

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO Curso de Engenharia Mecânica

LUCAS SOUSA RIBEIRO

## ANÁLISE DE SOLDAGEM DE RECUPERAÇÃO EM AÇO AAR M-201 GRAU B+ COM UTILIZAÇÃO DE ARAME TUBULAR AWS A5.36 E70T15-M21A2-CS2

SÃO LUIS/MA 2017

### LUCAS SOUSA RIBEIRO

## ANÁLISE DE SOLDAGEM DE RECUPERAÇÃO EM AÇO AAR M-201 GRAU B+ COM UTILIZAÇÃO DE ARAME TUBULAR AWS A5.36 E70T15-M21A2-CS2

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. MSc. Giovanni Augusto Ferreira Dias Coorientador: Eng. MSc. Ronan Geraldo Moreira

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA MONOGRAFIA DEFENDIDA PELO ALUNO LUCAS SOUSA RIBEIRO E ORIENTADA PELO(A) PROF. MSc. GIOVANNI AUGUSTO FERREIRA DIAS.

ASSINATURA DO(A) ORIENTADOR(A)

SÃO LUIS/MA 2017

Ribeiro, Lucas Sousa. Análise de soldagem de recuperação em aço AAR M-201 grau B+ com utilização de arame tubular AWS A5.36 E70T15-M21A2-CS2 / Lucas Sousa Ribeiro. – São Luís, 2017. 68 f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2017.

Orientador: Prof. Me. Giovanni Augusto Ferreira Dias.

1. Aço AAR M-201 grau B+. 2. Soldagem FCAW. 3. Arame tubular. I. Título.

CDU 621.791

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

### TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

## ANÁLISE DE SOLDAGEM DE RECUPERAÇÃO EM AÇO AAR M-201 GRAU B+ COM UTILIZAÇÃO DE ARAME TUBULAR AWS A5.36 E70T15-M21A2-CS2

Autor: Lucas Sousa Ribeiro

Orientador: Giovanni Augusto Ferreira Dias

Coorientador: Ronan Geraldo Moreira

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Monografia:

Prof. MSc. Giovanni Augusto Ferreira Dias (Orientador) Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Dr. Adilto Pereira Andrade Cunha Universidade Estadual do Maranhão

Prof. MSc. Francismar Rodrigues de Sousa Universidade Estadual do Maranhão

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

São Luís/MA, 07 de dezembro de 2017.

## Dedicatória

Dedico este trabalho a minha família, em especial aos meus pais e avós, que me educaram e me guiaram nos caminhos corretos, para que eu me tornar-se a pessoa que sou hoje.

## Agradecimentos

Durante este projeto tivemos ajuda de muitas pessoas e instituições, que me deram força e fizeram que este trabalho acontecesse. Apesar de o espaço ser pequeno, tentarei incluir todos que me auxiliaram nesta caminhada.

Inicialmente agradeço a Deus e a minha família, pois sem eles nada disto seria possível. Minha família sempre me deu forças para continuar perseverando e acreditando nos meus sonhos e mesmo com as dificuldades e provações, que não foram poucas, eles seguiram me apoiando e fazendo-me chegar aonde cheguei. Em especial, agradeço ao meu irmão, que sempre me motivou a estudar e seguir os mesmos passos que ele tem trilhado, sendo sempre uma referencia para mim e alguém que futuramente pretendo alcançar academicamente e profissionalmente.

Gostaria também de agradecer aos meus orientadores, Prof. MSc. Giovanni Augusto Ferreira Dias e Engenheiro Ronan Geraldo Moreira por todo apoio durante o andamento deste projeto, foram inúmeros problemas que passamos, porém com a ajuda destes e de outros parceiros que ainda irei citar, conseguimos contornar e finalizar o trabalho.

Agradeço as instituições que fizeram este trabalho acontecer. Primeiramente, agradeço ao Rafael Carlos Walachinski, representando o laboratório de ensaios mecânicos do SENAI-MA, uma pessoa muito prestativa e sempre mostrou disponibilidade para me ajudar neste trabalho. Agradeço também ao Felipe Pereira Finamor, representando o Instituto SENAI-MG de tecnologia metal mecânica pelo auxilio com os testes que não foram possíveis serem realizados aqui no Maranhão por falta de equipamento e, mesmo sem me conhecer, foi extremamente prestativo, entendendo as dificuldades de se trabalhar com projetos experimentais.

Agradeço aos colaboradores que me auxiliaram nos processos de soldagem e usinagem, que não poderei colocar o nome de todos por conta do espaço, porém irei representa-los pelas pessoas do Engenheiro Ivanildo Chagas Nascimento, Soldador Dimisson e o Prof. MSc. José de Ribamar Ferreira Barros Junior.

Por fim, mas não menos importante, agradeço também a todos os meus amigos que me deram força durante esta caminhada, em especial aos amigos Judimar Ramos, Luciano Lima e Periandro Sampaio, que sempre que preciso, estenderam a mão para me auxiliar.

### Resumo

Este trabalho visa a análise de recuperação por soldagem em aço AAR M-201 Grau B+, pelo processo arame tubular, com consumível AWS 5.36 E70T15-M21A2-CS2. O aço é utilizado na fabricação de componentes ferroviários e é normatizado pela Association of American Railroads. Para este estudo foi realizado uma simulação de recuperação de desgaste em um componente ferroviário fabricado com este aço. Foram confeccionados dois chanfros em V para aplicação da soldagem de recuperação. As duas regiões foram soldadas seguindo os parâmetros do processo de soldagem da manutenção já existente na empresa, porém com a utilização do novo arame. Após a soldagem foram fabricados os corpos de prova seguindo as orientações da AWS D15.1, preconizada pela AAR. Estes corpos de prova foram fabricados para avaliar as propriedades mecânicas, químicas e metalúrgicas das regiões do metal de base, metal de adição e ZTA, de forma a verificar a compatibilidade técnica entre o arame e o aço. Com os resultados dos testes foi evidenciado que este arame tende a ser compatível com o aço, apresentando resultados satisfatórios nas propriedades mecânicas e químicas, assim como uma microestrutura homogênea, quando comparado às demais regiões do corpo de prova soldado.

Palavra Chave: Aço AAR M-201 Grau B+, Soldagem FCAW, Arame Tubular.

### Abstract

This work aims to assess the recovery by welding in AAR M-201 Grade B + steel, by flux-cored wire process, with consumable AWS 5.36 E70T15-M21A2-CS2. Steel is used in the manufacture of railway components and is standardized by the Association of American Railroads. For this study, a wear recovery simulation was performed on a rail component made of this steel. Two V-grooves were made for the application of the recovery weld. The two regions were welded following the parameters of the welding process of the existing maintenance in the company, but with the use of the wire new. After welding, the test specimens were manufactured in accordance with the AWS guidelines D15.1, recommended by the AAR. These test specimens were fabricated to assess the mechanical, chemical and metallurgical properties of the base metal, in addition to the metal and ZTA regions in order to verify the technical compatibility between the wire and the steel. With the results of the tests it was evidenced that this wire tends to be compatible with the steel, presenting satisfactory results in the mechanical and chemical properties, as well as a homogeneous microstructure, when compared to the other regions of the welded test specimen.

Key Words: AAR M-201 Grade B + Steel, FCAW Welding, Flux-Cored Wire.

# Lista de Figuras

Figura 2.1 - Soldagem com arame tubular auto protegido FCAW-S	22
Figura 2.2 - Soldagem com arame tubular com proteção gasosa FCAW-G	22
Figura 2.3 - Estrutura matriz do aço	25
Figura 2.4 - Macrografia das juntas soldadas. Ataque nital 10%	29
Figura 2.5 - Microestrutura do aço ASTM A36	29
Figura 3.1- Simulação de recuperação com solda em componente ferroviário	30
Figura 3.2 - Componente ferroviário utilizado para simulação	31
Figura 3.3 - Região do componente ferroviário utilizada para simulação	32
Figura 3.4 - Peça com chanfro simulando desgaste.	32
Figura 3.5 - Peça com chanfro simulando desgaste.	33
Figura 3.6 - Valores de tesão e voltagem utilizados na soldagem	33
Figura 3.7 - Medição do fluxo de gás	34
Figura 3.8 - Medição da temperatura da peça antes do primeiro passe da solda B	34
Figura 3.9 - Primeiro passe do cordão de solda B	34
Figura 3.10 - Medição da temperatura da peça após o primeiro passe da solda B	35
Figura 3.11 - Segundo passe do cordão de solda B	35
Figura 3.12 - Medição da temperatura da peça após o segundo passe da solda B	36
Figura 3.13 - Terceiro passe do cordão de solda B.	36
Figura 3.14 - Medição da temperatura da peça após o terceiro passe da solda B	36
Figura 3.15 - Quarto passe do cordão de solda B	37
Figura 3.16 - Medição da temperatura da peça após o quarto passe da solda B	37
Figura 3.17- Quinto passe do cordão de solda B.	37
Figura 3.18 - Medição da temperatura da peça após o quinto passe da solda B	38
Figura 3.19 - Sexto passe do cordão de solda B	38
Figura 3.20 - Medição da temperatura da peça após o sexto passe da solda B	38

Figura 3.21 - Sétimo passe do cordão de solda B 39
Figura 3.22- Medição da temperatura da peça após o sétimo passe da solda B
Figura 3.23 - Medição da temperatura da peça antes do primeiro passe da Solda A
Figura 3.24 - Primeiro passe do cordão de solda A 40
Figura 3.25 - Medição da temperatura da peça após o primeiro passe da solda A 40
Figura 3.26 - Segundo passe do cordão de solda A 40
Figura 3.27 - Medição da temperatura da peça após o segundo passe da solda A 41
Figura 3.28 - Espectrômetro de bancada Spectromaxx 42
Figura 3.29 - Corpos de prova para análise química. (a) MB (b) Junta Soldada
Figura 3.30 - Corpo de prova de tração plano 43
Figura 3.31- Corpo de prova de tração plano, com ataque químico
Figura 3.32 - Corpo de prova de tração do metal de adição cilíndrico
Figura 3.33 - Máquina universal de ensaios EMIC 44
Figura 3.34 - Corpo de prova dobramento lateral 45
Figura 3.35 - Corpo de prova dobramento lateral 45
Figura 3.36 - Corpo de prova do ensaio de impacto 46
Figura 3.37 - Corpo de prova do ensaio de impacto, com ataque químico
Figura 3.38 - Máquina de ensaio de impacto Charpy RMU 47
Figura 3.39 - Politriz Mecatech 334 48
Figura 3.40 - Duroscan 70 Encotest
Figura 4.1 - CP 2 metal de base após ensaio. (a) Região da fratura (b) Área Fraturada 51
Figura 4.2 - CP 1 junta soldada após ensaio. (a) Região da fratura (b) Área Fraturada 52
Figura 4.3 - CP metal de solda após ensaio. (a) Região da fratura (b) Área Fraturada 52
Figura 4.4 - CP 2 de dobramento lateral após ensaio 52
Figura 4.5 - Resultados do ensaio de impacto Charpy 53
Figura 4.6 – Defeitos pré-existentes nos CPs do ensaio de impacto
Figura 4.7 - Defeitos pré-existentes no metal de base, encontrados no corte e usinagem 54

Figura 4.8 - Região de fratura CP 1 de junta soldada do ensaio de Impacto	55
Figura 4.9 - Região de fratura CP 3 de metal de base do ensaio de impacto	55
Figura 4.10 - Microestrutura do metal de base. Ataque nital 2%	56
Figura 4.11 - Microestrutura do metal de adição. Ataque nital 2%. Fonte: Autor	56
Figura 4.12 - Microestrutura na ZTA. Ataque Nital 2%	57
Figura 4.13 - Macrografia do corpo soldado. Ataque nital 10%	58
Figura 4.14 - Resultados do ensaio de microdureza Vickers	59

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Composição química do aço AAR M-201 Grau B+	. 24
Tabela 2.2 - Propriedades mecânicas do aço AAR M-201 Grau B+	. 24
Tabela 2.3 - Resultados do ensaio de impacto do aço baixo carbono.	. 27
Tabela 3.1 - Parâmetros de soldagem utilizados.	. 31
Tabela 3.2 - Quantidade de corpos de prova por ensaio.	. 41
Tabela 4.1 - Resultados da análise química	. 49
Tabela 4.2 - Resultados dos ensaios de tração	. 50
Tabela 4.3 - Resultados dos ensaios de Impacto	. 53
Tabela 4.4 - Valores de dureza HBW para as regiões de MB, MA e ZTA	. 58

### LISTA DE SIGLAS

- AAR Association of American Railroads
- AWS American Welding Society
- ASTM American Society for Testing and Materials
- DIN German Institute for Standardization
- FCAW Flux Cored Arc Welding
- FCAW-G-Gás-Shielded Flux-Cored Arc Welding
- FCAW-S-Self-Shielded Flux-Cored Arc Welding
- GMAW Gás Metal Arc Welding
- HIWT Hobart Institute of Welding Technology
- Junta Corpo de Prova de Junta Soldada
- MA Metal de Adição
- MAG Metal Active Gás
- MB Metal de Base
- MEV Microscópio Eletrônico de Varredura
- MIG Metal Inert Gás
- MO Microscópio Ótico
- MS Metal de Solda
- SMAW Shielded Metal Arc Welding
- ZTA Zona Termicamente Afetada

## LISTA DE SIMBOLOS

- $\varepsilon$  Deformação
- $\sigma$  Tensão
- A Área
- E-Módulo de Elasticidade
- F Força aplicada
- HB Dureza Brinell
- HV Dureza Vickers

# SUMÁRIO

1.	INT	rro	DUÇÃO	16
	1.1.	Ob	je tivos	17
	1.1.	1.	Objetivo Geral	17
	1.1.	2.	Objetivo Especifico	17
2.	RE	VISĂ	ÃO TEÓRICA	18
	2.1.	Sol	dage m	18
	2.2.	Paı	râmetros de Soldagem	18
	2.2.	1.	Corrente de Soldagem	19
	2.2.	2.	Tensão de Soldagem	20
	2.2.	3.	Velocidade de Soldagem	20
	2.3.	Pro	ocesso de Soldagem FCAW	20
	2.4.	Ara	ame Tubular	23
	2.5.	Aço	o AAR – M201 Grau B+	24
	2.6.	Tes	stes e Ensaios	25
	2.6.	1.	Ensaios Mecânicos	25
	2.6.	2.	Teste de composição química	28
	2.6.	3.	Ensaio metalográfico	28
3.	MA	TEI	RIAIS E MÉTODOS	30
	3.1.	Exe	ecução dos Testes de Soldagem	31
	3.1.	1.	Análise Química	41
	3.1.	2.	Ensaio de Tração	42
	3.1.	3.	Ensaio de Dobramento Lateral	44
	3.1.	4.	Ensaio de Impacto	45
	3.1.	5.	Análise Metalográfica	47
4.	RE	SUL	TADOS E DISCUSSÃO	49

4.1.	Análise Química	49
4.2.	Ensaio de Tração	50
4.3.	Ensaio de Dobramento Lateral	52
4.4.	Ensaio de Impacto	53
4.5.	Análise Metalográfica	55
4.6.	Ensaio de Microdureza	58
5. CO	NCLUSÃO	60
REFER	RÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

## 1. INTRODUÇÃO

Com a revolução industrial a ampliação das indústrias e com o aumento do uso do aço nos processos de fabricação, foi necessária a utilização de um processo que coalescência entre peças metálicas, formando estruturas maiores e mais complexas. Desta forma foi difundido o uso da soldagem, já existente até então, e constantemente em evolução, sendo esta aperfeiçoada por meio do desenvolvimento de novos processos de soldagem (CORREIA, 2017).

Com o acontecimento das duas grandes guerras mundiais a soldagem começou a ser difundida nos processos de fabricação, e com o avanço da tecnologia começou a prosperar ainda mais dentro das indústrias. Desta forma houve também maior iniciativa científica para estudo deste tema (CORREIA, 2017).

Os processos de soldagem não são utilizados apenas para união de peças, mas também em processos de manutenção, para recuperação de peças desgastadas e, em alguns casos, de peças trincadas. 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 químicas, mecânicas e metalúrgicas, de tal forma que a mesma continue executando sua função (AWS, 1991).

Dentre os processos de soldagem comumente utilizados nas indústrias estão o *GMAW* (*Gás Metal Arc Welding* – Soldagem ao arco elétrico com atmosfera de proteção gasosa), o *FCAW (Flux Cored Arc Welding* – Soldagem ao arco elétrico com arame tubular) *e o SMAW* (*Shielded Metal Arc Welding* – Soldagem ao arco elétrico com eletrodo revestido). Os dois primeiros processos se assemelham em relação aos equipamentos necessários para funcionamento, porém diferem na produtividade (ARAUJO, 2004).

Mesmo o processo *GMAW* tendo grande aceitação no meio industrial, o processo *FCAW* vem se tornando cada vez mais utilizado. Isto se dá devido às possíveis vantagens que este oferece, tais como a alta qualidade do metal de solda depositado, excelente aparência do cordão de solda, boas características de arco, baixo nível de respingo (GOMES, 2006). Gomes também cita em seu trabalho que a taxa de fusão, com os mesmos parâmetros de soldagem, é maior no arame tubular, pois ele possui uma menor área da seção transversal quando comparado ao arame sólido e, diante disto, possui uma maior densidade relativa de corrente (GOMES, 2006). O maior contraponto para a utilização do processo *FCAW* é o custo do consumível, porém, segundo Garcia, esta desvantagem é compensada pela alta qualidade e

produtividade da soldagem (GARCIA, 2010), onde o arame tubular terá uma maior taxa de deposição e menor quantidade de escórias e respingos no cordão de solda. Outro ponto é que, por se tratar de dois processos de soldagem semelhantes, a aplicação do *FCAW* pode ser implementada com facilidade, pois a inserção deste processo em uma soldagem que utiliza o processo *GMAW* não trará grandes mudanças na linha de trabalho, uma vez que os equipamentos são bastante similares para os dois tipos de processos.

Na manutenção de uma grande multinacional é utilizado o processo de soldagem *GMAW* para recuperação de componentes fundidos fabricados com aço AAR M-201 grau B+ (*Association of American Railroads*). Assim, visando sempre uma alta produtividade e a qualidade dos componentes soldados, é interessante avaliar a soldagem e analisar a implementação do processo *FCAW* e do consumível, obviamente respeitando suas particularidades.

### 1.1. Objetivos

#### 1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral do estudo é analisar a viabilidade de utilização do processo de soldagem *FCAW-G*, com arame tubular *AWS* A5.36 E70T15-M21A2-CS2, para a recuperação de peças fabricadas em aço AAR M-201 grau B+, evidenciando esta através de resultados conclusivos dos ensaios destrutivos e referenciados conforme normas pertinentes.

#### 1.1.2. Objetivo Especifico

- > Analisar as propriedades mecânicas da junta soldada;
- > Analisar as propriedades metalúrgicas da junta soldada;
- > Analisar as propriedades químicas da junta soldada.

## 2. REVISÃO TEÓRICA

#### 2.1. Soldagem

Segundo dados do *HIWT* (*Hobart Institute of Welding Technology*), a soldagem teve início em tempos remotos. Os primeiros exemplos são da Idade do Bronze. Pequenas caixas circulares de ouro foram feitas por juntas soldadas de pressão unidas. Existe a probabilidade de que essas caixas tenham sido produzidas há mais de 2000 anos. Durante a Idade do Ferro, os egípcios e outros povos na região do Mediterrâneo oriental aprenderam a soldar os pedaços de ferro unidos. Foram encontradas muitas ferramentas feitas aproximadamente a 1000 a.C.

A soldagem por arco elétrico surgiu por volta do ano de 1800 e após isto houve o aprimoramento e desenvolvimento da mesma. Segundo Wainer et al., com o advento das guerras, a soldagem teve maior progresso, devido a necessidade de fabricação de aviões e navios (WAINER, 1992). Com este objetivo, nos USA, surgiu a *AWS* (American Welding Society), uma organização sem fins lucrativos que visa normatizar os processos de soldagem e afins naquele país. Atualmente a soldagem é um dos processos mais usuais para união de peças metálicas, com existência de processos manuais, semiautomáticos e automáticos, aumentando assim a competitividade nas indústrias (SOARES, 2008).

Com a difusão da soldagem vários conceitos surgiram, um deles é que o processo de soldagem se resume na união de duas peças ou mais, onde o local da união tenha características químicas, mecânicas e metalúrgicas similares ao metal de base (WEINER, 1979). Seguindo a definição da norma a soldagem é uma operação que tem como objetivo a coalescência localizada, sendo esta formada pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição (AWS, 1991).

#### 2.2. Parâmetros de Soldagem

Existem diversos parâmetros de soldagem, alguns são definidos antes do processo e não podem ser mudados pós-qualificação, como o tipo do arame, diâmetro do arame e o tipo do

gás de proteção, as chamadas variáveis de fundo (JONES apud MODENESI, 1978). Também, segundo Jones, existem outros tipos de parâmetros pré-definidos, como metal de base, tipo de processo de soldagem, dentre outros. Estas variáveis possuem também outra nomenclatura, onde estes parâmetros pré-definidos são chamados de variáveis pré-selecionadas. Após o ajuste destas, entram as variáveis ajustáveis primárias que são a velocidade, tensão e corrente de soldagem e as secundárias que são a angulação da tocha de soldagem durante o deslocamento e o comprimento do arame ou eletrodo após o bico de contato (TEIXEIRA, 2011). A escolha destes parâmetros possui grande importância sobre processo de soldagem, pois influenciará as propriedades da junta soldada, sua geometria, a qualidade e os custos deste processo. (KARADENIZ et al., 2005).

Os parâmetros de um processo de soldagem são os responsáveis por afetarem diretamente a qualidade, a produtividade e o custo da junta a ser soldada (KIM et al., 2003). Desta forma, estes parâmetros estarão atrelados diretamente com a complexidade de tempos e ciclos de soldagem, uma vez que eles interferem na geometria da solda, aumentando assim os custos de fabricação de componentes soldados (CHAN et al., 1999).

#### 2.2.1. Corrente de Soldagem

A corrente de soldagem é a corrente elétrica utilizada para soldagem, advinda de uma fonte externa. Se fixadas todas as variáveis do processo de soldagem, o aumento da corrente afetará diretamente a taxa de deposição e a penetração de soldagem, aumentando-as (SALES, 2001), influenciando as características do cordão de solda como a sua largura e profundidade (MODENESI, 2005).

A influência da corrente de soldagem na taxa de deposição e penetração da solda é justificada pela relação aproximadamente linear entre a corrente de soldagem e a taxa de fusão do arame. Geralmente este efeito é mais perceptível no aquecimento do arame após o bico de contato (TEIXEIRA, 2011).

#### 2.2.2. Tensão de Soldagem

A tensão de soldagem, ou tensão do arco, é uma das variáveis mais importantes para caracterização do cordão de solda, uma vez que fixado os demais parâmetros, o aumento desta provoca um aumento da largura do cordão de solda, porém diminuição do reforço e também reduz o poder de penetração (MODENESI, 2005). Também vale ressaltar que tensões elevadas do arco causam excesso de respingos e mordeduras. Por outro lado, tensões baixas podem causar ausência de fusão na solda e cordões de solda muito convexos, o que prejudicar sua resistência mecânica (MODENESI, 2005).

Defeitos podem surgir devido a tensões desreguladas, pois, em casos de baixa tensão podemos encontrar porosidade e sobreposição nas laterais do cordão de solda, e em casos de alta tensão, podemos encontrar porosidades e salpicos (TEIXEIRA, 2011).

#### 2.2.3. Velocidade de Soldagem

A velocidade de soldagem é a velocidade de translado do arco elétrico ao longo do comprimento da região a ser soldada. A penetração da solda é maior em baixas velocidades, sendo esta, assim como a largura do cordão e a altura do reforço, reduzida com o aumento da velocidade (MODENESI, 2005).

Defeitos podem surgir na peça por falta de regulagem da velocidade de soldagem, em casos de velocidades muito elevadas podemos encontrar descontinuidade no cordão de solda por falta de fusão do material (MODENESI, 2005), ou também trincas por solidificação (TEIXEIRA, 2011).

#### 2.3. Processo de Soldagem FCAW

Podemos caracterizar o processo de soldagem por arame tubular pela transferência de metal para a poça de fusão através do arco. Isto ocorre devido às gotas de metal fundido que

são formadas extremidade do arame, onde este processo pode ser influenciado pelo tipo de material, pela energia de soldagem, pelo diâmetro do arame, pelo gás de proteção e pelas condições do ambiente (SCOOTI e PONOMAREV, 2008).

O processo de soldagem por arame tubular acontece por fusão, cujo arco é formado entre a peça e o arame com alimentação continua, protegendo a poça de fusão com um gás externo, ou não, e pela decomposição do fluxo existente no interior do arame tubular (JOAQUIM, 2001). Este fluxo existente é formado por materiais inorgânicos e metálicos e possuem diversas funções, dentre elas, a proteção da poça de fusão, melhoria da transferência do metal de solda e das características do arco elétrico e, em algumas situações, atua na adição de elementos de liga (FORTES, 2004; MOTA ET AL, 1998). O processo de soldagem por arame tubular segue o padrão dos processos de alta produção, ocasionados pela alta densidade de corrente (QUITES, 2013).

Existem duas variações básicas do processo de soldagem com arame tubular, uma em que toda a proteção necessária é gerada pelo próprio fluxo contido no eletrodo, este sub processo é chamado de *FCAW-S* (*Self-Shielded Flux-Cored Arc Welding*) e outra em que a proteção é complementada por uma nuvem de gás, este sub processo é chamado de *FCAW-G* (*Gás-Shielded Flux-Cored Arc Welding*) (RODRIGUES, 2005).

A soldagem *FCAW-S*, a proteção da solda acontece exclusivamente pelos gases produzidos pela decomposição dos componentes presentes no fluxo que o arame tubular contem e pela escoria formada durante a soldagem. A fusão do fluxo gera o gás protetor que auxilia a região do cordão de solda (MACHADO, 1996). A figura 2.1 demonstra este tipo de soldagem.



Figura 2.1 - Soldagem com arame tubular auto protegido FCAW-S.

Fonte: Fortes, 2004.

Na soldagem *FCAW-G*, a proteção da solda é feita por um gás advindo de meio externo ao equipamento, fluindo pelo bocal da tocha (RODRIGUES, 2009). É utilizada nos processos soldagem de aços de baixa liga e baixo carbono, gerando eficiência e altas taxas de deposição. Uma grande vantagem desta é a variedade de juntas e posições de soldas possíveis de serem utilizadas (RODRIGUES, 2005). A Figura 2.2 demonstra este tipo de soldagem.

Figura 2.2 - Soldagem com arame tubular com proteção gasosa FCAW-G.



Fonte: Araújo, 2014.

#### 2.4. Arame Tubular

Os arames tubulares são produzidos por fitas de aço de baixo carbono conformada em formato U, sua forma tubular é obtida após alguns processos de fabricação e o diâmetro final é alcançado com trefilação (MACHADO. 1996). As normas AWS A5.20 e A5.29 classificam arames tubulares que devem ser utilizados para os aços C-Mn e de baixa liga respectivamente. Para aços inoxidáveis a norma AWS A5.22 classifica os possíveis arames para uso (AWS A5.20, 2005; AWS A5.22, 2012; AWS 5.29, 2010).

Existem diversos elementos podem ser utilizados para formar o fluxo nos arames tubulares, por isso este tipo de soldagem possui maior flexibilidade. A mudança destes elementos para se ajustar a determinada aplicação particular ou especificação especial são menos complexas de serem obtidas com arames tubulares em comparação com os arames sólidos, devido a essa flexibilidade (RODRIGUES, 2005).

A classificação dos arames tubulares se dá pela norma AWS A5.20-69, onde esta classifica tanto os arames auto protegidos quanto os que devem ser utilizados concomitantemente com um gás de proteção, seguindo o padrão geral utilizado para classificação (AWS, 1991).

A soldagem com arames tubulares trata-se de um processo semiautomático e muito semelhante ao processo *GMAW*, sobretudo em relação aos equipamentos e princípios de funcionamento (MARQUES et al., 2005), assim como Araújo, já citado. A diferença mais relevante da soldagem com arame tubular em relação à soldagem MIG/MAG (MIG - Metal Inert Gás, MAG - Metal Active Gás) é o seu desempenho em termos de maior produtividade e melhor integridade do metal de solda (FORTES, 2004).

As principais vantagens da soldagem com arame tubular são a elevada produtividade, os benefícios metalúrgicos oriundos do fluxo interno do arame e o auxílio da escória na forma e aspecto do cordão de solda, quando comparada à utilização de arames sólidos (JEFFUS, 2004; RODRIGUES, 2005). Em contraponto, possui algumas limitações como a necessidade de remoção de escória e valor do arame mais elevado em comparação ao solido, onde esta diferença é reduzida com o aumento dos elementos de liga, pois o custo do arame solido também aumenta. (RODRIGUES, 2005).

#### 2.5. Aço AAR - M201 Grau B+

Parte dos componentes ferroviários, utilizados para a fabricação de vagões, são constituídos em aço fundido AAR M-201, sendo este classificado de acordo com sua composição química, nos graus A, B, B+, C, D e E. A diferença entre os graus deste aço quanto à composição química e processo de fabricação é o tratamento térmico posterior ao resfriamento do fundido (SCHWANKE, 2013) e o teor de manganês em cada um deles (AAR, 2010). A tabela 1 mostra o percentual máximo dos elementos químicos presentes no aço grau B+.

Tabela 2.1 - Composição química do aço AAR M-201 Grau B+

С	Mn	Р	S	Si
0,32%	0,90%	0,04%	0,04%	1,50%

Fonte: AAR, 2010.

Após a fabricação deste, os requerimentos mínimos de suas propriedades mecânicas são expressos pela AAR, mostrados pela Tabela 2.

Tabela 2.2 - Propriedades mecânicas do aço AAR M-201 Grau B+

Propriedades	Valor mínimo
Limite de Resistência a tração	552 MPa
Limite de Escoamento	345 MPa
Alongamento em 50 mm	24%
Redução de Área	36%
Resistência ao impacto (à -7 °C)	20,3 J
Faixa de Dureza	137 – 228 HB

Fonte: AAR, 2010.

A microestrutura presente neste aço é caracterizada basicamente por duas fases, possuindo uma matriz ferrítica e ilhas de perlita, como mostrado na Figura 2.3 (a)

(SCHWANKE, 2013). É possível observar estas duas fases pela Figura 2.3 (b), onde a região mais escura é a perlita e a região mais clara é a ferrita.



Figura 2.3 - Estrutura matriz do aço.

Fonte: Schwanke, 2013.

#### 2.6. Testes e Ensaios

A forma mais comum de medir a qualidade de um cordão de solda, após a etapa de inspeção visual para identificar defeitos superficiais, é a utilização dos ensaios de dobramento e tração. O teste de tração também ressalta o comportamento mecânico da junta soldada, a fim de caracterizar numericamente estas propriedades (CARVALHO, 2012). Os ensaios no geral têm como objetivo determinar quantitativamente a caracterização das propriedades de um material. Estes quantitativos são encontrados com o auxilio de maquinário apropriado, que aplicam uma determinada força no material e medem a reação do mesmo (ARAUJO, 2010).

#### 2.6.1. Ensaios Mecânicos

O ensaio de tração acontece pela aplicação de uma força de tração uniaxial em um corpo de prova, onde se pode inferir que as deformações que acontecem no material são simetricamente distribuídas pela extensão do corpo prova específico até a sua ruptura. (SOUZA, 1982). Este ensaio mecânico denominado ensaio de tração, está entre um dos melhores ensaios objetivando a relação custo-benefício, onde seu custo efetivo, tomadas as

devidas exigências e particularidades de cada teste, pode ser reduzido em comparação a outros ensaios mecânicos (NETO, 2013).

Análise de tensão e deformação feita pelos equipamentos de ensaio de tração pode ser visualizada na Equação 2.1, sendo está constante da literatura para a determinação do módulo de elasticidade do aço. Ela demonstra a relação entre a tensão, a deformação e o módulo de elasticidade, onde para manter o módulo de elasticidade constante é necessário uma equivalência na variação da força em relação ao produto da área pela deformação (CALLISTER, 2016).

$$E = \frac{F}{A \cdot \varepsilon} \tag{2.1}$$

Ao realizar ensaios de tração em dois tipos de corpos de prova, um corpo plano normal e um corpo com entalhe fabricados em aço baixo carbono, foi evidenciado que os corpos de prova com entalhe possuíram uma redução na resistência mecânica, limite de escoamento, alongamento e estricção, sendo a deformação reduzida em aproximadamente 50%, diminuindo a tenacidade do material. (BERTOLDI, 2014). Estes entalhes atuam como um concentrador de tensões, da mesma forma que os poros, sendo este um dos causadores da fratura frágil em materiais que apresentam normalmente comportamento dúctil a temperatura ambiente (GARCIA et al. 2008).

Outra equação para determinação do limite de resistência a tração aproximado é dada pela correlação entre esta variável e a dureza Brinell do material (CALLISTER, 2016). A Equação 2.2 mostra esta correlação.

$$\sigma = 3,45 \cdot HB \tag{2.2}$$

A tenacidade de um material é determinada pela sua capacidade absorver energia até que ocorra a fratura do mesmo. A tenacidade de um material pode ser analisada por meio do gráfico de tensão em função da deformação, através do calculo da área deste gráfico (GOUVEIA, 2013). Além da análise através do gráfico de tensão em função da deformação, um dos ensaios mais usuais de tenacidade é o ensaio Charpy entalhe 2 milímetros em V, devido ao seu reduzido custo e a relativa simplicidade para realização (SILVA, 1998).

O ensaio de impacto Charpy consiste na queda de um pendulo com uma velocidade e massa controladas, de uma altura conhecida, sobre a peça a ser ensaiada. Esta deve possuir um entalhe, criando um concentrador de tensão, para que aconteça a fratura, em alguns casos esta é frágil mesmo em materiais dúcteis, promovendo a quebra do corpo de prova (GOUVEIA, 2013).

Os resultados de tenacidade em um estudo para um aço de baixo carbono (0,2% de carbono), onde à temperatura ambiente foram encontrados valores médios de 69,5 J para o aço recozido e 63,8 J para o aço encruado (PEREIRA, 2015). Estes resultados são apresentados na Tabela 2.3, onde M é a média das amostras e S o desvio padrão.

	Resultados ensaios de impacto (J)			
	RECOZIDO ENCRUADO ENCR		ENCRUADO	
	Temp. Amb.	Temp. Amb.	Temp. 0°C	
	68,0	51.8	42,0	
	66,0	83,0	40,0	
	69,0	52,0	43,0	
	79,0	74,0	40,0	
	66,0	52,0	35,0	
	69,0	58,0	34,0	
М	69,5	63,8	39,0	
S	(4,8)	(14,0)	(3,7)	

Tabela 2.3 - Resultados do ensaio de impacto do aço baixo carbono.

Fonte: Pereira, 2015.

O ensaio de dobramento consiste na aplicação de uma força concentrada no centro do corpo de prova, onde o mesmo está sendo apoiado por duas bases. O corpo recebe a força em sua região central até ficar em formato de U. Este ensaio tem como objetivo avaliar a ductilidade da solda (DIN EN ISO 5173, 2012), porém não em valores qualitativos e sim por inspeção visual, onde o corpo é avaliado após o dobramento em 180° para avaliar a existência de defeitos ou trincas em sua extensão (KUNTZ, 2016).

A avaliação deste ensaio, segundo a norma AWS D15.1 consiste na verificação da existência de defeitos na região soldada. Tais defeitos não devem ser maiores que 3 mm ou a soma dos defeitos menores não devem ultrapassar 10 mm (AWS D15.1, 2001). Se os corpos de prova cumprirem estes requisitos, são aprovados no teste. Em uma pesquisa relacionada à

comparação entre corpos soldados pelos processos GMAW e FCAW, foi evidenciado que ambos os processos geraram soldas que obtiveram aprovação neste teste (KUNTZ, 2016).

#### 2.6.2. Teste de composição química

Para análise da composição química existentes no metal de adição e no metal de base uma técnica bastante difundida é a espectrometria ótica por centelhamento. Este método utiliza fótons emitidos, após a excitação dos elétrons, para determinar os elementos químicos (BREHM, 1999).

Esta técnica tem como principais vantagens à análise dos diversos elementos presentes em metais e ligas, sensibilidade e facilidade de operação e a velocidade de gerar os resultados (BREHM, 1999). Uma de suas desvantagens já é a necessidade da amostra ser condutora de eletricidade e estar sólida (FARNSWORTH, 1992), porém estudos demonstram técnicas que eliminam está desvantagem, como transformar a amostra não condutora em pó e adicionar grafite em pó para realização do ensaio (LAFFOLIE, 1997).

Para uma análise química mais detalhada é utilizado o conceito de carbono equivalente. O carbono equivalente retrata numericamente qual a influencia da composição química para a suscetibilidade de formação de trincas induzidas por hidrogênio em um aço. Quantificando o carbono equivalente, é possível analisar a temperabilidade do aço e com o aumento da temperabilidade, maior será a dureza, facilitando a formação de trincas (CARDOSO, 2010).

#### 2.6.3. Ensaio metalográfico

Os ensaios metalográficos, macrografia e micrografia, são normalmente executados com o uso de um microscópio ótico (MO) ou com microscópio eletrônico de varredura (MEV). Ele é utilizado para avaliação das microestruturas e micro fases de um dado material (COUTO, 2014), geralmente muito utilizado para caracterização qualitativa de regiões soldadas.

Em seu trabalho, Couto analisou a influencia das propriedades mecânicas e da microestrutura para peças de aço de alta resistência com soldagem FCAW. Nesta análise, ele

demonstra o efeito multipasses, evidenciado através da macrografia, com ataque nital 10% (COUTO, 2014). Esta analise pode ser visualizada pela Figura 2.4.

Figura 2.4 - Macrografia das juntas soldadas. Ataque nital 10%.



Fonte: Couto, 2014.

Na soldagem multipasses as regiões da solda são submetidas múltiplos ciclos térmicos devido aos vários passes. Desta forma a microestrutura desta região sofre mudanças com elevado grau de complexidade. O calor gerado pelo ciclo de um passe pode servir como tratamento térmico para o passe feito anteriormente, podendo evitar a utilização de tratamento térmico na peça soldada (AGUIAR, 2001).

A microestrutura característica do aço ASTM A36 (*American Society for Testing and Materials*), aço similar ao AAR M-201 B+, com existência de ferrita e perlita (DALCIN, 2012), como apresentado pela Figura 2.5. Neste mesmo trabalho foi verificado que os valores de dureza foram superiores na ZTA em todos os experimentos soldados, para o aço AISI 4140 (DALCIN, 2012).

Figura 2.5 - Microestrutura do aço ASTM A36.



Fonte: Dalcin, 2012.

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho tem o intuito de, através de análise experimental, embasado teoricamente em revisão bibliográfica e normas aplicáveis, buscar por evidências de viabilidade técnica para a utilização de um processo de soldagem em recuperação de peças fabricadas em aço AAR M-201 grau B+.

Para esta análise, foi necessário estudar as propriedades mecânicas, químicas e metalúrgicas do material, seguindo as recomendações da norma AWS D 15.1, preconizada pelo padrão AAR M-201, como a fabricação dos corpos de prova e dos testes necessários para aceitação.

Segundo a norma AWS D15.1, para avaliar a compatibilidade entre um arame de solda e o aço em estudo, de forma a permitir uma possível qualificação do procedimento de soldagem, é necessária a realização de quatro ensaios de dobramento lateral e dois ensaios de tração na junta soldada, porém, para maior embasamento dos resultados, foram realizados os seguintes ensaios adicionais, análise química, micrografia, macrografia, ensaio de impacto pelo método Charpy entalhe V e microdureza Vickers.

Para esta avaliação foi utilizada parte de um componente ferroviário, onde foram feitas duas simulações, conforme Figura 3.1, sendo a primeira com profundidade de 7 mm (Solda A), visando testar o processo de recuperação por desgaste, e a outra com solda de penetração total (Solda B), com vistas a melhor caracterização do metal de adição.



Figura 3.1- Simulação de recuperação com solda em componente ferroviário.

#### 3.1. Execução dos Testes de Soldagem

Conforme citado no referencial teórico, os processos FCAW e GMAW se assemelham em relação aos equipamentos e parâmetros. Desta forma foram utilizados, na simulação, os mesmos parâmetros já vigentes no processo anterior, mudando apenas o arame/processo, para não ocasionar mudanças na linha de produção, uma vez que estes parâmetros se enquadram nas variáveis do processo FCAW em análise. A Tabela 3.1 descreve os parâmetros de soldagem utilizados.

Parâmetros de Soldagem	Solda A	Solda B	
Processo	Flux Cored Arc Weld (FCAW)		
Arame	ESAB AWS A5.36 F	E70T15-M21A2-CS2	
Diâmetro do Arame	1,2	mm	
Metal de Base	AAR M-201 Grau B+		
Corrente	25,2 A		
Voltagem	20,8 V		
Gás de Proteção	CO2 + Argônio (25% / 75%)		
Fluxo do Gás	15 L/min		
Número de passes	2 passes	7 passes	

Tabela 3.1 - Parâmetros de soldagem utilizad	08	5.
--	----	----

Fonte: Autor.

Inicialmente, foi selecionada a região do componente ferroviário onde será realizada a simulação de desgaste e a soldagem. O componente pode ser visualizado pela Figura 3.2.

Figura 3.2 - Componente ferroviário utilizado para simulação.



O Componente é de fabricação nacional, com data de fabricação de 05/2008. Após a separação do componente e a marcação da região a ser trabalhada, foi feito o corte desta região utilizando maçarico, resguardando as áreas de execução dos testes do aporte térmico oriundo do processo de corte. A peça cortada pode ser visualizada pela Figura 3.3.

Figura 3.3 - Região do componente ferroviário utilizada para simulação.



Fonte: Autor.

Com isto, foi feito o corte, separando apenas a região frontal da peça e feitas às simulações de desgaste. Como descrito pela Figura 3.1, a solda A teve um chanfro com profundidade de 7 mm, um raio de 60°, simulando uma recuperação de desgaste. Já a solda B, teve um chanfro para soldagem de penetração total, com profundidade de 14 mm, um ângulo de 60°, nariz de 2,0 mm e abertura de raiz de 3,5 mm. Os chanfros são mostrados pela Figura 3.4. As medidas descritas neste trabalho foram feitas com calibre de solda modelo Universal. A Figura 3.5 retrata uma destas medições.

Figura 3.4 - Peça com chanfro simulando desgaste.



Figura 3.5 - Peça com chanfro simulando desgaste.



Fonte: Autor.

Após as medições, foram feitos os testes de ajuste com a máquina de solda, modelo ArcWeld 400S fabricante Eutectic Castolin. Os valores de corrente e tensão elétricas adequadas, assim como o fluxo de gás são expressos pelas Figuras 3.6 e 3.7, respectivamente.

Figura 3.6 - Valores de tesão e voltagem utilizados na soldagem.



Figura 3.7 - Medição do fluxo de gás.



Fonte: Autor.

Com o equipamento ajustado, foi feito a medição de temperatura da peça com a utilização de pirômetro laser e o primeiro passe do cordão de solda. Estes dois processos são mostrados pelas Figuras 3.8 e 3.9 respectivamente.

Figura 3.8 - Medição da temperatura da peça antes do primeiro passe da solda B.



Fonte: Autor.

Figura 3.9 - Primeiro passe do cordão de solda B.



Realizada a limpeza da região soldada, com eliminação de escórias por meios abrasivos, feita a medição da temperatura e executado o segundo passe do cordão de solda, conforme mostrado pelas Figuras 3.10 e 3.11.

Figura 3.10 - Medição da temperatura da peça após o primeiro passe da solda B.



Fonte: Autor.

Figura 3.11 - Segundo passe do cordão de solda B.



Fonte: Autor.

Para os demais passes, foram feitos repetidamente os processos de limpeza do cordão de solda, medição da temperatura e soldagem dos passes subsequentes. As Figuras 3.12 a 3.22 retratam estas etapas para cada passe.

Figura 3.12 - Medição da temperatura da peça após o segundo passe da solda B.



Fonte: Autor.

Figura 3.13 - Terceiro passe do cordão de solda B.



Fonte: Autor.

Figura 3.14 - Medição da temperatura da peça após o terceiro passe da solda B.





Fonte: Autor.

Figura 3.16 - Medição da temperatura da peça após o quarto passe da solda B.



Fonte: Autor.

Figura 3.17- Quinto passe do cordão de solda B.



Figura 3.18 - Medição da temperatura da peça após o quinto passe da solda B.



Fonte: Autor.

Figura 3.19 - Sexto passe do cordão de solda B.



Fonte: Autor.

Figura 3.20 - Medição da temperatura da peça após o sexto passe da solda B.



Figura 3.21 - Sétimo passe do cordão de solda B.



Fonte: Autor.

Figura 3.22- Medição da temperatura da peça após o sétimo passe da solda B.



Fonte: Autor.

Finalizada a solda B, foram iniciados os procedimentos para realização da solda A, sendo feita primeiramente a medição da temperatura e realizado o passe inicial. Após limpeza, foi realizada novamente a medição da temperatura e o segundo passe, finalizando a solda A. As Figuras 3.23 a 3.27 mostram os procedimentos executados na solda A.

Figura 3.23 - Medição da temperatura da peça antes do primeiro passe da Solda A.





Fonte: Autor.

Figura 3.25 - Medição da temperatura da peça após o primeiro passe da solda A.



Fonte: Autor.

Figura 3.26 - Segundo passe do cordão de solda A.



Figura 3.27 - Medição da temperatura da peça após o segundo passe da solda A.

Fonte: Autor.

Os corpos de prova para as análises descritas neste trabalho foram retirados do componente ferroviário onde foram feitas as simulações de desgaste e o procedimento de recuperação por soldagem, conforme descrito na metodologia. A Tabela 3.2 retrata a quantidade de corpos de prova para cada teste.

Tabela 3.2 - Quantidade de corpos de prova por ensaio.

Ensaio	Metal de Base (MB)	Metal de Adição (MA)	Junta Soldada (J)
Tração	2	1	2
Impacto	3	-	3
Dobramento Lateral	-	-	4
Microdureza	2	2	-
Macrografia	2	2	-
Micrografia	2	2	-
Química	3	3	-

Fonte: Autor.

#### 3.1.1. Análise Química

O teste de composição química foi aplicado seguindo a técnica de espectrometria ótica por centelhamento. Esta técnica permitiu caracterizar o metal de base e de solda quanto sua composição química utilizando emissão de fótons sobre o material. Para este teste foi utilizado o espectrômetro de bancada Spectromaxx, no laboratório do instituto de tecnologia SENAI, em Belo Horizonte, Minas Gerais. O teste foi feito em amostra do metal de base e metal de solda, com três testes cada, para obtenção da média de porcentagem de cada elemento, seguindo os padrões da ASTM A751. As Figuras 3.28 e 3.29 mostram o equipamento utilizado e os corpos de prova, respectivamente.

Figura 3.28 - Espectrômetro de bancada Spectromaxx.



Fonte: Autor.

Figura 3.29 - Corpos de prova para análise química. (a) MB (b) Junta Soldada



Fonte: Autor.

### 3.1.2. Ensaio de Tração

Amostras de cada material foram ensaiadas seguindo os procedimentos prescritos pela norma AWS D 15.1. Foram utilizados dois corpos de prova da junta soldada e dois corpos de prova do metal de base, para estabelecer uma média das propriedades mecânicas presentes no aço, seguindo assim os requisitos para avaliação de soldagem preconizados pela norma AWS D15.1. As amostras foram usinadas de acordo com a Figura 3.30, onde o comprimento da secção a ser reduzida A = 57 mm, comprimento total L = 100 mm, o raio de filete r = 12,7 mm, espessura da secção reduzida W = 8 mm e espessura da secção C = 12 mm.

Figura 3.30 - Corpo de prova de tração plano.



Fonte: AWS D 15.1, 2001.

Para análise da localização da fratura posterior ao ensaio, foi realizado um ataque químico com a utilização de reagente nital 2% nos corpos de prova de junta soldada, para evidenciar a região do metal de adição e a ZTA. A Figura 3.31 retrata o corpo de prova finalizado com o ataque químico.

Figura 3.31- Corpo de prova de tração plano, com ataque químico.



Fonte: Autor.

Para o ensaio de tração do metal de adição, foi fabricado um corpo de prova seguindo os padrões da norma citada para o ensaio de tração plano. A Figura 3.32 retrata as dimensões do corpo de prova de secção reduzida onde, A = 44,45 mm, D = 9 mm, r = 6,35 mm e G = 35,5 mm.





Fonte: AWS D 15.1, 2001.

Os ensaios de tração foram realizados na máquina universal de ensaios 100T fabricante EMIC. A Figura 3.33 retrata esta máquina.

Figura 3.33 - Máquina universal de ensaios EMIC.



Fonte: Autor.

#### 3.1.3. Ensaio de Dobramento Lateral

Neste ensaio é aplicada uma força sobre flexão em uma prensa que dobra o corpo de prova até que ele atinja um formato em U, com a região soldada no centro do dobramento. Os critérios de aprovação do corpo de prova, segundo a norma AWS D 15.1, são a não existência de trincas ou defeitos laterais excedendo 3 mm de comprimento e a soma de várias trincas ou defeitos na superfície externa do dobramento, originados durante o teste, não excedendo 10

mm de comprimento. No ensaio de dobramento lateral foi utilizada a mesma norma do ensaio de tração para fabricação dos corpos de prova. Desta forma, os quatro corpos de prova foram fabricados seguindo o modelo apresentado pela Figura 3.34, onde o comprimento total C = 152 mm, a altura do corpo de prova H = 14 mm e a espessura do corpo de prova L = 9,5 mm.

Figura 3.34 - Corpo de prova dobramento lateral.



Fonte: AWS D 15.1, 2001.

O ensaio foi realizado pela máquina universal de ensaios, mesmo equipamento utilizado para os ensaios de tração, expressa pela Figura 3.33. Os corpos de prova fabricados podem ser visualizados pela Figura 3.35.

Figura 3.35 - Corpo de prova dobramento lateral.



Fonte: Autor.

#### 3.1.4. Ensaio de Impacto

Para a verificação do comportamento do material perante a aplicação de uma carga súbita de impacto, efetuou-se o ensaio de impacto Charpy entalhe 2 milímetros em V. O corpo de prova para este ensaio seguiu os padrões da norma ASTM A370, conforme referenciado

pela AWS D15.1. A Figura 3.36 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 3.36 - Corpo de prova do ensaio de impacto.



Fonte: adaptado ASTM A370, 2017.

O equipamento utilizado para este ensaio foi uma máquina para teste Charpy 300 J, do fabricante RMU. Foi utilizando também uma brochadeira CP-1, fabricante Panambra, para inserir o entalhe V na peça a ser ensaiada. Os corpos de prova de junta soldada tiveram uma preparação superficial com lixamento até 400 Mesh, com variação de granulometria de 100 em 100 Mesh, e ataque químico com nital 2% para análise posterior da fratura e identificação da região a ser usinado o entalhe. A análise de impacto foi realizada com o entalhe na região do metal de adição, sobre a face da solda, sendo o ensaio realizado a temperatura ambiente (25 °C). A Figura 3.37 e 3.38 retrata um destes corpos de prova e o equipamento utilizado para o ensaio, respectivamente.

Figura 3.37 - Corpo de prova do ensaio de impacto, com ataque químico.



Figura 3.38 - Máquina de ensaio de impacto Charpy RMU.



Fonte: Autor.

#### 3.1.5. Análise Metalográfica

A análise metalográfica foi realizada com preparação superficial até 600 Mesh, com variação de granulometria de 100 em 100 Mesh para a macrografia. Na micrografia, o lixamento foi realizado até 1200 Mesh, também com variação de granulometria de 100 em 100 Mesh, com um polimento com pasta de diamante até 1 micrometro. A limpeza após a preparação foi realizada com álcool etílico absoluto 99,5% com utilização de secador para remoção do excesso, evitando corrosão. O ataque químico foi feito com nital 2% para a micrografia e nital 10% para a macrografia. Os ensaios de micrografia e macrografia foram realizados segundo o procedimento interno do SENAI MG PT7418, oriundo das normas ASTM E407 e ASTM E340. Os procedimentos para lixamento da peça foram realizados na politriz Mecatech 334, mostrada pela Figura 3.39.

Figura 3.39 - Politriz Mecatech 334.



Fonte: Autor.

Para realização da micrografia, retirada das imagens e realização do ensaio de microdureza Vickers, foi utilizado o equipamento Durascan 70, do fabricante Encotest, como mostrado na Figura 3.40. O ensaio de microdureza foi realizado com uma carga de 1 kgf, com espaçamento entre as indentações de 2,5 vezes o tamanho da indentação, com um indentador de diamante com angulação de 136°. Este ensaio seguiu os procedimentos da norma ASTM E92.

Figura 3.40 - Duroscan 70 Encotest.



# 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a fabricação dos corpos de prova, segundo as normas citadas, foram feitos os ensaios e seus resultados seguem descritos neste capítulo.

### 4.1. Análise Química

Neste teste foram utilizados dois corpos de prova onde cada um foi submetido a três testes. Os percentuais de cada elemento químico presente na amostra de metal de base e metal de solda seguem descritos pela Tabela 4.1.

Amostras	С	Si	Mn	Р	S	Cr	Ni	Mo
Metal de Base	0,29	0,369	0,71	0,019	0,023	0,75	0,084	0,037
Metal de Solda	0,077	0,54	1,47	0,013	0,018	0,144	0,023	0,021
Amostras	Al	Cu	Co	Ti	Nb	V	W	Рb
Metal de Base	0,04	0,204	0,0088	0,0012	0,0012	< 0,001	0,011	0,013
Metal de Solda	0,022	0,045	0,0013	0,0006	0,0013	< 0,001	0,0099	0,013
Amostras	В	Sb	Sn	Zn	As	Bi	Ta	Ca
Metal de Base	0,0002	<b>0,00</b> 57	0,01	0,0041	0,0049	0,0047	< 0,007	< 0,0001
Metal de Solda	0,0005	0,007	0,0052	< 0,001	0,0031	0,0051	0,0097	0,0002
Amostras	Ce	Zr	La	Se	Ν	Fe	-	-
Metal de Base	< 0,002	< 0,0015	< 0,0003	0,034	0,0082	97,4	-	-
Metal de Solda	< 0,002	< 0,002	< 0,0003	0,033	0,007	97,5	-	-

Tabela 4.1 - Resultados da análise química.

Os valores de composição química obtidos neste ensaio estão de acordo com a norma AAR M-201 Grau B+, descrita pela Tabela 2.1. Esta mesma norma descreve o carbono equivalente através da Equação 4.1. Os valores obtidos para os Ceq (Carbono equivalente) são de 0,646 para o metal de base e 0,45 para o metal de solda. Segundo a norma AAR, o limite máximo para o Ceq é de 0,72. Desta forma, os corpos de prova foram aprovados pela análise química.

$$C_{eq} = C + \frac{Mn + Si}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$
(4.1)

#### 4.2. Ensaio de Tração

Os resultados para os ensaios de tração dos cinco corpos de prova, sendo eles dois de metal de base, dois de junta soldada e um de metal de solda, são descritos pela Tabela 4.2.

CD'a	Escoamento	Resistência a	Alongamento	Redução de
CPS	(MPa)	Tração (MPa)	(%)	área (%)
MB 1	367,2	570,2	10,2%	12,6%
MB 2	344,5	623,9	15,1%	9,4%
Média MB	355,87	597,05	13%	11,0%
Desvio Padrão MB	16,08	38,04	3,46	2,26
JUNTA 1	393,6	660,4	11,0%	27,1%
JUNTA 2	384,1	640,8	15,8%	19,7%
Média Junta	388,88	650,62	13,4%	23,4%
Desvio Padrão Junta	6,69	13,87	3,39	5,23
MS 1	520,4	665,4	31,4%	29,0%

Tabela 4.2 - Resultados dos ensaios de tração.

Fonte: Autor.

Os valores médios do limite de resistência à tração e limite de escoamento ficaram superiores ao exigido pela norma, 345 MPa para o escoamento e 551 MPa para o limite de resistência a tração, porém o alongamento (mínimo de 24%) e redução da área (mínimo de

36%) foram inferiores ao exigido pela norma, com exceção do CP MS 1, que atingiu um bom resultado no alongamento. Isto ocorreu devido a grande quantidade de defeitos de fundição encontrados no metal de base, conforme Figuras 4.5 e 4.6. Os defeitos pré-existentes são característicos por se comportarem como concentradores de tensão assim como os entalhes (BERTOLDI, 2014). Com um elevado índice destes defeitos, o material sofreu redução em suas propriedades mecânicas no geral, sendo aprovados os limites de resistência e escoamento, provavelmente devido ao coeficiente de segurança de projeto do material.

A Equação 2.2 pode representar o limite de resistência a tração do material segundo sua dureza (CALLISTER, 2016). A partir da dureza encontrada para o MB, descrita pela Tabela 4.4, verificamos que o limite de resistência a tração médio para o metal de base deveria estar próximo de 623 MPa, evidenciando o estudo já citado que descreve sobre a redução das propriedades mecânicas (BERTOLDI, 2014). Ainda que reduzidos, tanto o limite de escoamento quanto o limite de resistência à tração, atenderam a norma referenciada.

Foi observado também um aumento de 6% no alongamento e de mais de 100% de redução de área nos corpos de prova soldados que, apesar de não atingirem a norma, ficaram com valores bem acima dos corpos de prova de metal de base. As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 retratam os corpos de prova de tração de metal de base, junta soldada e metal de adição, respectivamente.

Desta forma, podemos afirmar que as propriedades mecânicas que não atenderam neste teste estavam diretamente relacionadas aos problemas mostrados no metal de base. Assim, podemos evidenciar que a soldagem está dentro do padrão para aplicação.





(a)



Figura 4.2 - CP 1 junta soldada após ensaio. (a) Região da fratura (b) Área Fraturada

Fonte: Autor.

Figura 4.3 - CP metal de solda após ensaio. (a) Região da fratura (b) Área Fraturada



Fonte: Autor.

#### 4.3. Ensaio de Dobramento Lateral

Nesta análise, foram ensaiados quatro corpos de prova, como descrito na metodologia. Após os testes foi feito inspeção visual nos corpos de prova, onde nenhum deles apresentou trincas ou imperfeições na região soldada. O corpo de prova CP 2 apresentou duas trincas na região do metal de base, uma de 2,5 mm de comprimento e a outra de 1 mm de comprimento, porém as mesmas podem ser justificadas pela elevada quantidade de defeitos de fabricação existentes na peça. Desta forma, a solda foi aprovada neste ensaio. A Figura 4.4 retrata um dos corpos de prova após o ensaio.

Figura 4.4 - CP 2 de dobramento lateral após ensaio.



#### 4.4. Ensaio de Impacto

Os resultados para os ensaios de impacto dos seis corpos de prova, sendo eles três de metal de base e três de junta soldada, seguem descritos pela Tabela 4.3.

Corpos de prova	Energia ao impacto (J)	Média	Desvio Padrão
MB 1	26		
MB 2	27	28,0	2,65
MB 3	31		
Junta 1	70		
Junta 2	90	84,7	12,86
Junta 3	94		

Tabela 4.3 - Resultados dos ensaios de Impacto.

Fonte: Autor.

O teste foi realizado com o entalhe V sobre a face da solda e a temperatura de 25° C. As Figuras 4.6 e 4.7 retratam a quantidade de defeitos existentes no metal de base, tanto nos corpos de prova já prontos, quanto no metal de base após o corte, o que certamente influenciou negativamente nos resultados de todos os testes. A figura 4.5 mostra os resultados deste teste expresso graficamente.





Fonte: Autor

Os defeitos pré-existentes na peça, descritos pelas figuras 4.6 e 4.7, diminuíram a deformação da peça como um todo, reduzindo a tenacidade (GOUVEIA, 2013; BERTOLDI, 2014).

Figura 4.6 – Defeitos pré-existentes nos CPs do ensaio de impacto.



Fonte: Autor

Figura 4.7 - Defeitos pré-existentes no metal de base, encontrados no corte e usinagem.



Fonte: Autor

A norma AAR preconiza que o ensaio deve ser feito a -7° C, porém neste caso, devido a condições técnicas, foi realizado a 25° C. Os corpos de prova de metal de base tiveram uma média de 28 J e os de junta soldada uma média de 84,6 J. Pela escassez de trabalhos com este tipo de aço, foi utilizado a título de comparação onde foi encontrado, a 25° C, o valor de 69,5 J para o aço de baixo carbono recozido e 63,8 J para o aço de baixo carbono encruado, conforme Tabela 2.3 (PEREIRA, 2015). Comparando os valores obtidos na pesquisa citada com os valores encontrados neste trabalho, pode-se deduzir que os valores de tenacidade para a junta soldada foram aceitáveis, uma vez que o metal de base também é classificado como aço de baixo carbono. A mesma conclusão não pode ser associada ao metal de base devido o reduzido valor encontrado na tenacidade. Desta forma, podemos afirmar que a solda tende a

possuir as características necessárias de tenacidade, estipuladas em norma. As Figuras 4.8 e 4.9 mostram a região fraturada após o ensaio do corpo de prova de junta soldada e metal de base, respectivamente.

Figura 4.8 - Região de fratura CP 1 de junta soldada do ensaio de Impacto.



Fonte: Autor.

Figura 4.9 - Região de fratura CP 3 de metal de base do ensaio de impacto.



Fonte: Autor.

### 4.5. Análise Metalográfica

Pela Figura 4.10 é possível observar que o aço de constituição do metal de base possui em sua microestrutura uma matriz ferritica com perlita dispersa na matriz, onde a ferrita é a região clara e a perlita é a região escura (SCHWANKE, 2013; DALCIN, 2012). O material apresenta homogeneidade na distribuição das fases conforme pode ser visto pela figura 4.9 (a). A região de metal de base demonstrou nos testes de microdureza, um valor médio de 180 HV, conforme Tabela 4.4. A figura 4.9 (b) retrata a região de metal de base ampliada, onde é possível observar regiões que diferem da microestrutura, sendo possivelmente poros, característicos de defeitos de fabricação, circulados em vermelho.

Figura 4.10 - Microestrutura do metal de base. Ataque nital 2%.



#### (a) 100x



Fonte: Autor.

Fonte: Autor.

Pela Figura 4.11 podemos observar que a microestrutura na região do metal de adição possui homogeneidade na distribuição das fases, basicamente compostas por matriz ferritica com perlita dispersa. A região analisada não apresenta morfologia de zona colunar em função do resfriamento devido se tratar de análise realizada no centro da amostra. Como se trata de uma junta soldada multipasses, a zona colunar tende a se desfazer devido ao tratamento térmico realizado pelo passe posterior (AGUIAR, 2001).







(b) 200x

A Figura 4.12 retrata a microestrutura da região de ZTA. Pode ser verificado que a microestrutura possui uma matriz ferritica com perlita dispersa, assim como as regiões de metal de base e metal de solda, com morfologia acicular. Desta forma é possível afirmar que a região de ZTA apresenta certa homogeneidade na distribuição das fases, semelhante às outras regiões do corpo de prova soldado.

Figura 4.12 - Microestrutura na ZTA. Ataque Nital 2%.



(a) 100x



Fonte: Autor.

Na Figura 4.13 é possível observar a macrografia de uma amostra de junta soldada. É possível observar nesta imagem os passes de soldagem que foram executados para a formação do cordão de solda, chamado de efeito multipasses (COUTO, 2014). É possível visualizar defeitos no metal de base marcados em azul, já comentados, e alguns defeitos no metal de solda marcados em vermelho. Estes defeitos de soldagem são comuns na região de inicio e fim da solda, parte utilizada para este ensaio, sendo assim, estes foram caracterizados como pontuais.



Figura 4.13 - Macrografia do corpo soldado. Ataque nital 10%.

Fonte: Autor.

#### 4.6. Ensaio de Microdureza

Os dados do ensaio de microdureza Vickers são descritos pela Tabela 4.4. Foram medidos 3 pontos em cada região do material (MB, MA, ZTA), com uma carga de 1 kgf. A distância entre as indentações foi de 2,5 vezes o tamanho da indentação. Os valores foram emitidos em HV e transformados em HBW, segundo a norma ASTM E140. Como valores de dureza na escala HV são similares aos valores de dureza na escala HBW, conforme norma ASTM E140, até um valor de 238 HV, apenas os resultados de dureza na ZTA foram expressos nas duas escalas distintas.

Pontos	MA (HBW)	MB (HBW)	ZTA HV	ZTA HBW
1	183	184	252	241
2	185	180	258	245,6
3	180	178	254	243
Média	182,7	180,7	254,7	243,2
Desvio Padrão	2,5	3,1	3,1	2,3

Os resultados da Tabela 4.4 são também expressos graficamente na Figura 4.13, onde é mostrado os limites conforme norma.



Figura 4.14 - Resultados do ensaio de microdureza Vickers

Fonte: Autor.

Os resultados de dureza para o MB e para o MA ficaram dentro da faixa estipulada pela AAR. A média de dureza na ZTA ficou 6% acima do limite superior da norma (137 a 228 HB). De fato a região de ZTA tende a ter uma dureza ligeiramente mais elevada quando comparada ao metal de base (DALCIN, 2012), uma vez que o consumível de soldagem apresenta maiores limites na resistência mecânica e no escoamento, maximizando as transformações na região. Desta forma, a solda foi aprovada neste teste.

## 5. CONCLUSÃO

O presente trabalho demonstrou através de ensaios e testes a interação entre um metal de base e um metal de adição, pré-selecionados, no ponto de vista mecânico, químico e metalúrgico.

Nas propriedades mecânicas, foram encontrados valores acima do preconizado pela norma para o limite de resistência à tração, limite de escoamento e para a dureza, tanto para o metal de base, quanto para a junta soldada. Ficou evidente que os problemas com redução de área e alongamento se deram devido aos defeitos de fabricação encontrados no metal de base. Estes mesmos defeitos contribuíram para a redução dos valores de tenacidade, onde os corpos de prova sem solda ficaram com valores bem inferiores aos corpos de prova soldados.

Nos resultados de microdureza, as regiões do corpo de prova soldado tiveram valores dentro da faixa permitida pela norma, exceto a ZTA, porém normalmente é a região mais dura de um corpo de prova soldado, isto justificado, no caso deste estudo, pelo maior valor de resistência mecânica e escoamento do metal de adição.

Pelos resultados dos testes de tenacidade pode-se concluir que a solda tem potencial para ser utilizada na recuperação deste aço, porém é necessário refazer alguns testes conforme as especificações da AAR (Tenacidade ao impacto, método Charpy, entalhe 2 milímetros em V, à -7 °C). Nas demais propriedades mecânicas, a solda teve resultados satisfatórios e foi aprovada.

Na análise química, tanto o metal de base quanto o metal de solda obtiveram a composição dentro dos parâmetros da norma AAR. Também foi analisado o carbono equivalente dos dois corpos, estando estes também dentro dos padrões da norma referida. Desta forma, a solda obteve êxito neste teste e foi aprovada.

Na análise metalúrgica, foi possível observar na micrografia que o metal de base possui uma microestrutura de matriz ferritica com perlita dispersa. Também foi visto que tanto o metal de base quanto o metal de solda apresentam uma homogeneidade na distribuição das fases, com presença de defeitos localizados no metal de base, reforçando as discussões sobre os resultados dos ensaios mecânicos.

Na macrografia foi possível observar passes do cordão de solda bem definidos, evidenciando se tratar de uma junta soldada multipasses. Foi possível observar também defeitos no metal de base e alguns defeitos em uma das amostras do no metal de solda, porém estes são justificados pela região (final da solda) onde foi retirada especificamente esta amostra. Desta forma, a solda teve resultados satisfatórios na análise metalográfica e foi aprovada.

Logo, é possível afirmar, com base nos resultados obtidos neste estudo, que o arame AWS A3.36 E70T15-M21A2-CS2 tende a ser tecnicamente compatível para a recuperação por soldagem do aço AAR M-201 Grau B+. No entanto para verificação e aprovação final, é necessário que sejam refeitos os testes de tenacidade dentro da temperatura especificada pela norma. Outra ressalva é a baixa qualidade de fabricação do metal de base, que influenciou negativamente em vários resultados e que deve ser um assunto a tratar entre o fornecedor fabricante do aço e empresa compradora para garantir um componente e uma recuperação por soldagem mais confiáveis.

Possibilidade de trabalhos futuros que possuem o potencial de agregar mais valores a estes resultados seriam voltados ao estudo dos parâmetros adequados de soldagem no processo FCAW para a recuperação do aço AAR M-201 Grau B+, sobre outras condições de processamento. Outro trabalho interessante seria sobre o estudo da tenacidade deste aço em temperatura superior e inferior a 0° C.

# **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AAR, Association of American Railroads, "Castings, Steels", AAR MSRP Casting Details, M-201, 2010.

AGUIAR, W. M. Soldagem do aço ABNT 4140 sem Tratamento Térmico Posterior. Dissertação de Mestrado. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2001.

ARAÚJO, J. F. estudo de propriedades mecânicas do polipropileno moldado por injeção em insertos de resinas, 2010, 107 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná.

ARAÚJO, W.R., Comparação entre soldagem robotizada com eletrodo sólido e metal cored – A ocorrência do Finger, UFMG, fevereiro, 2004.

ASTM, American Society for Testing and Materials, A751, Standard Test Methods, Practices, and Terminology for Chemical Analysis of Steel Products, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.

ASTM, American Society for Testing and Materials, A370, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

ASTM, American Society for Testing and Materials, E140, Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

ASTM, American Society for Testing and Materials, E407-07(2015)e1, Standard Practice for Microetching Metals and Alloys, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

ASTM, American Society for Testing and Materials, E340, Standard Practice for Macroetching Metals and Alloys, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

ASTM, American Society for Testing and Materials, E92, Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

AWS, Welding Handbook, "Flux Cored Arc Welding." 8th ed., Miami-USA. American Welding Society, v.2, 1991, pp.158.

AWS, American Welding Society, "Specification for Carbon Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding", ANSI/AWS A5.20, 2005.

AWS, American Welding Society, "Specification for Low-Alloy Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding", ANSI/AWS A5.29, 2010.

AWS, American Welding Society, "Specification for Stainless Steel Flux Cored and Metal Cored Welding Electrodes and Rods", ANSI/AWS A5.22, 2012.

AWS, American Welding Society, "Railroad Welding Specification for Cars and Locomotives", AWS D15.1, 2001.

BERTOLDI, E. Análise de ensaios de tração em corpo de prova de aço SAE 1020. 4ª Semana Internacional de Engenharia e Economia FAHOR, Horizontina, Rio Grande do Sul, 2014.

BREHM, F. A. Produção de padrões para análise espectrométrica por emissão óptica de uma liga de aço AISI/SAE 1020. Dissertação de mestrado. 54 p. Universidade federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução 9<sup>a</sup> edição. LTC Editora, 2016, 704 pp.

CARDOSO, A. S. M. Caracterização mecânica e microestrutural dos aços SAE 4340 e 300M após soldagem a laser e tratamento superficial de nitretação a plasma, 115 p. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Lorena, Lorena, São Paulo, 2010.

CARVALHO, J. M. Análise estática e de fadiga de uniões soldadas por friction stir welding, 119 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2012.

CHAN; B. et al., Modelling gás metal arc weld geometry using artificial neural network technology, Can. Metall. Quart., p 43-51, Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Canada, 1999.

CORREIA, A. L. G. Soldagem a gás: Processo, técnicas empregadas, defeitos e causas e procedimentos. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina – IFSC, Florianópolis, 2017.

COUTO, J. L. S. Influência da microestrutura nas propriedades mecânicas de metais de solda de aços de alta resistência obtidos por processo arame tubular. Dissertação de Mestrado. 70 p. CEFET-RJ, Rio de Janeiro, 2014.

DIN EN ISO 5173. Destructive tests on welds in metallic materials, 2012.

DALCIN, R. L. Estudo da soldagem multipasses entre os aços dissimilares AISI 4140 e ASTM A36 sem tratamento térmico posterior. Faculdade Horizontina – FAHOR. Horizontina, 2012.

FARNSWORTH, PAUL B. Optical Emission Spectroscopy. In: Metals Handbook, materials Characterization. 10 ed. Ohio: American Society for Metals, p. 21-30, 1992.

FORTES, C., Soldagem MIG/MAG – Traduzido e adaptado, ESAB, Agosto, 2004. GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. Ensaio dos materiais. Rio de Janeiro: LTC, 2008. GARCIA, R. P. Uma avaliação dos processos MIG/MAG e Eletrodo Tubular em termos de capacidade produtiva, geração de fumos e de respingos, usando consumível para aço estrutural. 2010, 133 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

GOMES, E. B. Análise do comportamento da soldagem por Curto-Circuito aplicado ao processo Eletrodo Tubular através da Metodologia Taguchi, 119 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.

GOUVEIA, K. C. Investigação dos métodos de determinação da temperatura de transição dúctil-frágil (TTDF) utilizando ensaio de impacto charpy, 162 p. Dissertação de Mestrado. Centro universitário FEI, São Bernardo dos Campos, São Paulo, 2013.

JEFFUS, L. Welding: principles and applications. 5 ed. Australia: Delmar Learning, 2004. 904 p.

JOAQUIM, R. Manual de Tecnologia de Fabricação e Soldagem – Módulo II - Processo de Soldagem Arame Tubular. Centro de Tecnologia de Soldagem, São Paulo, 2001.

KARADENIZ, E.; OZSARAC, U.; YILDIZ, C. The effect of process parameters on penetration in gas metal arc welding processes. Material & Design 28, p. 649-656, 2007.

KIM, I. S.; LEE, J. S. e KIMURA, A. Embrittlement of ER309L stainless steel clad by sphase and neutron irradiation. Journal of Nuclear Materials, v. 329–333, n. 1, p. 607–611, 2004.

KUNTZ, M. R. K. Análise comparativa entre a soldagem com arame sólido e metal cored no processo multipasses. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Panambi, Rio Grande do Sul, 2016.

LAFFOLIE, H. Optical emission spectral analysis – A short introduction and a historical survey. Massachusetts: Spectro Analytical Instruments GMBH, 1997.

MACHADO, Ivan Guerra. Soldagem & Técnicas Conexas: Processos. Porto Alegre, 1996.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. Soldagem: fundamentos e tecnologia. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 362 p.

MODENESI, P. J. Introdução à física do arco elétrico, UFMG, Belo Horizonte, Janeiro, 2005.

MOTA, C.A.M.; FARIAS, J.P.; SURIAN, E.; RIVAS, R.H.V., Efeito dos Parâmetros de Soldagem e do tipo de Arame sobre a Geometria da Solda a Arame Tubular Auto protegido. V CEM- NNE 98, 1998, Fortaleza, CE, pp. 390-396.

NETO, R. M. L. Ensaio de Tração. IEM-Instituto de Engenharia Mecânica, LEN-Laboratório de Ensaios Destrutivos e Não-Destrutivos, Universidade Federal de Itajubá, 2013.

PEREIRA, J. M. F. et al. Influência da temperatura e do tamanho de grão sobre a tenacidade à fratura de um aço baixo carbono. CONTECC, Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, Fortaleza, Ceará, 2015.

QUITES, A. Introdução à soldagem a arco voltaico. Florianópolis: Editora Soldasoft, 2013.

RODRIGUES, E. R. Influência de parâmetros do processo FCAW– G nas características da solda do Aço ASTM A-36, 96 p., Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pósgraduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

RODRIGUES, L. O. Análise e Otimização de Parâmetros na Soldagem com Arame Tubular. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá (MG), 2005.

SALES, J.C., Estudo da Geometria do Cordão de Solda usando CO2 e uma Mistura de Ar e CO2 na Soldagem com Arame Tubular AWS E71T-1. COBEM, Uberlândia – MG, V4, ref 172, pp 543-551, 2001.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho. São Paulo: Artiliber Editora, 2008.

SILVA, R. V.; Avaliação da tenacidade à fratura de soldas de alta resistência e baixa liga pelo método da Integral J. Dissertação. São Carlos, 1998.

SOARES, H. M. Estudo da influência dos parâmetros de soldagem MIG e da morfologia do cordão no comportamento à fadiga de juntas soldadas de um eixo traseiro veicular, 84 p. Dissertação de Mestrado. Escola politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SOUZA, Sérgio A. Ensaios mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos. 5ª ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1982.

TEIXEIRA, G. S. Análise da influencia dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão de solda depositado pelo processo de soldagem TIG-MAG em Tandem, 122 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

WAINER; E, Soldagem, Associação Brasileira de Metais, 14ª edição ampliada, São Paulo, 1979, p.3.

WAINER; E, Brandi; S D, De Mello; F D H Soldagem: Processos e Metalurgia, Editora Edgard Blucher, São Paulo, 1992.