



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO

Curso de Engenharia Mecânica

NATANAEL PINHO DA SILVA ALVES

Avaliação do processo de alívio de tensão em componentes de aço AAR

M201 grau E recuperados por soldagem

SÃO LUÍS/MA

2019

NATANAEL PINHO DA SILVA ALVES

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE ALÍVIO DE TENSÃO EM COMPONENTES DE
AÇO AAR M201 GRAU E RECUPERADOS POR SOLDAGEM**

Monografia de graduação apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Adilto Pereira Andrade Cunha

Coorientador: Masc. Ronan Geraldo Moreira

SÃO LUÍS

2019

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE ALÍVIO DE TENSÃO EM COMPONENTES DE
AÇO AAR M201 GRAU E RECUPERADOS POR SOLDAGEM**

Autor: Natanael Pinho da Silva Alves

Orientador: Prof. Dr. Adilto Pereira Andrade Cunha

Coorientador: Msc. Ronan Geraldo Moreira

Prof. Dr. Adilto Pereira Andrade Cunha

Prof. Msc. Carlos Ronyelton Santana de Oliveira

Prof. Msc. Amadeu Santos Nunes Junior

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

São Luís/MA, 04 de dezembro de 2019.

AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo a Deus, pelo dom da vida e por todas as bênçãos concedidas para que eu chegasse até aqui. A ele toda honra, glória e louvor!

Ao meu orientador Adilto Pereira Andrade, por ter contribuído na minha formação, mostrando meios para enriquecer meu trabalho. Ao amigo e coorientador Ronan Geraldo Moreira, que me incentivou na escolha da temática do projeto e sempre se mostrou disposto a ajudar, estando aberto a diálogos e auxiliando de forma intelectual na produção deste trabalho de conclusão de curso.

Agradeço a empresa Vale por ter cedido o material, espaço e financiado parte dos experimentos necessários para a realização do trabalho.

A minha família, por todo apoio e suporte durante essa caminhada. Não foi fácil deixar minha cidade natal, mas com incentivo dos meus pais e todo carinho, mesmo em estados diferentes, tive forças para completar mais esta etapa e buscar a realização deste sonho.

Agradeço aos meus tios, Dalceli e João Brito, que fizeram o papel de pais, me receberam em sua casa e me deram cuidados que foram essenciais para que eu me sentisse acolhido mesmo estando longe de casa. Agradeço aos meus primos, Luana, Jordana e Gustavo, que considero verdadeiros irmãos, a este último em especial, juntamente com a Luciana, pelas boas conversas, incentivou-me a expandir meus horizontes, sempre me incentivando a querer ser o melhor naquilo que me propunha a fazer, sempre que possível dividindo comigo conhecimentos. Além de sempre ser criterioso, me induzindo a buscar perfeição nos conhecimentos técnicos-científicos.

Aos meus amigos de caminhada, família Ágora, que junto comigo compartilharam diversos momentos de alegria, tristeza. Com eles pude dividir as angústias e dúvidas que surgem durante o processo de formação, além de juntos termos alcançado muitas conquistas. Estarmos juntos colocando em prática aquilo que aprendemos em sala de aula nos fez crescer como profissionais e vivenciar experiência de mercado da engenharia mecânica. Obrigada Família Ágora, juntos somos mais fortes!

Agradeço a oportunidade recebida de poder atuar na minha área de formação em uma grande empresa e as amizades que construí lá. Tive a oportunidade de aprender grandes

coisas e colocar em prática conhecimentos adquiridos durante a graduação. Hoje me sinto forte e maduro para encarar qualquer desafio.

Por fim, nenhuma batalha se vence só e no decorrer desta caminhada muitas pessoas foram importantes para a conclusão da minha formação acadêmica. Meus sinceros agradecimentos a todos que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para que eu chegasse até aqui.

“Tudo que você tiver de fazer faça o melhor que puder, pois no mundo dos mortos não se faz nada, e ali não existe pensamento, nem conhecimento, nem sabedoria. E é para lá que você vai”.

Eclesiastes 9:10

RESUMO

O processo de recuperação de componentes metálicos através da soldagem gera tensões residuais que podem influenciar diretamente na vida útil do componente. Definir o tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT) ideal para o componente evita uma redução na vida útil da peça. Nesse trabalho foi avaliado o efeito do tratamento térmico de alívio de tensões após a recuperação por soldagem de componentes ferroviários. Foram utilizados componentes ferroviários fabricados em aço AAR M201 grau E para o estudo e realizado a análise de tensões residuais através do método de difração de raio-X. Foram realizados processos de pré-aquecimentos e um tratamento térmico de alívio de tensão, e verificado a influência desses no alívio de tensão. Avaliou-se o efeito de cada tratamento térmico sobre as propriedades mecânicas por meio de ensaio de dureza, tração, impacto Charpy. Verificado um aumento característico da dureza na região da ZTA devido a não homogeneidade das regiões. As observações experimentais mostraram que quando a peça apresenta as tensões residuais aliviadas, a mesma apresenta uma redução da dureza nas regiões da solda (ZTA e metal de solda). Os resultados de dureza e de difração de raio-X convergiram para um mesmo resultado.

Palavras chaves: soldagem, tratamento, térmico, aquecimento, propriedades.

ABSTRACT

The process of recovering metal components through welding generates residual stresses that can directly influence component life. Setting the optimum stress relieving heat treatment (TTAT) for the component avoids a reduction in part life. In this work we evaluated the effect of stress relief heat treatment after welding recovery of rail components. Rail components made from AAR M201 grade E steel were used for the study and the analysis of residual stresses by the X-ray diffraction method. Preheating processes and a stress relief heat treatment were performed, and their influence on stress relief was verified. The effect of each heat treatment on mechanical properties was evaluated by hardness, tensile, Charpy impact test. There was a characteristic hardness increase in the ZTA region due to the inhomogeneity of the regions. Experimental observations showed that when the workpiece has the relieved residual stresses, it exhibits a reduction in hardness in the weld regions (ZTA and weld metal). The hardness and X-ray diffraction results converged to the same result.

Keywords: welding, treatment, thermal, heating, properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Componentes dos engates ferroviários (BERTOSSO, 1991).....	19
Figura 3.2 - Detalhes dos componentes do engate (RODRIGUES, 2014).....	20
Figura 3.3 - Evolução do processo de soldagem ao passar dos anos (WAINER, BRANDI e MELO, 2004)	22
Figura 3.4 - Representação esquemática do processo de soldagem MIG/MAG. (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).....	23
Figura 3.5 - Perfil típico de cordões de solda, em função do gás de proteção (OKUMURA e TANIGUCHI, 1982).....	24
Figura 3.6 – Tipos de tensões (WITHERS e BHADESHIA, 2000).....	25
Figura 3.7 - Analogia da formação de tensão (MODENESI, 2001).....	26
Figura 3.8 - Varredura superficial da amostra (SOUSA, 2012)	31
Figura 3.9 - Deslocamento dos picos de difração quando comparados com o padrão (KOUKETSU, 2017).....	31
Figura 3.10 - Modelo do estado plano de tensões (SOUSA, 2012)	32
Figura 3.11 - Representação da variação do limite de resistência e limite de escoamento em função da temperatura (ZEEMANN, 2003)	35
Figura 3.12 - Como ocorre o alívio de tensões quando se aquece o material (ZEEMANN, 2003)	36
Figura 3.13 - Corpo de prova circular padrão do ensaio de tração (HIBBELER, 2009)	38
Figura 3.14 - Máquina de ensaio Charpy (CALLISTER, 2002)	39
Figura 4.1 - Região dos corpos de prova na peça (Autor).....	42
Figura 4.2 - Vazão do gás de proteção (L/min) (Autor).....	43
Figura 4.3 – Parâmetros de soldagem e goivagem utilizados (Autor).....	44
Figura 4.4 - Realização de partícula magnética na braçadeira 01 (Autor)	44
Figura 4.5 - Medição de dureza na braçadeira (Autor).....	45
Figura 4.6 - Região com maior probabilidade de trincas (Adaptado da AAR, 2001).....	45
Figura 4.7 - Região soldada em braçadeira (Autor)	46
Figura 4.8 - Medição de temperatura após a soldagem (Autor).....	46
Figura 4.9 – Forno Mufla (Autor)	48
Figura 4.10 – Corpos de prova (Autor)	49
Figura 4.11 - Espectrômetro de bancada (Autor)	49
Figura 4.12 - Micro Hardness Tester HV-1000 (Autor).....	50

Figura 4.13 – Região da Microdureza (Autor)	50
Figura 4.14 - Região com defeitos na solda (Autor)	51
Figura 4.15 - Corpo de prova de tração (Autor)	52
Figura 4.16 - Corpo de prova de tração (Autor)	52
Figura 4.17 - Instron 2382 (Autor)	53
Figura 4.18 - Corpo de prova de impacto (Autor)	53
Figura 4.19 - Corpo de prova de impacto (Autor)	54
Figura 5.1 - Microestrutura do material de base (Autor)	56
Figura 5.2 - Microestrutura da ZTA (Autor)	57
Figura 5.3 - Microestrutura da solda (Autor)	57
Figura 5.4 -Alongamento (Autor)	58
Figura 5.5 - Redução de área (Autor)	58
Figura 5.6 - Limite de escoamento (Autor)	58
Figura 5.7 - Limite de resistência a tração (Autor)	59
Figura 5.8 - Valores de dureza do metal de base conforme a norma AAR (Autor)	61
Figura 5.9 - Perfil de microdureza no CP01 e CP02 – Sem tratamento térmico (Autor)	62
Figura 5.10 - Perfil de microdureza no CP03 e CP02 – Tratamento utilizado na oficina 300°C (Autor)	62
Figura 5.11 - Perfil de microdureza no CP04 e CP02 – Com pré-aquecimento de 273°C (Autor)	63
Figura 5.12 - Tensão residual nos componentes (MPa)	64
Figura 5.13 - Tensão residual nos corpos de prova (MPa)	65

LISTA DE TABELA

Tabela 3.1 - Classificação e principais métodos de medições de tensões residuais (ROCHA, 2010).....	28
Tabela 3.2 - Comparação entre as principais técnicas de medição de tensões residuais (LU, 1996).....	29
Tabela 3.3 - Comparação entre as principais técnicas de medição de tensões residuais (LU, 1996).....	36
Tabela 3.4 - Propriedades mecânicas do aço M201 grau E (AAR, 2010).....	37
Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas do arame (ESAB, 2015).....	42
Tabela 4.2 - Temperatura do alívio de tensão (Autor)	47
Tabela 4.3 - Tratamentos térmicos nos corpos de provas (Autor).....	48
Tabela 5.1 - Composição química do material de base (Autor)	55
Tabela 5.2 - Composição química da região da solda (Autor)	55
Tabela 5.3 - Resultados do ensaio de impacto (Autor).....	60

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Al - Alumínio

ψ – ângulo de difração

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AAR – Association of American Railroads

ASTM - American Society of Testing and Materials (Sociedade Americana de Testes e Materiais)

AWS - American Welding Society

Ca – Cálcio

C – Carbono

CE – Carbono equivalente

Ceq – Carbono Equivalente

Pb – Chumbo

CP01 – Corpo de prova número 1

CP02 – Corpo de prova número 2

CP03 – Corpo de prova número 3

CP04 – Corpo de prova número 4

Cr – Cromo

$\varepsilon_{\phi\psi}$ - Deformação no sentido da tensão

CO_2 -Dióxido de carbono

$d\phi\psi$ – Distancia interplanar

d0 – Distancia interplanar do corpo padrão

S – Enxofre

Fe – Ferro

P – Fósforo

HB - *Dureza* Brinell

HRC – *Dureza* Rockwell

HV – *Dureza* Vickers

°C – Graus Celsius

J – Joule

LE – Limite de escoamento

LR – Limite de resistências

l/min – Litros por minuto

Mn – Manganês

MIB - Materials Institute of Brazil

MPa – Mega Pascal

MAG - Metal Active Gás

MB – Metal de base

MS – Metal de solda

MIG - Metal Inert Gás

μm – Micrómetro

mm – Milímetros

Mo – Molibdênio

NBR – Normas brasileiras

RS – Região Soldada

Si – Silício

σ_1 – Tensão principal

TTAT – Tratamento térmico de alívio de tensões

TIG - Tungsten Inert Gas

ZTA – Zona termicamente afetada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	OBJETIVOS.....	18
2.1	OBJETIVO GERAL	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	19
3.2	ENGATES FERROVIÁRIOS	19
3.3	SOLDAGEM - BREVE HISTÓRIA	21
3.4	SOLDAGEM MIG/MAG	22
3.5	TENSÕES RESIDUAIS	24
3.6	INFLUÊNCIA DAS TENSÕES RESIDUAIS NA VIDA EM FADIGA DO MATERIAL	27
3.7	MEDIÇÃO DE TENSÃO RESIDUAL	27
3.8	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X.....	29
3.9	ALÍVIO DE TENSÃO RESIDUAL	33
3.10	PRÉ-AQUECIMENTO.....	34
3.11	PÓS AQUECIMENTO	35
3.12	AÇO AAR – 201 -E	36
3.13	ENSAIOS MECÂNICOS	37
3.13.1	ENSAIO DE TRAÇÃO	38
3.13.2	ENSAIO DE DUREZA	39
3.13.3	ENSAIO DE IMPACTO.....	39
3.13.4	ENSAIO METALOGRÁFICO.....	40
4	MATERIAIS E MÉTODOS	41
4.1	AÇO AAR M-201 GRAU E	41
4.2	METAL DE ADIÇÃO	42

4.3	GÁS DE PROTEÇÃO	42
4.4	PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM.....	43
4.5	ENGATES E BRAÇADEIRAS	44
4.6	BRAÇADEIRA E ENGATE 01	47
4.7	ENGATE E BRAÇADEIRA 02	47
4.8	ENGATE E BRAÇADEIRA 03	47
4.9	CORPOS DE PROVA	48
4.10	ANÁLISE QUÍMICA	49
4.11	MICRODUREZA	50
4.12	ENSAIO DE TRAÇÃO	51
4.13	ENSAIO DE IMPACTO.....	53
4.14	MEDIÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL.....	54
5	RESULTADOS	55
5.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS QUÍMICOS	55
5.2	ENSAIO DE TRAÇÃO	57
5.3	ENSAIO DE IMPACTO.....	60
5.4	ENSAIOS DE DUREZA	60
5.5	DIFRAÇÃO POR RAIO-X	64
6	CONCLUSÃO.....	66
	REFERÊNCIAS	67
	ANEXO A – TABELAS COM VALORES COMPLETOS	72

1 INTRODUÇÃO

A soldagem começou a ser difundida nos processos de fabricação após as duas grandes guerras mundiais, e com o avanço da tecnologia prosperou ainda mais dentro das indústrias (CORREIA, 2017). Os processos de soldagem são utilizados para unir duas peças, recuperação de peças desgastadas e em peças com trincas. Para tal, é necessário ser estudado o metal de base e o metal de solda para que a peça recuperada continue com as mesmas propriedades (química, mecânica, metalúrgicas), assim mantendo todas as suas funções (A.W.S., 2000).

Em algumas aplicações, apenas o processo de união, não garante o resultado esperado pelo processo de soldagem, assim sendo indispensável a utilização de tratamentos térmicos. Esses são definidos através de diversos parâmetros, mas o principal é temperatura/tempo (SILVA, 2010).

Durante a soldagem as juntas soldadas sofrem mudanças estruturais e metalúrgicas, devido a distribuição de temperatura não ocorrer de forma uniforme durante o ciclo térmico da soldagem. As mudanças causadas por essa distribuição não-uniforme podem comprometer a integridade dos componentes soldados, através das tensões residuais e distorções acarretando uma falha prematura no componente (OLIVEIRA, 2009).

Regiões que possuem tensões residuais estão suscetíveis a nucleação de trincas prematuras, podendo ser propagadas por baixas tensões aplicadas ao componente soldado durante o trabalho. As tensões residuais contribuem também para a falha por fadiga e por corrosão, conseqüentemente uma redução da vida útil das estruturas soldadas quando submetidas a esse fenômeno (OLIVEIRA, 2009).

Na oficina de manutenção e recuperação, é utilizado o processo de soldagem para recuperação de componentes fundidos em aço AAR M-201 grau E (AAR, 2010). Desse modo, visando sempre a qualidade da recuperação das peças, é necessário avaliar o processo de alívio de tensão utilizado na oficina.

O presente trabalho pretende avaliar o processo de alívio de tensão utilizado atualmente pela oficina, assim comparando com o processo indicado pela AAR, e com a influência do pré-aquecimento para o alívio das tensões residuais. Dessa forma foi realizado todos os testes conforme o padrão utilizado na oficina. Para avaliar o efeito do

tratamento térmico sobre as propriedades mecânicas foram realizados ensaios de dureza, tração e impacto Charpy-V. A caracterização microestrutural foi por microscopia óptica.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o tratamento térmico de alívio de tensões, utilizado em uma oficina de recuperação de componentes ferroviários. A análise foi realizada juntamente com a utilização de ensaios laboratoriais.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a influência do processo de soldagem na microestrutura do aço;
- Apresentar os efeitos da temperatura no alívio de tensão dos componentes;
- Avaliar as propriedades mecânicas, metalúrgicas e químicas dos componentes;
- Comparar os resultados com os valores padronizados pela norma AAR.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As ferrovias, motivado pela revolução industrial, começou com tração animal e os componentes de madeira para vagões maiores e sobre trilhos. Também, houve a introdução de locomotivas permitindo um número maior de vagões tracionados, chegando a mais de 660 vagões em uma mesma composição (BERTOSSO, 1991).

Ainda segundo Bertossi (1991), a maior evolução dos vagões aconteceu com a virada do século XX, com uma série de mudanças nos componentes ferroviários. As principais mudanças foram: a inversão do sistema de frenagem dos vagões, truques fundidos em aço e desenvolvimento dos engates conhecidos atualmente. Este último, é responsável pela união de dois vagões, extremamente importante para o aumento de transporte de cargas. Na Figura 3.1 é apresentado mais detalhes sobre os componentes dos engates.

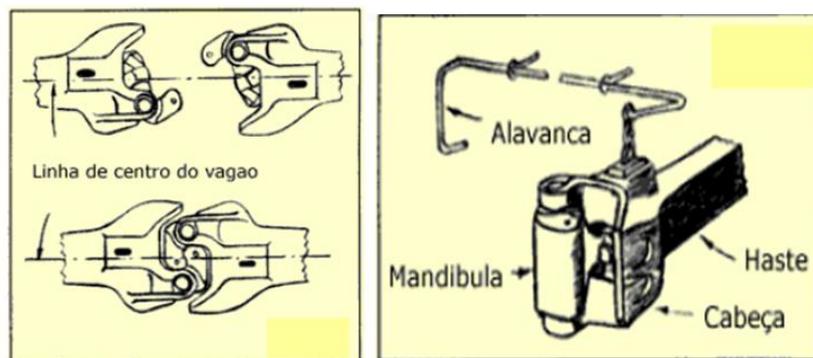


Figura 3.1 - Componentes dos engates ferroviários (BERTOSSO, 1991).

3.2 ENGATES FERROVIÁRIOS

O engate é um componente do conjunto de choque e tração responsável pela união entre dois veículos da composição. Serve também para transmitir os esforços na composição (BAPTISTELLA, 2016). Segundo Rodrigues (2014), o engate é fisicamente composto pela parte fundida, a mandíbula e os componentes que são utilizados para o

travamento da mandíbula (Figura 3.2). Nos vagões que descarregam em virador de vagões, são utilizados engates fixos e rotativos.

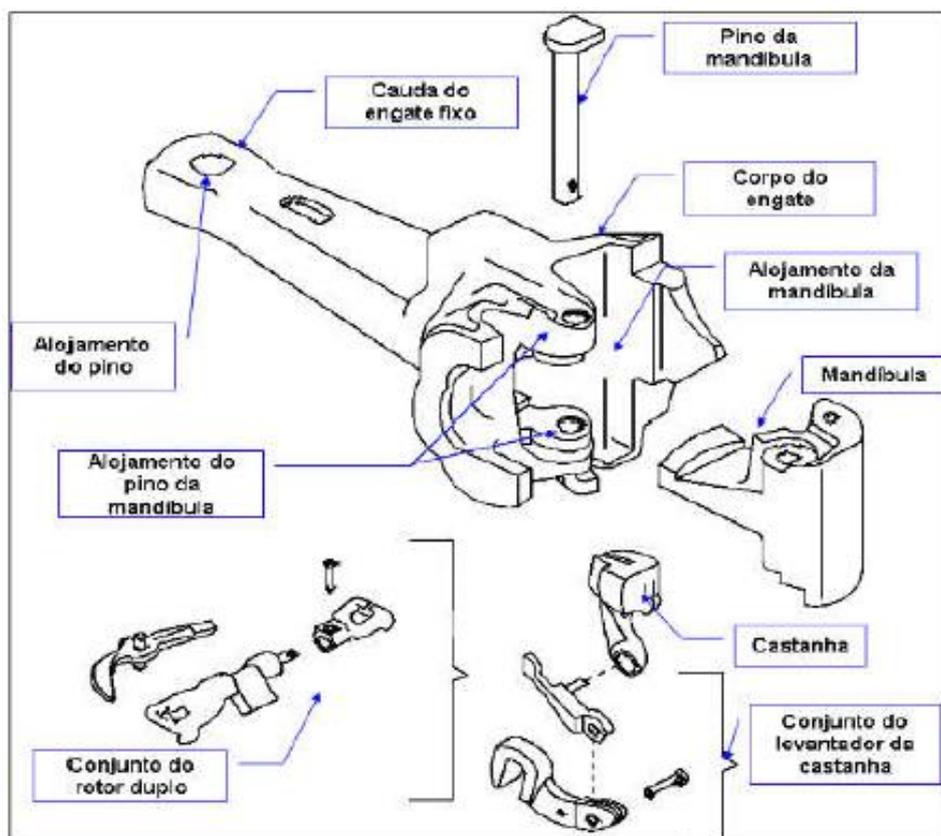


Figura 3.2 - Detalhes dos componentes do engate (RODRIGUES, 2014)

Segundo Alves (2009), engates ferroviários são fabricados por fundição (processo de inserir metal líquido em um molde), assim como os blocos de motores, corpo de válvulas e torneiras. Este método de fabricação utiliza principalmente componentes que sofrem cargas dinâmicas, que é o caso do engate. A fundição é um dos métodos mais utilizados, no entanto, o custo ainda é muito alto quando é necessário produzir em baixa quantidade, devido a sua dificuldade de produção. Assim, a solução de grande parte dos engates é a recuperação dos desgastes e trincas através da soldagem.

3.3 SOLDAGEM - BREVE HISTÓRIA

A soldagem é conhecida como a forma de unir materiais metálicos. Sua descoberta é datada a cerca de 3500 a.c. (Idade do Cobre), com a brasagem com ligas de ouro e cobre. Na época, se utilizava como fonte de energia a lenha e o carvão (OKUMURA, 1982), sendo uma prática bastante artesanal. Contudo, com a descoberta da energia elétrica houve um grande avanço na soldagem.

A descoberta da energia elétrica foi crucial para a evolução da soldagem, que galgou patamares como o que se encontra atualmente. Principalmente durante a segunda guerra mundial, onde o processo de soldagem teve um grande impulso para fabricação de armas e navios, mesmo sabendo que a técnica utilizada atualmente (arco elétrico) foi desenvolvida no século XIX (WAINER, BRANDI e MELO, 2004).

Algumas datas importantes e marcos na história que aumentaram a utilização da soldagem são apresentados e apresentado na Figura 3.3 segundo MARQUES, MODENESI e BRACARENSE (2009):

- a) Século XVIII – Descoberta do acetileno por Sir Edmund Davy e primeiras experiências com arco elétrico por Sir Humphrey Davy;
- b) 1885 – Primeira patente de um processo de soldagem é registrada na Inglaterra por Nikolas Bernados e Stanislav Olszewski, tratava-se de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de carvão e a peça a ser soldada.
- c) Meados de 1890 – Em países distantes um do outro, o russo N.G. Slavianoff e o americano Charles Coffin cada qual no seu país desenvolveram individualmente a primeira soldagem com arco elétrico com um eletrodo metálico.

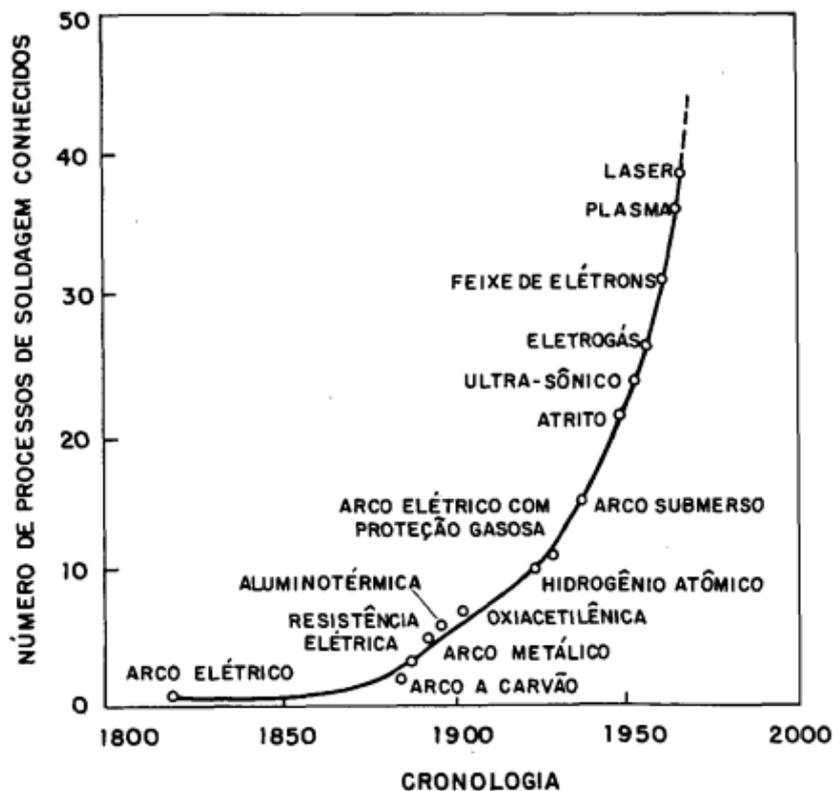


Figura 3.3 - Evolução do processo de soldagem ao passar dos anos (WAINER, BRANDI e MELO, 2004)

A partir da década de 30 iniciou-se a utilização de proteção gasosa nas operações de solda. Essa proteção teve o objetivo de resolver os problemas de contaminação atmosférica nas mesmas. Assim, iniciou o processo que é chamado atualmente de *Tungsten Inert Gas* (TIG) (JOAQUIM, 2006). No processo TIG o arco elétrico é envolto por uma atmosfera protetora de gás inerte. A partir da evolução da tecnologia TIG, em 1948 por *Battelle Memorial Institute*, foi desenvolvido o processo MIG (*Metal Inert Gás*) e posterior o processo MAG (*Metal Active Gás*). Esse novo processo tem como principal diferença a utilização de um eletrodo consumível de alimentação contínua. (CALEGGARI & DADALTO, 2011).

3.4 SOLDAGEM MIG/MAG

Esse tipo de soldagem é utilizado em materiais de diversos tipos de espessura e em materiais ferrosos e não ferrosos. A diferença entre os processos é que o MIG é utilizado em materiais ferrosos e não ferrosos, como por exemplo: alumínio, cobre, níquel

e suas ligas, já o processo MAG só é utilizado em materiais ferrosos com o gás de proteção CO₂ ou misturas ricas nesse gás (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

O processo de soldagem MIG/MAG se destaca, devido sua alta taxa de deposição e grande variedade em tipo e espessuras de metal de base a ser soldado. Além disso, a baixa produção de escórias (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009). No processo de MIG/MAG, o eletrodo consumível é alimentado continuamente, fechando um arco entre a peça a ser soldada. É utilizado um fluxo de gás para a proteção contra a oxidação da região soldada e consequentemente ajuda na estabilidade do arco e refrigeração da pistola, visto que a temperatura para soldagem é alta (OKUMURA e TANIGUCHI, 1982) (Figura 3.4).

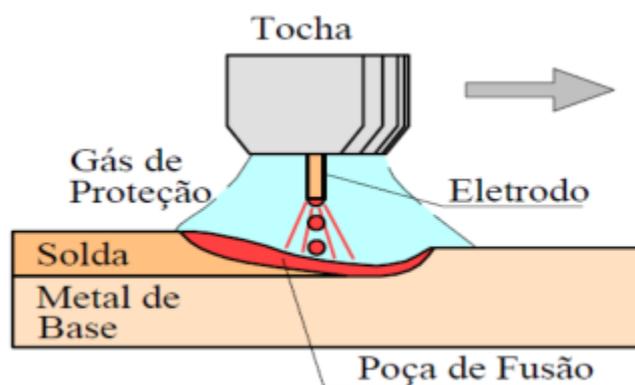


Figura 3.4 - Representação esquemática do processo de soldagem MIG/MAG. (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009)

Os gases utilizados para a proteção na soldagem podem ser inertes ou ativos e até mesmo uma mistura. O tipo de gás tem uma influência direta nas características do arco, transferência de metal, penetração, largura do formato da solda, velocidade máxima de soldagem, tendência ao aparecimento de mordeduras ou não e o custo da soldagem. A Figura 3.5 mostra um padrão no perfil para os tipos de gases, entretanto, o perfil do cordão de solda pode ser alterado conforme os parâmetros operacionais de soldagem. (FIGUEIREDO, 2005)

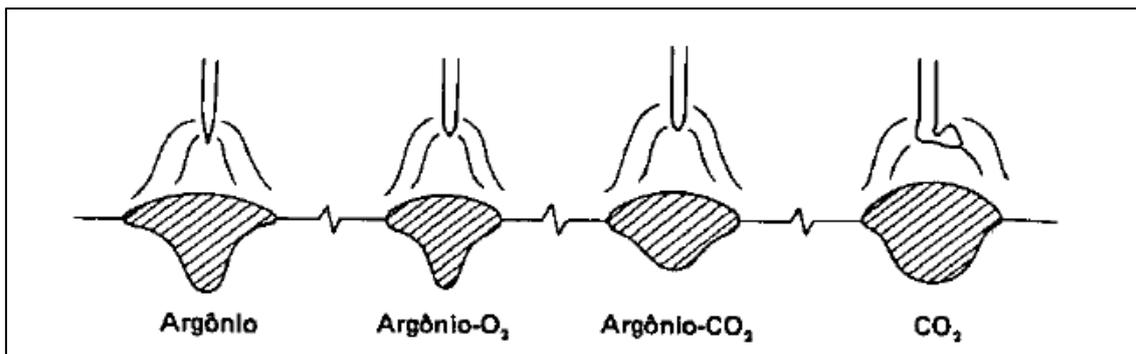


Figura 3.5 - Perfil típico de cordões de solda, em função do gás de proteção (OKUMURA e TANIGUCHI, 1982)

Os processos que utilizam gases para proteção apresentaram bastante avanços para a soldagem, pois possibilitou reduzir o custo da produção. Além disso, as soldas podem ser automatizadas e possibilita uma maior facilidade de operação. No entanto, Figueiredo (2015) aponta que esse processo de soldagem apresenta algumas limitações tais como:

- Maior sensibilidade à variação dos parâmetros;
- Equipamentos são caros e complexos;
- Utilização mais restrita devido as dimensões dos equipamentos;
- O arco deverá ser protegido de correntes de ar.

Além dessas limitações expostas, outro ponto que se deve destacar são as tensões residuais geradas no processo de soldagem, devido a diferença de temperatura gerada no componente a ser soldado.

3.5 TENSÕES RESIDUAIS

As tensões residuais são aquelas que ficam no material mesmo após a remoção das solicitações externas. Essas tensões também são denominadas de tensões internas, que aparecem frequentemente em materiais que sofrem algum tipo de processamento térmico ou mecânico, entre eles estão: soldagem, usinagem, laminação, forjamento, fundição, dobramento, etc. (WELDING HANDBOOK, 2001)

Tensões residuais são classificadas basicamente pela causa geradora (mecanicamente ou termicamente) ou pela escala no qual elas são auto equilibradas. A

Figura 3.6 mostra o desajuste em diferentes regiões gerando tensões. Em diversos casos, esses desajustes envolvem grandes distâncias, por exemplo, no caso das deformações plásticas não-uniformes de uma barra fletida. Elas também surgem através de uma grande diferença de temperatura, como por exemplo, no caso dos tratamentos térmicos ou soldagens. (WITHERS e BHADESHIA, 2000)

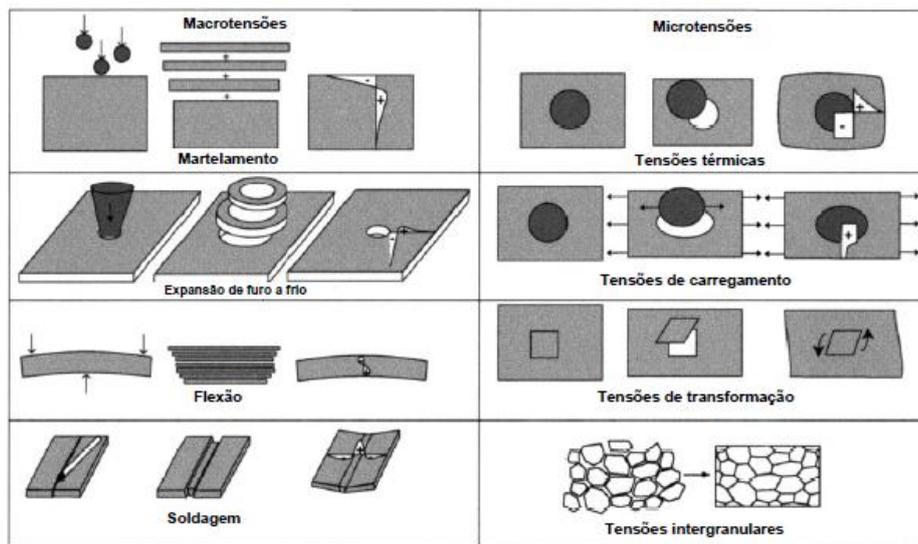


Figura 3.6 – Tipos de tensões (WITHERS e BHADESHIA, 2000)

Tensões residuais que tem origem devido a um gradiente de temperatura podem ser compreendidas conforme a Figura 3.7 que cria uma analogia para entender a formação das tensões. Quando um metal é aquecido de forma uniforme, com todas as condições controladas, não há formação de tensão, devido a sua expansão ser uniforme. Por outro lado, quando se tem um aquecimento não uniforme, com um gradiente térmico, que é o caso da soldagem, temos expansões térmicas diferentes, como representada pela Figura 3.7 (b). A barra aquecida sofrera uma expansão térmica, mas está restringida pelas bases, isso gerará um desenvolvimento de tensão compressiva na barra expandida, e de tração nas barras adjacentes. (OLIVEIRA, 2009)

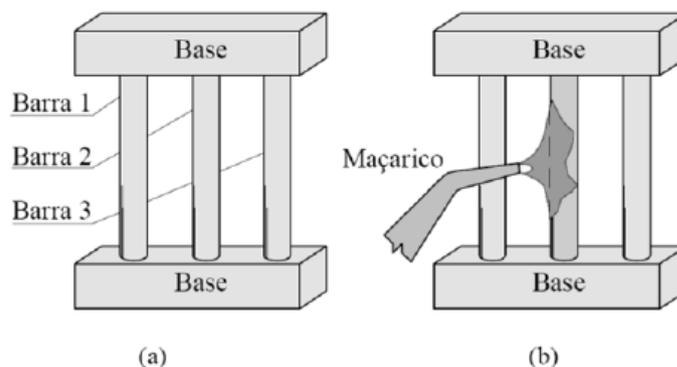


Figura 3.7 - Analogia da formação de tensão (MODENESI, 2001)

Quando os metais sofrem um aquecimento consequentemente sofrem uma expansão, ou dilatação, e quando resfriado sofrem contração. A dilatação é uma grandeza diretamente proporcional a variação de temperatura, ou a quantidade de calor aplicada. (JUNIOR, 2008)

Segundo FORTE (2004), o material mais próximo da solda é o que está sujeito ao maior aquecimento, e quanto mais distante a temperatura atingida é menor. O aquecimento heterogêneo cria contração/ expansão heterogênea gerando distorção e tensão residual no metal de solda, e dependendo da composição e a aplicação do metal, ele pode não ser capaz de resistir a essas tensões e acabar trincando ou falhando prematuramente devido um concentrador de tensão.

Zeemann (2003) explica que ao final do aquecimento a porção aquecida está comprimida e quando começa o resfriamento o material tende a contrair. Inicialmente a região sofre alívio das tensões de compressão, mas como o material não consegue reduzir seu tamanho, devido ao restante do componente, então acaba começando uma tensão de tração que pode passar o limite de escoamento do material, e então o material acaba deformando para acomodar o efeito dessa tensão. Quando o material não sofre uma deformação para acomodar o efeito da tensão, significa tensões não ultrapassaram o limite de escoamento, ficando então uma deformação na região elástica, e estas são chamadas de tensões residuais.

3.6 INFLUÊNCIA DAS TENSÕES RESIDUAIS NA VIDA EM FADIGA DO MATERIAL

Tensões residuais podem gerar efeitos benéficos ou deletérios nos materiais, dependendo da sua disposição, magnitude, profundidade e distribuição (TORRES, 2001). Além de agir em conjunto, de maneira elástica, em materiais que se deformam plasticamente, sendo que as cargas estáticas são somadas algebricamente (WITHERS e BHADESHIA, 2000).

As tensões residuais podem alterar o comportamento mecânico dos componentes e estruturas soldadas, sendo elas na maioria das vezes responsáveis pela falha deles. Isso ocorre devido a magnitude da tensão ser a mesma ou superior ao limite do escoamento do material (OLIVEIRA, 2009). As trincas relacionadas a fadiga geralmente surgem na superfície do componente. Se existisse tensão residual compressiva no local, iria retardar o surgimento de tal trinca, mas caso existam tensão trativas, terá um efeito contrário, assim contribuindo para o surgimento e propagação de uma trinca prematura (WEBSTER, 2001).

3.7 MEDIÇÃO DE TENSÃO RESIDUAL

Atualmente existem diversas técnicas para medir a tensão residual, sendo classificadas como destrutivas, semidestrutivas e não destrutivas. Algumas premissas devem ser assumidas em uma análise de tensão residual sendo elas:

- O material ser isotrópico;
- As técnicas de medição não introduzirem novas tensões residuais;
- O campo de tensão ser uniforme;
- Existência de um estado plano de tensão.

Para a escolha de um método para medir a tensão residual deve se levar em consideração vários fatores, tais como: como a natureza do campo da tensão residual, do tempo disponível para medição, da incerteza requerida, da extensão da região de interesse, do custo associado, etc. (ROCHA, 2010) Na Tabela 3.1 abaixo estão os métodos mais conhecidos e mais utilizados:

Tabela 3.1 - Classificação e principais métodos de medições de tensões residuais (ROCHA, 2010)

CLASSIFICAÇÃO	PRINCIPAIS MÉTODOS	OBSERVAÇÕES
Semidestrutivos	Método do furo cego	Execução de um furo(\varnothing 0,8 a 3,2mm), normalizado pela ASTM E-837
Destrutivos	Método de remoção de camadas (Método de deflexão)	Camadas retiradas por ataque químico. Pode estar aliada ao método de difração de raio X(método não destrutivo).
	Método do seccionamnto	Cortes parciais longitudinais ou transversais ao eixo de peças axissimétricas,(ex.:cilindros)
Não destrutivo	Difração de raio X	Variação das distâncias entre os planos atômicos. Técnica normalizada pela SAE J784a
	Difração de nêutrons	Semelhante ao método de raio X, porém com inspeção em todo o volume.
	Método ultrassônico	Variação da velocidade das ondas ultrassônicas no interiordo material.
	Método magnético	Relação entre propriedades magnéticas, permeabilidade, indução e efeito Barkhausen.

Segundo LU (1996) para selecionar o melhor método de medição requer uma observação maior a quanto os níveis práticos, econômicos e técnicos, conforme a Tabela 3.2 que relaciona diferentes técnicas.

Tabela 3.2 - Comparação entre as principais técnicas de medição de tensões residuais (LU, 1996)

Descrição	Furo cego	Deflexão	Difração de Raio-X	Ultra-som	Magnético
Hipoteses básicas	Tensão biaxial e uniforme na superfície do furo	Tensão biaxial e uniforme de um retângulo de dimensões grandes em relação a espessura	Padrão: material policristalino de grãos finos, isotrópico e homogêneo	Material isotrópico e homogêneo, tensão homogênea no caminho acústico entre o transmissor e o receptor	Material ferromagnético
Tipos de tensões residuais analisadas	Macroscópica	Macroscópica	Macroscópica Microscópica	Macroscópica Microscópica submicroscópica	Macroscópica Microscópica submicroscópica
Parâmetros medidos	Deformação ou deslocamento superficial	Deformação ou deflexão	Mudança no espaçamento interplanar do material policristalino.	Variação da velocidade da onda ultrasônica	Amplitude de ruído Barkhausen ou permeabilidade magnética
Área de análise mínima (uso padrão)	0,5 mm ²	1000 mm ² 100 mm ²	0,5 mm ²	0,1 mm ² (método da alta frequência) 30 mm ² (método convencional)	1 mm ² (método de Barkhausen) 100 mm ² (método de permeabilidade magnética)
Profundidade mínima de análise	20 µm	20 µm	Dezenas de micrometros	15 µm a 300 µm	100 µm
Custo do equipamento [US\$]	10.000 a 50.000	1.000	100.000 a 200.000	40.000 a 200.000	10.000 a 60.000
Incerteza típica	± 20 MPa	± 30 MPa	± 20 MPa	± 10 a 20 MPa	± 10 a 20 MPa
Profundidade de inspeção	0,02 a 15 mm	0,1 a 3 mm	1 a 50 µm	0,15 a 3 mm	0,1 a 1 mm

Um dos métodos para medição de tensão residual é a difração por raios-X (SUCHARSKI, 2016). Nesse método, a tensão é calculada através das alterações nas distâncias interplanares geradas pelas deformações no cristal do agregado policristalino. Assim, é comparado com os parâmetros de rede do cristal (padrão) do mesmo material sem sofrer deformação (SOUSA, 2012).

3.8 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

O estudo da difração de raio-X teve início com Laue em 1912. Este cientista estudava os aspectos da propagação da luz em cristais juntamente com Ewald, que estava desenvolvendo sua tese sobre o assunto. Diversos experimentos foram feitos na tentativa de detectar esse fenômeno, e em 1912 Laue conseguiu obter o primeiro diagrama de difração, com a utilização de sulfato de cobre. (MARTINS, 1998).

Em 1925, Lester e Aborn, mostraram que era possível medir as tensões residuais através de difração de raio-X. O método foi otimizado em 1934 por Barret e Gensamer, que utilizaram para medir a soma de três tipos de tensões residuais (macroscópicas, microscópica e sub-microscópica). Em 1935, Glocker conseguiu mostrar que era possível avaliar cada tipo de tensão residual. Desde então, com a evolução tecnológicos foi possível ter um progresso no método (JAMES, LU e ROY, 1996).

O método de difração de raio-X utiliza a medição da deformação no cristal agregado policristalino para medir a tensão residual, comparando com os parâmetros da rede do cristal do mesmo material sem sofrer deformação. Quando um feixe de raio-X é direcionado para a superfície de um corpo, uma parte dos raios são absorvidos enquanto uma parte é refletida em todas as direções da área irradiada. Esse método mede a intensidade máxima dos raios difratados para um determinado ângulo de varredura, assim é possível obter o espaçamento interplanares dos planos de difração (SOUSA, 2012).

A medição da tensão residual por difração de raios-X não ocorre de forma direta. Sabendo o comprimento de onda do raio que será incidido, λ , e o ângulo de difração, 2θ , é possível determinar a variação na distância interplanar do corpo com e sem o carregamento utilizando a lei de Bragg, segundo a equação 3.1: (SCURACCHIO, 2012).

$$\lambda = 2d \cdot \sin\theta \quad (3.1)$$

Quando um feixe de raios-X interage com uma estrutura cristalina, parte desses raios é absorvida em forma de calor e parte é difratada. Essa difração ocorre a partir de uma fina camada superficial de aproximadamente 20 μm . Quando a superfície está sobre compressão, o espaçamento interplanar “d” é maior do que no seu estado livre (sem tensão), isso é devido ao efeito de Poisson (ANDEROGLU, 2004). Quando a varredura é realizada utilizando esse método, o resultado será um espectro mostrando picos de difração que é característico para cada material, a Figura 3.8 é um exemplo.

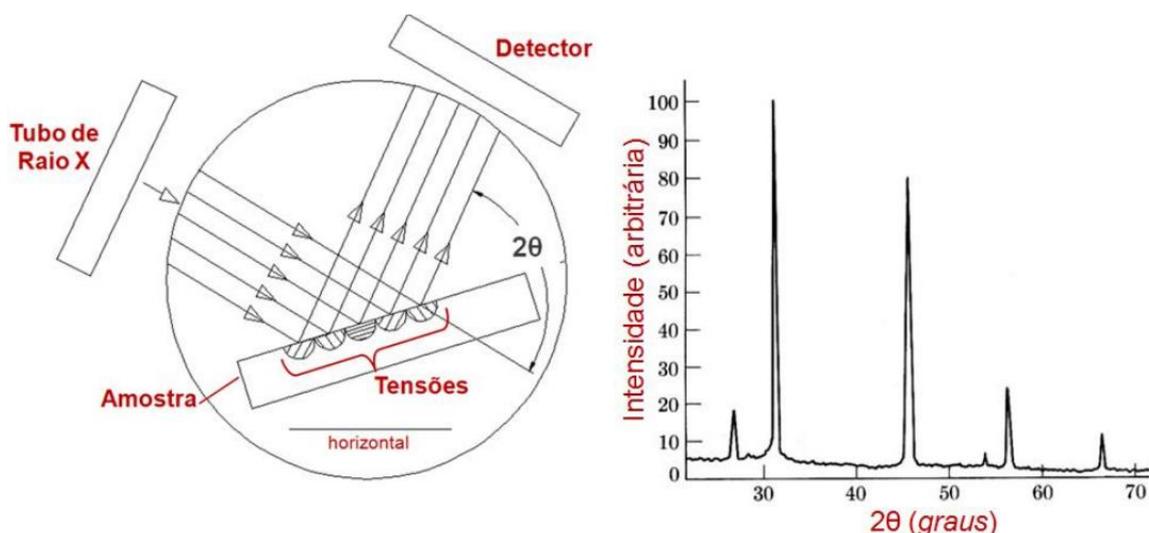


Figura 3.8 - Varredura superficial da amostra (SOUSA, 2012)

A existência de tensões residuais em um material provoca mudanças em seu espaçamento interplanar, conseqüentemente pode ser observado as mudanças no parâmetro de difração. Para ângulos maiores, as distâncias interplanares são menores quando comparadas com o padrão (material sem esforço/carga), então a tensão residual será de compressão. Porém se os ângulos forem menores a distância interplanar será maior, logo a tensão residual será de tração, conforme a Figura 3.9

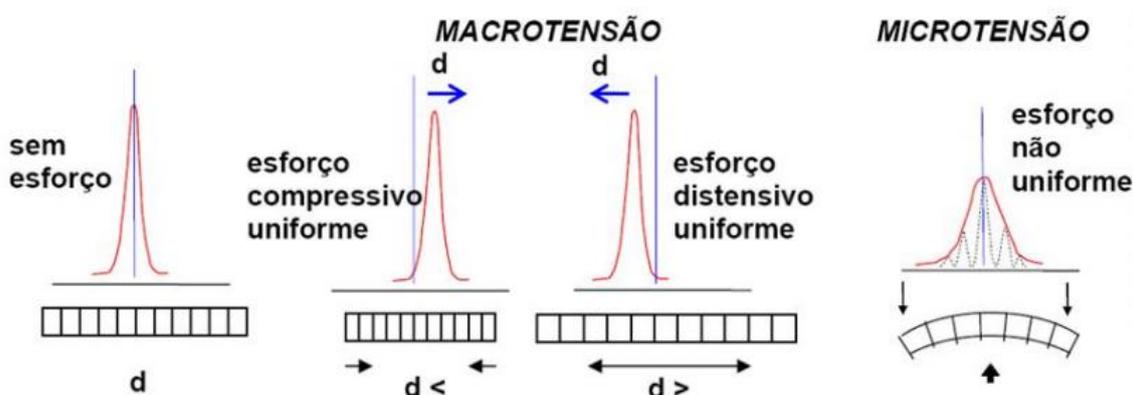


Figura 3.9 - Deslocamento dos picos de difração quando comparados com o padrão (KOUKETSU, 2017)

Então, com o ângulo de difração é possível estimar o valor da deformação do cristal, conseqüentemente o valor da tensão residual daquela região, conforme Figura 3.10.

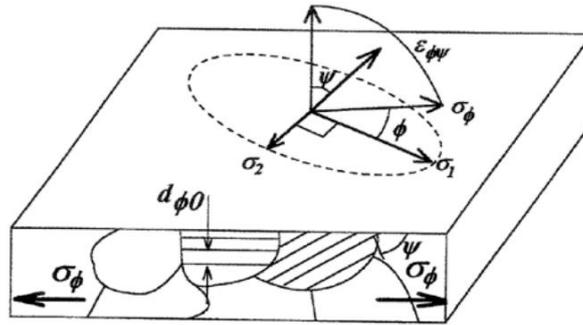


Figura 3.10 - Modelo do estado plano de tensões (SOUSA, 2012)

Para o cálculo da tensão residual são utilizadas equações que correlacionam tensão e deformação no regime elástico. A figura acima apresenta o modelo do estado plano de tensão, o qual é utilizado para os cálculos. Assim admite-se duas tensões principais σ_1 e σ_2 , mesmo sabendo que não há uma tensão normal a superfície, será adotada uma deformação nesse sentido, $\varepsilon_{\phi\psi}$, devido o coeficiente de Poisson (EIGEMANN e MACHERAUCH, 1996).

O modelo é apresentado da seguinte maneira:

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \left[\frac{1+V}{E} (\sigma_1 \alpha_1^2 + \sigma_2 \alpha_2^2) \right] - \left[\frac{V}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \right] \quad (3.2)$$

$$\alpha_1 = \cos.\text{sen}\psi \text{ e } \alpha_2 = \text{sen}\phi.\text{sen}\psi \quad (3.3)$$

Substituindo 3.3 em 3.2, resulta na Equação 3.4:

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \left[\frac{1+V}{E} (\sigma_1 \cos^2 \phi + \sigma_2 \text{sen}^2 \phi) \text{sen}^2 \psi \right] - \left[\frac{V}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \right] \quad (3.4)$$

Quando $\psi = 90^\circ$, o vetor deformação apresenta-se sobre a superfície da amostra e a tensão da superfície é obtida pela Equação 3.5.

$$\sigma_\phi = \sigma_1 \cos^2 \phi + \sigma_2 \text{sen}^2 \phi \quad (3.5)$$

Substituindo a equação 3.5 na 3.4 (PREVÉY, 1986), resulta na Equação 3.6.

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{1+V}{E} \sigma_{\phi} \text{sen}^2\psi - \frac{V}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (3.6)$$

Se $d_{\phi\psi}$ é a distância interplanar conforme a Figura 3.10, então d_0 é a distância interplanar do corpo de prova padrão (ANDEROGLU, 2004), conforme a Equação 3.7.

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{d_{\phi\psi} + d_0}{d_0} \quad (3.7)$$

Resultando na Equação 3.8.

$$\frac{d_{\phi\psi} + d_0}{d_0} = \frac{1+V}{E} \sigma_{\phi} \text{sen}^2\psi - \frac{V}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (3.8)$$

Segundo Neves, et all (2003) como não há carregamento sobre o corpo, a tensão residual será conforme a Equação 3.9.

$$\frac{d_{\phi\psi} + d_0}{d_0} = \frac{V}{E} \sigma_{\phi} \quad (3.9)$$

Conforme a equação acima o aumento da distância interplanar em relação a uma amostra sem cargas (sem tensão residual) resulta em um valor positivo, então será uma tensão trativa. No caso da redução da distância interplanar, o valor é negativo, assim a tensão residual é compressiva.

3.9 ALÍVIO DE TENSÃO RESIDUAL

Para reduzir as tensões residuais diversos tratamentos térmicos e/ou mecânicos são aplicados. Esses tratamentos são necessários para manter ou restaurar as propriedades padrões do metal de base que foi afetado por um ciclo térmico (SILVA, 2005). Conforme Novikov (1994), não há a necessidade de destruir o corpo para conseguir realizar o alívio das tensões, basta acontecer deformações plásticas. Consequentemente para conseguir realizar esse alívio, é necessário inserir esse escoamento plástico.

3.10 PRÉ-AQUECIMENTO

Grande parte dos metais são bons condutores de calor, conseqüentemente o calor inserido pelo processo de soldagem é rapidamente dissipado por toda a massa. Desta forma, gera um resfriamento relativamente rápido. O pré-aquecimento da região a ser soldada é uma maneira de reduzir essa taxa de resfriamento do material, geralmente a temperatura utilizada para pré-aquecimento em metais varia de 50°C a 540°C. No entanto, é utilizada na faixa de 150°C a 200°C (CALLEGARI e DADALTO., 2011).

Segundo Zeermann (2003), o pré-aquecimento ajuda na redução das tensões residuais, devido ele reduzir a velocidade de resfriamento facilitando a acomodação das tensões.

O objetivo principal do pré-aquecimento é manter o teor de martensita da solda a um nível mínimo, A possibilidade de trincas causadas pela formação de martensita é agravada pela presença de hidrogênio (AWS, 1987). Em resumo, o pré-aquecimento reduz o risco de trincas induzidas pelo hidrogênio; as tensões residuais e a dureza na região termicamente afetada pelo calor da soldagem (PEREZ, 2007).

Segundo Perez 2007, para determinar a temperatura de pré-aquecimento é necessário saber a composição química do material, pois é controlada pelo carbono equivalente do mesmo. Basicamente quanto maior for o teor de carbono simples e equivalente do material de base, maior será a temperatura de pré-aquecimento necessária.

Para a calcular o carbono equivalente é utilizado a Equação 3.10.

$$CE = C + \frac{Mn + Si}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (3.10)$$

Se o carbono equivalente (CE) calculado ultrapassar 0,4, é recomendável que o metal de base seja pré-aquecido entre 93 a 204°C. Se o CE ultrapassa 0,6, a faixa de pré-aquecimento fica entre 204 a 371°C. Para esse cálculo existe diferentes fórmulas que devem ser estudadas para cada caso (A.W.S., 2000).

Outros fatores importantes para se determinar a temperatura de pré-aquecimento são a espessura e o tamanho do componente. Conforme tem um aumento no tamanho e/ou espessura do componente, a temperatura de pré-aquecimento também

aumenta. (YURIOKA e KASUYA, 1994). Segundo ESAB (2005), a espessura do material de base pode tornar o pré-aquecimento necessário, mesmo para materiais de baixo carbono. Para se determinar a temperatura de pré-aquecimento considerando a espessura é utilizado a equação 3.11.

$$C_{eqtotal} = 0,005 * C_{eq} * espessura (mm) \quad (3.11)$$

Para determinar a temperatura de pré-aquecimento levando em consideração a espessura do material de base por meio do cálculo do carbono equivalente total, é utilizado a equação 3.12.

$$Temperatura \text{ de pré - aquecimento}(^{\circ}C) = 350 * \sqrt{C_{eqtotal} - 0,25} \quad (3.12)$$

3.11 PÓS AQUECIMENTO

Segundo Zermann (2013), o alívio de tensão residual por tratamento térmico após a soldagem ocorre da seguinte maneira: a tensão limite de escoamento (LE), assim como a tensão limite de resistência (LR), diminui com a temperatura, conforme a figura 3.11. Quando ocorre o aquecimento em um material que sua tensão residual se situa próxima a tensão de escoamento do material, essa tensão ultrapassa a do escoamento e ocorre a deformação do material, aliviando as tensões internas, conforme a Figura 3.12.

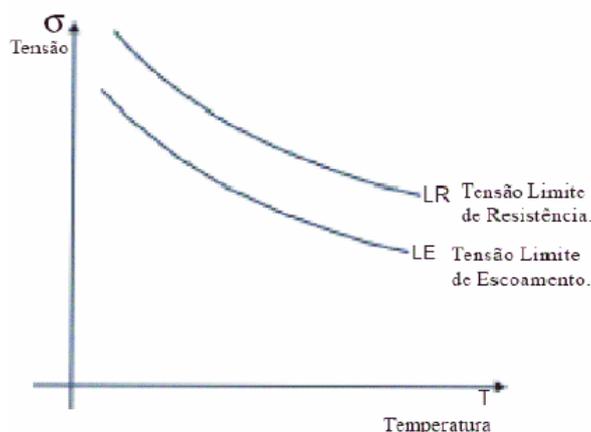


Figura 3.11 - Representação da variação do limite de resistência e limite de escoamento em função da temperatura (ZEEMANN, 2003)

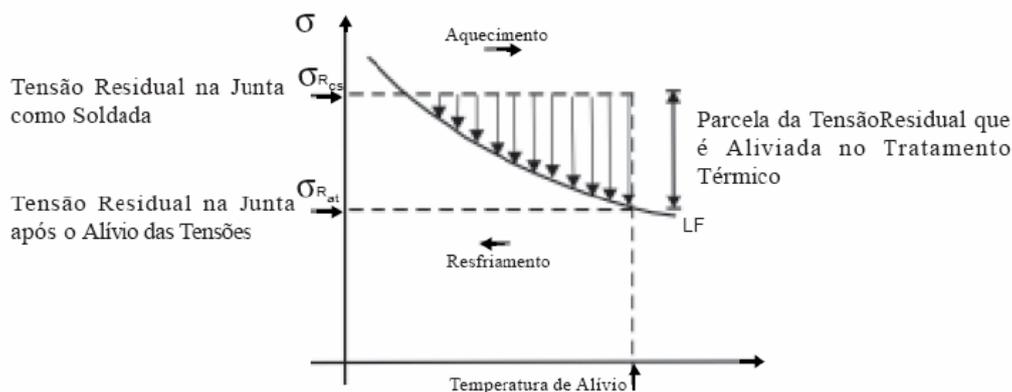


Figura 3.12 - Como ocorre o alívio de tensões quando se aquece o material (ZEEMANN, 2003)

A temperatura e o tempo são variáveis importantes do TTAT (tratamento térmico de alívio de tensões), e dependentes da espessura da peça (ZEEMANN, 2003). A maioria dos aços a temperatura do tratamento varia entre 550°C e 650°C por uma hora a cada 25 mm de espessura, passando logo em seguida por um resfriamento lento até a temperatura ambiente (FORTES, 2004).

3.12 AÇO AAR – 201 -E

Grande parte dos componentes ferroviários, utilizados para a fabricação de vagões, são feitos em aço fundido AAR – M201, sendo esses classificados nos graus A, B, B+, C, D, E, de acordo com sua composição química e propriedades mecânicas. A grande diferença entre essas classificações é o teor de manganês de cada um (AAR, 2010) (SCHWANKE, 2013), as Tabelas 3.3 e 3.4 mostram o percentual máximo de cada elemento químico e as propriedades mecânicas do aço M201 grau E.

Tabela 3.3 - Comparação entre as principais técnicas de medição de tensões residuais (LU, 1996)

C	Mn	P	S	Si
0,32	1,85	0,40	0,40	1,50

Tabela 3.4 - Propriedades mecânicas do aço M201 grau E (AAR, 2010).

Propriedades	Valor mínimo
Limite de Resistência a tração	827 MPa
Limite de Escoamento	689 MPa
Alongamento em 50 mm	0,14
Redução de Área	0,3
Resistência ao impacto	27,1 J
Faixa de Dureza	241 – 311 HB

3.13 ENSAIOS MECÂNICOS

Para conhecer cada material é necessário conhecer suas propriedades, e para isso são utilizados alguns ensaios, mantendo um padrão adequado em produtos comercializados (SILVA, 2014). As características do material definem suas aplicações, conforme a sua forjabilidade, usinabilidade, suscetibilidade a tratamentos e características mecânicas. (GARCIA, SPIM e SANTOS, 2000).

Os ensaios são divididos entre destrutivos e não destrutivos. Ensaios de tração, fadiga, torção não permite a reutilização do material, conseqüentemente, são classificados como ensaios destrutivos. Com a finalidade de que o material não perca sua utilidade, ou em um cenário onde não se pode parar o processo, são utilizados ensaios não destrutivos, como por exemplo: líquido penetrante, raios-X, ultrassom, dentre outros (SILVA, 2014). A escolha de um ensaio a ser utilizado, depende da finalidade e das propriedades mecânicas que se pretende medir/avaliar (SOUZA, 1982).

Um dos ensaios mais utilizados para caracterizar um material mecanicamente é o ensaio de tração ou compressão. Apesar de ser um teste completo quando se fala de propriedades mecânicas, na maioria das vezes ele é utilizado basicamente para encontrar a relação entre tensão normal média e deformação normal média. Esse ensaio é utilizado em muitos materiais, como por exemplo nos metais, nos cerâmicos, nos polímeros e nos compostos (HIBBELER, 2009).

3.13.1 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração consiste na aplicação de uma força uniaxial em um corpo de prova até sua ruptura, assim as deformações são distribuídas pela extensão do corpo de prova (SOUZA, 1982). Um corpo de prova circular padrão utilizado nos ensaios de tração é mostrado na Figura 3.13.

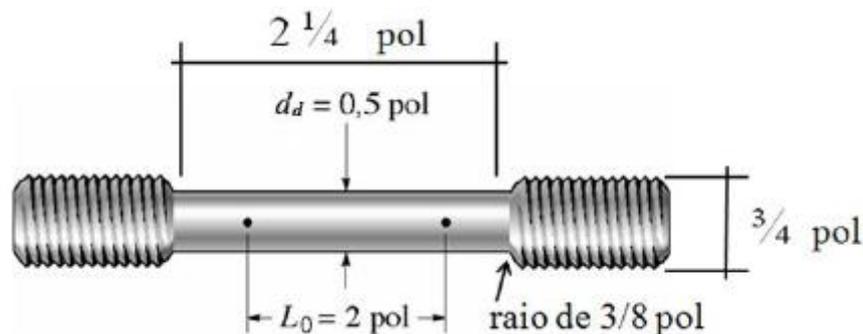


Figura 3.13 - Corpo de prova circular padrão do ensaio de tração (HIBBELER, 2009)

Geralmente os corpos de prova para esse ensaio possuem a seção transversal circular, no entanto, também podem ser utilizados corpos de provas de seção retangulares. A norma ABNT NBR 6152 (1992) regulamenta os ensaios de tração a temperatura ambiente para materiais metálicos, apresentando alguns parâmetros a serem utilizados para a fabricação dos corpos de provas.

Para os resultados de tensão e deformação obtidos pelos equipamentos de ensaio de tração é utilizada a equação abaixo. Sendo essa utilizada para determinação do módulo de elasticidade do material. A Equação 3.13 mostra uma relação direta entre tensão, deformação e o módulo de elasticidade (CALLISTER, 2002).

$$E = \frac{F}{A \cdot \varepsilon} \quad (3.13)$$

Pode ser utilizada a relação da dureza brinell para determinar a tensão de escoamento e de resistência a tração, conforme a Equação 3.14 (CALLISTER, 2002).

$$\sigma = 3,45 \cdot HB \quad (3.14)$$

3.13.2 ENSAIO DE DUREZA

O ensaio de dureza é uma técnica que tem o objetivo principal de medir a dureza superficial do material. Diversas técnicas para medição são utilizadas, entre elas estão Vickers, Rockwell, Brinell, Knoop, entre outras (SOUSA, 2012).

O ensaio de dureza é o mais utilizado, devido a sua simplicidade e seu custo baixo, pois seus corpos de provas não precisam de uma preparação tão complexa, sendo basicamente lixados ou polidos. Esse tipo de ensaio é considerado não destrutivo, e pode ser utilizado para estimar o módulo de elasticidade, limite de resistência, entre outros (MANEIRO e RODRÍGUEZ, 2006).

3.13.3 ENSAIO DE IMPACTO

Hoje em dia existem vários tipos de ensaios de impacto, variando a aplicação, desde impacto com velocidades baixas até velocidades ultrassônicas. Dentre eles o mais antigo e usual é o Charpy (CALLISTER, 2002). Assim como os outros, os corpos de prova utilizados no ensaio de impacto seguem normas, com a finalidade de manter o padrão e repetibilidade (CHIAVERINI, 1986). A Figura 3.14 apresenta um esquemático do dispositivo Charpy.

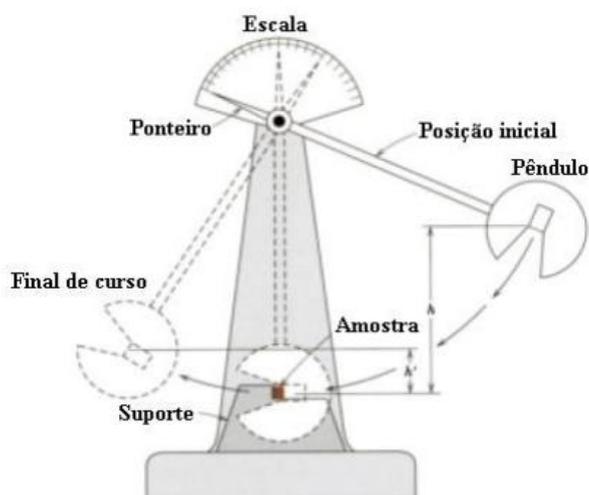


Figura 3.14 - Máquina de ensaio Charpy (CALLISTER, 2002)

O ensaio consiste no impacto do pêndulo sobre o entalhe do corpo de prova. Para iniciar, o martelo é elevado a uma certa altura, assim adquirindo uma energia potencial. Quando o pêndulo é liberado, a energia potencial se transforma em energia cinética. A diferença entre as energias potenciais gravitacionais antes e depois do impacto, representa a energia absorvida por ele (CALLISTER, 2002).

3.13.4 ENSAIO METALOGRAFICO

A finalidade principal do ensaio metalográfico é relacionar a estrutura do material com suas propriedades físicas, processos de fabricação, desempenho, etc. A metalografia pode ser dividida em macrografia e micrografia (SECCO e FILHO, 2014).

A micrografia é a análise realizada em microscópicos, que permite analisar superfícies perfeitamente polidas. Os microscópicos em sua grande maioria, possuem sistema de fotografia integrado, que permite o registro das análises, conforme a imagem 1. A macrografia é uma análise feita a olho nu ou microscópicos estéreos, com pouca ampliação. Assim é possível ver homogeneidade no material, impurezas relacionadas, por exemplo, ao processo de fabricação (COLPAERT, 2008)

Com a análise no microscópico não é possível descrever o material quantitativamente, apenas qualitativamente. Quando se tem a necessidade de uma análise quantitativa utiliza-se uma análise por imagem (RIOS e PADILHA, 2007). Para capturar tais imagens utiliza-se microscópico óptico ou eletrônico de varredura. O computador ligado ao equipamento trata a imagem e converte em sinais binários, assim possibilitando a quantificação das fases (FERREIRA, 2002).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizado na pesquisa com a finalidade de avaliar o processo de alívio de tensão utilizado na oficina de vagões da EFC após a recuperação por soldagem em componentes ferroviários. Foram criados corpos de provas, os quais foram submetidos a metalografia e ao ensaio de tração, dureza, impacto e difração de raio-X. Através desses experimentos obtêm-se os seguintes dados: propriedades químicas, propriedades mecânicas e tensão residual.

4.1 AÇO AAR M-201 GRAU E

Para esse trabalho foram utilizados engates/ braçadeiras e partes desses componentes ferroviários, que utilizam o aço AAR M201 grau E. O aço grau E possui teores de carbono na faixa de 0,32%, e os teores de manganês mais elevados, com a possibilidade de chegar até 1,85%, mas respeitando a equação do carbono equivalente supracitada, conforme a Tabela 4.1. As propriedades químicas e mecânicas do material devem estar conforme a AAR. Testes foram realizados para caracterização mecânica e química do metal de base, conforme os resultados discutidos nesse trabalho.

Tabela 4.1 – Composição química do aço M-201 grau E

Especificado AAR	C	Si	Mn	P	S	CE
M-201 grau E	0,32 max	1,5 max	1,85 max	0,04 max	0,04 max	0,88 max

Inicialmente foram utilizados três engates e três braçadeiras para o trabalho (dispositivos novos), e simuladas as recuperações em regiões onde se tem a maior probabilidade de aparecimento de trincas. No segundo momento foram criados quatro corpos de prova do mesmo componente para simular diferentes condições para a mesma peça e para ter uma superfície plana para uma maior assertividade no ensaio de difração por raio-X.

Para essa simulação foram feitos quatro corpos de prova de 150 x 200 mm para realização de um cordão de solda no mesmo. A Figura 4.1 mostra a região dos 4 corpos de prova. O corte foi realizado a frio por um dispositivo mecânico, do tipo serra fita para não ocorrer um aquecimento no material

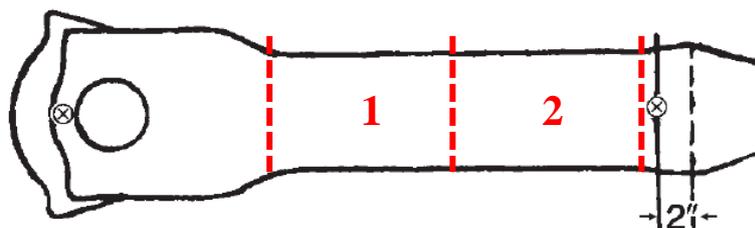


Figura 4.1 - Região dos corpos de prova na peça (Autor)

4.2 METAL DE ADIÇÃO

O consumível de soldagem (metal de adição) utilizado na recuperação dos componentes foi o ASME SFA 5.28 E110C-G (OK TUBROD 110 MC), fabricado e fornecido pela ESAB em bobina de 16 kg, com código de rastreabilidade VT3091. As propriedades mecânicas são demonstradas na Tabela 4.2 conforme o catálogo da fabricante.

Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas do arame (ESAB, 2015)

Limite de resistência (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento mínimo (%)	Energia de impacto Charpy – V mínima
850	800	18	50J a -29°C

4.3 GÁS DE PROTEÇÃO

O gás utilizado no teste para a proteção da poça de fusão na soldagem foi o CO₂ + Argônio (25% / 75%). A vazão utilizada do gás foi de aproximadamente 17 L/minutos, conforme retratado pela figura 4.2.



Figura 4.2 - Vazão do gás de proteção (l/min) (Autor)

4.4 PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM

Os equipamentos utilizados para goivagem e soldagem foram os mesmos para todos os testes, presentes na oficina da Vale em São Luís no estado do Maranhão, seguindo os mesmo padrão e velocidade de soldagem que foi de aproximadamente 4,55 mm/seg. (milímetros por segundos).

A máquina utilizada para realizar a goivagem foi o plasma da AIR JET 162 do fabricante Eutectic Castolin com os parâmetros conforme a Figura 4.3 (a). A máquina de solda utilizada foi a ArcWeld 400S fabricante Eutectic Castolin com os parâmetros de 120 amperes, conforme a Figura 4.3 (b). Os valores de tensão e corrente foram medidos como forma de redundância por um multímetro tipo alicate da fabricante Fluke modelo 376 FC, com os valores 25 V e 208 amperes, conforme a Figura 4.3 (c). Cada par de peça (engate e braçadeira) passou por um tratamento diferenciado para se ter parâmetro para comparação.



(a)

(b)

(c)

Figura 4.3 – Parâmetros de soldagem e goivagem utilizados (Autor)

4.5 ENGATES E BRAÇADEIRAS

Os componentes utilizados são engates e braçadeiras do sistema de choque e tração de vagões ferroviários. Para o trabalho foram utilizados três engates e três braçadeiras para se obter a condição real dos componentes e de recuperação. Para uma avaliação da condição inicial foi realizado a verificação de presença de trinca através de inspeção pelo método de partícula magnética conforme a figura 4.4.



Figura 4.4 - Realização de partícula magnética na braçadeira 01 (Autor)

Após a verificação de ausência de trincas, foi realizada preparação da superfície para medição da dureza nas regiões indicadas pela AAR, assim obtendo os valores reais para comparar com os padrões. Para a medição da dureza foi utilizado um durômetro portátil Hardmatic HH-411 810-298-10 - Leeb 1HL - 999HL conforme a Figura 4.5.



Figura 4.5 - Medição de dureza na braçadeira (Autor)

Com todas as informações iniciais dos componentes levantadas, iniciou-se a goivagem nas regiões de maior probabilidade do aparecimento de trincas conforme o histórico, denominadas de regiões 19 e 22 para braçadeiras e no engate a região do furo (figura 4.6).

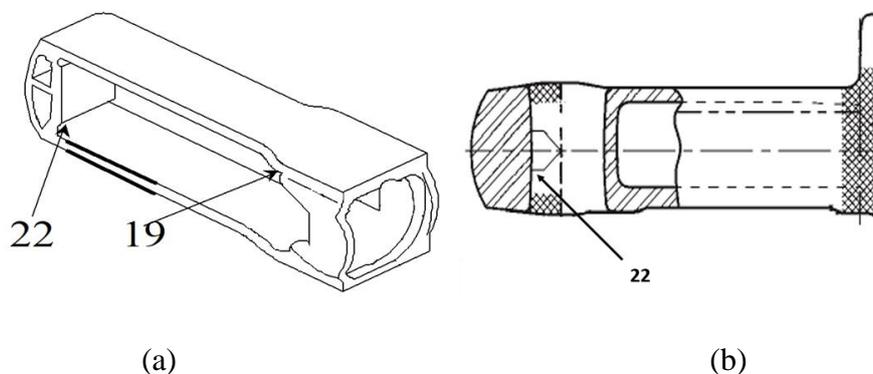


Figura 4.6 - Região com maior probabilidade de trincas (Adaptado da AAR, 2001).

A Figura 4.7 mostra a região 22 da braçadeira que foi realizado o processo de goivagem e recuperação por solda. A temperatura da peça antes e após a soldagem foi medida com um termômetro digital (pirômetro) (Figura 4.8).



Figura 4.7 - Região soldada em braçadeira (Autor)



Figura 4.8 - Medição de temperatura após a soldagem (Autor).

Os parâmetros de soldagem foram mantidos para os seis componentes e para os quatro corpos de prova. O que variou foi o tratamento em cada peça, ou pares de peças.

4.6 BRAÇADEIRA E ENGATE 01

O primeiro par dos componentes ferroviários foi fabricado em 03/2019, para esse não foi realizado um pré-aquecimento, mas foi utilizado o processo de alívio de tensão conforme utilizado na oficina de recuperação (oficina de manutenção), assim tem-se o real cenário dos componentes. Foram utilizados fornos elétricos presente na oficina de manutenção de truque e tração na Vale em São Luís. Como são dois fornos diferentes as temperaturas do tratamento de alívio de tensão foram diferentes para cada componente, conforme a Tabela 4.3, seguindo o procedimento utilizado atualmente pela oficina.

Tabela 4.3 - Temperatura do alívio de tensão (Autor)

	Temperatura inicial	Temperatura final
Engate	166°C	295°C
Braçadeira	164°C	350°C

4.7 ENGATE E BRAÇADEIRA 02

A braçadeira do segundo par dos componentes ferroviários foi fabricada em 02/2019, já o engate foi em 11/2018. Para esse par não foi realizado pré-aquecimento, e não foi realizado o processo de alívio de tensão – em forno, para se obter um parâmetro de comparação (componente sem alívio de tensão).

4.8 ENGATE E BRAÇADEIRA 03

A braçadeira do terceiro par dos componentes ferroviários foi fabricada em 03/2019, já o engate foi em 11/2018. Para esse par, foi realizado o pré-aquecimento com um maçarico na região a ser soldada, chegando a uma temperatura média de 276 para braçadeira e de 273 para o engate. A temperatura de pré-aquecimento foi determinada através da Equação 3.11 e Equação 3.12. Não foi realizado pós-aquecimento nas peças. Para avaliar o desempenho fez se apenas um pré-aquecimento antes da recuperação.

4.9 CORPOS DE PROVA

A braçadeira utilizada para fabricação dos quatro corpos de prova foi fabricada em 06/2016. A Tabela 4.4 retrata os tratamentos submetidos a cada corpo de prova.

Tabela 4.4 - Tratamentos térmicos nos corpos de provas (Autor)

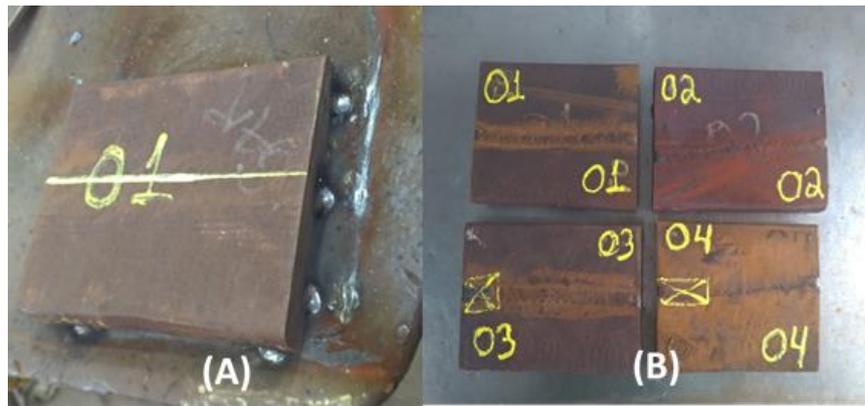
CP	Tratamento térmico
CP01	Nenhum
CP02	560°C por duas horas (conforme AAR)
CP03	300°C
CP04	Pré aquecimento 273°C

A temperatura de 560°C foi definida conforme parâmetros da AWS, já a temperatura de 300°C foi definida conforme a temperatura real utilizada pela oficina estudada no dia-a-dia para o tratamento de alívio de tensão. A temperatura de pré-aquecimento foi definida com a Equação item 3.12.

Para o tratamento térmico foi utilizado um forno elétrico mufla, presente no laboratório de ensaios mecânicos da Vale, conforme a Figura 4.9. A goivagem seguiu todos os parâmetros já apresentados. Para a realização da soldagem foram presas as peças na mesa através de pontos de solda para garantir a restrição conforme a figura 4.10 (a). A figura 4.10 (b) retrata os quatro corpos de prova após a soldagem.



Figura 4.9 – Forno Mufla (Autor)



(a)

(b)

Figura 4.10 – Corpos de prova (Autor)

4.10 ANÁLISE QUÍMICA

O teste da composição química foi realizado seguindo a técnica de espectrometria ótica por centelhamento. Esta técnica permitiu caracterizar o metal de base e a solda quanto à sua composição química utilizando emissão de fótons sobre o material.

Para este teste foi utilizado o espectrômetro de bancada, no laboratório do MIB (*Materials Institute of Brazil*), na cidade de São Paulo. O teste foi feito em amostra do metal de base e metal de solda em cada peça, triplicata, para obtenção da média de porcentagem de cada elemento, seguindo os padrões da ASTM A751. A Figura 4.12 mostra o equipamento utilizado.

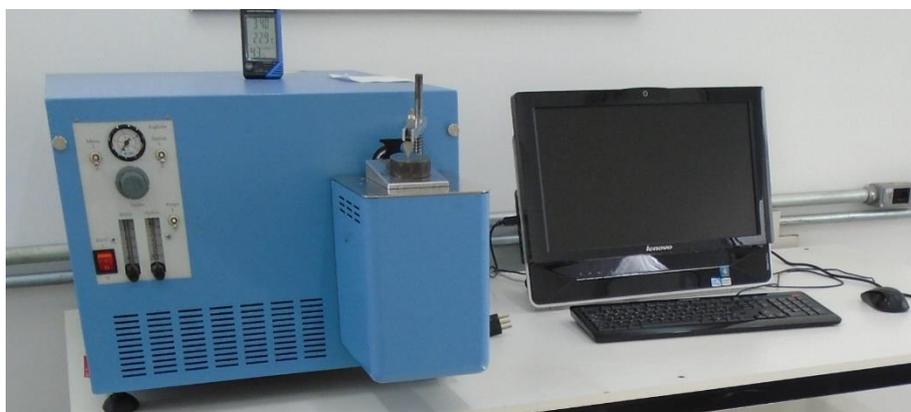


Figura 4.11 - Espectrômetro de bancada (Autor)

4.11 MICRODUREZA

No presente trabalho o ensaio de microdureza foi realizado nos CPs previamente preparados para o exame macrográfico, conforme a Figura 4.14. O método usado foi o Método Vickers, com carga de 50 N (HV5). O ensaio foi conduzido conforme ASTM E384-17. Foi avaliada a dureza do metal de base (MB), da zona termicamente afetada (ZTA) e do metal de solda (MS), sendo todas as medidas realizadas em triplicata. Para realização da micrografia, retirada das imagens e realização do ensaio de microdureza Vickers, foi utilizado o equipamento Micro Hardness Tester HV-1000, presente no MIB, como mostrado na Figura 4.12. Para obter o perfil de microdureza foi realizada a medição conforme a Figura 4.13.



Figura 4.12 - Micro Hardness Tester HV-1000 (Autor)

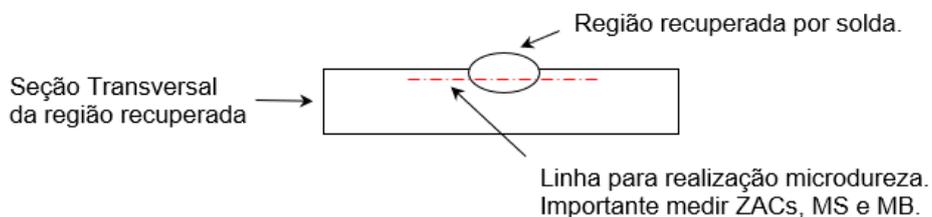


Figura 4.13 – Região da Microdureza (Autor)



Figura 4.14 - Região com defeitos na solda (Autor)

4.12 ENSAIO DE TRAÇÃO

Amostras de cada material foram ensaiadas seguindo os procedimentos prescritos pela norma ASTM E8/E8M-16a. Foram utilizados três corpos de prova da região próxima a solda, para estabelecer uma média das propriedades mecânicas presentes no aço. As amostras foram usinadas de acordo com a Figura 4.15, onde o diâmetro da secção a ser reduzida é de $A = 6 \text{ mm}$, comprimento total $L = 124 \text{ mm}$, o raio de filete $r = 6 \text{ mm}$ e diâmetro da seção de 9 mm , conforme a figura 4.16.

Para realização dos ensaios de tração foi utilizada uma máquina Instron 2382, conforme a figura 4.17. Sua capacidade máxima de tração é de 100 kN . Os parâmetros de deslocamento utilizados nos ensaios foram de $0,5 \text{ mm/min}$ até o escoamento e 8 mm/min até a fratura.

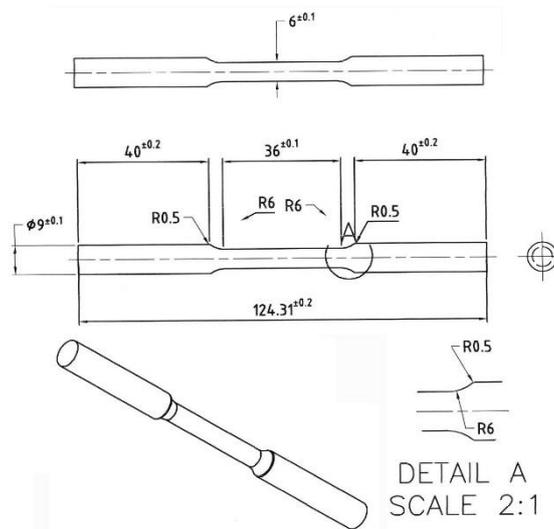


Figura 4.15 - Corpo de prova de tração (Autor)



Figura 4.16 - Corpo de prova de tração (Autor)



Figura 4.17 – Máquina universal de ensaios mecânicos - Instron 2382 (Autor)

4.13 ENSAIO DE IMPACTO

Para a verificação do comportamento do material perante a aplicação de uma carga súbita de impacto, efetuou-se o ensaio de Charpy entalhe V. O corpo de prova para este ensaio seguiu os padrões da norma ASTM A370 E23-16. A Figura 4.18 mostra o corpo de prova e a Figura 4.19 mostra o dimensional do corpo de prova onde o comprimento total do mesmo é de 55 mm, com secção transversal quadrada com 10 mm de altura e um entalhe em V com 0,25 mm de raio, necessário para causar a fratura.



Figura 4.18 - Corpo de prova de impacto (Autor)

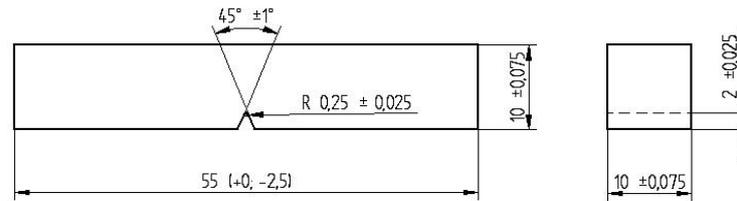


Figura 4.19 - Corpo de prova de impacto (Autor)

4.14 MEDIÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL

Para a medição das tensões residuais, foi utilizado um difratômetro de raio X modelo X'Pert³ MRD, conforme a Figura 4.20. Foi utilizado o método $\text{sen}^2\psi$ (0.0 a 0.9), a fonte de radiação de Mo-K alpha. O intervalo utilizado foi o de 64.9° a $69.9^\circ - 0.05^\circ$ por passo 30 seg/passos e a varredura foi em modo $\theta/2\theta$.



Figura 4.20 – Difratômetro de raio-X (PANALYTICAL, 2019)

5 RESULTADOS

5.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS QUÍMICOS

A análise química do metal de base e metal de solda foi realizada conforme a seção 4.10. Pelas Tabelas 5.1 e 5.2 pode-se fazer uma comparação entre a composição química do metal de base e da região da solda. Os valores de composição química do metal de base estão de acordo com AAR.

Tabela 5.1 - Composição química do material de base (Autor)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Cu	Al	CE	Fe
Braçadeira 01	0,23	0,4	1,72	0,018	0,026	0,24	0,05	0,24	0,006	0,011	0,03	0,02	0,69	Bal
Braçadeira 02	0,26	0,43	1,82	0,017	0,016	0,42	0,04	0,25	0,006	0,012	0,04	0,05	0,78	Bal
Braçadeira 03	0,24	0,44	1,55	0,016	0,019	0,39	0,06	0,26	0,007	0,008	0,03	0,04	0,71	Bal
Engate 01	0,24	0,53	1,48	0,011	0,018	0,37	0,02	0,22	0,008	0,018	0,02	0,05	0,70	Bal
Engate 02	0,21	0,5	1,58	0,019	0,028	0,36	0,07	0,27	0,006	0,016	0,09	0,06	0,69	Bal
Engate 03	0,22	0,5	1,48	0,018	0,022	0,35	0,07	0,26	0,005	0,016	0,1	0,06	0,68	Bal
Corpo de prova 01	0,25	0,57	1,51	0,017	0,021	0,38	0,03	0,27	0,006	0,024	0,02	0,04	0,73	Bal
Corpo de prova 02	0,23	0,58	1,51	0,018	0,021	0,38	0,02	0,27	0,006	0,023	0,02	0,04	0,71	Bal
Corpo de prova 03	0,25	0,59	1,55	0,02	0,024	0,35	0,02	0,28	0,007	0,026	0,02	0,03	0,74	Bal
Corpo de prova 04	0,26	0,57	1,52	0,019	0,02	0,38	0,02	0,27	0,006	0,024	0,02	0,04	0,74	Bal
Especificado AAR M201 - E	0,32 max	1,50 max	1,85 max	0,04 max	0,04 max	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	0,88 max	Bal

Tabela 5.2 - Composição química da região da solda (Autor)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Cu	Al	CE	Fe
Braçadeira 01	0,11	0,46	1,5	0,006	0,015	0,34	1	0,25	0,051	0,002	0,02	0,01	0,63	Bal
Braçadeira 02	0,2	0,43	1,51	0,009	0,022	0,36	0,92	0,28	0,047	0,003	0,02	0,01	0,72	Bal
Braçadeira 03	0,1	0,41	1,37	0,015	0,013	0,34	1,09	0,26	0,054	0,002	0,01	ND	0,60	Bal
Engate 01	0,09	0,35	1,29	0,007	0,012	0,31	0,99	0,23	0,047	0,003	0,01	ND	0,55	Bal
Engate 02	0,09	0,3	1,18	0,01	0,014	0,31	1,07	0,25	0,048	0,002	0,03	ND	0,53	Bal
Engate 03	0,11	0,29	1,2	0,016	0,014	0,34	0,86	0,25	0,039	0,003	0,04	0,01	0,54	Bal

Os valores de composição química obtidos neste ensaio estão de acordo com a norma AAR M-201 Grau E, descrita pela Tabela 3.3. Esta mesma norma descreve o carbono equivalente através da Equação 3.12. O valor máximo obtido para o C_{eq} (Carbono equivalente) foi de 0,79 para o metal de base e 0,72 para o metal de solda. Segundo a norma AAR, o limite máximo para o C_{eq} é de 0,88. Desta forma, os corpos de prova foram aprovados pela análise química.

A caracterização da microestrutura do metal de base pode ser observada na Figura 5.1. Por meio dessas imagens pode-se verificar que a microestrutura apresenta o aspecto de martensita e bainita revenidas. A região da solda possui características de microestrutura constituída por ferrita acicular, bainita granular e martensita, conforme a Figura 5.3. Na região da ZTA (na região de grãos grosseiros) a microestrutura característica é martensita, conforme a Figura 5.2.

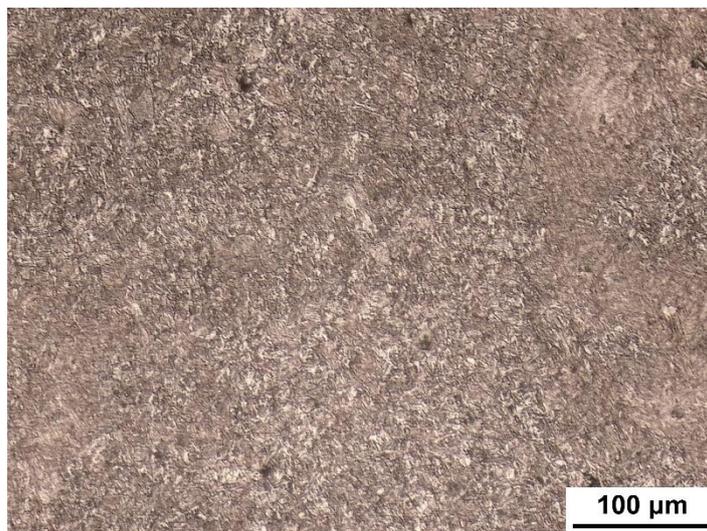


Figura 5.1 - Microestrutura do material de base (Autor)

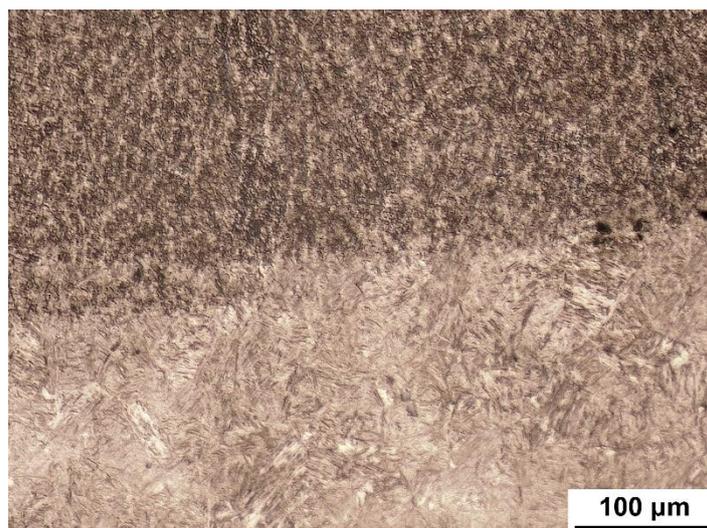


Figura 5.2 - Microestrutura da ZTA (Autor)

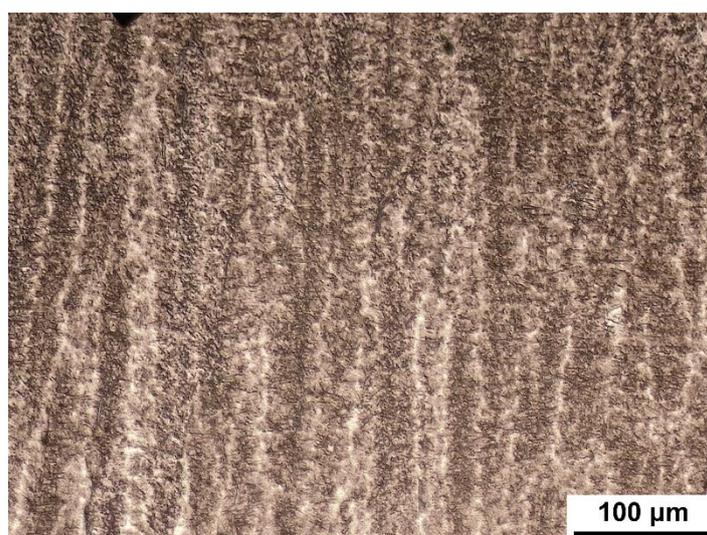


Figura 5.3 - Microestrutura da solda (Autor)

5.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os ensaios de tração foram realizados conforme a seção 4.11. Os resultados de alongamento e redução de área, estão apresentados na Figura 5.4 e Figura 5.5 respectivamente. O limite de escoamento e limite de resistência a tração estão apresentados nas Figuras 5.6, 5.7 respectivamente, do metal de base (MB) e região soldada (RS). Os valores detalhados podem ser visualizados no Anexo A.

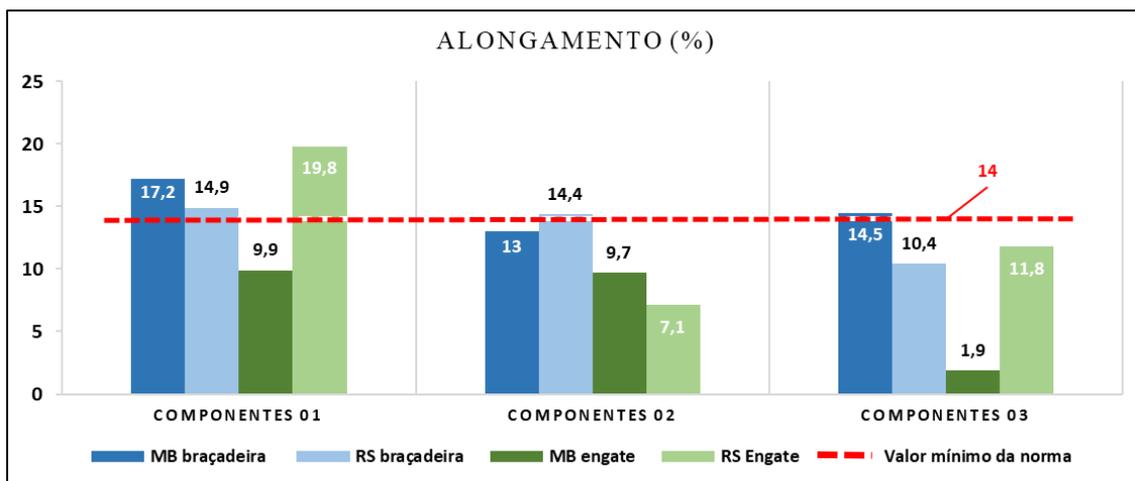


Figura 5.4 -Alongamento (Autor)

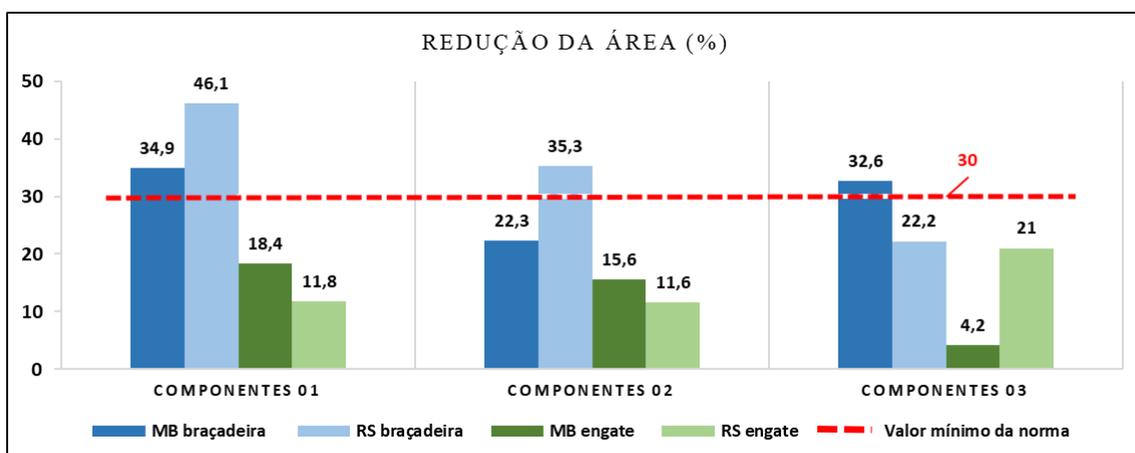


Figura 5.5 - Redução de área (Autor)

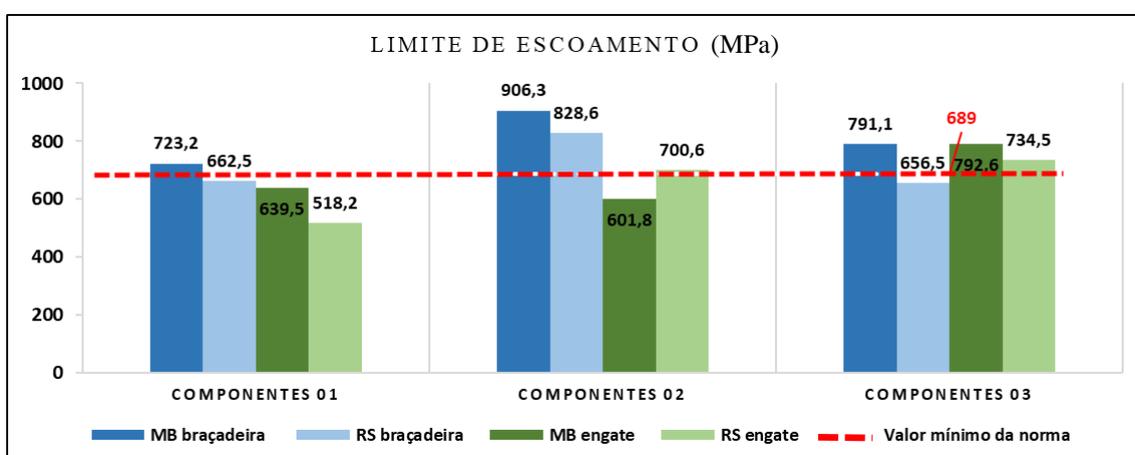


Figura 5.6 - Limite de escoamento (Autor)

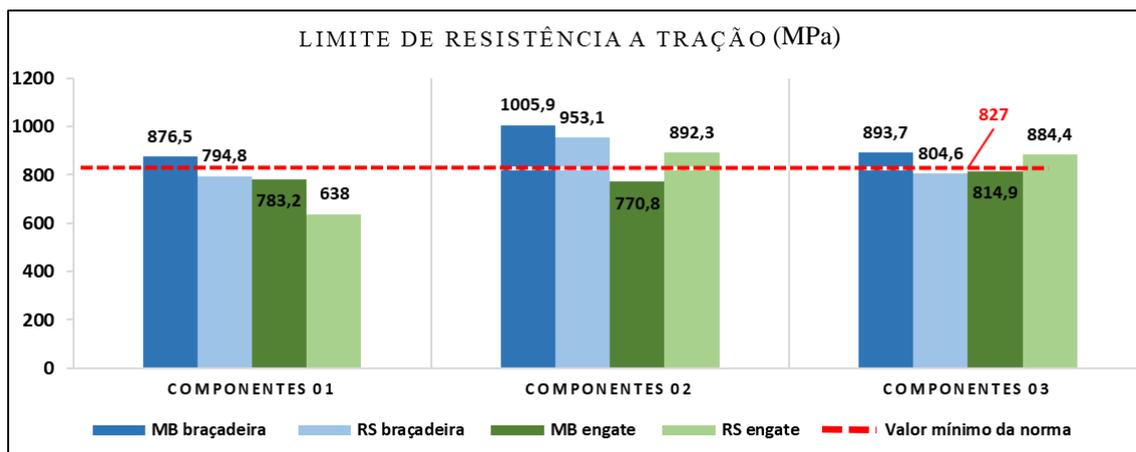


Figura 5.7 - Limite de resistência a tração (Autor)

O material de base das braçadeiras 01 e 03 estão com os valores de alongamento, redução de área, resistência a tração e limite de escoamento conforme a norma AAR. A braçadeira 02 não apresenta as propriedades mecânicas conforme a norma AAR, isso provavelmente ocorreu devido a peça ter um maior percentual de manganês, que consequentemente pode aumentar o carbono equivalente da peça, assim tendo uma tendência de ser um material mais duro, menores valores de alongamento, redução de área, resistência a tração e limite de escoamento.

Na região soldada apenas a braçadeira ficou conforme a norma AAR, isso pode ser resultado da quantidade de defeitos na região de solda, conforme a Figura 4.14, podendo verificar a presença de vazios, possíveis sulfetos ou inclusões não metálicas. Com um elevado índice de defeitos na solda, o material sofreu uma redução em suas propriedades mecânicas em geral.

Para a região soldada é válido ressaltar que no ensaio de tração é tensionado simultaneamente no mínimo três regiões propriedades diferentes (metal de base, ZTA e metal de solda) (MATHERS, 2004). Os valores obtidos no ensaio não representam, particularmente e especificamente, as propriedades de nenhuma das regiões, mas sim da junta como um todo.

5.3 ENSAIO DE IMPACTO

Os ensaios de impacto Charpy, foram realizados no material de base e na região soldada de cada par dos componentes, conforme a Tabela 5.3. Todos os valores estão em Joule (J).

Tabela 5.3 - Resultados do ensaio de impacto (Autor).

Componente	Região		Medida 01	Medida 02	Medida 03	Média (J)
Braçadeira 01	Metal de base		46	42	44	44
	Metal de solda	Região 19	38	36	46	40
		Região 22	52	40	46	46
Braçadeira 02	Metal de base		44	42	46	44
	Metal de solda	Região 19	54	58	40	51
		Região 22	50	44	40	45
Braçadeira 03	Metal de base		66	62	64	64
	Metal de solda	Região 19	52	62	48	54
		Região 22	58	62	58	59
Engate 01	Metal de base		66	80	74	73
	Metal de solda	Região 19	60	70	72	67
		Região 22	68	78	79	75
Engate 02	Metal de base		38	42	40	40
	Metal de solda	Região 19	36	42	44	41
		Região 22	44	40	40	41
Engate 03	Metal de base		48	46	44	46
	Metal de solda	Região 19	48	50	40	46
		Região 22	40	38	46	41

A norma AAR define como padrão o valor de 27 J a temperatura de -40°C, entretanto, para esse trabalho foi realizado a temperatura ambiente 25°C, devido condições técnicas. Os valores obtidos não sofreram uma grande variação para a energia.

5.4 ENSAIOS DE DUREZA

Os ensaios de dureza foram separados em duas etapas, sendo inicialmente medida a dureza das peças nas regiões determinadas pela AAR, conforme a seção 4.10. No segundo momento foi medida a dureza na região de solda, inserindo uma linha de

dureza passando pelo MB, ZTA e metal adição. Os resultados da dureza média do material de base podem ser observados na Figura 5.8. Os valores de todas as medidas podem ser observados no anexo A. Todos os valores de dureza estão na escala Brinell (HB).

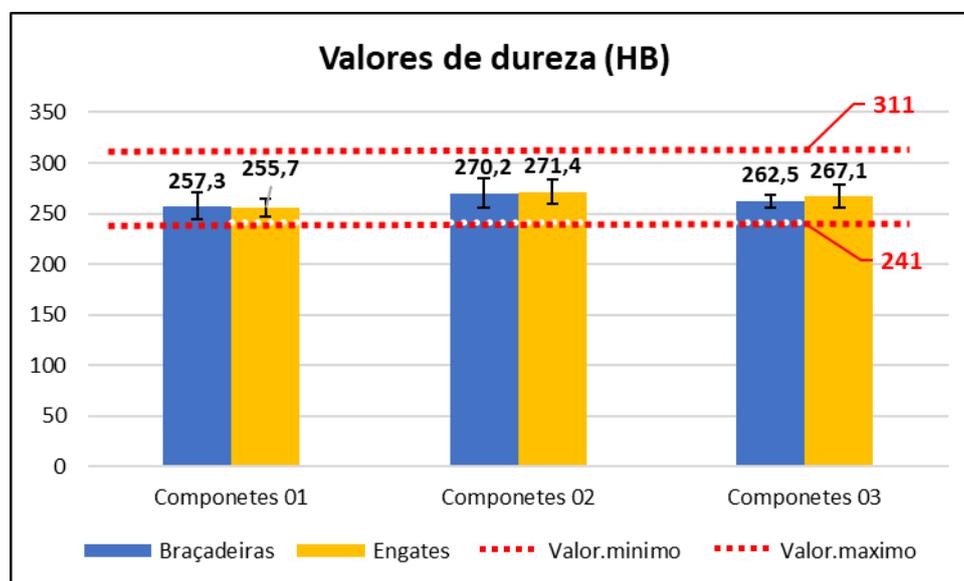


Figura 5.8 - Valores de dureza do metal de base conforme a norma AAR (Autor)

Os resultados de dureza da segunda análise foram apresentados em forma gráfica para facilitar a visualização de cada região. As Figuras 5.9, 5.10, 5.11 representam a durezas do corpo de prova 01, 03 e 04 comparadas com corpo de prova 02, respectivamente.

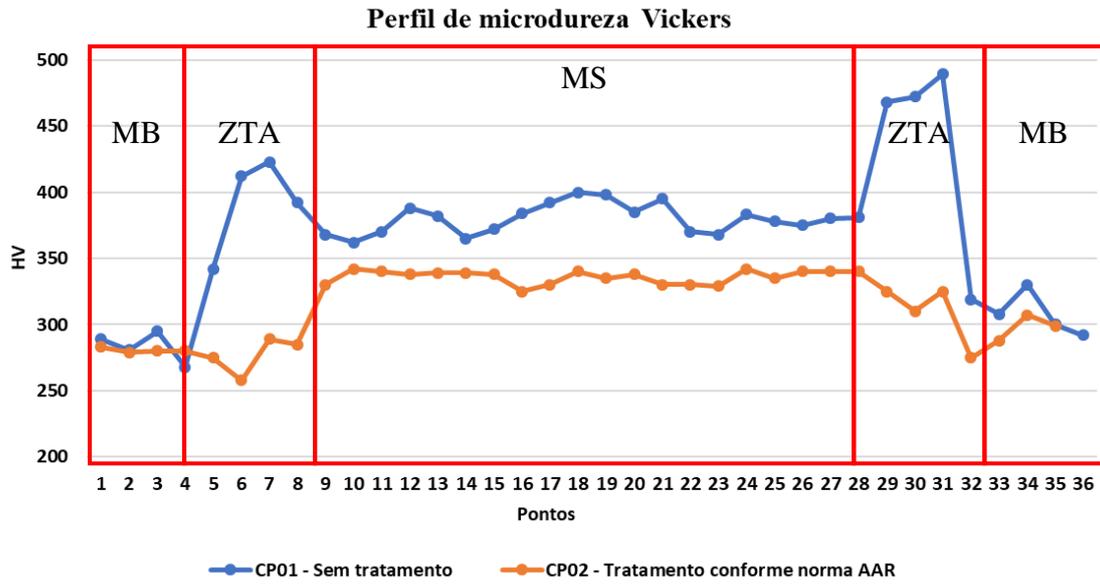


Figura 5.9 - Perfil de microdureza no CP01 e CP02 – Sem tratamento térmico (Autor)

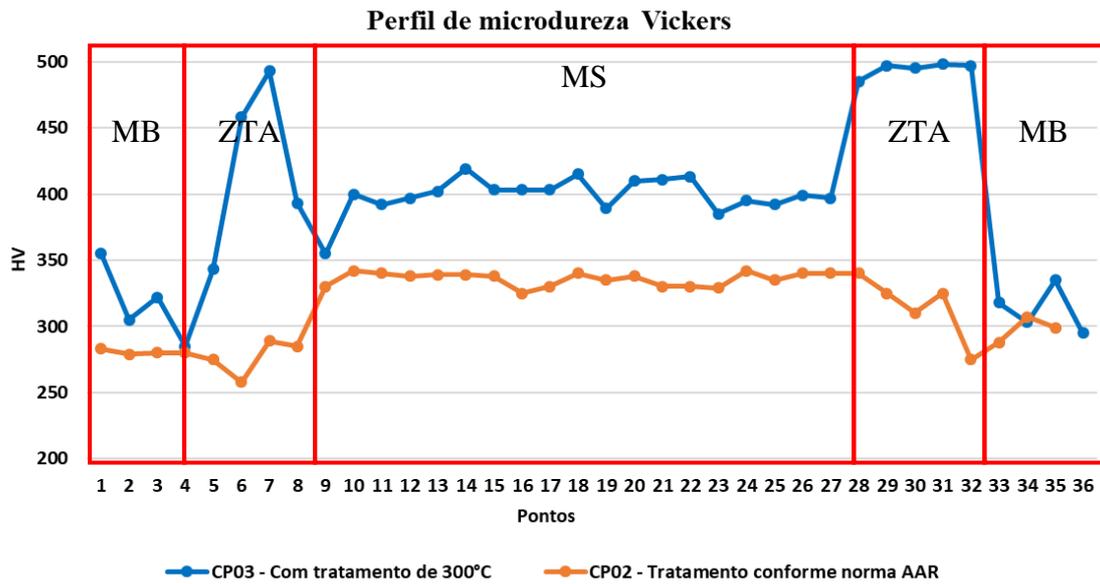


Figura 5.10 - Perfil de microdureza no CP03 e CP02 – Tratamento utilizado na oficina 300°C (Autor)

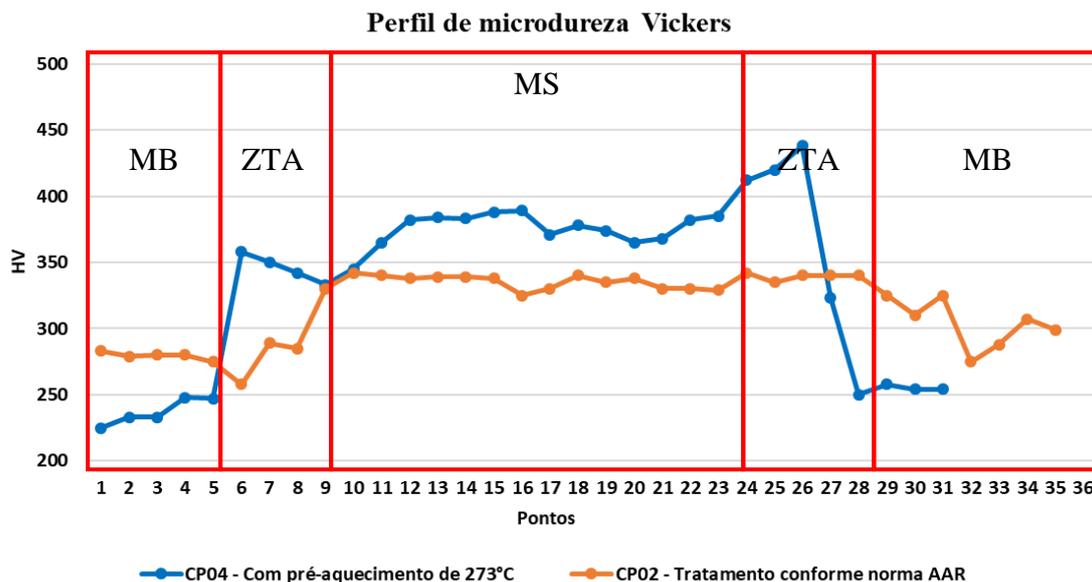


Figura 5.11 - Perfil de microdureza no CP04 e CP02 – Com pré-aquecimento de 273°C
(Autor)

Todos os componentes estão com a dureza conforme especificado pela norma (AAR), ficando na faixa de 241 a 311 HB. A partir dos resultados acima é possível observar que a dureza do corpo de prova que não passou por nenhum tratamento está na mesma faixa do CP que passou pelo tratamento térmico realizado atualmente na oficina de manutenção, chegando a uma dureza de 500 HB na região da ZTA, e em média 370 a 400 HB na região do metal de solda, caracterizando a formação de microestruturas frágeis devido a possível elevação da taxa de resfriamento durante a soldagem da peça. A maioria das normas de soldagem, como por exemplo a AWS D1.1, recomendam, em média, uma dureza máxima de 350 HB (A.W.S., 2000).

No CP 02, submetido ao alívio de tensão conforme a norma, foi perceptível a queda na dureza do material, cerca de 40% na região da ZTA e de aproximadamente 15% no metal de solda. Entretanto os valores das durezas ficaram conforme os padrões que normalizam a soldagem desse tipo de componente. Essa queda da dureza está coerente com o observado por diversos autores, como (COSTA, 1993) e (EVANS, 1993).

No CP 04 é possível perceber uma queda na dureza na região da ZTA e uma leve queda na dureza da região de solda podendo ser relacionada com a redução da taxa de resfriamento causado pelo pré-aquecimento. Com a redução da taxa de resfriamento há uma redução na formação de microestruturas frágeis (ZEEMANN, 2003).

Quando comparado CP 04 com o CP02, percebe-se uma ineficiência no pré-aquecimento, o que, devido a diferentes inércias térmicas, tende a provocar temperaturas e taxas de resfriamento distintas em tais regiões de espessuras não similares, consequentemente transformando microestruturas variadas e frágeis.

Segundo (SOUSA, 2012), a tensão residual presente na peça está relacionada com a maior ou menor dureza da junta soldada se comparado com a dureza do material de base. Conforme apresentado, todos os materiais de base estão com a dureza conforme a norma, ou seja, entre 241 – 311 HB e os materiais que não sofreram alívio de tensão apresentam uma dureza na faixa de 500 HB na ZTA, caracterizando a presença de tensão residual na peça inserida pelo processo de recuperação da mesma por soldagem.

5.5 DIFRAÇÃO POR RAIOS-X

A análise de tensão residual através da difração de raios-X seguiu conforme o item 4.13. Os resultados dos testes nos componentes estão representados na Figura 5.13 e dos corpos de prova estão na Figura 5.14.

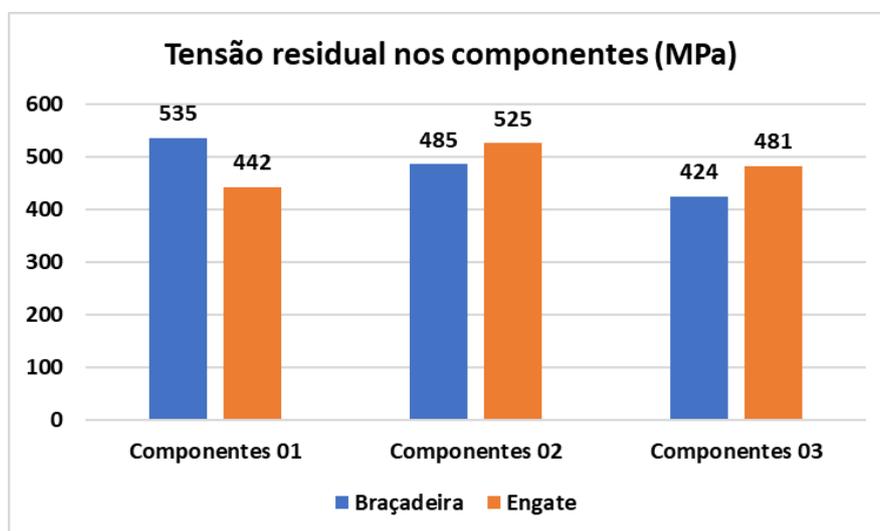


Figura 5.12 - Tensão residual nos componentes (MPa)

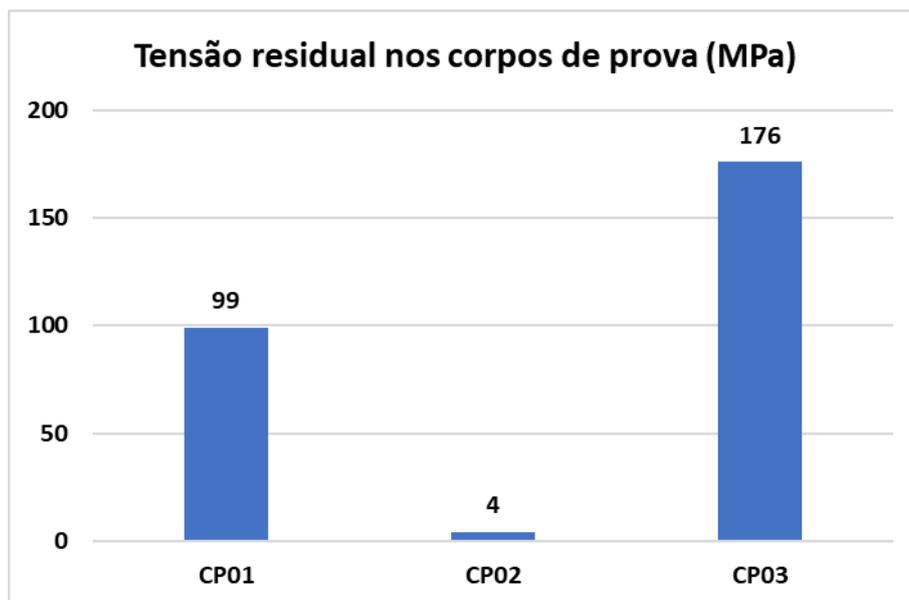


Figura 5.13 - Tensão residual nos corpos de prova (MPa)

Em uma análise geral, os resultados da difração de raio-X convergem com os resultados obtidos pelo resultado da dureza do material (metal de base, metal de solda e ZTA). É possível identificar uma relação direta entre a dureza da peça e a tensão residual. Os componentes 01, 02, 03 apresentaram uma tensão residual muito próxima, tendo apenas uma pequena queda devido ao tipo de tratamento. Os componentes 01 (braçadeira e engate) onde não foram realizados tratamentos, apresentaram as maiores tensões residuais, seguidos pelos componentes 02 (engate e braçadeira) onde foi realizado o processo de alívio de tensão utilizado pela oficina. Já nos componentes 03 (engate e braçadeira) onde foi realizado um pré-aquecimento antes da soldagem, houve queda na tensão residual quando comparado com os demais avaliados.

Nos corpos de prova é possível notar uma queda brusca da tensão residual quando comparado com o componente completo (físico – peça inteira). Este fato tende a estar relacionado com a restrição criada na hora da recuperação, algo inerente à própria geometria da peça (a peça inteira tem espessuras variadas e heterogêneas, provocando maior formação de tensões residuais devido a diferença de espessuras e a baixa homogeneidade nos tratamentos, seja TTAT ou Pré-aquecimento). No CP 02 é identificado um alívio de tensão expressivo, confirmando a relação com a dureza encontrada nas peças.

6 CONCLUSÃO

Com o presente trabalho, foi possível uma análise química, mecânica e metalúrgica dos componentes ferroviários recuperados em uma oficina de recuperação. O tratamento térmico de alívio de tensão utilizado na oficina após recuperação por soldagem-se mostrou ineficiente. Assim, quando comparadas as tensões residuais dos componentes que não passaram por tratamento térmico e dos componentes que passaram pelo TTAT utilizado atualmente na oficina.

A utilização do pré-aquecimento com o intuito de reduzir as tensões residuais geradas nas peças, não apresentou um resultado satisfatório. Houve pequena redução das tensões residuais. Esse fato ocorreu devido não haver uma homogeneidade da peça, correspondente às espessuras da mesma.

A região da ZTA teve um aumento considerável da microdureza, mas com o tratamento térmico conforme indicado pela AAR, a peça sofre uma homogeneização das microdurezas ficando com os valores próximos aos recomendados pela AWS.

Quando utilizado o tratamento térmico conforme os padrões da AAR (condição ideal), as peças sofreram o alívio de tensão esperado, e as propriedades mecânicas melhoradas.

REFERÊNCIAS

- A.W.S. **Certification Manual for Welding Inspectors**. 4ª. ed. Miami: American Welding Society, 2000.
- AAR. “Castings, Steels”, AAR MSRP Casting Details, M-201. **Association of American Railroads**, 2010.
- ABNT. **NBR 6152 - Materiais metálicos –Ensaio de tração à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992.
- ALVES, L. H. D. Utilização do método de Taguchi na modelagem e otimização de vazios relacionados à solidificação em processo de fundição de aço ABNT 1030, 2009.
- ANDEROGLU, B. S. O. Residual stress measurement using X-ray diffraction, Texas, 2004. 12-42.
- AWS. **Welding Handbook**. 8ª. ed. Miami: American Welding Society, v. 1, 1987.
- BAPTISTELLA, M. A. Caracterização microestrutural de um aço aar- m 201 grau e, em engate ferroviário fixo tipo “f”, após magnetização por prods no ensaio com partículas magnéticas, Guarantiguetá, 2016.
- BERTOSSI, M. Engates: modelos e protótipos., 1991.
- CALLEGARI, D. B.; DADALTO, I. T. Análise técnico-econômica dos processos de, Vitória , 2011.
- CALLEGARI, D. B.; DADALTO., I. T. Análise técnico – econômica dos processos de soldagem na reforma do alto forno I. **Análise técnico – econômica dos processos de soldagem na reforma do alto forno I**, Vitoria, 15 dez. 2011. 75.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. 5ª. ed. São Paulo : LTC, 2002.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica**. 2ª. ed. São Paulo: Pearson, v. I, 1986.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4ª. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.

CORREIA, A. L. G. Soldagem a gás: Processo, técnicas empregadas, defeitos e causas e procedimentos, Florianópolis, 2017.

COSTA, H. R. M. Avaliação do Efeito de Múltiplos Tratamentos Térmicos de Alívio de Tensão (TTAT) sobre as Propriedades Mecânicas e Microestruturas de um Metal de Solda Ferrítico, Rio de Janeiro, 1993.

EIGEMANN, B.; MACHERAUCH, E. **Röntgenographische Untersuchung von Spannungszustander in Werkstoffen**. [S.l.]: [s.n.], 1996.

EVANS, G. M. The Effect of Vanadium on the Manganese Containing MMA Weld Deposits. **Welding International**, v. 7, n. 6, p. 438 - 448, 1993.

FERREIRA, R. A. S. **Transformação de Fase: aspectos cinéticos e morfológicos**. Recife: Universidade de UFPE, 2002.

FIGUEIREDO, K. M. D. Tecnologia da soldagem. **Tecnologia da soldagem**, São Luís, 2 mar. 2005. 110.

FORTES, C. Arames Tubulares. **Arames Tubulares**, Belo Horizonte, 2004.

FRANCISCO, W. D. C. E. Mundo educação. **Transporte Ferroviário: A idéia da criação do transporte ferroviário se espalhou rapidamente pelo mundo, já que foi um meio de transporte inovador para aquela época.**, 2016. Disponível em: <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/transporte-ferroviario.htm>>. Acesso em: 31 out. 2019.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. D. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: Lct, 2000.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 5ª. ed. São Paulo: Person Prentice Hall, 2009.

JAMES, M.; LU, J.; ROY, G. **Handbook of measurement of residual stress**: Englewood. [S.l.]: [s.n.], 1996.

JUNIOR, J. M. M. Influência do Tratamento Térmico de Alívio de Tensões Pós-soldagem na Microestrutura e. **Influência do Tratamento Térmico de Alívio de Tensões Pós-soldagem na Microestrutura e**, Lorena, 2008.

KOUKETSU, F. Efeito Dos Parâmetros De Shot Peening No Perfil De, Curitiba, 2017.

LU, J. **Handbook of measurement of residual stresses**. [S.l.]: Lilburn, GA : Fairmont Press ; Upper Saddle River, NJ, 1996.

MANEIRO, M. A. G.; RODRÍGUEZ, J. A procedure to prevent pile up effects on the analysis of spherical indentation data in elastic-plastic materials. **Mechanics of materials**, Madrid, 2006.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e tecnologia**. 3ª. ed. Belo Horizonte: UFMG, v. I, 2009.

MARTINS, R. D. A. A Descoberta dos Raios X O Primeiro Comunicado de Rontg. **A Descoberta dos Raios X O Primeiro Comunicado de Rontg**, 1998.

MATHERS, G. Mechanical testing. **Tensile testing Part II: Welding procedure approval for**, 2004. Disponível em: <http://www.twi.co.uk/j32k/protected/band_3/jk70.html>. Acesso em: 10 outubro 2019.

MODENESI, P. J. **Efeitos mecânicos do ciclo térmico**. 1ª. ed. Minas Gerais: UFMG, v. i, 2001. 70 p.

NEVES, F. O. Análise de tensões residuais em tubos trefilados de aço Inox ABNT 304, Campinas, 2003. 43 - 47.

NOVIKOV, I. Teoria dos tratamentos térmicos dos metais, Rio de Janeiro, 1994.

OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Tecnicos e Cientificos Editora S.A, v. I, 1982.

OLIVEIRA, G. L. G. D. Avaliação de tensões residuais de soldagem em chapas planas de aço estrutural ASTM A516 G70. **Avaliação de tensões residuais de soldagem em chapas planas de aço estrutural ASTM A516 G70**, Fortaleza, 1 Janeiro 2009. 140.

PANALYTICAL, M. Direct Industry, 2019. Disponível em: <<https://www.directindustry.com/pt/prod/malvern-panalytical/product-14669-1931717.html>>. Acesso em: 01 Dezembro 2019.

PEREZ, F. R. D. C. A influência da temperatura de pré-aquecimento e tecimento na microestrutura e propriedades mecânicas na soldagem mig/mag robotizada de aços sae 8620 com abnt ln28.. **A influência da temperatura de pré-aquecimento e tecimento**

na microestrutura e propriedades mecânicas na soldagem mig/mag robotizada de aços sae 8620 com abnt In28. , Bauru, Dezembro 2007.

PREVÉY, P. S. X-ray Diffraction residual Stress Techniques. **Revista Metals Handbook**, v. 10, p. 380 - 392, 1986.

RICARDO, J. Info Solda. **Info Solda**, 2006. ISSN ISSN. Disponível em: <www.infosolda.com.br>. Acesso em: 15 out. 2019.

RIOS, P. R.; PADILHA, A. F. **Transformações de Fases**. São Paulo: Artliber, 2007.

ROCHA, C. L. F. D. Desempenho em fadiga de arames submetidos ao processo de shot peening. **Desempenho em fadiga de arames submetidos ao processo de shot peening**, Porto alegre, 2010.

RODRIGUES, E. G. ESTUDO DE CASO DE QUEBRA DE TRENS DE TRANSPORTE DE MINÉRIO DE FERRO NA FERROVIA ESTRADA DE FERRO CARAJÁS (EFC). **Acta Brazilian Science**, São Luís, v. 01, Janeiro 2014.

SCHWANKE, R. G. L. FERRO FUNDIDO NODULAR COMO ALTERNATIVA PARA O AÇO FUNDIDO AAR M-201, UTILIZADO EM TRUQUES FERROVIÁRIOS DE CARGA, Caxias do sul, 18 novembro 2013.

SCURACCHIO, B. G. Tensões residuais induzidas por shot-peening e, São Paulo, 2012.

SECCO, A. V.; FILHO, J. R. K. CARACTERIZAÇÃO DE FERRO FUNDIDO POR MEIO DA TÉCNICA DE EXCITAÇÃO POR IMPULSO , Pato branco, 2014.

SILVA, B. M. D. Alívio de tensões residuais em juntas soldadas de caixa espiral de turbina hidráulica, Guaratinguetá, 2005.

SILVA, D. M. D. AVALIAÇÃO DO GANHO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA VERSUS FRAGILIDADE DO AÇO 1020 ENDURECIDO POR TÊMPERA E REVENIDO, Ponta Grossa, 14 agosto 2014.

SILVA, J. A. D. S. P. D. Tratamento Térmico de Juntas Soldadas, Porto, março 2010.

SOUSA, D. A. D. Determinação de Tensões Residuais em Materiais Metálicos por meio de Ensaio de Dureza, São Joao Del-Rei, 13 abril 2012.

SOUZA, A. C. D. Estudo da recuperação de peças de ferro fundido. **Estudo da recuperação de peças de ferro fuNDIDO**, Jaraguá do sul, 05 maio 2018. 80.

SOUZA, S. A. D. **Ensaaios mecânicos de materiais metálicos**: Fundamentos teóricos e práticos. São Paulo: Blucher, 1982.

SUCHARSKI, G. B. Estudo da erosão por cavitação sobre diferentes morfologias. **Estudo da erosão por cavitação sobre diferentes morfologias**, Curitiba, 2016.

TORRES, M. A. S. An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel. **An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel**, Guarantigutá, 19 Outubro 2001.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELO, F. D. H. D. **Soldagem**: Processos e metalurgia. 1ª. ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, v. II, 2004.

WEBSTER, G. A. Residual stress distributions and their influence on fatigue lifetimes. **Residual stress distributions and their influence on fatigue lifetimes**, 2001.

WELDING HANDBOOK. **WELDING SCIENCE AND TECHNOLOGY**. 9ª. ed. Miami: AWS, v. I, 2001.

WITHERS, P. J.; BHADESHIA, H. K. D. H. **Residual stress Part 1 – Measurement techniques**. 1ª. ed. Cambridge: University of Cambridge, v. i, 2000.

YURIOKA, N.; KASUYA, T. A chart method to determine necessary preheat in steel Welding, 1994. 1-12.

ZEEMANN, A. Info solda. **Infosolda**, 2003. Disponível em: <<https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/met/diluio.pdf>>. Acesso em: 26 out. 2019.

ANEXO A – TABELAS COM VALORES COMPLETOS

Valores do Ensaio de tração do metal de base (Autor)

Metal de base	A (%)	RA (%)	Se	Sr
Braçadeira 01	17,2	34,9	723,2	876,5
Braçadeira 02	13	22,3	906,3	1005,9
Braçadeira 03	14,5	32,6	791,1	893,7
Engate 01	9,9	18,4	639,5	783,2
Engate 02	9,7	15,6	601,8	770,8
Engate 03	1,9	4,2	792,6	814,9
Especificado AAR M201 – E	14 min	30 min	689 min	827 min

Valores do ensaio de tração da região soldada (Autor)

Região da solda	A (%)	RA (%)	Se	Sr
Braçadeira 01	14,9	46,1	662,5	794,8
Braçadeira 02	14,4	35,3	828,6	953,1
Braçadeira 03	10,4	22,2	656,5	804,6
Engate 01	19,8	11,8	518,2	638
Engate 02	7,1	11,6	700,6	892,3
Engate 03	11,8	21	734,5	884,4
Especificado AAR M201 – E	14 min	30 min	689 min	827 min

Resultado do ensaio de dureza (Autor)

Componente	Região	Medidas					Média	Média geral	Especificado
Braçadeira 01	Região A	254	243	269	268	251	257	257,3	241 - 311
	Região B	248	262	248	246	284	257,6		
Braçadeira 02	Região A	290	278	284	261	277	278	270,2	
	Região B	248	251	283	269	261	262,4		
Braçadeira 03	Região A	260	268	260	256	263	261,4	262,5	
	Região B	266	258	277	255	262	263,6		
Engate 01	Região A	274	255	249	254	257	257,8	255,7	
	Região B	262	253	243	263	247	253,6		
Engate 02	Região A	298	257	271	274	282	276,4	271,4	
	Região B	262	268	266	272	264	266,4		
Engate 03	Região A	268	251	258	258	282	263,4	267,1	
	Região B	270	281	284	256	263	270,8		

Resultado da difração por raio-X (Autor)

Peça	Tensão (MPa)
Braçadeira 01	535
Braçadeira 02	485
Braçadeira 03	424
Engate 01	442
Engate 02	525
Engate 03	481
CP01	99
CP02	4
CP03	176