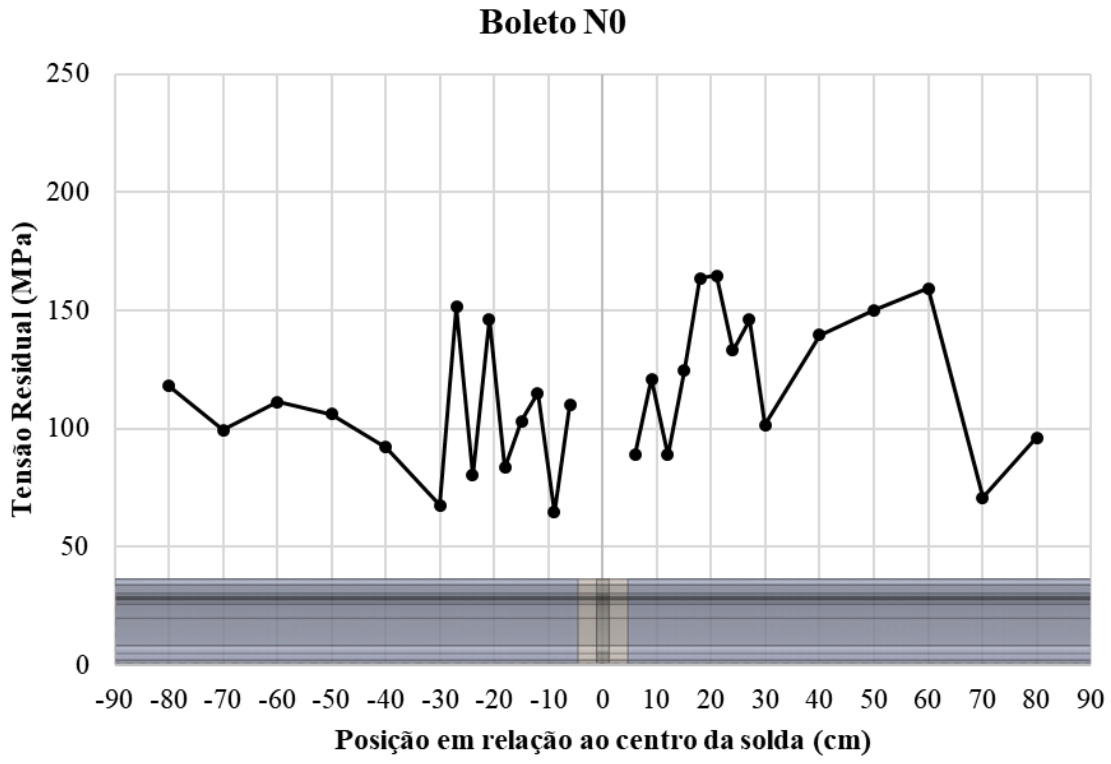
As Figuras 51, 52 e 53 mostram o gráfico da distribuição da diferença de tensões medida na lateral do boleto na região do metal de base. O eixo das ordenadas indica a posição em relação ao comprimento do trilho tendo como origem o centro da solda, e o eixo das abscissas indica a diferença de tensão residual, os valores de tensão podem ser encontrados no apêndice A.

A partir dos resultados obtidos, é possível constatar que, todas as amostras apresentaram tensões trativas. A amostra N3 foi a que apresentou menores valores de tensões, todas as amostras em ambos os lados, até aproximadamente 30 cm da linha central da solda é onde ocorre a maior variação dos valores, tendo magnitudes dentro de uma faixa de 80 a 200 MPa como visto na amostra N0. Este fato pode estar relacionado a influência da soldagem nas proximidades da região. Em todos os gráficos, a partir de 40 cm da linha central do cordão, ocorreu uma estabilidade dos valores das tensões trativas, característica de trilho novo.

As simulações de Carvalho (2020) e Li *et al.* (2020) apresentaram resultados que possuem a mesma tendência do observado nesta pesquisa, tensões residuais trativas no boleto, mesmo contendo regiões pontuais de tensões compressivas. As simulações mostram que as tensões residuais nos sentidos vertical e transversal tendem a 0, considerando esse contexto pode-se estimar que neste trabalho, a diferença de tensões apresenta majoritariamente tensões longitudinais de forma trativa no boleto. O Anexo A apresenta resultados de furo cego realizado na superfície do trilho no metal de base onde a tensão longitudinal é trativa.

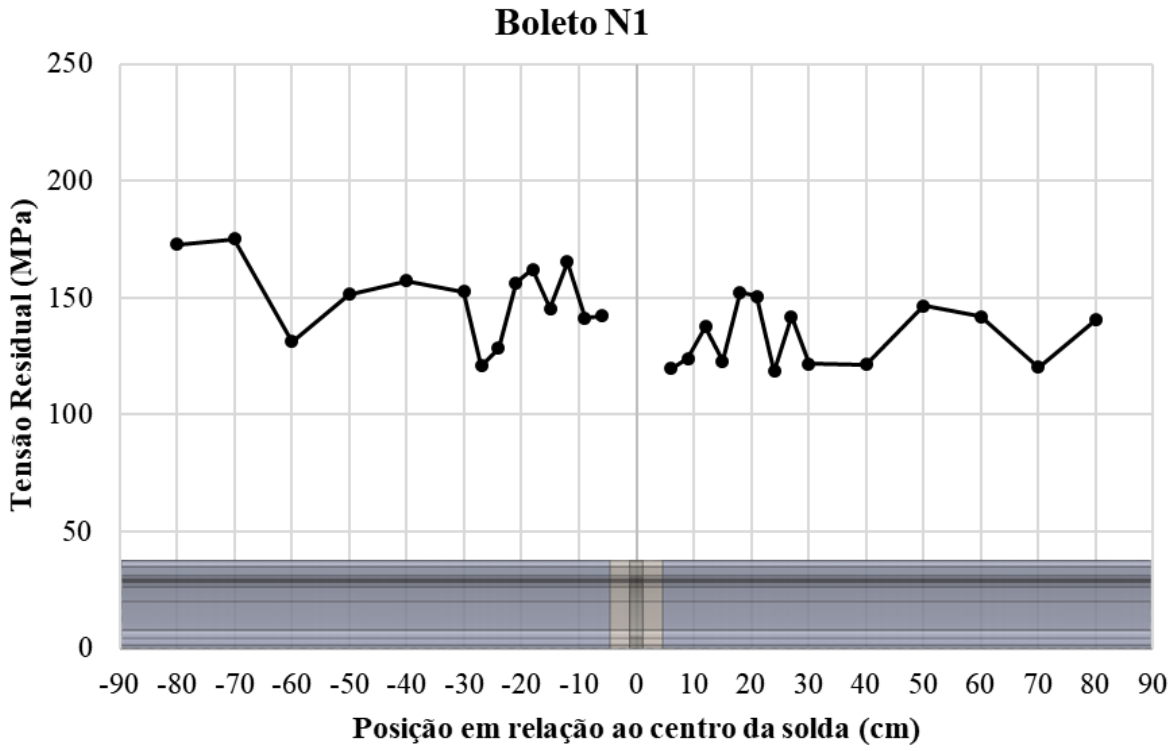
Li *et al.* (2020) mostraram que a tensão residual longitudinal no boleto pode variar de +238 MPa na superfície do boleto para -200 MPa próximo ao centro do boleto. Os valores máximos de tensões trativas e compressivas no boleto encontrados por Carvalho (2020) foram de +252,58 MPa e – 42,98 MPa. Sendo assim, os valores obtidos via técnica de birrefringência trata-se de uma informação de média da diferença entre as tensões principais correspondente ao volume de interação percorrida pela onda sonora, ou seja, para a lateral do boleto tem-se duas regiões laterais e o núcleo. Desta forma, não se espera que os resultados desta técnica sejam aproximados dos resultados obtidos via técnicas de medição de tensões residuais que avaliam a superfície e/ou subsuperfície de materiais. Entretanto, o resultado referente ao sentido da tensão pode ser comparado dependendo do caso.

Figura 51. Tensões residuais ao longo do boleto da amostra N0



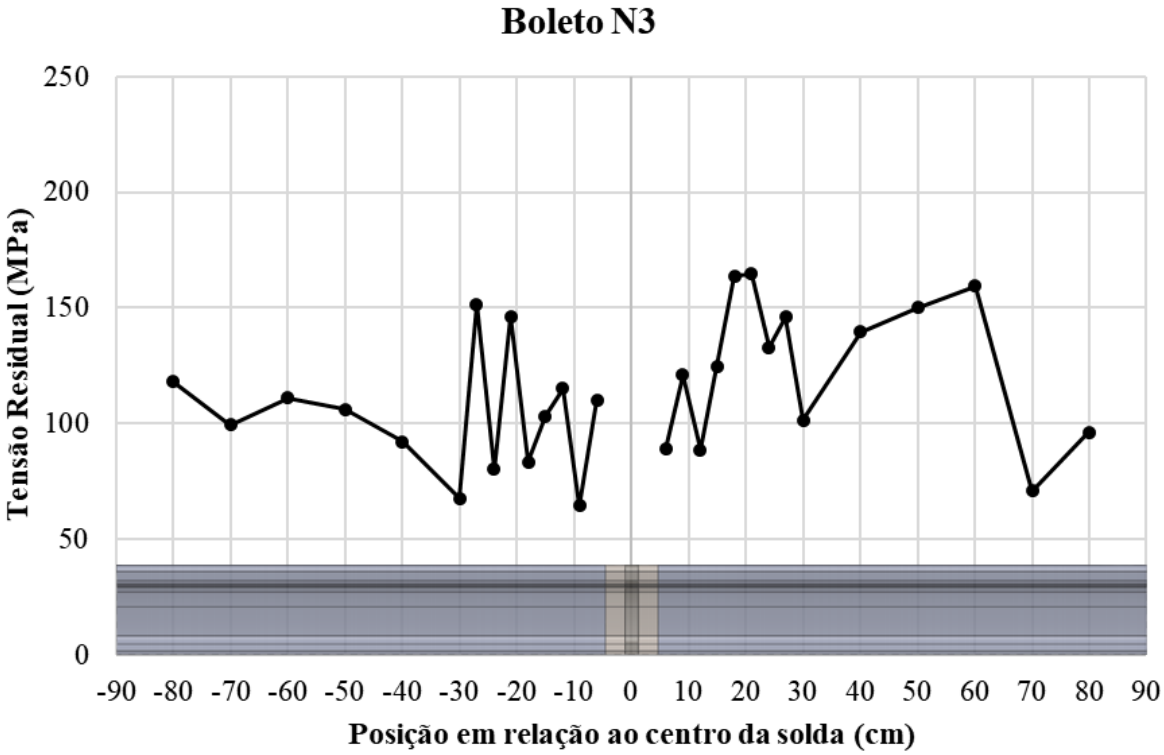
Fonte: Autoria Própria.

Figura 52. Tensões residuais ao longo do boleto da amostra N1.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 53. Tensões residuais ao longo do boleto da amostra N3.



Fonte: Autoria Própria.

As Tabelas 9 e 10 apresentam a média das tensões no metal de base entre os pontos medidos de 3 em 3 cm, e de 10 em 10 cm. Observa-se que os valores médios para as condições avaliadas não apresentam diferença significativa, no entanto, os maiores desvios para os pontos mais próximos a solda (Tabela 9) indicam tendência de maior dispersão dos resultados obtidos.

Dentre os dados experimentais encontradas na literatura, citadas no Anexo A, percebe-se que as medições realizadas na região do topo do boleto tendem a ser trativas enquanto na lateral do boleto tende a ser compressivas. Turan (2016) verificou, via técnica de difração de raio X, que amostras de trilhos com boletos tratados apresentam valores de tensões compressivas maiores que o trilho sem tratamento no boleto. Yu (2015) verificou ainda que a duração e o tipo de resfriamento influenciam diretamente nas tensões residuais. O autor verificou ainda que a tensão máxima na superfície do trilho com resfriamento por ar é de 0,136 MPa, enquanto por água chega a 262,6 MPa.

Tabela 9. Média das tensões nos pontos espaçados de 3 em 3 cm no boleto.

Amostras	Média das tensões (σ_z-σ_y) (MPa)	Desv. Padrão (σ_z-σ_y) (MPa)
N0	146,93	33,58
N1	139,15	15,53
N3	114,15	31,86

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 10. Média das tensões nos pontos espaçados de 10 em 10 cm no boleto

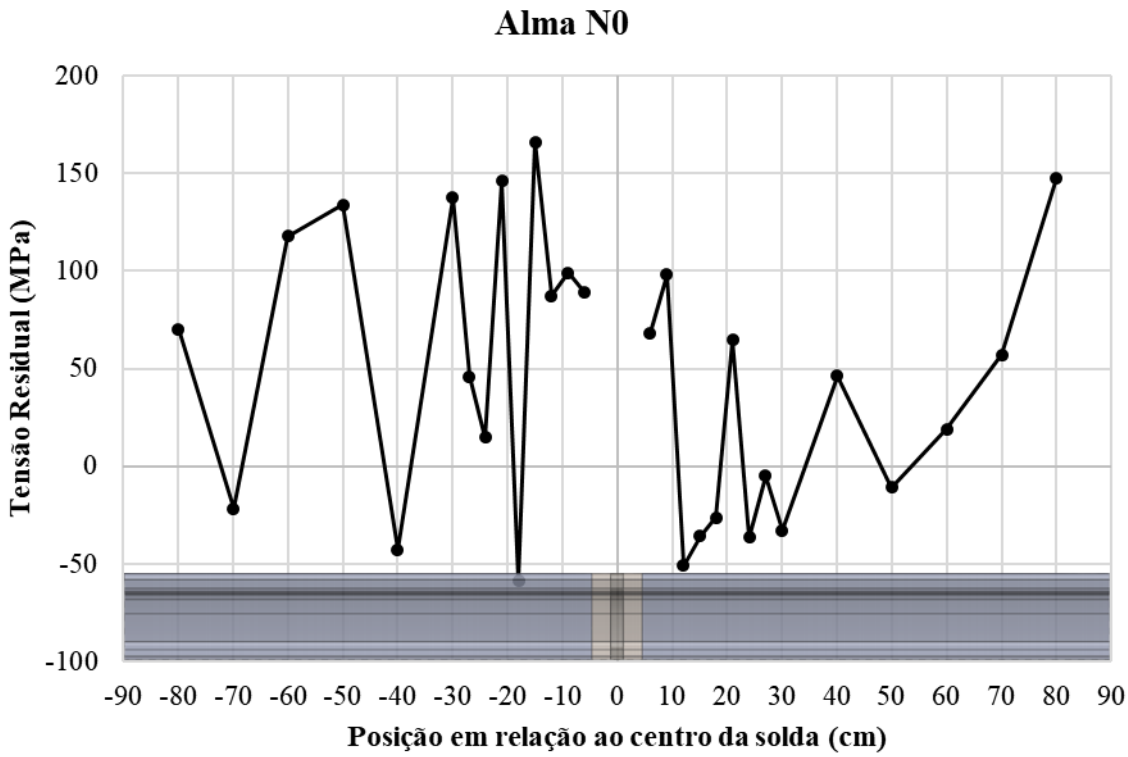
Amostras	Média das tensões (σ_z-σ_y) (MPa)	Desv. Padrão (σ_z-σ_y) (MPa)
N0	125,60	22,65
N1	145,91	19,01
N3	114,31	27,83

Fonte: Autoria Própria.

As Figuras 54, 55 e 56 mostram o perfil da distribuição da diferença de tensões residuais medida no metal de base na região da alma, mais detalhes dos valores de tensões na alma podem ser encontrados no Apêndice A.

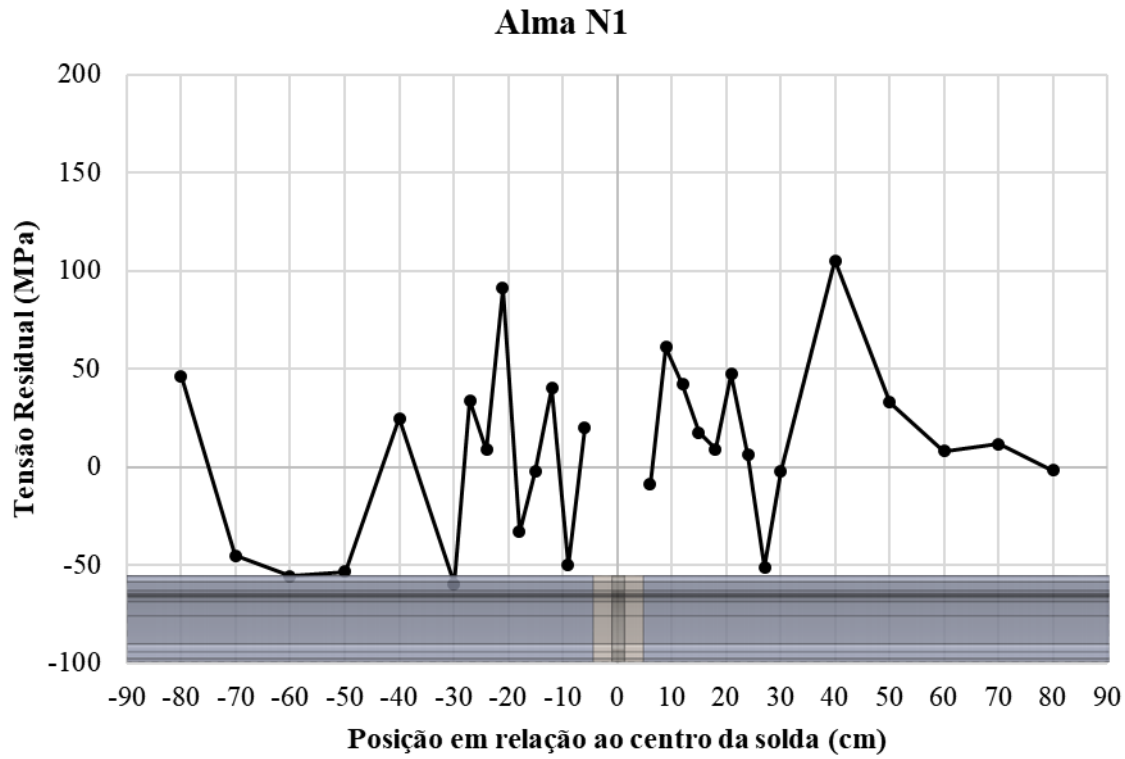
A distribuição da diferença de tensões na alma mostrou-se bastante heterogênea com tensões trativas e compressivas para todas as condições de resfriamento, a maior variação dos valores ocorreu próximos a solda. A amostra N0 foi a que apresentou maior variação de tensão, variando de 166,14 a -58,47 MPa. Na amostra N3 existe a predominância de tensões compressivas na alma, semelhante ao sentido de tensões encontrados por (Biempica *et al.*, 2009; Tawfik *et al.*, 2006; Oliveira 2018).

Figura 54. Tensões residuais ao longo da alma na amostra N0



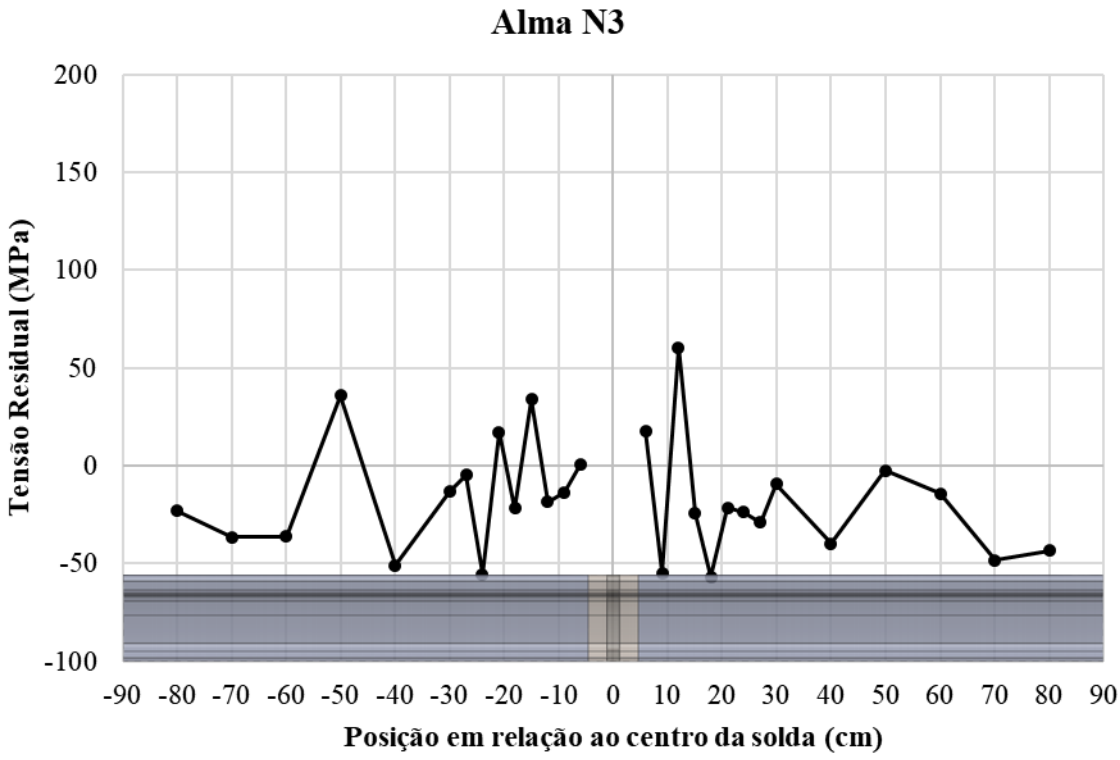
Fonte: Autoria Própria.

Figura 55. Tensões residuais ao longo da alma na amostra N1



Fonte: Autoria Própria.

Figura 56. Tensões residuais ao longo da alma na amostra N3



Fonte: Autoria Própria.

As Tabelas 11 e 12 apresentam a média das tensões na alma na região do metal de base entre os pontos medidos de 3 em 3 cm, e de 10 em 10 cm. Os resultados mostram valores médios baixos com grande desvio padrão, sugerindo que os valores de tensões variam entre valores positivos e negativos próximo de zero e sem diferença significativa. Sendo que a condição N3 apresentou valor médio negativo e as condições N1 e N2 valores positivos.

A média das tensões residuais na alma para os trilhos N0 e N1 mostrou-se trativa, a medição por furo cego na amostra N0, disponível no Anexo A, apresentou o mesmo padrão. Esperava-se que esse comportamento da amostra N3 fosse semelhante para todos os trilhos. Nesse sentido, acredita-se que a soldagem pode ter influenciado de forma significativa essa região, principalmente nas regiões próximas onde ocorre maior variação entre tensões trativas e compressivas. De modo geral, esses resultados estão em acordo com outros disponíveis na literatura, embora medidos com outras técnicas, (Hodgson, 1993; Henderson *et al*., 1998; Ma. *et al.*, 2017)

Tabela 11. Média das tensões nos pontos espaçados de 3 em 3 cm na alma.

Amostras	Média das tensões (σ_z-σ_y) (MPa)	Desv. Padrão (σ_z-σ_y) (MPa)
N0	42,81	73,31
N1	9,48	40,56
N3	-11,94	30,55

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 12. Média das tensões nos pontos espaçados de 10 em 10 cm na alma

Amostras	Média das tensões (σ_z-σ_y) (MPa)	Desv. Padrão (σ_z-σ_y) (MPa)
N0	51,72	66,70
N1	7,27	50,04
N3	-25,83	26,58

Fonte: Autoria Própria.

Através da análise estatística é possível observar que, com a média móvel dos resultados de ultrassom no boleto, as amostras N0 e N3 apresentaram uma diminuição dos valores de tensão quando medidos próximos a solda, talvez devido ao resfriamento mais intenso a amostra N3 mostrou uma linha de tendencia mais acentuada que a amostra N0. A amostra N1 se comportou de forma contraria as outras, elevando as tensões quando medido próximo a solda, com isso, os resultados demonstraram que existe uma tendencia de alteração das tensões conforme a taxa de resfriamento. No entanto, a Análise de Variância (ANOVA) para um alfa (α) de 5%, mostrou que os resultados de tensão em função da taxa de resfriamento não apresentaram diferença significativa. Os gráficos da média móvel e os valores da ANOVA são mostrados respectivamente no Apêndice C e D.

5.3 ANÁLISES DE TENSÕES RESIDUAIS DA SOLDA VIA FURO CEGO

A técnica de furo cego foi utilizada no centro da solda e na zona afetada pelo calor do boleto e alma do trilho.

As Tabelas 13, 14 e 15 apresentam os valores de tensões residuais longitudinais e transversais para o boleto e longitudinais e verticais para alma, ambos na região central da solda e na extremidade da ZAC. As Figuras 57 e 58 mostram o nível de tensões para o centro da solda e ZAC.

Os resultados encontrados no boleto, observa-se que todas as amostras apresentaram tensões compressivas no centro da solda, tendo uma redução das tensões conforme o aumento da taxa de resfriamento, na extremidade da ZAC ocorreu o mesmo padrão, no entanto a amostra

N3 apresentou tensões trativas no sentido transversal. Porcaro (2019) e Ma (2015) obtiveram valores próximos as medições no centro da solda do topo do boleto, resultaram respectivamente em -181,0 e -215,0 MPa na direção longitudinal e -77,7 e 18,7 MPa na transversal. Resultados similares para taxas de resfriamento pós soldagem equivalentes a -132 e -44 MPa.

A região da alma apresentou majoritariamente tensões trativas, mostrando um comportamento oposto ao do boleto no centro da solda, quanto maior a taxa de resfriamento, maiores foram os níveis de tensões longitudinais e verticais. Na extremidade da ZAC não houve grande variação dos valores, no entanto as tensões verticais mostraram-se mais elevadas que as longitudinais, o que demonstra a importância do estudo das tensões nesse sentido. As simulações desenvolvidas por Tawfik *et al.,* (2008); Ghazanfari e Tehrani., (2018), assim como as análises experimentais realizadas por Saita *et al.,* (2017), Ma *et al.,* (2015) e Tawfik (2006), mostraram resultados similares aos encontrados nesta pesquisa.

Tabela 13. Dados de tensão residual da amostra N0

	Boleto (MPa)		Alma (MPa)	
Ponto	σ_z	σ_x	σ_z	σ_y
ZAC_LA			159	320
ZAC_LB				
CS	-202	-130	180	204

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 14. Dados de tensão residual da amostra N1

	Boleto (MPa)		Alma (MPa)	
Ponto	σ_z	σ_x	σ_z	σ_y
ZAC_LA			118	225
ZAC_LB	-387	-43	163	261
CS	-281	-96	307	364

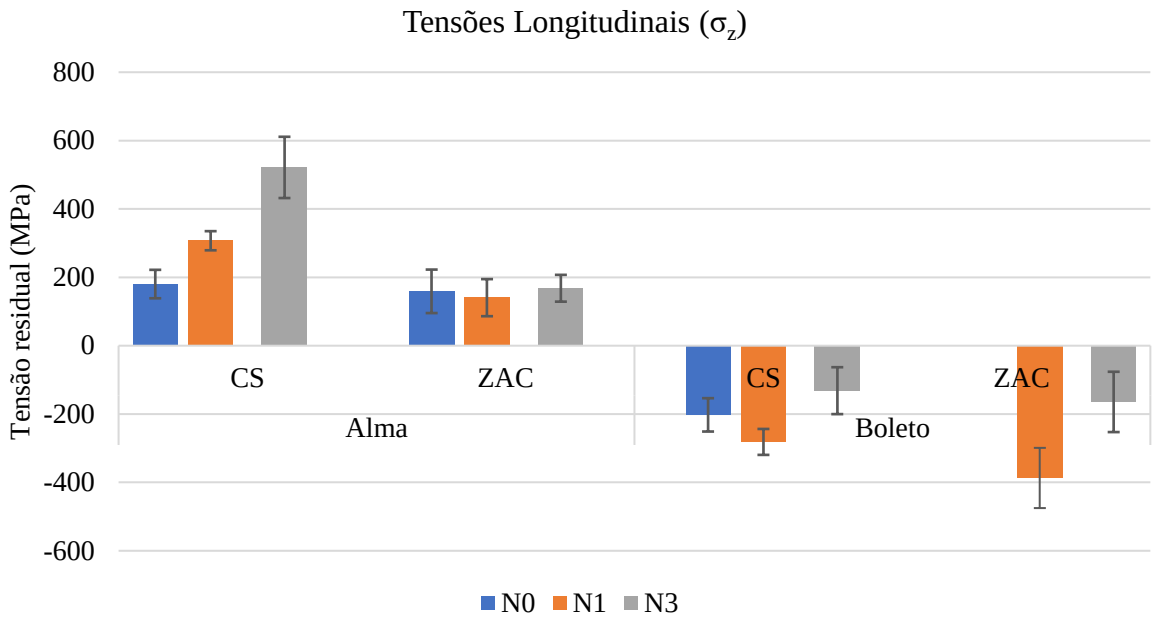
Fonte: Autoria Própria.

Tabela 15. Dados de tensão residual da amostra N3

	Boleto (MPa)		Alma (MPa)	
Ponto	σ_z	σ_x	σ_z	σ_y
ZAC_LA	-214	26	140	325
ZAC_LB	-115	72	196	353
CS	-132	-44	522	417

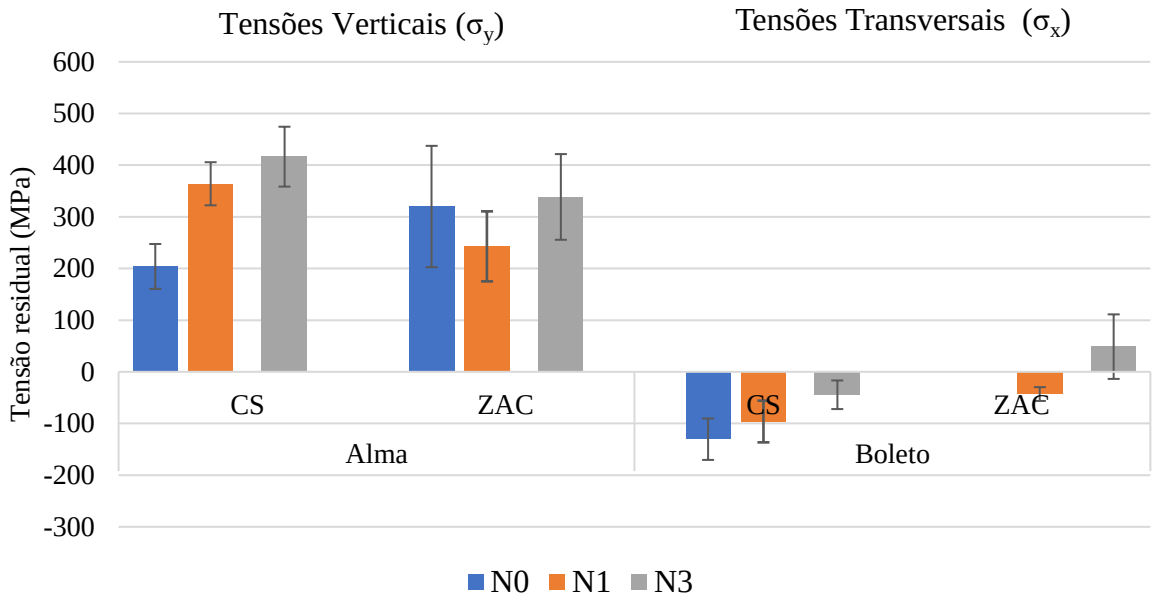
Fonte: Autoria Própria.

Figura 57: Gráfico de tensões residuais longitudinais obtidas via técnica de furo cego na região do centro da solda a ZAC do boleto e alma.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 58: Gráfico de tensões verticais e transversais obtidas via técnica de furo cego na região do boleto e alma.



Fonte: Autoria Própria.

6 CONCLUSÕES

As análises de tensões residuais nas amostras de trilhos ferroviários soldadas por centelhamento e resfriadas de forma controlada com diferentes taxas apresentaram as seguintes conclusões:

A diferença das tensões residuais principais medidas no metal base do boleto a 30 cm da região de fronteira da ZAC para diferentes condições de resfriamento são de natureza trativas. Sendo a máxima encontrada na ordem de 203 MPa para o trilho N0, que representa 25% da tensão de escoamento do material que é 800 MPa. Para a diferença de tensões residuais medida na alma, constatou-se que nas amostras N0 e N1 a presença de tensões em sua maioria de natureza trativa, indicando a influência do processo de soldagem. principalmente, na região até 30 cm de ambos onde ocorre a maior variação dos valores, no entanto, a amostra N3 apresentou tensões compressivas na alma, característica de trilhos novos. Tendo como referência a tensão de escoamento do trilho, constata-se que, a distribuição de tensões nas regiões do boleto e alma próximos a solda, assim como o efeito das diferentes taxas de resfriamentos, não influenciaram significativamente na magnitude da tensão de escoamento. No entanto, é necessário monitorar de forma isolada as tensões de cada eixo, σ_x, σ_y e σ_z. Dessa forma, as tensões obtidas por birrefringência serão separadas, permitindo a análise das tensões principais medias para um determinado volume do material.

A medição de tensão residual por furo cego permitiu concluir que quanto maior a taxa de resfriamento menor são as tensões compressivas no centro da solda e ZAC medidas no boleto. Na alma, quanto maior a taxa de resfriamento maior são as tensões trativas no centro da solda, enquanto na extremidade na zona afetada pelo calor não ocorre variação significativa dessas tensões, as quais são trativas no eixo vertical.

O resfriamento controlado após a soldagem dos trilhos é de grande relevância, pois influencia em seu estado de tensões, como foi constatado com as análises de ultrassom e furo cego. Esses resultados mostram a importância do estudo das tensões residuais, uma vez que de posse do conhecimento dos valores, pode-se intervir no processo de fabricação de TLS com tratamento térmico pós soldagem para alívio de tensões.

7 CONCLUSÕES TECNOLÓGICAS

Levando em consideração a característica deletéria que as tensões residuais trativas podem ter à integridade estrutural e mecânica do trilho e solda, contribuindo para o processo de falha como observado por Saíta *et al*., (2013), e Godefroid *et al*., (2015), é sugerido que as regiões do trilho com tensões trativas tenham níveis baixos, principalmente na direção vertical para a região da alma da solda. A amostra N3 com taxa de resfriamento de 4 ºC/s foi a que apresentou maiores valores de tensão trativa para esta região, enquanto a amostra N0 sem resfriamento forçado, taxa de 1 ºC/s, apresentou valores menores. Nesse sentido, o uso de resfriamento da solda com maiores taxas para melhorar a propriedade mecânica do boleto, com o objetivo de diminuir a diferença entre a solda e o trilho como fabricado, deve seguir de tratamento térmico de alívio de tensões residuais para conferir tensões trativas toleráveis na solda.

Com o aprimoramento da técnica de ultrassom é possível aplicá-la como inspeção do trilho no estaleiro de solda e no campo antes e após o processo de soldagem, devido a praticidade e rapidez nas medições. Dessa forma, possibilitando o monitoramento dos níveis de tensões residuais dos trilhos antes e após instalação na via férrea.

8 SUGESTÕES PARAR TRABALHOS FUTUROS

- Determinar através da Birrefringência acústica as constantes acustoelástica e a birrefringência inicial do metal de base, ZAC e centro da solda do boleto e alma dos trilhos *premium* e *superpremium;*
- Verificar se com a técnica de transparência é possível melhorar o sinal recebido pelo transdutor;
- Aplicar a técnica de separação de tensões aplicada a birrefringência acústica com ondas cisalhantes e compressivas descrita por Hirao 2017.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

ABNT. NBR 7590 - Trilho Vignole — Requisitos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 37, 2012.

Agarwal, S. C. &. M., 2013. Railway Engineering. 2 ed. s.l.:Oxford University Press.

Albuquerque, Lucas. *Metodologia para a determinação das constantes acustoélasticas em trilhos ferroviários.* 2016. 56f. Trabalho de conclusão de curso – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Pará.

AREMA. **Manual for Railway Engineering**, v. 1, p. 2000–2001, 2010.

ASTM International. *Método de teste padrão E837-20 para determinação de tensões residuais pelo método Strain Gage de perfuração* . West Conshohocken, PA; ASTM International, 2020. doi: https://doi.org/10.1520/E0837-20

ASTM International. *E494-20 Prática padrão para medição de velocidade ultrassônica em materiais pelo método comparativo de eco de pulso* . West Conshohocken, PA; ASTM International, 2020. doi: https://doi.org/10.1520/E0494-20

ANDREUCCI, Ricardo. 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>. Acesso em: 20 jan. 2021.

AWS (American Welding Society). AWS A3.0M/A3.0:2010: standard welding terms and definition. Miami: AWS; 2010.

BITTENCOURT, M. S. Q. Desenvolvimento de um sistema de medida de tempo decorrido da onda ultrassônica e análise do estado de tensões em materiais metálicos pela técnica da birrefringência acústica. 2000. 115f. Tese (Doutorado) - Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

Bian Y, Zheng R and Kang XH. Test and analysis of residual stress for on-line heat treated rail. Sci Technol Baotou Steel 2018; 44: 45–48.

BIEMPICA, C.; DIAZ, J.; NIETO, P.; SANCHEZ, L. Nonlinear analysis of residual stresses in a rail manufacturing process by fem. Ady Math Model, v. 33, p. 34 – 53, 2009.

CANNON, D. F. *et al*. Rail defects: an overview. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, v. 26, n. 10, p. 865-886, 2003.

CALLE GONZALES, Miguel Angel. **Análise Numérico-Experimental Das Tensões Residuais Induzidas Por Jateamento Com Granalha Em Molas Automotivas**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CARVALHO, Mateus Fortes. **Análise De Tensões Residuais Em Trilhos Geradas No ˜ Processo De Straightening**. 2020. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Pará, Belém-Pa. 2020.

Chen Y, L. F. B. C. D. J., 2006. Heat transfer modelling of rail thermite welding. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F: J. Rail and Rapid Transit, Volume 220, pp. 207-217.

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

DENARDI L. S. **Diagnóstico das principais falhas de via permanente ferroviária visando reduzir a indisponibilidade na circulação de trens**. In:VII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção,5., 2018, Paraná. Anais eletrônicos Ponta grossa: UTRPR, 2018. Disponível em: < http://anteriores.aprepro.org.br/conbrepro/2018/down.php?id=4972&q=1> acesso em 10 de jan. 2019

Esveld, C. Modern Railway Track, 2001

FERREIRA, Thiago *et al*. Determinação das velocidades de propagação longitudinal e transversal do sinal ultrassônico em diferentes tipos de aço. In: **V Congresso Norte-Nordeste de Pesquisa e Inovação (CONNEPI)**. 2010. p. 8.

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

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.

GARNHAN, J. E.; DAVIS, C. L. Rail materials. In: **Wheel–rail interface handbook**. Woodhead Publishing, 2009. p. 125-171.

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

GODEFROID, Leonardo Barbosa *et al*. Falha por fadiga de um trilho soldado de topo. **Ciência de materiais Procedia**, v. 3, p. 1896-1901, 2014.

GUILHERME, José. Extensômetria (strain gage) – o que é? Quando utilizar?. ENSUS ADVANCED ENGENIEERING, 2016. Disponível em < https://ensus.com.br/extensometria-strain-gauge-o-que-e-quando-utilizar/>. Acesso em: 26/09/2021.

HIRAO, M.; OGI, H. Electromagnetic Acoustic Transducers. [S.l.: s.n.], 2017.

Hodgson WH. Residual stresses in rail. In: Kalker JJ, *et al*., editors. **Rail quality and maintenance for modern railway operation.** Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1993. p. 61–73

International Heavy Haul Association Conference (IHHA), v. 262, n. 262, p. 208–215,2017.

KANDIL, F. A. *et al.* A review of residual stress measurement methods-a guide to technique selection. 2001.

KNUTTON, M. Measure, Predict, Prevent. Internacional Railway Journal and Rapid Transit Review. New York, p. 15-19, ago. 2004.

LI, Yang *et al*. Study on the effect of residual stresses on fatigue crack initiation in rails. **International Journal of Fatigue**, v. 139, p. 105750, 2020.

LU, J. Ultrasonic methods. In: . Handbook of measurement of residual stresses. Institute for Materials Science and Engineering: SEM, 1996. p. 149–178. ISBN 0-88173-229-X.

LU, J., Handbook of Measurements of Residual Stress, Vol. 2, Ed. SEM, 2ed. 2005, 417p;

MAGINA, Priscila Goreti. Análise de tensões com ultra-som em tubos soldados. 2009. 100f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

MA, Ninshu *et al*. Investigation of welding residual stress in flash-butt joint of U71Mn rail steel by numerical simulation and experiment. **Materials & Design**, v. 88, p. 1296-1309, 2015.

MA, Rui *et al*. Effects of rail flash-butt welding and post-weld heat treatment processes meeting different national standards on residual stresses of welded joints. **International Journal of Materials Research**, v. 111, n. 9, p. 780-787, 2020.

MAPAILA, L.T., Sitimela T. M., Msibi, L. L. Simulation of the Thermite Welding Precess Using 3D Casting Solftware. **International Heavy Haul Association (IHHA)**, p. 150, 2017.

MINELA, Sthefani Neves *et al*. Extensometria: estudo e aplicação. 2017.

OMEGA (Brasil). Introdução a sensores de deformação. Disponível em:. Acesso em: 08 fev. 2017a.

ORRINGER, O., Tang, Y. H., Gordon, J. E., *et al*. (1988) Crackpropagation life of detail fractures in rails. US Department ofTransportation, FRA, DOT/FRA/ORD-88/13.

OLIVEIRA, Bras. **Metodologia para medição de tensões residuais na região soldada por centelhamento em trilhos ferroviários**, 2018. Dissertação (Mestrado profissional) – PPGEP. Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

P.J. WITHERS & H.K.D.H. BHADESHIA (2001) Residual stress. Part 1 – Measurement techniques, Materials Science and Technology, 17:4, 355-365, DOI: 10.1179/026708301101509980

POMPEU, Sammy Nascimento. **Curvas Trc De Aços De Trilhos Ferroviários: Dilatometria, Microestrutura E Microdureza**. 2020. Dissertação. Mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Pará, Belém, 2020.

PORCARO, R. R. **Efeito da Soldagem Elétrica por Centelhamento na Microestrutura, Propriedades Mecânicas e Resistência à Fadiga de um Aço para Trilhos Ferroviários – Análise Experimental e Numérica**. [s.l.] Tese de doutorado - UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO, 2019.

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

SAITA, K. *et al*. Trends in Rail Welding Technologies and Our Future Approach. **Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report**, n. 105, p. 84–92, 2013.

SAITA, K. *et al.* Developing technologies to improve the reliability of flash butt welds. In: **Proceedings of the 11th International Heavy Haul Association Conference**. Virginia Beach: International Heavy Haul Association, 2017. p. 2-6.

SARIKAVAK, Yasin; TURKBAS, Osman Selim; COGUN, Can. Influência da soldagem na microestrutura e resistência do aço ferroviário. **Construção e Materiais de Construção**, v. 243, p. 118220, 2020.

SEMPREBONE, PAULA DA SILVA. *Desgastes Em Trilhos Ferroviarios: Um Estudo Teorico*. 2005.

STEENBERGEN, M. J. M. M. Rail welds. In: **Wheel–rail interface handbook**. Woodhead Publishing, 2009. p. 377-408.

SCHLEINZER, G .; FISCHER, FD Tensões residuais em trilhos novos. **Ciência e Engenharia de Materiais: A** , v. 288, n. 2, pág. 280-283, 2000.

SITIMELA, T. *et al*. Comparative Fatigue Life Analysis on Flash Butt and Thermite Welds Using Durability and FE-Based Analysis. **International Heavy Haul Association (IHHA)**, p. 33, 2019.

Skyttebol, A. "Continous welded railway rails: Residual stress analyses, fatigue assessments and experiments. PHD thesis," Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2004.

SCHNEIDER, Eduardo Luís. Análise da vida remanescente de trilhos com defeitos transversais desgastados em serviço. 2005.

SCHLEINZER, G.; FISCHER, F. D. Residual stress formation during the roller straightening of railway rails. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 43, n. 10, p. 2281-2295, 2001.

SOARES, M. C. B. V. *et al*. Influência das tensões residuais no comportamento em fadiga e fratura de ligas metálicas. **São Paulo: Tese (Doutorado) em Ciências na Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear, IPEN-USP**, 1998.

SCHAJER, G. S., "Measurement of Non-uniform Residual Stresses Using the Hole Drilling Method – Part I – Stress Calculation Procedures, Vol. 10, 338-343, October 1988

TAWFIK, David; MUTTON, Peter John; CHIU, Wing Kong. Investigações experimentais e numéricas: Aliviando tensões residuais de tração em soldas instantâneas por tratamento térmico rápido pós-soldagem localizado. **Jornal da tecnologia de processamento de materiais** , v. 196, n. 1-3, pág. 279-291, 2008.

TAWFIK, David *et al*. Residual Stress Behaviour Due to Localised, Rapid, Post-weld Heat Treatment in Flashbutt-welded Rails. In: **Rail Achieving Growth: Conference Proceedings**. RTSA, 2006. p. 341.

TOTTEN G., Howes,M.. Inoue T., editors, Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel, 2002;

YU, Feng Qin; WANG, Jun. The Study of Finite Element Simulation for Cooling after Heating Process of Rail. In: **Key Engineering Materials**. Trans Tech Publications Ltd, 2016. p. 224-230.

Zhan XW and Wang SQ. Measurement and analysis of rail residual stress based on technical standard. Railway Qual Control 2009; 43: 34–53.

ZERBST, U; LUNDÉN, R; EDEL, K. -O; SMITH, R. A. Introduction to the Damage Tolerance Behaviour of Railway Rails – A Review. Engineering Fracture Mechanics, v. 76, 2009 (a), p. 2563-2601.

ANEXO A. TABELA DE TENSÕES RESIDUAIS NA REGIÃO DO METAL DE BASE

Técnicas de medição de tensão residual (MPa)							
	Furo cego			DRX			Região de análise
Autores	σ_z (Long)	σ_y (Vert)	σ_x (Trans)	σz (Long)	σ_y (Vert)	σ_x (Trans)	Metal de base
Tawfik (2008)	-30	-80					Centro da alma
Oliveira (2018)				-167 até 178			Topo do boleto
				-178 até -2,2			Lateral do boleto
				-153 até 194			Centro da alma
Turan (2016)					-292,4		Topo do boleto
					-484,39		
					-415,44		
Autor	182		-74				Topo do boleto
	-101	115					Centro da alma

ANEXO B. TABELA DE TENSÕES RESIDUAIS NA REGIÃO DA ZAC

Técnica de medição de tensão residual (MPa)							
	Furo cego			DRX			Região de análise
Autores	σ_z (Long)	σ_x (Trans)	σ_y (Vert)	σ_z (Long)	σ_x (Trans)	σ_y (Vert)	ZAC
Tawfik (2006)	280		240				Centro da Alma
Oliveira (2018)				351,7 até 78,2			Topo do boleto
						-62,3 até 242,1	Lateral do boleto
						174,1 até 201,3	Centro da alma
Ma (2015)	-223,82	-11,3					Topo do boleto
	199,37		43,62				Centro da Alma
Ma 2020				-135 até 25 -60 até -25 -150 até 48 -278 até -100 -350 até -298			Topo do boleto

ANEXO C. TABELA DE TENSÕES RESIDUAIS NO CORDÃO DE SOLDA

Técnica de medição de tensão residual (MPa)				
		Furo cego		Região de análise
Autores	σ_z (Long)	σ_x (Trans)	σ_y (Vert)	Centro da solda
Porcaro (2019)	-181	-77,7		Topo do boleto
	199,5		321,5	Centro da alma
Tawfik (2006)	200	320		Centro da Alma
Ma (2015)	-215,2	18,74		Topo do boleto
	217,65		106,25	Centro da alma
Saita (2017)	150		220	Centro da alma
PWHT	140		200	Centro da alma

APÊNDICE A. TABELA COM OS DADOS DE BIRREFRINGÊNCIA DAS AMOSTRAS N0, N1 E N3

Boleto N0									
Posição	Onda Cisalhante (t_1)	Onda Cisalhante (t_2)	Onda Compressiva	B	R	$(\sigma_z-\sigma_y)$ (MPa)	$(\sigma_z+\sigma_y)$ (MPa)	σ_z (MPa)	σ_y (MPa)
-80	4,636E-05	4,639E-05	2,530E-05	6,186E-04	5,455E-01	111,42	-686,28	-287,43	-398,85
-70	4,642E-05	4,644E-05	2,530E-05	3,567E-04	5,448E-01	144,15	-372,40	-114,12	-258,27
-60	4,643E-05	4,645E-05	2,531E-05	3,472E-04	5,449E-01	145,34	-407,91	-131,29	-276,63
-50	4,644E-05	4,646E-05	2,532E-05	5,046E-04	5,452E-01	125,67	-550,75	-212,54	-338,21
-40	4,643E-05	4,644E-05	2,539E-05	2,625E-04	5,467E-01	155,93	-1209,02	-526,55	-682,48
-30	4,637E-05	4,638E-05	2,528E-05	2,251E-04	5,452E-01	160,60	-558,37	-198,88	-359,49
-27	4,636E-05	4,638E-05	2,527E-05	6,173E-04	5,450E-01	111,58	-471,59	-180,00	-291,58
-24	4,639E-05	4,639E-05	2,527E-05	-1,159E-04	5,448E-01	203,22	-365,40	-81,09	-284,31
-21	4,637E-05	4,641E-05	2,526E-05	8,406E-04	5,444E-01	83,66	-221,53	-68,93	-152,60
-18	4,638E-05	4,639E-05	2,529E-05	2,277E-04	5,452E-01	160,27	-558,95	-199,34	-359,61
-15	4,637E-05	4,638E-05	2,529E-05	1,671E-04	5,454E-01	167,85	-637,73	-234,94	-402,79
-12	4,636E-05	4,638E-05	2,527E-05	3,680E-04	5,449E-01	142,74	-410,01	-133,63	-276,38
-9	4,637E-05	4,637E-05	2,526E-05	5,796E-05	5,448E-01	181,49	-378,39	-98,45	-279,94
-6	4,633E-05	4,636E-05	2,528E-05	5,300E-04	5,455E-01	122,49	-671,61	-274,56	-397,05
-3									
0									
3									

6	4,607E-05	4,611E-05	2,514E-05	8,312E-04	5,453E-01	84,84	-612,19	-263,68	-348,51
9	4,612E-05	4,614E-05	2,514E-05	3,563E-04	5,450E-01	144,20	-480,17	-167,98	-312,18
12	4,612E-05	4,615E-05	2,514E-05	1,323E-04	5,449E-01	172,20	-421,82	-124,81	-297,01
15	4,612E-05	4,613E-05	2,530E-05	1,518E-04	5,485E-01	169,77	-1985,57	-907,90	-1077,67
18	4,610E-05	4,612E-05	2,515E-05	3,375E-04	5,456E-01	146,55	-702,05	-277,75	-424,30
21	4,613E-05	4,614E-05	2,517E-05	2,330E-04	5,456E-01	159,61	-706,27	-273,33	-432,94
24	4,612E-05	4,613E-05	2,515E-05	1,897E-04	5,452E-01	165,03	-537,34	-186,15	-351,18
27	4,611E-05	4,612E-05	2,516E-05	1,640E-04	5,457E-01	168,24	-748,81	-290,29	-458,52
30	4,613E-05	4,617E-05	2,515E-05	7,069E-04	5,450E-01	100,38	-480,34	-189,98	-290,36
40	4,616E-05	4,619E-05	2,515E-05	6,132E-04	5,446E-01	112,09	-296,11	-92,01	-204,10
50	4,611E-05	4,612E-05	2,515E-05	3,863E-04	5,454E-01	140,46	-646,63	-253,09	-393,54
60	4,614E-05	4,618E-05	2,514E-05	8,788E-04	5,447E-01	78,90	-313,17	-117,14	-196,03
70	4,616E-05	4,618E-05	2,512E-05	6,078E-04	5,441E-01	112,77	-91,31	10,73	-102,04
80	4,609E-05	4,611E-05	2,517E-05	4,759E-04	5,461E-01	129,25	-931,58	-401,16	-530,42

Alma N0									
Posição	Onda Cisalhante (t_1)	Onda Cisalhante (t_2)	Onda Compressiva	B	R	$(\sigma_z-\sigma_y)$ (MPa)	$(\sigma_z+\sigma_y)$ (MPa)	σ_z (MPa)	σ_y (MPa)
-80	1,110E-05	1,111E-05	6,018E-06	9,488E-04	5,419E-01	70,14	899,44	484,79	414,65
-70	1,089E-05	1,091E-05	6,045E-06	1,683E-03	5,545E-01	-21,65	-4586,07	-2303,86	-2282,21
-60	1,117E-05	1,117E-05	6,045E-06	5,663E-04	5,413E-01	117,95	1166,85	642,40	524,45
-50	1,112E-05	1,113E-05	6,034E-06	4,382E-04	5,423E-01	133,97	692,56	413,26	279,30
-40	1,121E-05	1,123E-05	6,063E-06	1,850E-03	5,403E-01	-42,54	1571,78	764,62	807,16
-30	1,115E-05	1,115E-05	6,076E-06	4,103E-04	5,449E-01	137,45	-406,70	-134,63	-272,08
-27	1,109E-05	1,110E-05	6,084E-06	1,142E-03	5,482E-01	45,99	-1865,31	-909,66	-955,65
-24	1,106E-05	1,108E-05	6,073E-06	1,392E-03	5,486E-01	14,72	-2006,33	-995,81	-1010,52
-21	1,108E-05	1,108E-05	6,077E-06	3,408E-04	5,486E-01	146,14	-2011,26	-932,56	-1078,70
-18	1,106E-05	1,108E-05	6,080E-06	1,978E-03	5,493E-01	-58,44	-2339,62	-1199,03	-1140,59
-15	1,093E-05	1,093E-05	6,099E-06	1,807E-04	5,581E-01	166,15	-6139,63	-2986,74	-3152,89
-12	1,106E-05	1,107E-05	6,085E-06	8,120E-04	5,498E-01	87,25	-2534,85	-1223,80	-1311,05
-9	1,095E-05	1,095E-05	6,070E-06	7,181E-04	5,544E-01	98,98	-4541,41	-2221,21	-2320,20
-6	1,106E-05	1,107E-05	6,087E-06	7,989E-04	5,502E-01	88,88	-2743,22	-1327,17	-1416,05
-3									
0									
3									
6	1,091E-05	1,092E-05	5,957E-06	9,651E-04	5,456E-01	68,11	-705,55	-318,72	-386,83

9	1,091E-05	1,092E-05	5,973E-06	7,259E-04	5,471E-01	98,00	-1382,00	-642,00	-740,00
12	1,091E-05	1,093E-05	5,930E-06	1,918E-03	5,428E-01	-50,98	478,63	213,82	264,80
15	1,074E-05	1,076E-05	5,973E-06	1,797E-03	5,555E-01	-35,89	-5009,37	-2522,63	-2486,74
18	1,074E-05	1,075E-05	5,929E-06	1,721E-03	5,518E-01	-26,33	-3423,32	-1724,82	-1698,49
21	1,089E-05	1,090E-05	5,976E-06	9,924E-04	5,485E-01	64,70	-1974,63	-954,97	-1019,66
24	1,072E-05	1,074E-05	5,994E-06	1,801E-03	5,585E-01	-36,32	-6341,33	-3188,83	-3152,51
27	1,073E-05	1,074E-05	5,991E-06	1,549E-03	5,581E-01	-4,84	-6159,11	-3081,98	-3077,14
30	1,072E-05	1,074E-05	5,992E-06	1,774E-03	5,583E-01	-32,98	-6254,34	-3143,66	-3110,68
40	1,074E-05	1,075E-05	5,977E-06	1,141E-03	5,561E-01	46,14	-5269,62	-2611,74	-2657,88
50	1,074E-05	1,076E-05	6,004E-06	1,598E-03	5,585E-01	-10,98	-6355,18	-3183,08	-3172,10
60	1,069E-05	1,070E-05	5,977E-06	1,357E-03	5,588E-01	19,15	-6481,81	-3231,33	-3250,48
70	1,099E-05	1,100E-05	5,960E-06	1,053E-03	5,420E-01	57,17	824,09	440,63	383,46
80	1,092E-05	1,092E-05	5,992E-06	3,274E-04	5,487E-01	147,81	-2090,59	-971,39	-1119,20

Boleto N1									
Posição	Onda Cisalhante (t_1)	Onda Cisalhante (t_2)	Onda Compressiva	B	R	$(\sigma_z-\sigma_y)$ (MPa)	$(\sigma_z+\sigma_y)$ (MPa)	σ_z (MPa)	σ_y (MPa)
-80	4,604E-05	4,605E-05	2,516E-05	3,868E-04	5,464E-01	140,38	-1084,46	-472,04	-612,42
-70	4,601E-05	4,604E-05	2,515E-05	5,472E-04	5,465E-01	120,34	-1128,87	-504,27	-624,60
-60	4,605E-05	4,607E-05	2,514E-05	3,745E-04	5,459E-01	141,92	-850,31	-354,19	-496,12
-50	4,605E-05	4,606E-05	2,514E-05	3,379E-04	5,459E-01	146,50	-840,28	-346,89	-493,39
-40	4,602E-05	4,605E-05	2,513E-05	5,377E-04	5,459E-01	121,53	-859,56	-369,01	-490,55
-30	4,605E-05	4,608E-05	2,515E-05	5,359E-04	5,459E-01	121,75	-856,48	-367,36	-489,11
-27	4,604E-05	4,606E-05	2,513E-05	3,746E-04	5,458E-01	141,92	-790,29	-324,19	-466,11
-24	4,603E-05	4,606E-05	2,514E-05	5,606E-04	5,460E-01	118,66	-915,07	-398,20	-516,87
-21	4,602E-05	4,604E-05	2,514E-05	3,055E-04	5,461E-01	150,55	-920,46	-384,95	-535,51
-18	4,606E-05	4,608E-05	2,515E-05	2,917E-04	5,459E-01	152,28	-834,75	-341,23	-493,51
-15	4,603E-05	4,605E-05	2,515E-05	5,267E-04	5,462E-01	122,90	-977,65	-427,38	-550,28
-12	4,603E-05	4,605E-05	2,515E-05	4,086E-04	5,462E-01	137,67	-983,73	-423,03	-560,70
-9	4,602E-05	4,605E-05	2,516E-05	5,173E-04	5,465E-01	124,08	-1098,77	-487,34	-611,43
-6	4,603E-05	4,605E-05	2,515E-05	5,512E-04	5,463E-01	119,84	-1032,36	-456,26	-576,10
-3									
0									
3									
6	4,603E-05	4,604E-05	2,518E-05	3,720E-04	5,470E-01	142,24	-1337,16	-597,46	-739,70

9	4,615E-05	4,617E-05	2,515E-05	3,778E-04	5,449E-01	141,52	-410,44	-134,46	-275,98
12	4,609E-05	4,610E-05	2,516E-05	1,871E-04	5,457E-01	165,35	-783,77	-309,21	-474,56
15	4,607E-05	4,609E-05	2,517E-05	3,472E-04	5,462E-01	145,34	-970,47	-412,57	-557,90
18	4,609E-05	4,610E-05	2,518E-05	2,115E-04	5,463E-01	162,30	-1035,59	-436,65	-598,94
21	4,608E-05	4,610E-05	2,525E-05	2,590E-04	5,478E-01	156,36	-1679,32	-761,48	-917,84
24	4,604E-05	4,606E-05	2,516E-05	4,832E-04	5,464E-01	128,35	-1058,28	-464,97	-593,31
27	4,604E-05	4,606E-05	2,517E-05	5,429E-04	5,465E-01	120,88	-1093,21	-486,16	-607,05
30	4,609E-05	4,610E-05	2,515E-05	2,888E-04	5,456E-01	152,64	-721,38	-284,37	-437,01
40	4,609E-05	4,610E-05	2,515E-05	2,508E-04	5,457E-01	157,38	-773,45	-308,03	-465,42
50	4,608E-05	4,610E-05	2,517E-05	2,970E-04	5,460E-01	151,62	-899,74	-374,06	-525,68
60	4,603E-05	4,605E-05	2,517E-05	4,589E-04	5,468E-01	131,38	-1229,41	-549,01	-680,39
70	4,612E-05	4,613E-05	2,518E-05	1,084E-04	5,459E-01	175,19	-869,55	-347,18	-522,37
80	4,612E-05	4,612E-05	2,521E-05	1,274E-04	5,466E-01	172,81	-1164,20	-495,69	-668,51

Alma N1									
Posição	Onda Cisalhante (t_1)	Onda Cisalhante (t_2)	Onda Compressiva	B	R	$(\sigma_z-\sigma_y)$ (MPa)	$(\sigma_z+\sigma_y)$ (MPa)	σ_z (MPa)	σ_y (MPa)
-80	1,075E-05	1,076E-05	5,910E-06	1,525E-03	5,495E-01	-1,85	-2412,99	-1207,42	-1205,57
-70	1,075E-05	1,077E-05	5,905E-06	1,418E-03	5,489E-01	11,55	-2176,11	-1082,28	-1093,83
-60	1,083E-05	1,084E-05	5,926E-06	1,445E-03	5,468E-01	8,09	-1242,83	-617,37	-625,46
-50	1,080E-05	1,082E-05	5,895E-06	1,245E-03	5,453E-01	33,08	-611,56	-289,24	-322,32
-40	1,086E-05	1,087E-05	5,930E-06	6,698E-04	5,460E-01	105,02	-889,25	-392,12	-497,13
-30	1,077E-05	1,078E-05	5,915E-06	1,527E-03	5,489E-01	-2,09	-2171,99	-1087,04	-1084,95
-27	1,075E-05	1,077E-05	5,907E-06	1,918E-03	5,488E-01	-51,05	-2114,71	-1082,88	-1031,83
-24	1,077E-05	1,079E-05	5,928E-06	1,460E-03	5,498E-01	6,27	-2570,55	-1282,14	-1288,41
-21	1,076E-05	1,077E-05	5,928E-06	1,132E-03	5,509E-01	47,18	-3008,59	-1480,70	-1527,89
-18	1,076E-05	1,077E-05	5,903E-06	1,438E-03	5,484E-01	9,03	-1950,64	-970,81	-979,84
-15	1,075E-05	1,077E-05	5,914E-06	1,368E-03	5,496E-01	17,70	-2467,38	-1224,84	-1242,54
-12	1,077E-05	1,079E-05	5,910E-06	1,172E-03	5,482E-01	42,22	-1840,17	-898,98	-941,19
-9	1,083E-05	1,085E-05	5,910E-06	1,023E-03	5,452E-01	60,89	-567,23	-253,17	-314,06
-6	1,076E-05	1,078E-05	5,912E-06	1,582E-03	5,488E-01	-8,96	-2123,79	-1066,37	-1057,42
-3									
0									
3									
6	1,081E-05	1,083E-05	5,878E-06	1,348E-03	5,433E-01	20,22	290,15	155,18	134,97

9	1,076E-05	1,078E-05	5,879E-06	1,911E-03	5,457E-01	-50,11	-746,08	-398,10	-347,99
12	1,081E-05	1,083E-05	5,891E-06	1,188E-03	5,445E-01	40,28	-239,52	-99,62	-139,90
15	1,083E-05	1,085E-05	5,907E-06	1,529E-03	5,449E-01	-2,35	-403,07	-202,71	-200,36
18	1,084E-05	1,086E-05	5,915E-06	1,775E-03	5,450E-01	-33,14	-480,35	-256,75	-223,61
21	1,084E-05	1,083E-05	5,902E-06	7,800E-04	5,448E-01	91,25	-360,45	-134,60	-225,85
24	1,076E-05	1,077E-05	5,891E-06	1,440E-03	5,471E-01	8,80	-1379,25	-685,23	-694,03
27	1,084E-05	1,085E-05	5,895E-06	1,238E-03	5,436E-01	33,98	131,43	82,70	48,72
30	1,077E-05	1,079E-05	5,910E-06	1,986E-03	5,482E-01	-59,48	-1837,58	-948,53	-889,05
40	1,071E-05	1,072E-05	5,904E-06	1,312E-03	5,509E-01	24,73	-3037,40	-1506,33	-1531,07
50	1,071E-05	1,073E-05	5,917E-06	1,937E-03	5,518E-01	-53,43	-3420,47	-1736,95	-1683,52
60	1,072E-05	1,074E-05	5,899E-06	1,955E-03	5,500E-01	-55,67	-2620,88	-1338,27	-1282,61
70	1,071E-05	1,073E-05	5,908E-06	1,871E-03	5,510E-01	-45,12	-3056,18	-1550,65	-1505,53
80	1,071E-05	1,072E-05	5,945E-06	1,140E-03	5,550E-01	46,25	-4793,30	-2373,52	-2419,78

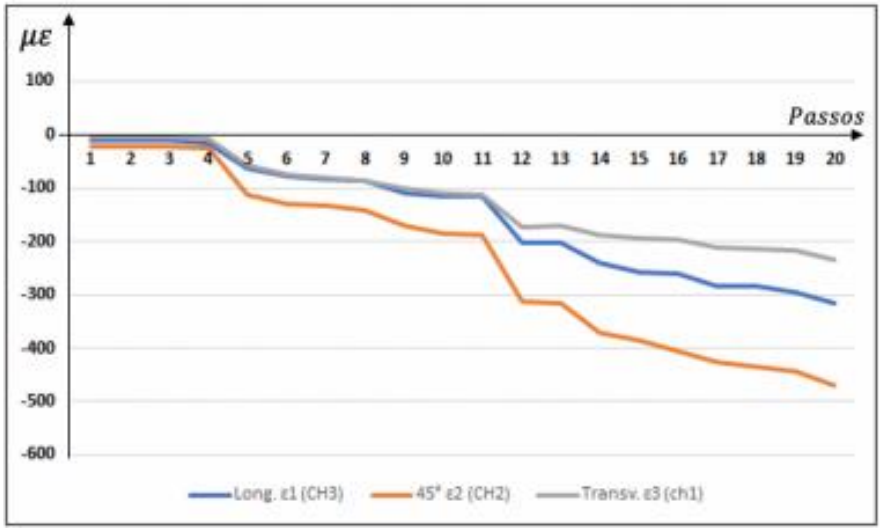
Boleto N3									
Posição	Onda Cisalhante (t_1)	Onda Cisalhante (t_2)	Onda Compressiva	B	R	$(\sigma_z-\sigma_y)$ (MPa)	$(\sigma_z+\sigma_y)$ (MPa)	σ_z (MPa)	σ_y (MPa)
-80	4,623E-05	4,627E-05	2,516E-05	7,406E-04	5,441E-01	96,17	-57,10	19,53	-76,64
-70	4,623E-05	4,628E-05	2,518E-05	9,432E-04	5,443E-01	70,85	-151,78	-40,47	-111,31
-60	4,623E-05	4,624E-05	2,517E-05	2,352E-04	5,443E-01	159,34	-170,22	-5,44	-164,78
-50	4,622E-05	4,624E-05	2,516E-05	3,096E-04	5,443E-01	150,04	-136,93	6,55	-143,49
-40	4,618E-05	4,620E-05	2,516E-05	3,924E-04	5,446E-01	139,69	-303,45	-81,88	-221,57
-30	4,619E-05	4,622E-05	2,516E-05	6,980E-04	5,446E-01	101,49	-267,02	-82,76	-184,26
-27	4,619E-05	4,621E-05	2,514E-05	3,409E-04	5,442E-01	146,12	-117,34	14,39	-131,73
-24	4,618E-05	4,620E-05	2,515E-05	4,451E-04	5,445E-01	133,10	-257,80	-62,35	-195,45
-21	4,620E-05	4,621E-05	2,514E-05	1,934E-04	5,442E-01	164,56	-120,20	22,18	-142,38
-18	4,619E-05	4,620E-05	2,515E-05	2,002E-04	5,445E-01	163,71	-222,73	-29,51	-193,22
-15	4,619E-05	4,621E-05	2,515E-05	5,127E-04	5,444E-01	124,65	-192,89	-34,12	-158,77
-12	4,619E-05	4,623E-05	2,515E-05	7,993E-04	5,443E-01	88,83	-162,14	-36,66	-125,48
-9	4,618E-05	4,621E-05	2,515E-05	5,412E-04	5,443E-01	121,10	-159,42	-19,16	-140,26
-6	4,619E-05	4,622E-05	2,513E-05	7,981E-04	5,440E-01	88,99	-14,65	37,17	-51,82
-3									
0									
3									
6	4,617E-05	4,620E-05	2,519E-05	6,279E-04	5,453E-01	110,26	-597,68	-243,71	-353,97

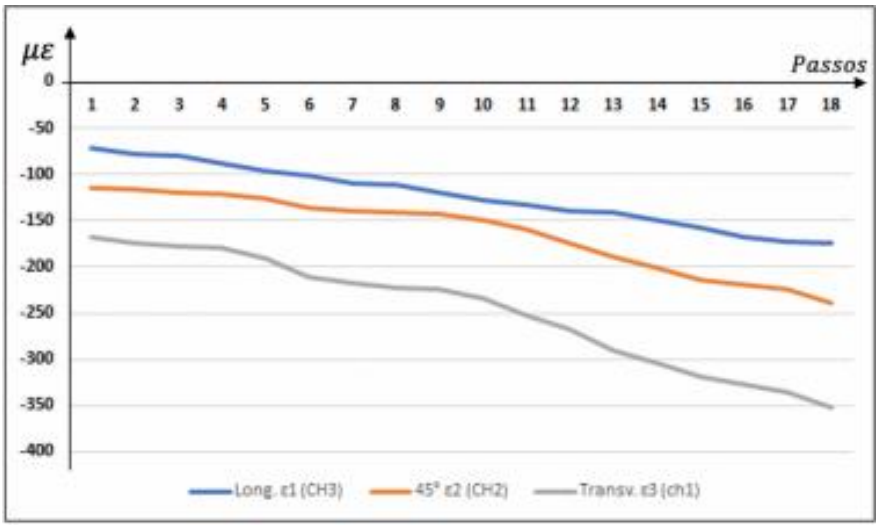
9	4,621E-05	4,626E-05	2,518E-05	9,936E-04	5,447E-01	64,55	-339,12	-137,29	-201,84
12	4,626E-05	4,629E-05	2,519E-05	5,889E-04	5,443E-01	115,13	-166,44	-25,66	-140,79
15	4,626E-05	4,629E-05	2,519E-05	6,848E-04	5,443E-01	103,15	-151,58	-24,22	-127,36
18	4,624E-05	4,628E-05	2,519E-05	8,417E-04	5,445E-01	83,53	-256,15	-86,31	-169,84
21	4,619E-05	4,621E-05	2,518E-05	3,396E-04	5,451E-01	146,29	-510,37	-182,04	-328,33
24	4,624E-05	4,628E-05	2,519E-05	8,687E-04	5,444E-01	80,16	-210,60	-65,22	-145,38
27	4,622E-05	4,624E-05	2,520E-05	2,974E-04	5,450E-01	151,56	-456,09	-152,27	-303,83
30	4,623E-05	4,628E-05	2,519E-05	9,688E-04	5,446E-01	67,65	-301,50	-116,93	-184,57
40	4,624E-05	4,628E-05	2,518E-05	7,728E-04	5,443E-01	92,14	-169,43	-38,65	-130,79
50	4,625E-05	4,628E-05	2,519E-05	6,606E-04	5,444E-01	106,16	-210,61	-52,23	-158,39
60	4,624E-05	4,627E-05	2,519E-05	6,203E-04	5,446E-01	111,21	-278,69	-83,74	-194,95
70	4,623E-05	4,626E-05	2,518E-05	7,150E-04	5,446E-01	99,37	-291,81	-96,22	-195,59
80	4,621E-05	4,624E-05	2,520E-05	5,652E-04	5,452E-01	118,09	-552,03	-216,97	-335,06

Alma N3									
Posição	Onda Cisalhante (t_1)	Onda Cisalhante (t_2)	Onda Compressiva	B	R	$(\sigma_z-\sigma_y)$ (MPa)	$(\sigma_z+\sigma_y)$ (MPa)	σ_z (MPa)	σ_y (MPa)
-80	1,074E-05	1,075E-05	5,936E-06	1,695E-03	5,525E-01	-23,14	-3723,88	-1873,51	-1850,37
-70	1,070E-05	1,072E-05	5,942E-06	1,801E-03	5,547E-01	-36,33	-4702,29	-2369,31	-2332,98
-60	1,076E-05	1,078E-05	5,957E-06	1,799E-03	5,532E-01	-36,18	-4040,54	-2038,36	-2002,18
-50	1,072E-05	1,073E-05	5,913E-06	1,222E-03	5,513E-01	35,95	-3188,91	-1576,48	-1612,43
-40	1,074E-05	1,076E-05	5,929E-06	1,918E-03	5,516E-01	-50,96	-3347,85	-1699,40	-1648,45
-30	1,077E-05	1,079E-05	5,932E-06	1,615E-03	5,503E-01	-13,19	-2773,20	-1393,19	-1380,01
-27	1,076E-05	1,078E-05	5,936E-06	1,547E-03	5,512E-01	-4,66	-3157,84	-1581,25	-1576,59
-24	1,076E-05	1,078E-05	5,943E-06	1,953E-03	5,520E-01	-55,32	-3489,99	-1772,66	-1717,34
-21	1,076E-05	1,077E-05	5,913E-06	1,371E-03	5,493E-01	17,32	-2325,06	-1153,87	-1171,19
-18	1,076E-05	1,078E-05	5,930E-06	1,683E-03	5,505E-01	-21,60	-2868,83	-1445,21	-1423,61
-15	1,076E-05	1,077E-05	5,935E-06	1,238E-03	5,513E-01	34,03	-3197,23	-1581,60	-1615,63
-12	1,074E-05	1,076E-05	5,956E-06	1,657E-03	5,540E-01	-18,36	-4378,93	-2198,65	-2180,29
-9	1,075E-05	1,077E-05	5,938E-06	1,617E-03	5,518E-01	-13,36	-3411,31	-1712,33	-1698,97
-6	1,075E-05	1,077E-05	5,916E-06	1,504E-03	5,498E-01	0,70	-2541,69	-1270,49	-1271,19
-3									
0									
3									
6	1,082E-05	1,084E-05	5,936E-06	1,366E-03	5,482E-01	18,04	-1843,88	-912,92	-930,96

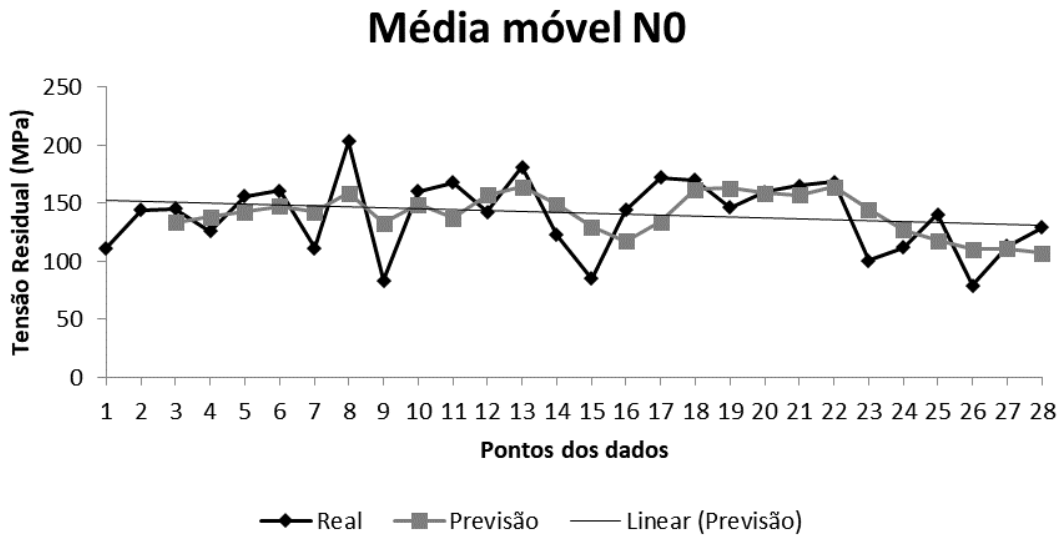
9	1,082E-05	1,084E-05	5,919E-06	1,949E-03	5,465E-01	-54,92	-1112,58	-583,75	-528,83
12	1,081E-05	1,082E-05	5,926E-06	1,026E-03	5,479E-01	60,45	-1734,61	-837,08	-897,53
15	1,080E-05	1,082E-05	5,915E-06	1,704E-03	5,473E-01	-24,21	-1455,35	-739,78	-715,57
18	1,079E-05	1,081E-05	5,943E-06	1,964E-03	5,502E-01	-56,74	-2744,70	-1400,72	-1343,98
21	1,079E-05	1,081E-05	5,916E-06	1,681E-03	5,478E-01	-21,33	-1684,60	-852,96	-831,63
24	1,080E-05	1,082E-05	5,951E-06	1,700E-03	5,505E-01	-23,72	-2846,17	-1434,94	-1411,22
27	1,080E-05	1,082E-05	5,914E-06	1,741E-03	5,469E-01	-28,88	-1298,13	-663,51	-634,63
30	1,081E-05	1,083E-05	5,920E-06	1,583E-03	5,472E-01	-9,14	-1437,85	-723,50	-714,35
40	1,077E-05	1,079E-05	5,906E-06	1,828E-03	5,480E-01	-39,73	-1774,50	-907,11	-867,39
50	1,077E-05	1,078E-05	5,884E-06	1,529E-03	5,460E-01	-2,35	-916,16	-459,25	-456,90
60	1,080E-05	1,081E-05	5,897E-06	1,623E-03	5,458E-01	-14,13	-794,77	-404,45	-390,32
70	1,080E-05	1,082E-05	5,899E-06	1,896E-03	5,458E-01	-48,21	-824,30	-436,25	-388,04
80	1,080E-05	1,082E-05	5,898E-06	1,856E-03	5,458E-01	-43,30	-799,23	-421,27	-377,97

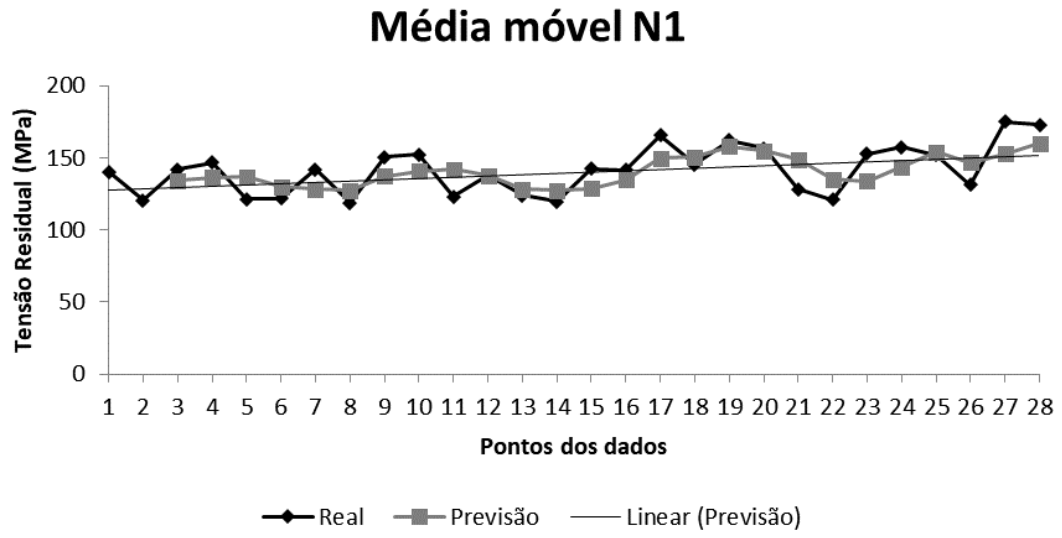
APÊNDICE B. GRÁFICOS DA DEFORMAÇÃO EM FUNÇÃO DOS INCREMENTOS DURANTE O PROCESSO DE FURAÇÃO RESPECTIVAMENTE NA ZTA E NO CENTRO DA SOLDA.

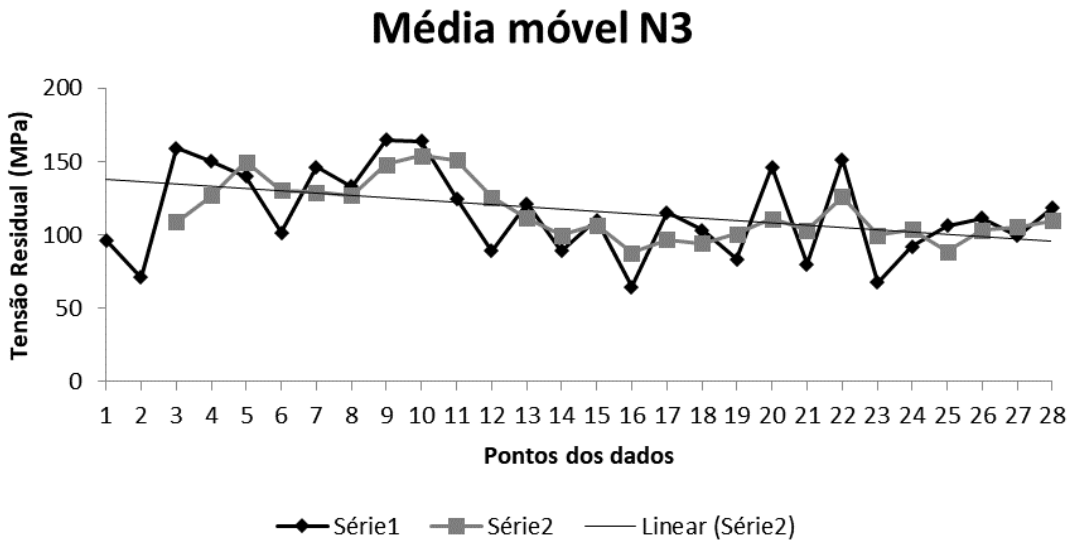




APÊNDICE C. GRÁFICO DAS MÉDIAS MÓVEIS DA REGIÃO DO BOLETO.







APÊNDICE D. ANOVA DAS MEDIÇÕES DE ULTRASSOM.

RESUMO

Grupo	*Contagem*	*Soma*	*Média*	*Variância*
N1	28	3963,699	141,5607	283,2604
N3	28	3197,887	114,2103	897,3877
N0	28	3900,687	139,3103	989,1681

ANOVA

Fonte da variação	*SQ*	*gl*	*MQ*	*F*	*valor-P*	*F crítico*
Entre grupos	12909,11	2	6454,557	8,924107	0,000314	3,109311
Dentro dos grupos	58585,04	81	723,2721			
Total	71494,15	83				