

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

HORTENCIA NORONHA DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO E DESEMPENHO DE JUNTAS SOLDADAS PELO PROCESSO
GMAW**

**Alegrete
2017**

HORTENCIA NORONHA DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO E DESEMPENHO DE JUNTAS SOLDADAS PELO PROCESSO
GMAW**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Aldoni Gabriel Wiedenhöft

**Alegrete
2017**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

S237a SANTOS, HORTENCIA NORONHA DOS
AVALIAÇÃO E DESEMPENHO DE JUNTAS SOLDADAS PELO
PROCESSO GMAW / HORTENCIA NORONHA DOS SANTOS.
65 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)-- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA MECÂNICA, 2017.

"Orientação: ALDONI GABRIEL WIEDENHOFT".

1. GMAW. 2. Soldagem. 3. Soldagem semiautomática. 4. Desempenho. I. Título.

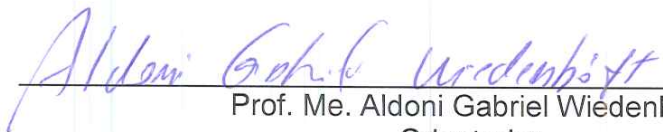
HORTENCIA NORONHA DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO E DESEMPENHO DE JUNTAS SOLDADAS PELO PROCESSO
GMAW**

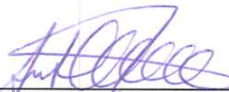
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal
do Pampa, como requisito parcial
para obtenção do Título de Bacharel
em Engenharia Mecânica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 28 de junho de
2017.

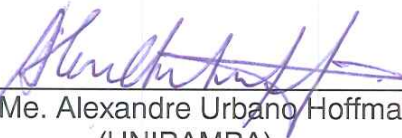
Banca examinadora:



Prof. Me. Aldoni Gabriel Wiedenhöft
Orientador
(UNIPAMPA)



Prof. Dra. Ana Claudia Costa
(UNIPAMPA)



Prof. Me. Alexandre Urbano Hoffmann
(UNIPAMPA)

Dedico este trabalho a meus pais, pois
nunca deixaram de acreditar em mim.

AGRADECIMENTO

Este é o final de um capítulo muito importante. A engenharia tomou um tempo maior do que eu imaginava há alguns anos atrás, me levando a pensar em desistir diversas vezes, porém, tive a sorte de ter pessoas iluminadas na minha vida que me apoiaram e me fizeram chegar até aqui.

Agradeço primeiramente a meus pais, Edison e Silvia, pela vida e pelo apoio incondicional, sem questionamentos, sem pressão, sempre acreditando na minha vitória. Este trabalho é de vocês.

A meus irmãos, Jerônimo e Paglya, pelo carinho e preocupação demonstrados ao decorrer da minha vida acadêmica.

A meu orientador Prof. Aldoni, pela oportunidade de desenvolvermos um trabalho juntos, pela amizade e apoio na construção deste TCC.

A banca deste trabalho, Prof. Ana e Prof. Alexandre, pelo auxílio quando tive dúvidas na confecção deste TCC.

A empresa PS Zamprogna, por fornecer o material para desenvolvimento desse trabalho, além de abrir as portas da empresa para que pudesse conhecer o processo.

A meus melhores amigos, Luis Guilherme e Mateus, que caminharam comigo nesses anos, me auxiliando em muitas horas de estudo, inclusive no desenvolvimento desse TCC, além da amizade que quero pra vida inteira. Vocês são muito importantes para mim, este trabalho também é de vocês.

A minhas amigas Priscila, Thalita, Roberta, Daiane e Júlia, pelo apoio e companheirismo demonstrados ao longo desses anos. A Felipe, pela amizade sincera.

A meus colegas de estágio, Alan, Anderson, Guilherme, Marlon e Cauã, pela camaradagem neste último semestre. Foi muito bom trabalhar com vocês.

Aos professores da UNIPAMPA, aos que me reprovaram e me aprovaram, meu muito obrigada. Perdi noites de sono, porém cresci muito como profissional.

Aos técnicos do laboratório que me auxiliaram nos ensaios deste trabalho.

A todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para que eu chegasse no final desta empreitada, a todos, meu muito obrigado.

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível”.

Charles Chaplin

RESUMO

Soldagem é o processo de união de metais por meio de fusão. Esse processo evoluiu ao longo do século XX, tendo diversas variações e adequações conforme o avanço tecnológico, passando de um processo manual a robotizado. A solda *GMAW* (*Gas Metal Arc Welding*), é um processo largamente utilizado em indústrias, sendo realizado através de arco elétrico entre a peça e o consumível em forma arame, em que o eletrodo não revestido é fornecido através de alimentador contínuo. O gás de proteção, inerte ou não, protege o cordão de impurezas, evitando possíveis defeitos do material. Este processo é de baixo custo e permite ser automatizado com facilidade, e também permite soldar diversos tipos de aços. Quando bem realizada, a solda *GMAW* possui bom desempenho e não há escória, se comparada com outros processos mais comuns utilizados na indústria. O presente trabalho avalia o desempenho de juntas soldadas por este processo, a partir da união de chapas de aço SAE 1030 de diferentes espessuras (1,8 mm, 2 mm, 2,25 mm, 2,5 mm e 2,65 mm) em equipamento automático, realizada pela empresa PS Zamprogna, de Canoas/RS. A máquina utilizada é Starweld 390x3, eletrodo ER70S-6, gás inerte com 75% de CO₂ e 25% de Ar. A solda foi realizada em um passe, pelo equipamento em uma velocidade constante para diferentes espessuras. Para analisar a solda, foram realizados ensaios de tração, microdureza e micrografia, afim de avaliar a resistência mecânica, dureza, tenacidade e identificar possíveis defeitos na estrutura a nível micro e macro. Após análise dos resultados, foi identificado que o gradiente de temperatura elevado, o que levou o crescimento de grãos grosseiros, baixa dureza e rompimento na solda (no ensaio de tração), o que compromete a mesma. Para juntas de menor espessura (1,8 mm e 2 mm) este gradiente foi mais severo, onde foi constatado o aparecimento de trincas a nível microestrutural. Para juntas de maior espessura (2,25 a 2,65), a solda teve bom comportamento no ensaio de tração, e os resultados de microdureza e micrografia estiveram de acordo com a bibliografia.

Palavras-Chave: *GMAW*, soldagem, soldagem semiautomática, desempenho.

ABSTRACT

Welding is the process of joining metals by melting. This process evolved throughout the twentieth century, having several variations and adaptations according to the technological advance, going from a manual to robotized process. GMAW (Gas Metal Arc Welding) welding is a widely used process in industries, being carried out through an electric arc between the part and the consumable in wire form, in which the uncoated electrode is supplied through a continuous feeder. The protective gas, inert or not, protects the cord from impurities, avoiding possible defects of the material. This process is inexpensive and allows to be easily automated, and also allows to weld diverse types of steels. When done well, GMAW soldering has good performance and there is no slag compared to other more common processes used in the industry. This work evaluates the performance of welded joints by joining SAE 1030 steel sheets of different thicknesses (1.8 mm, 2 mm, 2.25 mm, 2.5 mm and 2.65 mm) in automatic equipment, made by the company PS Zamproga, from Canoas/RS. The machine used is Starweld 390x3, electrode ER70S-6, inert gas with 75% CO₂ and 25% Ar. The welding was performed in one pass, by the equipment at a constant speed for different thicknesses. To analyze the weld, tensile, microhardness and micrograph tests were carried out to evaluate the mechanical strength, hardness, toughness and to identify possible defects in the structure at micro and macro level. After analysis of the results, it was identified that the high temperature gradient, which led to the growth of coarse grains, low hardness and rupture in the weld (in the tensile test), which compromises the same. For thicker joints (1.8 mm and 2 mm) this gradient was more severe, where it was observed the appearance of cracks at the microstructural level. For thicker joints (2.25 to 2.65), the weld had good behavior in the tensile test, and microhardness and micrograph results were in agreement with the literature.

Keywords: GMAW, welding, semi-automatic welding, performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processos metalúrgicos de união.....	20
Figura 2 – Desenho esquemático do processo GMAW.....	22
Figura 3 – Máquina de Solda Semiautomática.....	24
Figura 4 – Realização da solda.....	25
Figura 5 – Regiões que compõem a junta soldada.....	26
Figura 6 – Diagrama CCT da transformação da austenita.....	27
Figura 7 - Microconstituintes presentes no metal fundido.....	30
Figura 8 – Temperaturas e estrutura da ZTA.....	32
Figura 9 – Esquema da variação da dureza na ZTA de aços de baixo e médio carbono. (A) Região de recristalização. (B) Região de granulação grosseira.....	34
Figura 10 – Desenho esquemático (a) e macrografia (b) da ZTA.....	35
Figura 11 – Fluxograma da operação na linha de produção.....	40
Figura 12 – Disposição do equipamento na linha de produção.....	41
Figura 13 – Operador posicionando as chapas.....	41
Figura 14 – Fluxograma de atividades.....	42
Figura 15 – Desenho esquemático da seção transversal da amostra.....	44
Figura 16 – Desenho esquemático das medições de microdureza.....	45
Figura 17 – Máquina de tração usada no trabalho.....	45
Figura 18 - Corpo de prova conforme Norma ASTM E8M.....	46
Figura 19 – CP após fratura.....	47
Figura 20 – Fotografias do cordão de solda para diferentes espessuras.....	48
Figura 21 - Microestrutura do metal base, aumento de 800x.....	49
Figura 22 – Micrografias da zona fundida para espessuras estudadas.....	50
Figura 23 – Micrografias da zona termicamente afetada para espessuras estudadas.	52
Figura 24 – Microdureza do metal base.....	54
Figura 25 – Microdureza solda.....	55
Figura 26 – Microdureza ZTA.....	56
Figura 27 – Aspecto da fratura.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações do equipamento de solda.	24
Tabela 2 – Principais constituintes da zona fundida.....	28
Tabela 3 – Variáveis do processo.	36
Tabela 4 – Composição química (%) do metal base.....	39
Tabela 5 – Composição química (%) do metal de adição.	39
Tabela 6 – Parâmetros de soldagem utilizados no processo.....	40
Tabela 8 - Medições, média e desvio padrão do ensaio de microdureza.....	57
Tabela 9 – Resultado dos ensaios de tração.	58
Tabela 10 – Valores de eficiência da junta para CPs que romperam fora da zona fundida.	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MIG – Metal Inert Gas

MAG – Metal Active Gas

GMAW – Gas Metal Arc Welding

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

SAE – Society of Automotive Engineers

IIW – International Institute of Welding

MA – Metal de Adição

MB – Metal Base

ZTA – Zona Termicamente Afetada

CCT – Continuous Cooling Transformation

MO – Microscópio Óptico

PF (G) – Ferrita de Contorno de Grão

PF (I) – Ferrita Intragranular Poligonal

AF – Ferrita Acicular

FS (A) – Ferrita com 2ª Fase Alinhada

FS (NA) – Ferrita com 2ª Fase Não Alinhada

FC – Agregado Ferrita-Carboneto

M - Martensita

ZTA-GG – Zona de Grão Grosseiro

ZTA-GF – Zona de Grão Fino

ZTA-IC – Zona Intercrítica

ZTA-SC – Zona Subcrítica

HV – Dureza Vickers

ASME – American Society of Mechanical Engineers

AWS – American Welding Society

AISI – American Iron and Steel Institute

LE – Limite de Escoamento

LR – Limite de Resistência

ESAB – Elektriska Svetsnings Aktie Bolaget

CP – Corpo de Prova

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	15
1.2 OBJETIVOS	16
1.3 JUSTIFICATIVA.....	16
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA.....	18
2.1 AÇOS CARBONO.....	18
2.1.1 AÇO SAE 1030	18
2.2 CARBONO EQUIVALENTE.....	18
2.3 PROCESSO DE SOLDAGEM.....	19
2.3.1 SOLDA A ARCO ELÉTRICO.....	19
2.3.2 PROCESSO GMAW.....	21
2.3.3 INDUSTRIALIZAÇÃO DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM	23
2.3.4 EFICIÊNCIA DA JUNTA SOLDADA.....	25
2.4 METALURGIA DA SOLDAGEM.....	26
2.4.1 CARACTERÍSTICAS DO METAL FUNDIDO	27
2.4.2 CARACTERÍSTICAS DA ZONA TERMICAMENTE AFETADA	32
2.4.3 PRINCIPAIS VARIÁVEIS DE SOLDAGEM	35
2.4.4 DEFEITOS DO METAL DE SOLDA.....	36
3 MATERIAIS E MÉTODOS	38

3.1	MATERIAIS	38
3.2	MÉTODOS	39
3.2.1	FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES	41
3.2.2	ESPECTROMETRIA	42
3.2.3	ENSAIO DE MICROGRAFIA	43
3.2.4	ANÁLISE DA MICRODUREZA VICKERS	44
3.2.5	ENSAIO DE TRAÇÃO	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1	INSPEÇÃO VISUAL	48
4.2	ANÁLISE METALOGRÁFICA	49
4.2.1	METAL BASE	49
4.2.2	ZONA FUNDIDA	49
4.2.3	ZONA TERMICAMENTE AFETADA	51
4.3	ANÁLISE DA MICRODUREZA VICKERS	54
4.4	ANÁLISE DO ENSAIO DE TRAÇÃO	58
5	CONCLUSÃO	61
5.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	62
	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do Problema

Entende-se por soldagem a união de metais de forma permanente, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão. Este processo evoluiu durante a Segunda Guerra Mundial, na construção de aviões e navios. O uso da soldagem na indústria metal mecânica permitiu o desenvolvimento de novos componentes mecânicos, dando maior confiabilidade a união permanente de peças, como a substituição de parafusos.

Com o avanço da tecnologia, no desenvolvimento de processos confiáveis e econômicos, a globalização permitiu que a comercialização de bens e serviços fosse um atrativo, mas também um fator competitivo para as empresas. Assim, a necessidade de produzir com qualidade se tornou o fator mais importante do que produzir em grande quantidade. Porém, com o aumento da qualidade, o custo de produção também se eleva, fazendo com que se haja necessidade de buscar o menor custo de fabricação. Neste âmbito, a área de soldagem tem destaque pelo baixo custo e qualidade (MARTINS FILHO, 2012).

O processo de soldagem MIG/MAG, também conhecido como processo GMAW (*Gas metal arc welding* – Soldagem ao Arco Elétrico com Atmosfera de Proteção Gasosa), tem sido muito utilizado, pois se tem notado um desenvolvimento constante devido a qualidade, custo e flexibilização do processo, podendo, inclusive, ser mecanizado (MOREIRA, 2006).

Em paralelo com a revolução industrial e dos processos de fabricação, também houve a necessidade de se regulamentar estes processos, através de normas e regras, na tentativa de evitar acidentes e padronizar a produção, um fator decisivo no aspecto econômico, principalmente em produção em larga escala. As normas em processos de soldagem são controladas por órgãos específicos, tais como a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

Para garantir a confiabilidade de juntas soldadas neste processo, são necessários que se verifiquem os parâmetros de soldagem através de ensaios destrutivos e não destrutivos.

Este trabalho estuda os parâmetros de qualidade e desempenho da solda de juntas soldadas da empresa PS Zamprogná, da cidade de Canoas/RS. A empresa trabalha com chapas e perfis laminados, das mais diversas espessuras e tamanhos

pré-determinados. Em uma das etapas da linha de produção, é feito um cordão de solda para juntar as bobinas que estão na linha de produção, evitando, assim, que não haja desperdício de material e diminuir o tempo de troca de bobina. O processo de solda é automatizado, mas controlado por operador. A qualificação da solda proporciona garantia ao trabalho que já é realizado, podendo, assim, dar a oportunidade de ampliar o mercado, já que ainda não foi realizado testes nas chapas soldadas.

1.2 Objetivos

Objetivo geral: avaliar as propriedades e normalidade de juntas soldadas de espessura de 1,8 mm, 2 mm, 2,25 mm, 2,5 mm e 2,65 mm fornecidas pela empresa PS Zamproga necessária para qualificar o procedimento de solda GMAW.

Objetivos específicos:

- Avaliar resistência mecânica e dureza;
- Avaliar integridade da solda em geral;
- Avaliar regiões endurecidas e tenacidade das juntas soldadas supracitadas;
- Identificar defeitos e origem, quando existentes, para melhoria da qualidade da junta e do processo.

1.3 Justificativa

A realização deste estudo de caso procura consolidar os conhecimentos teóricos na área de soldagem e processos de fabricação, junto a observações investigativas, conforme a realização dos ensaios, contribuindo para a formação profissional do pesquisador. Além disso, a garantia da qualidade da solda para a empresa permite um novo destino aos perfis que possuam a junta soldada, que na atualidade são pouco comercializados por não haver qualificação adequada.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está segmentado em cinco grandes tópicos: introdução, revisão bibliográfica, metodologia, resultados e discussão, conclusão e referências bibliográficas.

Na introdução o problema é contextualizado e se dá uma visão geral do processo de soldagem. Também são mostrados os objetivos (geral e específico) do trabalho e justificativa da realização do mesmo. Na revisão bibliográfica é abordada a base teórica para fundamentar o processo de soldagem e tópicos relacionados, através dessa base é possível validar os resultados tratados posteriormente.

Na metodologia é exposto o método que a soldagem foi executada e quais parâmetros foram utilizados, além de como foram realizados os ensaios para investigação do problema de pesquisa. Os resultados e discussão procuram tratar os dados obtidos nos ensaios e relacionar os resultados com a revisão bibliográfica, para validação.

Por fim, na conclusão são retomados os objetivos afim de identificar se foram atendidos, além de resumir os resultados discutidos no tópico anterior. Também são sugeridos trabalhos futuros que podem ser realizados com esta pesquisa.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção serão abordados os principais embasamentos teóricos acerca do processo de soldagem, aços carbono e ensaios mecânicos.

2.1 Aços Carbono

O presente trabalho envolve a soldagem de união de um aço SAE 1030. Aço é uma liga metálica essencialmente formada por ferro e carbono, sendo que o percentual de carbono varia de 0 a 2,11% (CHIAVERINI, 1996).

Este aço é considerado de médio carbono, contendo 0,3% de carbono em sua estrutura. Esse tipo de aço é facilmente soldado levando em consideração o uso de eletrodos de baixo hidrogênio e um pré-aquecimento na peça, a fim de eliminar tensões residuais e reduzir a dureza (MODENESI, 2011).

2.1.1 Aço SAE 1030

O aço 1030, em relação a aços de menor concentração de carbono, possui maior dureza, menor ductilidade e tenacidade. Pode receber tratamento térmico de revenimento e têmpera. É considerado um aço estrutural: utilizado para fabricação de perfis estruturais, construção civil, torres de transmissão, entre outros (CHIAVERINI, 1996).

2.2 Carbono Equivalente

Através do cálculo do carbono equivalente, é possível avaliar a soldabilidade de um aço, relacionando a composição química com a tendência a apresentar estruturas frágeis, quando submetido a processo de soldagem (DURAND, 2007). O Instituto Internacional da Soldagem (IIW) recomenda a seguinte fórmula:

$$CE(IIW) = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} \quad (1)$$

A relação entre o carbono equivalente e a probabilidade de obtenção de microestrutura martensítica é diretamente proporcional. Com menor microestrutura martensítica, melhor será a soldabilidade. Aços com carbono equivalente menor que 0,4 apresentam boa soldabilidade, de 0,4 a 0,6 soldabilidade intermediária e acima de 0,6, má soldabilidade (DURAND, 2007).

Caso o aço não tenha boa soldabilidade, é recomendado realizar tratamento térmico após o processo de soldagem (DURAND, 2007).

Para o aço 1030 utilizado neste trabalho, este possui boa soldabilidade, com um valor de 0,38.

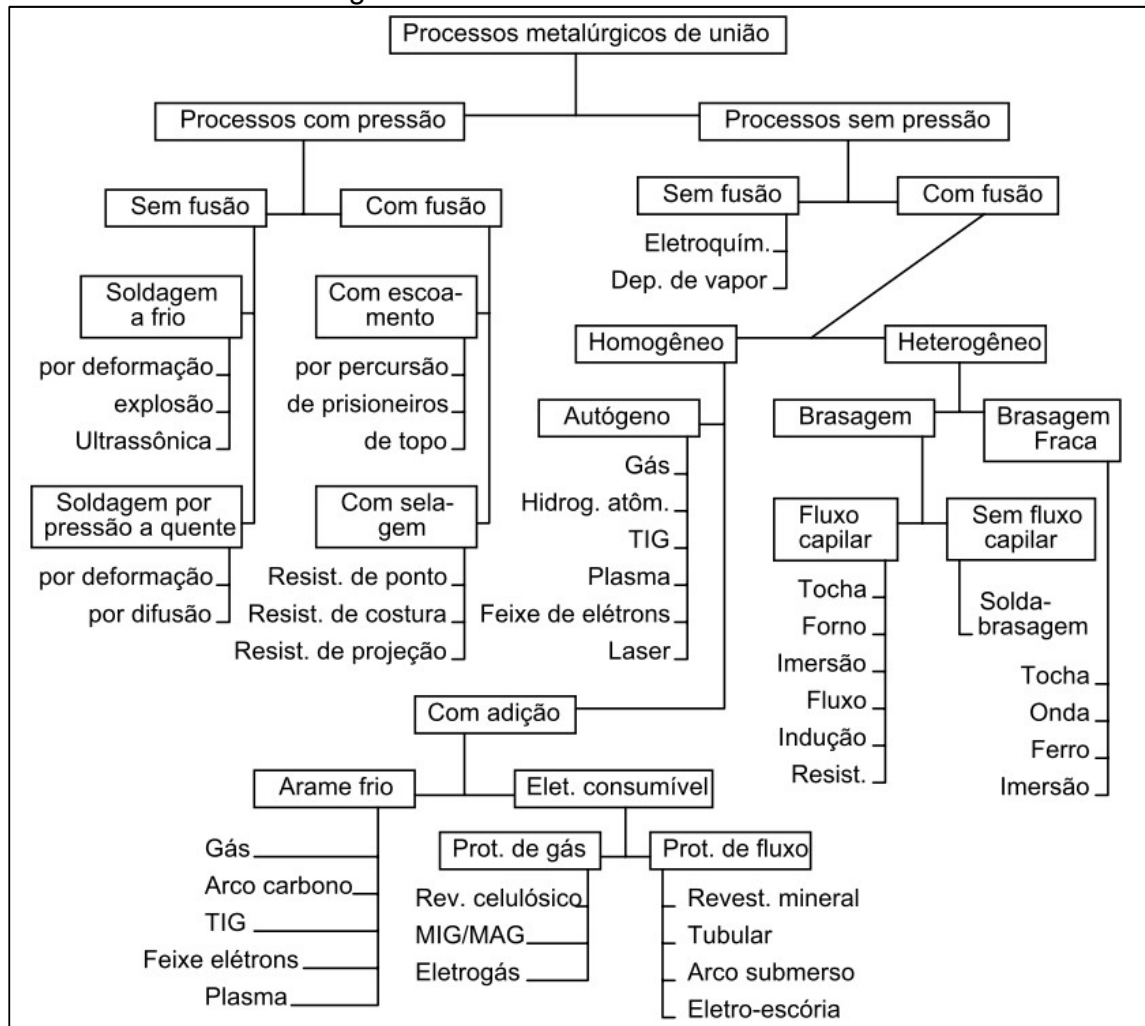
2.3 Processo de Soldagem

O processo de soldagem utilizado no trabalho será explicado simplificada e a seguir.

2.3.1 Solda a arco elétrico

Dentro dos processos de soldagem, encontra-se o processo de solda por fusão, por pressão e brasagem. A solda a arco elétrico faz parte da solda por fusão, que por sua vez, se divide em vários processos, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 – Processos metalúrgicos de união.



Fonte: Principles of Welding, 1999.

O processo de fusão, basicamente, é um processo que une as partes a partir da energia elétrica ou química, sem adição de pressão. O arco elétrico é a fonte de calor mais utilizada na soldagem por fusão de materiais metálicos, pois apresenta uma combinação ótima de características, incluindo uma concentração adequada de energia para a fusão localizada do metal base, facilidade de controle, baixo custo relativo do equipamento e um nível aceitável de riscos à saúde dos seus operadores.

O arco elétrico é uma descarga elétrica, sustentada pelo plasma, ou seja, um gás a alta temperatura. Com energia térmica suficiente, é possível realizar a fusão dos metais na área a ser soldada.

2.3.2 Processo GMAW

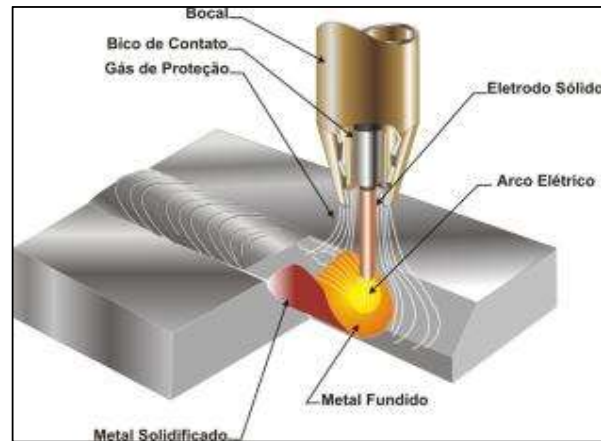
Neste processo de soldagem, a zona do arco e a poça de fusão são protegidas por uma atmosfera gasosa. O método utiliza eletrodo, consumível ou não, e gases inertes, como hélio e argônio. Para o uso de gases inertes, utiliza-se a denominação MIG (*metal inert gas*). Em casos que se utiliza uma porcentagem maior de argônio-CO₂, o gás reage na mistura, sendo assim um gás ativo, portanto, denomina-se MAG (*metal active gas*). No processo de soldagem em questão, o eletrodo é fornecido através do centro de um bocal de solda (OKUMURA e TANIGUCHI, 1982). Os tipos de eletrodos que podem ser utilizados dependem da composição do metal de base e dos gases inertes que são utilizados. Assim, os eletrodos usados no processo são os seguintes (INFOSOLDA, 2015):

- Arames de alumínio e suas ligas;
- Arames de cobre e suas ligas;
- Arames de aço inoxidável e aços com alto teor de Cr;
- Arames de níquel e suas ligas;
- Arames de titânio e suas ligas;
- Arames de aço carbono e aço de baixa liga;
- Arames de magnésio e suas ligas.

A composição química do arame deve ser similar ao metal de base, pois define a composição do metal de solda, assim como suas características. O diâmetro do metal de adição deve ser escolhido de acordo com a espessura da chapa, posição de soldagem, entre outros fatores (INFOSOLDA, 2015).

Ao ser aproximado da peça, o eletrodo produz um arco elétrico, é fundido, e une as partes a serem soldadas.

Figura 2 – Desenho esquemático do processo GMAW.



Fonte: Cruz e Cabral, 2008.

O processo é feito usando uma corrente contínua e polaridade inversa com eletrodo positivo, de maneira a possibilitar estabilidade e melhor penetração do arco, garantindo uma melhor qualidade de cordão. Utilizando polaridade direta, quando não há necessidade de grande penetração, aumenta-se a velocidade de deposição (OKUMURA e TANIGUCHI, 1982).

Com o avanço tecnológico na área de soldagem, o processo GMAW tomou espaço no mercado pela possibilidade de utilizar o processo automático, que pode reduzir o tempo de serviço e aumentar a qualidade do produto final. Historicamente, o processo começou a ser desenvolvido em 1929, por H. M. Robart e P. K. Denver, sendo comercializado em 1948. Os processos de soldagem tiveram uma evolução significativa na época da II Guerra Mundial, dada à necessidade de construir aviões e navios resistentes (BARBEDO, 2011).

No processo MIG, o arame é alimentado através da tocha de soldagem, e o arco elétrico é gerado entre o arame e o metal base. Como gases de proteção, utiliza-se argônio ou hélio, ou uma mistura de ambos. Podem ser adicionados O_2 e CO_2 , com porcentagens entre 2% a 20%. O processo tem as seguintes características: (OKUMURA e TANIGUCHI, 1982).

- Arco elétrico estável, diminuindo a incidência de respingos;
- Corrente de alta densidade permite velocidade de deposição elevada, sendo um processo eficiente;
- Não há formação de escória significativa;
- A junta é elástica, tenaz, hermética e resistente à formação de trincas, sendo superior a processos semelhantes;

- Como desvantagem, o uso de gás inerte encarece o processo.

O processo MIG pode ser utilizado nos mais diversos metais, principalmente aqueles que a soldabilidade é problemática, tais como aços de alta resistência, inoxidáveis e ligas não ferrosas. Este processo proporciona um arco elétrico comprimido, que permite uma penetração profunda na região abaixo do arco, mas não satisfatório para as regiões adjacentes.

Usa-se corrente contínua com tensão constante e polaridade inversa. A polaridade inversa é justificada pela necessidade transferência de metal por névoa, caso contrário, a transferência será globular, o que compromete a qualidade da solda para o caso da MIG.

O processo MAG, que utiliza gás ativo como CO₂ ou outros gases como gás de proteção, é um dos processos mais utilizados na soldagem pelo fato de que o CO₂ é um gás oxidante, o que auxilia na soldagem de estruturas de aço. O custo do processo é baixo em relação aos semelhantes (OKUMURA e TANIGUCHI, 1982).

2.3.3 Industrialização dos Processos de Soldagem

Para diminuir os custos e aumentar o rendimento, com o avanço tecnológico foi possível utilizar processos de soldagem semiautomáticos ou totalmente automáticos.

Na empresa PS Zamprogná, onde é realizada a solda de estudo deste trabalho, é utilizado um meio semiautomático para soldagem das chapas na linha de produção. O equipamento utilizado é mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Máquina de Solda Semiautomática.



Fonte: acervo do autor.

De acordo com Wainer (1992), o posicionador é o nome dado a um sistema mecânico ou eletromecânico que movimenta e suporta a estrutura para a posição a ser soldada ou outros usos. O posicionador influencia em vários fatores da soldagem, como taxa de deposição, habilidade do operador, qualidade da solda e investimento. A melhor posição para o posicionador é a plana, pois é a mais fácil de ser controlada pelo operador, o que diminui o valor da mão de obra.

A máquina utilizada pertence à linha Starweld Zikeli, modelo Starweld 390x3, que possui as características exibidas na Tabela 1.

Tabela 1 – Especificações do equipamento de solda.

Especificação	Modelo 390x3
Espessura até (mm)	3,75
Largura de chapa até (mm)	390
Sistema de solda	TIG-200A
Avanço da tocha	Automático
Corte	Guilhotina hidráulica
Posicionamento da chapa	Manual
Fixação da chapa	Hidráulico
Tempo de ciclo (min)	1 a 3

Fonte: adaptado de ZIKELI, 2015.

A facilidade do uso deste equipamento para empresa é pela redução do tempo na troca de bobinas na linha de produção, o que garante uma produção contínua, unindo as extremidades das mesmas através de soldagem. A Figura 4 mostra a solda executada na empresa.

Figura 4 – Realização da solda.



Fonte: acervo do autor.

Na questão de aspectos econômicos, a automatização do processo permite maior qualidade da solda, pois as variáveis são controladas por dispositivos eletrônicos ou eletromecânicos. O nível de produção é maior, pois o tempo de execução é menor, o que aumenta a produtividade. Meios insalubres ou de difícil acesso dificultam o trabalho do soldador, a solda automática ou semiautomática pode facilitar o trabalho.

2.3.4 Eficiência da Junta Soldada

A razão entre a tensão admissível da junta pela tensão admissível do metal base é considerada a eficiência da junta soldada. É uma redução de tensão em relação a tensão admissível do metal base. Existem fatores determinantes para a eficiência, que pode ser expressada através da equação 1:

$$\text{Eficiência da junta } (\eta) = \frac{\text{Tensão admissível da junta } (f_w)}{\text{Tensão admissível do metal base } (f)} \quad (2)$$

A eficiência da junta soldada é influenciada por:

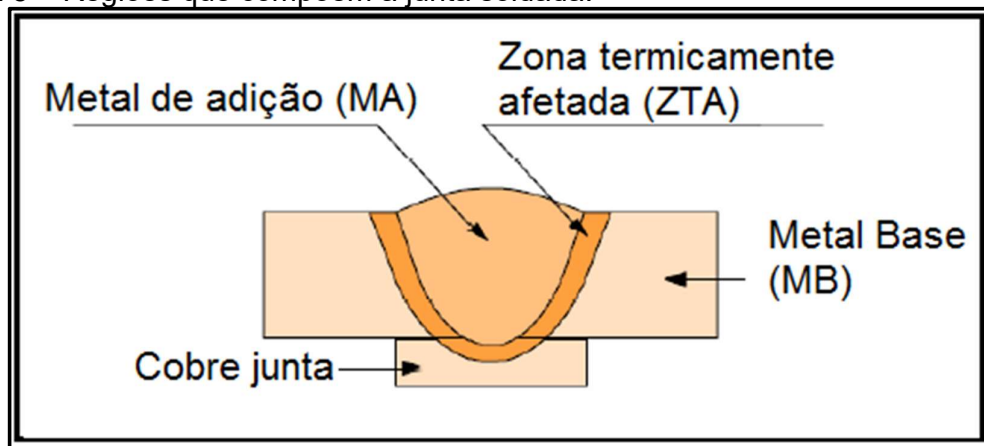
- Processo de soldagem;
- Material de solda;

- Ambiente de soldagem e posição;
- Acabamento;
- Tratamento térmico;
- Tipo de junta a ser soldada.

2.4 Metalurgia da Soldagem

De acordo com Abreu (2008), a região soldada compreende não somente no cordão de solda, mas também pelas regiões adjacentes, onde ocorreram alterações de suas condições iniciais. Uma junta soldada é formada composta de metal de adição (MA), metal base (MB) e zona termicamente afetada (ZTA). A região do metal de adição é a parte do metal base e metal de adição que foram fundidos, formando o cordão de solda. A zona termicamente afetada é a região que não foi fundida, mas teve alterações microestruturais o calor do processo. Metal base é a região que não sofreu alterações na microestrutura. A Figura 5 mostra um desenho esquemático das regiões citadas anteriormente.

Figura 5 – Regiões que compõem a junta soldada.

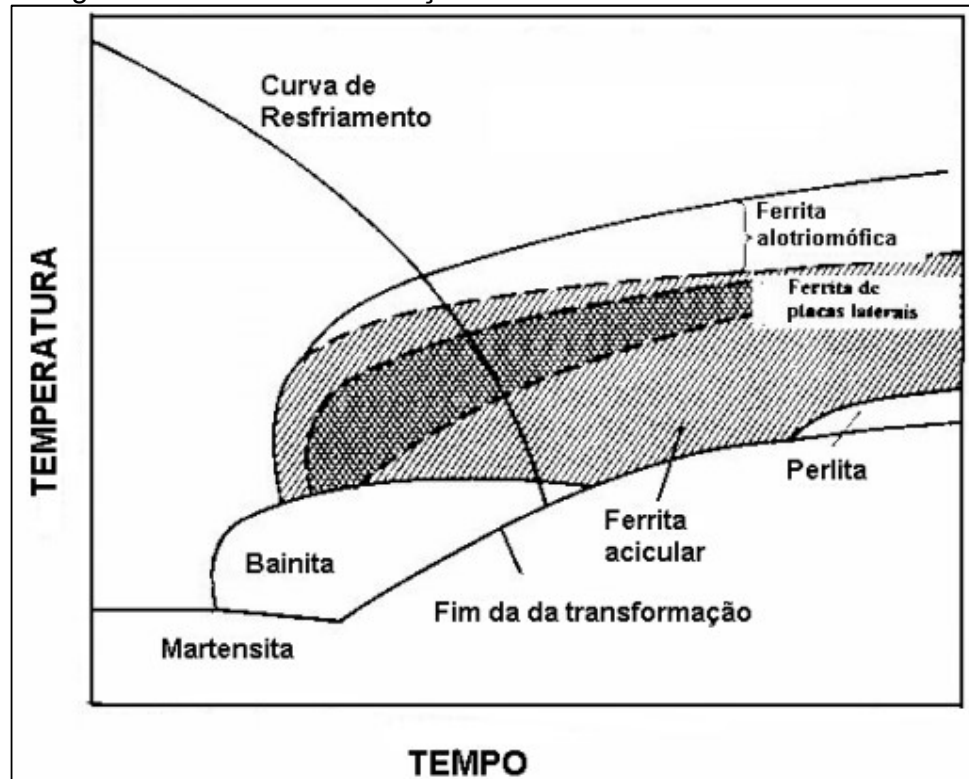


Fonte: adaptado de Abreu (2008).

Na questão metalúrgica, a soldagem é considerada um processo complexo pelas transformações que acontecem no estado sólido do aço. A zona fundida ou metal de adição é uma área que possui gradiente térmico considerável, diferindo dos tratamentos térmicos tradicionais em função da elevada temperatura e tempo de resfriamento curto.

Através do diagrama de transformação de fases sob resfriamento contínuo (CCT), é possível verificar a influência da temperatura do processo.

Figura 6 – Diagrama CCT da transformação da austenita.



Fonte: BUENO, 2010.

Através desse diagrama é possível verificar as possíveis microestruturas presentes no material de acordo com a velocidade de resfriamento. Para cada tipo de aço existem diferentes curvas de resfriamento; quanto maior o teor de elementos de liga e carbono, mais para a direita a curva será deslocada.

A identificação desses microconstituintes se dá pelo uso de microscópio eletrônico (MO), e caracterizam-se através da identificação da distribuição, coloração de fases, forma e tamanho dos constituintes.

2.4.1 Características do Metal Fundido

De acordo com Modenesi (2004), na soldagem de aços de baixo carbono e baixa liga, a solidificação da poça de fusão inicia-se como ferrita, sofrendo reação peritética com a formação de austenita. Ao longo do resfriamento, a austenita remanescente se transforma em ferrita. A ferrita sofre grande crescimento do grão, com a elevação da temperatura. Assim, apresenta uma estrutura de grão colunar e

grosseiro, equivalente a estrutura original de fusão da zona fundida. Com temperaturas abaixo de 900°C, ocorre decomposição da austenita, podendo resultar diferentes constituintes e produtos.

O crescimento epitaxial colunar do metal de adição solidificado compõe a microestrutura da zona termicamente afetada, que é influenciada pelo estado inicial da austenita, condições de aquecimento, resfriamento e efeito dos elementos de liga.

As principais microestruturas formadas na zona fundida estão listadas na Tabela 2. Este sistema de classificação foi desenvolvido pelo Instituto Internacional de Soldagem (IIW) reunindo os microconstituintes mais comuns vistos pelo microscópio óptico, sendo um dos sistemas de classificação mais aceitos atualmente.

Tabela 2 – Principais constituintes da zona fundida.

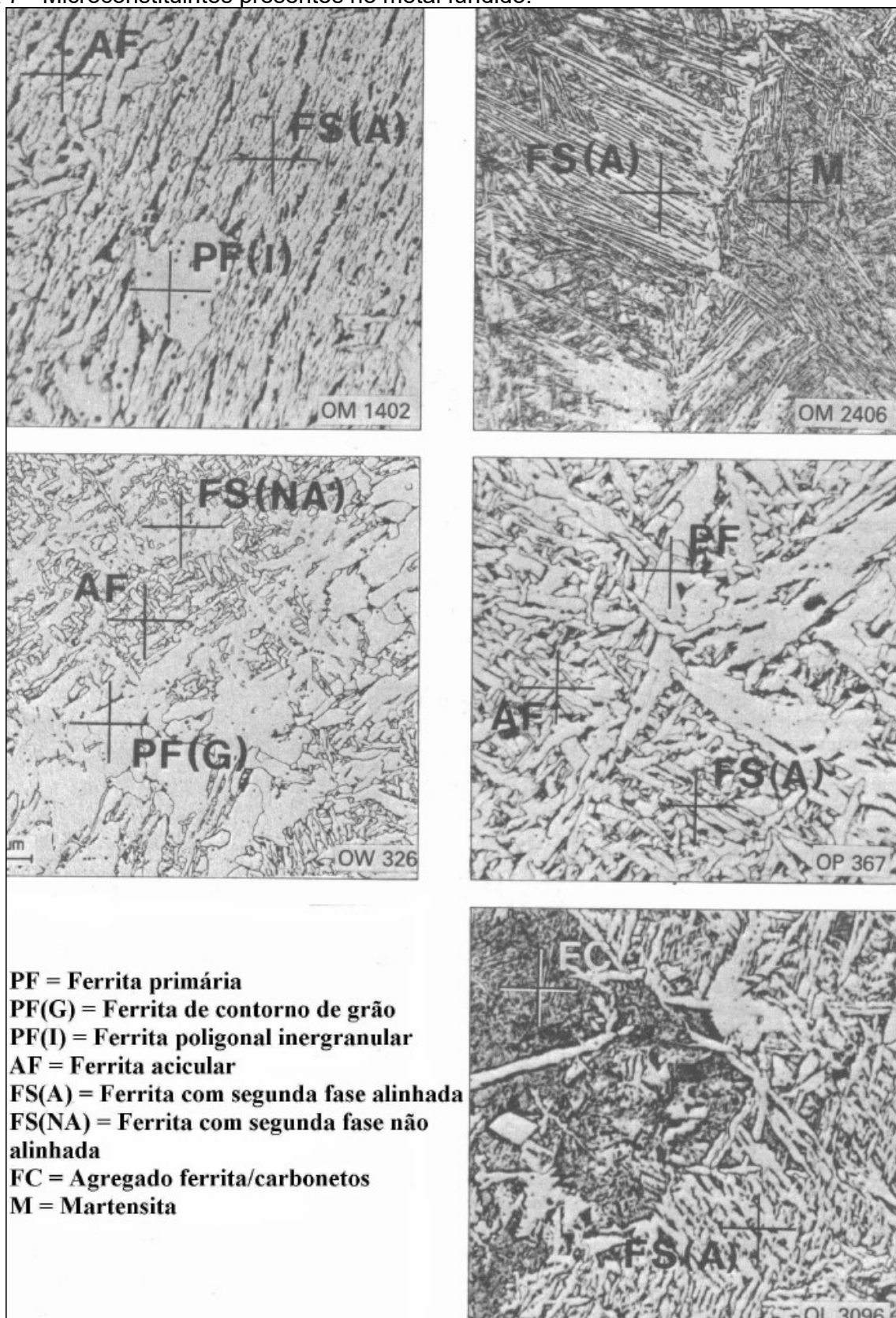
Constituinte	Sigla	Descrição
Ferrita primária (Ferrita de contorno de grão)	PF (G)	Veios de grãos poligonais associados com os contornos austeníticos prévios
Ferrita primária (Ferrita poligonal intragranular)	PF (I)	Grãos de ferrita usualmente poligonais, localizados dentro dos grãos austeníticos prévios, no mínimo 03 vezes maiores do que os grãos ou lâminas adjacentes de ferrita
Ferrita Acicular	AF	Grãos de ferrita pequenos e não alinhados localizados no interior dos grãos auteníticos prévios. Uma região de AF comumente inclui placas isoladas de grande razão de forma (relação entre o maior e o menor eixo)
Ferrita com segunda fase alinhada	FS (A)	Duas ou mais placas paralelas de ferrita. No caso de apenas duas placas, a razão de forma deve ser maior do que 4:1 Este constituinte pode ser subclassificado como: 1. Placa lateral de ferrita FS (SP);

		2. Bainita superior FS (UB), ou inferior FS (LB)
Ferrita com segunda fase não alinhada	FS (NA)	Ferrita envolvendo completamente: <ol style="list-style-type: none"> 1. Microfases aproximadamente equiaxiais ou distribuídas aleatoriamente; ou 2. Lâminas isoladas de AF
Agregado Ferrita Carboneto	(FC)	Estruturas finas de ferrita e carboneto, incluindo ferrita com carbonetos interfásicos e perlita. Se o agregado é claramente identificado como perlita, ele deve ser designado como FC (P). Se o agregado for menor que as lâminas adjacentes dentro do grão austenítico prévio, ele deve ser desprezado.
Martensita	M	Colônias de martensita maiores que as lâminas adjacentes de ferrita. O constituinte pode ser classificado como: <ol style="list-style-type: none"> 1. Martensita laminar M(L); 2. Martensita maclada M(T).

Fonte: MODENESI, 2004.

A representação dos microconstituintes citados na Tabela 2 podem ser observados na Figura 7.

Figura 7 - Microconstituintes presentes no metal fundido.



Fonte: Mondenesi (2004)

Para aços carbono, considera-se o tamanho médio do grão como forma de atribuir a propriedade mecânica mais adequada da zona fundida, porém, este fator não pode ser diretamente correlacionado por que existem outros a serem considerados, sendo: inclusões, dureza, constituintes ricos em carbono, morfologia e distribuição de carbonetos, quantidade de constituintes, entre outros (MODENESI, 2002).

Em termos gerais, pode-se afirmar que quanto menor o tamanho do grão ferrítico, maior será o limite de escoamento da zona fundida. O tamanho do grão austenítico prévio e temperatura de transformação estão em função do ciclo térmico de soldagem (MODENESI, 2002).

O processo GMAW não apresenta grande energia de soldagem, o que propicia crescimento de grão com granulação mais fina. Essa configuração faz com que o metal de solda tenha maior densidade de deslocações, contribuindo para um maior limite de escoamento na região, tendo um valor maior quando comparado ao metal base. Porém, ressalta-se que um elevado limite de escoamento gera tensões residuais e pode gerar problemas de fissuração por corrosão sob tensão. Pode-se avaliar este parâmetro a partir de uma relação com a medição da dureza do material (MODENESI, 2002).

A tenacidade da zona fundida depende não apenas da energia absorvida no processo de fratura, mas também no estado de tensões, temperatura, meio ambiente, velocidade de deformação e microestrutura do material. A possibilidade de fratura frágil e instável está ligada a uma baixa tenacidade, podendo esta fratura ocorrer de maneira instantânea e inesperada, abaixo, inclusive do limite de escoamento do material. De maneira idealizada, um metal de solda com boa tenacidade deve apresentar em sua microestrutura uma predominância de ferrita acicular fina (MODENESI, 2002).

Inclusões na zona fundida influenciam a temperabilidade, mas também diminuem o platô de energia absorvida na fratura dúctil, pela formação de vazios. Inclusões de grandes dimensões (muitos micrômetros de diâmetro) oportunizam o aparecimento de nucleação de trincas de clivagem, prejudicando a tenacidade da junta (MODENESI, 2002).

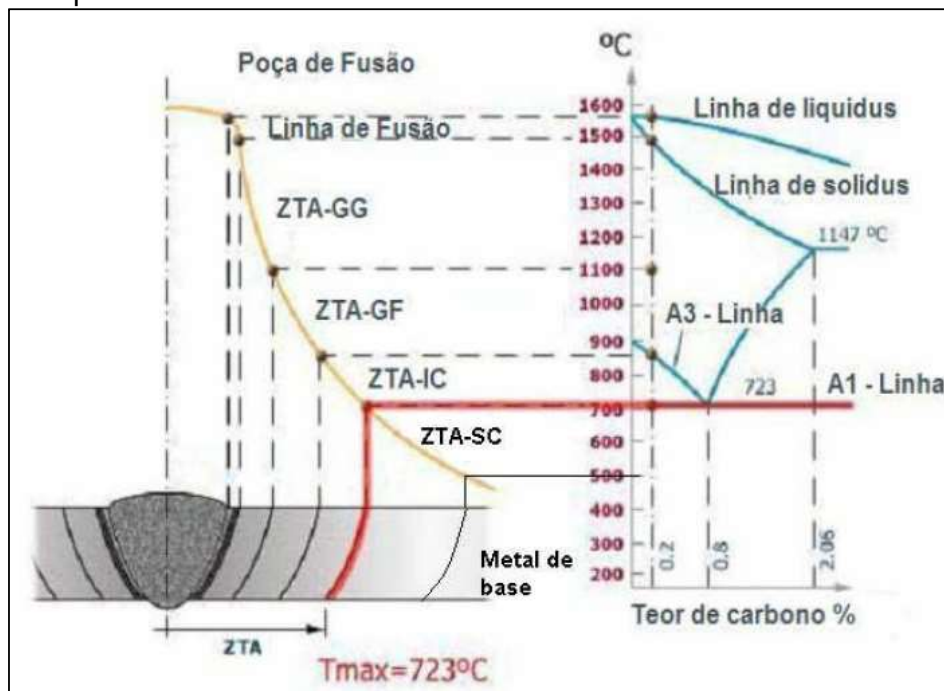
Para que o metal fundido possa ter boa resistência a fissuração, dureza e tenacidade, o teor de carbono ideal deve estar entre 0,05 e 0,15%.

2.4.2 Características da Zona Termicamente Afetada

A zona termicamente afetada é a região adjacente ao metal fundido e que sofre alterações em sua microestrutura em função da alta temperatura em que ocorre o processo. Esse ciclo térmico que a zona fundida é submetida causa alterações microestruturais e nas propriedades mecânicas do material.

A ZTA possui várias subzonas, classificadas de acordo com o pico de temperatura que o material esteve submetido. Para um passe único de solda, a Figura 8 mostra as subzonas e suas respectivas temperaturas.

Figura 8 – Temperaturas e estrutura da ZTA.



Fonte: FOSCA PASTOR, 2003.

A ZTA pode ser dividida em quatro zonas, como mostra a Figura 8. As características de cada uma das zonas estão descritas a seguir, conforme Kou (2002), Lancaster (1999) e Porter (2002).

1. **Zona de grão grosseiro (ZTA-GG)**, tem temperatura entre 1100 e 1450 °C. O grão austenítico cresce quando a região atinge uma temperatura de aproximadamente 1200°C. O tamanho do grão austenítico está em função do ciclo térmico de soldagem e temperatura de formação do grão. O tamanho desse grão determina a microestrutura resultante e a

transformação estrutural dentro do grão, que é função da taxa do resfriamento da junta soldada.

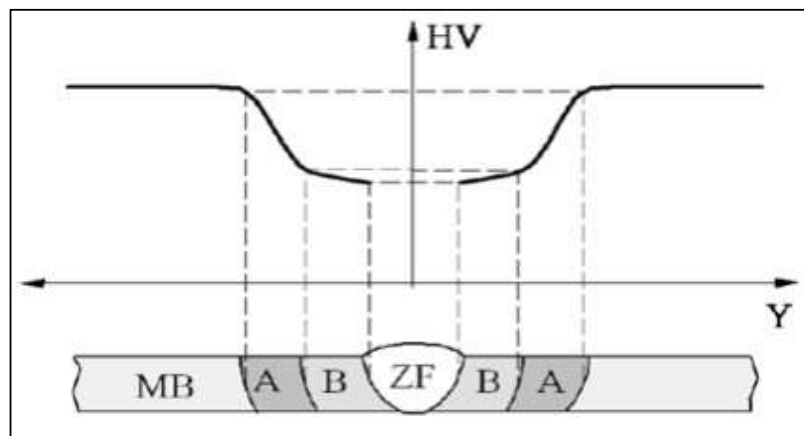
2. **Zona de grão fino (ZTA-GF)**, possui temperatura de 1100°C, localizada na linha A3. Nessa região, o crescimento do grão austenítico é lento e o tamanho do grão é pequeno. Há formação de nitretos ou carbetos quando há alumínio, nióbio, titânio e vanádio no material, que atuam como aditivos de refinamento do grão. Logo, com o refinamento, não há ou é reduzido o movimento do contorno do grão austenítico. A austenita-ferrita tem tendência a formação de estrutura de ferrítico-bainítico ou ferrítico-perlítico, durante o resfriamento do material. Essa formação de estrutura ocorre em razão ao alto número de contornos de grão, promovendo a formação de ferrita de contorno de grão. Esta situação enriquece a austenita excedente em carbono, sendo transformada em perlita ou bainita, de acordo com a taxa de resfriamento e quantidade de carbono, bem como os elementos de liga do metal base.
3. **Zona intercrítica (ZTA-IC)**, na figura, a região está compreendida pelas linhas A1 e A3. Em aços ferrítico-perlíticos, no aquecimento, há uma transformação rápida das ilhas de ferrita em fase austenítica. Novamente, a austenita enriquecida em carbono, no resfriamento, se transforma em bainita superior, perlita, matensita autorevenida ou martensita de alto carbono.
4. **Zona subcrítica (ZTA-SC)**, a região dessa zona é na temperatura menor que a linha A1. Não há uma mudança observável na microestrutura, exceto pela degradação de perlita lamelar à partículas esferoidais de cementita (Fe_3C) que pode ocorrer, sendo dificilmente detectada. Pode ocorrer envelhecimento de esforço dinâmico por conta do efeito combinado de aquecimento, que é entre 100 e 300°C, e tensões residuais. Associa-se esse fenômeno a uma fina camada de impurezas (C e N) em discordâncias dentro de grãos ferríticos, fragilizando a estrutura.

Em relação a dureza, com os valores encontrados nos ensaios é possível determinar se há fragilização e sensibilidade a fissuração. Para aços de baixa liga, uma dureza acima de 350 HV é considerada excessiva e indica que pode haver rompimento do cordão quando solicitado (MONDENESI, 2002). A região da solda

tende a apresentar menor dureza do que o metal base em função da perda de encruamento com a recristalização (SCHIO, 2013).

A Figura 9 mostra o comportamento da dureza em relação a três regiões distintas: metal base, onde o valor da dureza é maior; região de recristalização, em que o valor é intermediário e isso ocorre em razão do ciclo térmico, que é suficiente para permitir uma recristalização, que substitui a estrutura deformada por uma sem deformação; e, por fim, a região grosseira, onde o ciclo térmico não permite a recristalização e há crescimento de grãos grosseiros, diminuindo a resistência mecânica (SCHIO, 2013).

Figura 9 – Esquema da variação da dureza na ZTA de aços de baixo e médio carbono. (A) Região de recristalização. (B) Região de granulação grosseira.

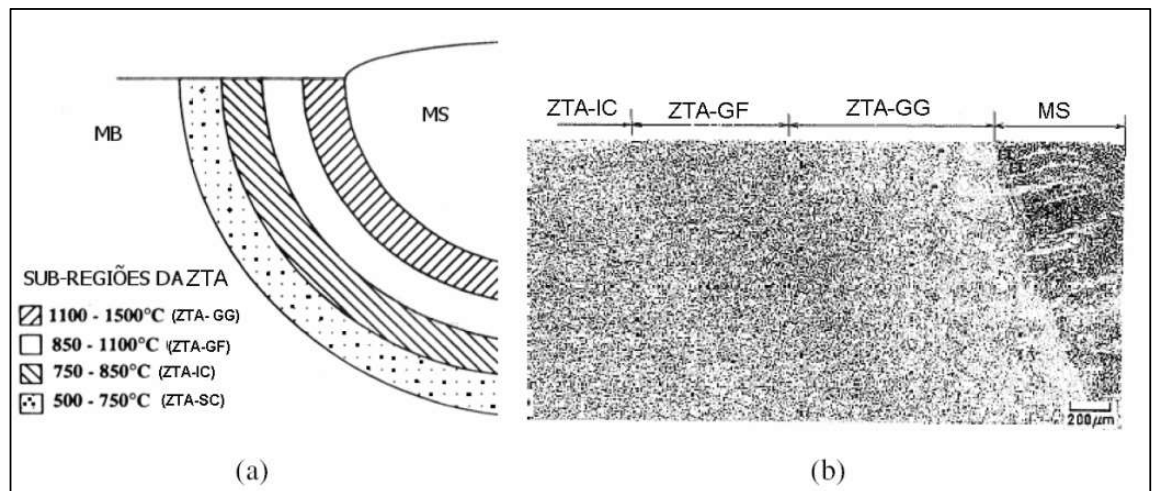


Fonte: SCHIO, 2013.

A velocidade de resfriamento, temperabilidade e ciclo térmico são fatores que influenciam na dureza, sendo a velocidade o fator principal dessa grandeza. A composição química do material é expressa através do cálculo do carbono equivalente, e a temperabilidade depende da composição química (MONDENESI, 2002).

A ZTA-GG tem maior probabilidade de sofrer fragilização durante a soldagem, sendo que o ciclo térmico, temperatura de crescimento do grão, microestrutura, microestrutura final, tamanho, forma, quantidade e composição das inclusões, entre outros fatores, podem afetar a tenacidade da ZTA e comprometer a eficiência da solda. Em aços de baixa temperabilidade, a velocidade de resfriamento alta produz uma estrutura mais fina e, por conseguinte, menos fragilidade. Processos com elevada energia de soldagem geram ZTA grosseira e com menos tenacidade (MONDENESI, 2002).

Figura 10 – Desenho esquemático (a) e macrografia (b) da ZTA.



Fonte: TAGAWA, *et al* (1993).

2.4.3 Principais variáveis de soldagem

As variáveis de soldagem, segundo a norma ASME, seção IX, edição 1983, se dividem em três tipos:

- Variáveis essenciais: variáveis que, havendo uma mudança para uma variável específica, é considerada como alteradora das propriedades mecânicas da peça soldada.
- Variáveis essenciais suplementares: variáveis requeridas em metais para testes de impacto, conforme especificação para tal.
- Variáveis não essenciais: mudanças em variáveis específicas que podem ser introduzidas na Especificação dos Procedimentos de Soldagem, sem que haja necessidade de requalificação.

Estas variáveis são gerais, ou seja, para todos os processos de soldagem. Na solda MIG/MAG, as variáveis do processo para qualificação do procedimento são as exibidas na Tabela 3, conforme classificação.

Tabela 3 – Variáveis do processo.

Variável essencial	Variável essencial complementar	Variável não essencial
Metal-base	Preaquecimento	Tipo de junta
Metal de adição	Tipo de gás de proteção	Posição de soldagem
Tratamento térmico após o processo		Características elétricas
		Técnica de soldagem

Fonte: adaptado de Wainer, 1992.

2.4.4 Defeitos do Metal de Solda

Assim como qualquer material, o metal de solda pode sofrer defeitos das mais diversas origens, sendo eles (ESAB BR, 2005):

- Trincas de solidificação ou trinca a quente: Ocorre devido à escolha de um eletrodo de composição similar ao de cordão de base. Isso pode ocorrer, com exceção à aços de alto teor de liga, pois possuem temperatura de solidificação muito maior que outras ligas, as tornando suscetíveis à fissuração de solidificação. Também pode ocorrer em aços de baixo carbono, que, caso possuam altos valores de enxofre, levando a fissuração no centro da solda. A fissuração pode levar a quebra da união, e a maneira de contornar este problema é através da penetração não muito profunda.
- Trincas induzidas por hidrogênio no metal de solda: Ocorre em temperaturas próximas a ambiente. O hidrogênio no cordão de solda se fixa, em sua maioria, na zona termicamente afetada (ZTA). Com o resfriamento, a austenita, que é formada na ZTA, dificulta a difusão do hidrogênio, que leva a fissura do cordão.
- Porosidade: Podem ocorrer em três situações, o resultado de reações químicas, a partir da oxidação do ferro e o carbono, liberando monóxido de carbono; no início da soldagem manual com eletrodo revestido, já que nesta região não há proteção contra os gases na atmosfera; aprisionamento de gases de proteção na base da poça de fusão. A porosidade pode ser evitada, mas caso ocorra, não é um defeito de grande perigo, apenas quando ocorre na superfície, que pode levar a uma falha por fadiga.

- Inclusões de escória ou outras inclusões: inclusões são partículas do fluxo que ficam para trás, formando o defeito. Ocorre por má perícia do operador.
- Trincas de cratera: Este defeito acontece devido a altas velocidades de soldagem e rápida remoção da fonte de calor, fazendo a poça de fusão se solidificar com um vazão chamado cratera. Esta cratera possui trincas, levando a quebra do material.
- Falta de fusão: É causada por corrente de soldagem muito baixa e velocidade inadequada

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para determinação das propriedades de um material, são necessários ensaios mecânicos programados, que possam reproduzir as condições de serviço. O conhecimento da estrutura e propriedade do material é de fundamental importância na escolha de materiais para projeto de estruturas ou componentes, de maneira a evitar níveis demasiados de deformação ou alto custo de projeto, devido ao superdimensionamento de componentes.

Os principais fatores considerados em ensaios mecânicos são: natureza da carga aplicada, duração da mesma e condições ambientais. Tais cargas podem ser de tração, compressão ou cisalhamento, e a magnitude flutuante ou constante. O tempo de aplicação também é variável, de fração de segundos a vários anos.

Para manter uma normalização dos ensaios, com objetivo de manter o padrão de qualidade e credibilidade das amostras, existem órgãos regulamentadores que são responsáveis pela elaboração de normas para cada tipo de ensaio. Nos Estados Unidos, por exemplo, existe a *The American Society of Mechanical Engineers – ASME* (Sociedade dos Engenheiros Mecânicos dos Estados Unidos) e no Brasil, o órgão regulamentador é a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (TEÓFILO, 2014).

3.1 Materiais

O material utilizado pela empresa e analisado neste trabalho foi o aço AISI 1030 laminado, soldado com arame ER70S-6, conforme especificação da AWS A5.18 (2001), com diâmetro de 2,4 mm, em chapas metálicas de diferentes espessuras. A solda foi realizada em junta de topo, no dispositivo de solda, sem chanfros, de forma a unir as chapas, não havendo preocupação com o tamanho do vão de raiz. A solda foi realizada por um equipamento semiautomático em apenas um passe e não houve pré-aquecimento do metal base antes da solda nem tratamento térmico posterior.

A tabela mostra a composição química do metal base. Estes dados foram obtidos através do espectrômetro da UNIPAMPA, utilizando as amostras deste trabalho.

Tabela 4 – Composição química (%) do metal base.

Linha	Fe	C	Mn	P	S
Media	00.002,12	00.000,28	00.001,11	00.000	00.000
Desvio %	00.035,05	00.045,14	00.041,99	00.031	00.036

Fonte: acervo do autor.

As propriedades mecânicas do metal base são (ASTM, 2009):

- Resistência à tração: 470 MPa;
- Limite de escoamento: 260 MPa;
- Alongamento: 20%;
- Dureza: 137 HB.

O arame utilizado para realizar a solda possui composição química conforme mostra a Tabela 5.

Tabela 5 – Composição química (%) do metal de adição.

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	V	Cu	Mo	Nb
0,16	1,5	0,55	0,03	0,025	0,6	0,3	0,1	0,5	0,3	0,08

Fonte: ESAB (2017)

As propriedades mecânicas deste metal de adição são (ESAB, 2013):

- Limite de resistência mecânica: 560 MPa;
- Tensão de escoamento: 480 MPa;
- Alongamento: 26%.

3.2 Métodos

Para realização dos ensaios de tração, micrografia e microdureza foram confeccionadas 25 amostras, sendo que:

- 05 amostras para micrografia e microdureza,
- 15 corpos de prova para o ensaio de tração.

A solda foi realizada por uma máquina semiautomática que utilizou os seguintes parâmetros de soldagem:

Tabela 6 – Parâmetros de soldagem utilizados no processo.

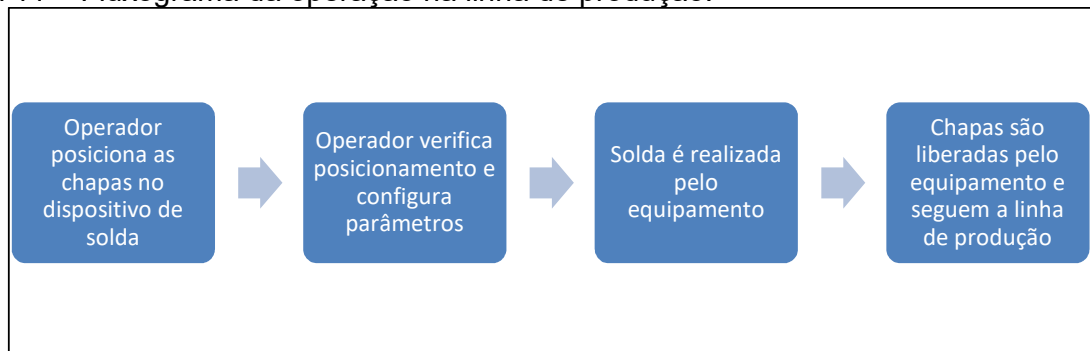
Corrente	120 A
Diâmetro do eletrodo	2,4 mm
Fluxo de argônio	10 l/mm
Altura do eletrodo	2 mm
Velocidade	175 mm/min

Fonte: autoria própria.

Na Figura 12 é possível visualizar a disposição do equipamento na linha de produção quando não está em uso.

Para realização da solda, o operador posiciona as duas chapas no equipamento e certificava-se de que estas estavam presas no posicionador (Figura 13). Assim, o equipamento era ligado com os parâmetros supracitados e o cordão era realizado pelo equipamento. Ao fim do processo, o operador solta as chapas do posicionador e estas seguem a linha de produção. A tocha é movida com auxílio de motor elétrico e os parâmetros eram alterados no quadro de comando elétrico anexado ao equipamento.

Figura 11 – Fluxograma da operação na linha de produção.



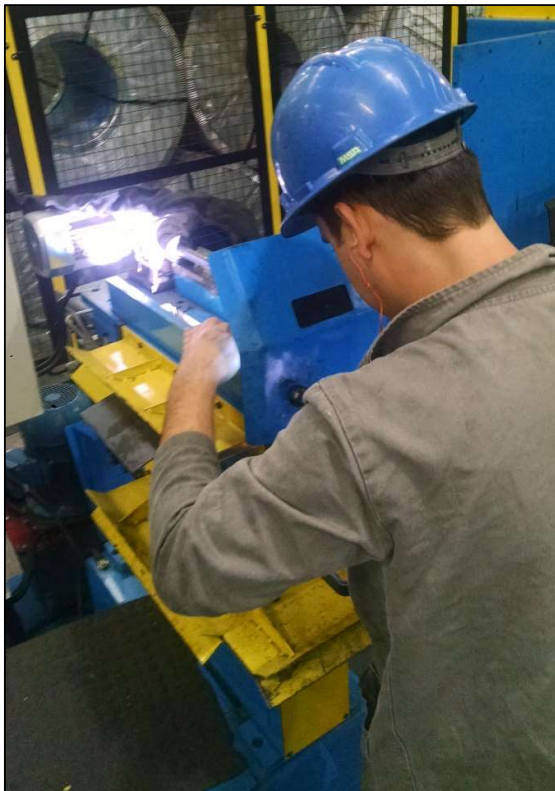
Fonte: autoria própria.

Figura 12 – Disposição do equipamento na linha de produção.



Fonte: acervo do autor

Figura 13 – Operador posicionando as chapas.

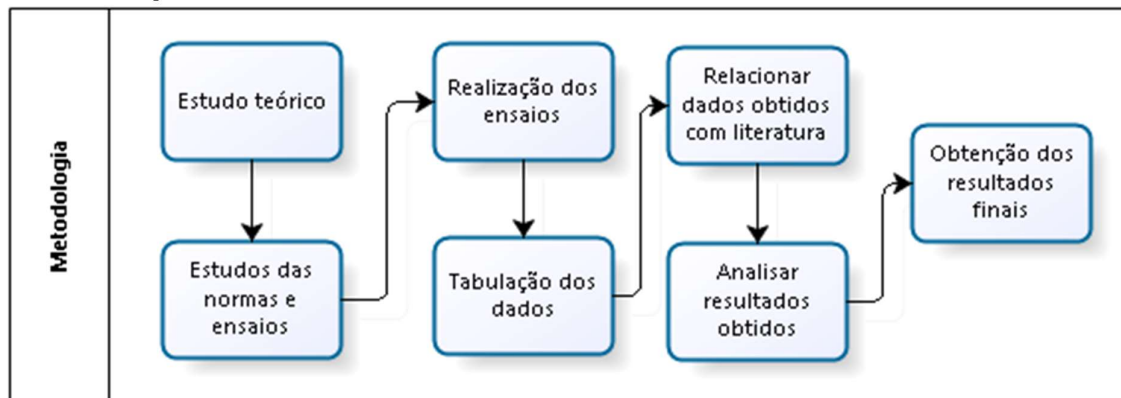


Fonte: acervo do autor

3.2.1 Fluxograma de atividades

As atividades desenvolvidas no trabalho seguem o fluxograma exibido na Figura 14.

Figura 14 – Fluxograma de atividades.



Fonte: autoria própria.

Fluxograma é o conjunto de atividades executadas a partir de uma lógica programada. Realizou-se a parte teórica para que em seguida fossem realizados os ensaios dos materiais. Posteriormente, os dados foram tabulados e comparados com a literatura, afim de obter os resultados finais deste trabalho.

3.2.2 Espectrometria

Espectrometria de emissão óptica com emissão de centelha é utilizada para identificar compostos desconhecidos através de uma técnica analítica. A partir desse ensaio, pode-se quantificar materiais conhecidos e identificar a composição química de dado material (AZEVEDO, 2004).

Neste ensaio, utilizou-se o espectrômetro B2 Advanced, com a finalidade de determinar a composição do aço enviado para análise. O espectrômetro é composto de uma fonte de excitação, uma centelha compacta de baixa voltagem e alta energia controlada por computador. De acordo com o metal e a liga analisados, usa-se determinada amplitude da corrente de descarga, duração do pulso e taxa de repetição. Além disso, a máquina conta com um sistema óptico conhecido como Paschen-Runge, com distância focal de 500 mm. O sistema de leitura do equipamento fornece leitura, teste e sinais analíticos do espectrômetro. O software utilizado para análise computacional é o WINCCD (ANACOM CIENTÍFICA, 2016).

3.2.3 Ensaio de micrografia

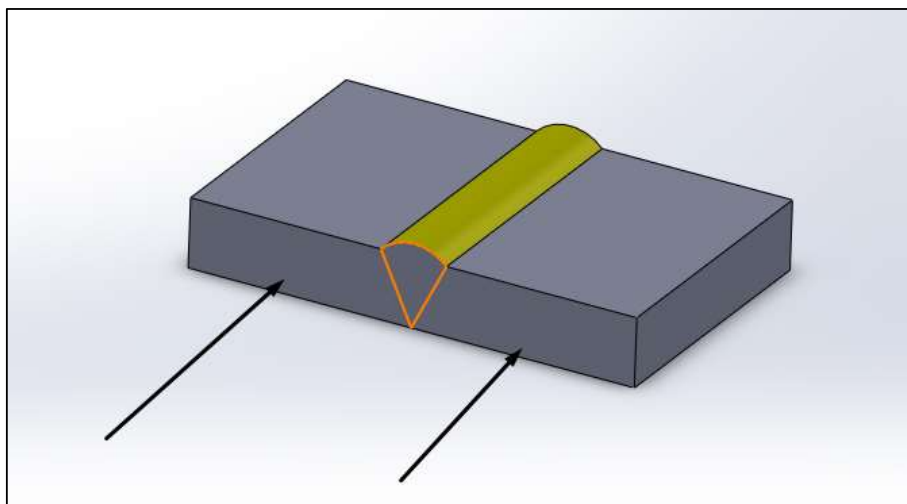
O ensaio metalográfico é importante, pois é um meio eficiente e seguro de avaliação da qualidade do material, podendo inclusive corrigir defeitos e melhorar a qualidade.

Relacionar as propriedades do material com os aspectos de fabricação é a principal utilidade deste ensaio, que se divide em macrografia e micrografia. A macrografia analisa o aspecto da superfície da amostra, polia e atacada conforme norma. Através da macrografia, pode-se investigar a homogeneidade, distribuição e natureza de falhas e impurezas. A micrografia investiga os aspectos metalúrgicos com auxílio de microscópio, observando a granulação do material, natureza, forma, quantidade e distribuição de vários constituintes ou inclusões (BAPTISTA *et al*, 2015).

A análise microestrutural é dada por meio da caracterização, através da qual é possível avaliar a composição, as fases presentes e tratamento térmico a que o material foi submetido. Esses dados são necessários para verificar a estrutura do material quando em uso e para especificar suas aplicações. Na análise microestrutural alguns equipamentos podem ser utilizados no estudo de uma microestrutura, como o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), Difrátômetro de Raios (DRX), Espectrômetro de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS), além desses equipamentos mais sofisticados existem os microscópios óticos, e para a preparação metalográfica de amostras são utilizadas cortadoras, embutidoras, lixadeiras e politrizes (MONDENESI, 2011).

Para remoção da amostra, retirou-se uma pequena amostra da chapa, na região do cordão de solda. O corte foi realizado em uma serra metalográfica. Para análise da microscopia do material, foi usada a seção transversal da amostra, como mostra a Figura 15, de maneira a exibir a zona fundida, zona termicamente afetada e metal base, regiões indicadas pelas setas da Figura 15.

Figura 15 – Desenho esquemático da seção transversal da amostra.



Fonte: autoria própria

Após o corte, as amostras foram embutidas a quente com baquelite. Lixadas com lixa d'água de granulometrias 120, 220, 320, 400, 600, 800, 1200, 2000 e 2500. Em seguida, estas foram polidas na politriz com alumina e foram atacadas com solução de Nital 3% durante 6 segundos e observadas no microscópio ótico de reflexão DiagTech modelo XJM104, obtendo imagens através de uma câmera fotográfica acoplada a uma lente para fotografar a amostra com ampliações de 100x, 200x, 400x e 800x.

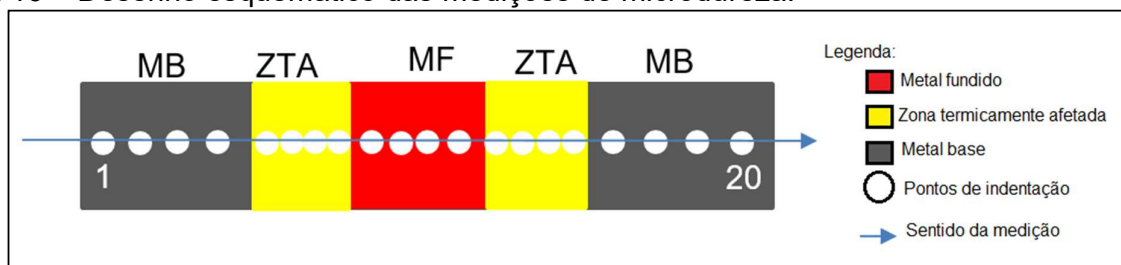
3.2.4 Análise da Microdureza Vickers

Para se conhecer o comportamento da propriedade de microdureza na zona fundida, zona termicamente afetada e metal base, foi realizado um ensaio de microdureza Vickers em todas as amostras. Realizada em um equipamento da marca Buehler/Wilson, modelo Tukon 1102, os dados foram coletados em diversos pontos de cada uma das regiões. A carga utilizada para ensaio foi de 0,5 kgf com tempo de endentação de 15 segundos.

Foram realizadas quatro medições de microdureza nas distintas regiões que compunham as amostras, metal base, zona termicamente afetada e a solda em si, como mostra o esquema na Figura 16. A distância entre os pontos de endentação é de aproximadamente 0,15 mm. Apesar de três medidas serem consideradas confiáveis, foi decidido realizar a quarta medição, pois algumas amostras possuíam defeitos perceptíveis a olho nu, sendo ligeiramente irregular.

O tamanho médio das amostras analisadas é de 30 mm; portanto, a distância de medição de cada um dos pontos é de 0,15 mm para cada uma das regiões estudadas.

Figura 16 – Desenho esquemático das medições de microdureza.



Fonte: autoria própria.

3.2.5 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil, do Departamento de Engenharia Civil da UNIPAMPA Alegrete. A máquina de ensaio utilizada é da marca EMIC, modelo GR048, conforme mostra a Figura 17.

Figura 17 – Máquina de tração usada no trabalho.



Fonte: acervo do autor

Os corpos de prova foram submetidos à carga de tração axial ao longo do comprimento do corpo. A máquina fornece os valores de alongamento, tempo e força.

Assim, foi calculado a deformação e a tensão. Para o cálculo da deformação, é utilizada a equação 3.

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3)$$

Em que l_0 é o comprimento inicial, l_i é o comprimento instantâneo e Δl é o alongamento em um certo instante.

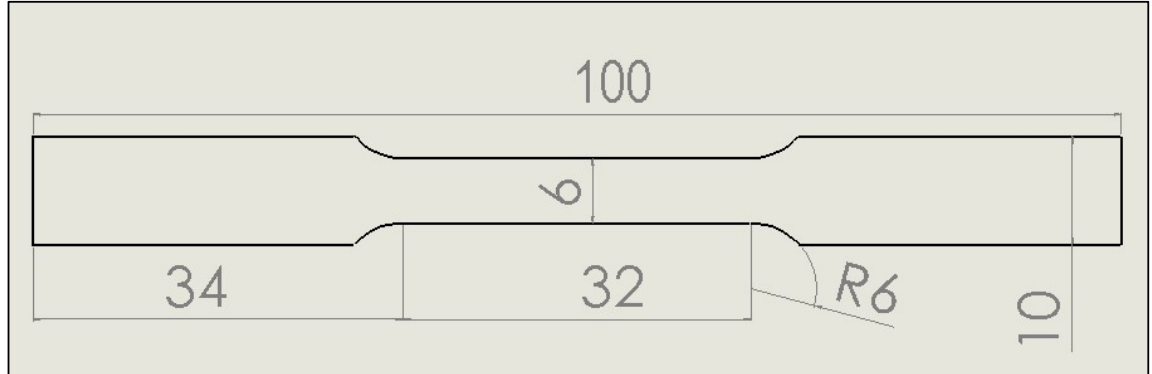
Assim, é calculada a tensão de engenharia, mostrada na equação 4.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (4)$$

Em que F é a carga instantânea aplicada perpendicularmente à seção transversal do corpo de prova e A_0 a área inicial do corpo de prova antes da aplicação da carga de tração.

Para este ensaio, utilizou-se como base a norma ASTM E8M, com desenho esquemático do corpo de prova exibido na Figura 18 e velocidade de ensaio a 1 mm/min.

Figura 18 - Corpo de prova conforme Norma ASTM E8M.



Fonte: ASTM E8M (2016).

Através desse ensaio foi possível obter valores de limite de resistência mecânica, limite de escoamento, força máxima aplicada no corpo de prova, entre outros. Esses dados são obtidos através da análise do gráfico tensão x deformação. **A Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra o aspecto do corpo de prova após rompimento no equipamento.

Figura 19 – CP após fratura.



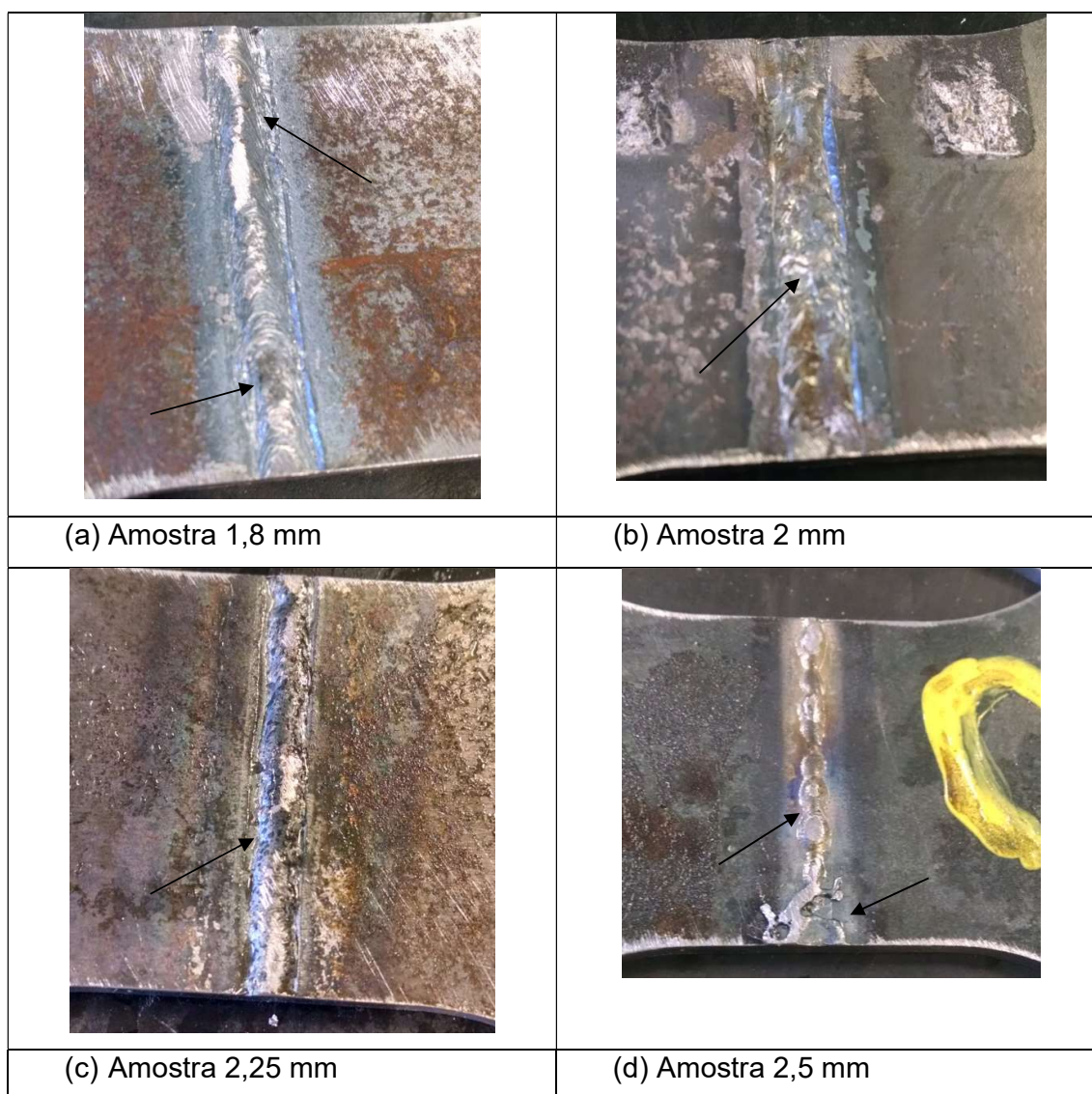
Fonte: acervo do autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Inspeção visual

A inspeção visual procurou identificar a integridade da solda, em geral, para verificar possíveis defeitos que podem danificar a amostra no uso. A Figura 20 mostra fotografias exibindo defeitos indicados através de setas.

Figura 20 – Fotografias do cordão de solda para diferentes espessuras.



Fonte: acervo do autor.

De maneira geral, a solda apresenta integridade razoável (Figura 20 a), com exceção de algumas amostras que mostravam falta de preenchimento e descontinuidades, que não foram usadas nos ensaios.

Verificou-se que a estrutura do cordão apresenta rugosidade macro (Figura 20 d) e desvios de paralelismo das bordas (Figura 20 c, d). Foram identificados defeitos como mordeduras, porosidade (Figura 20 c) e descontinuidade, sendo este último motivo de descarte da peça ensaiada.

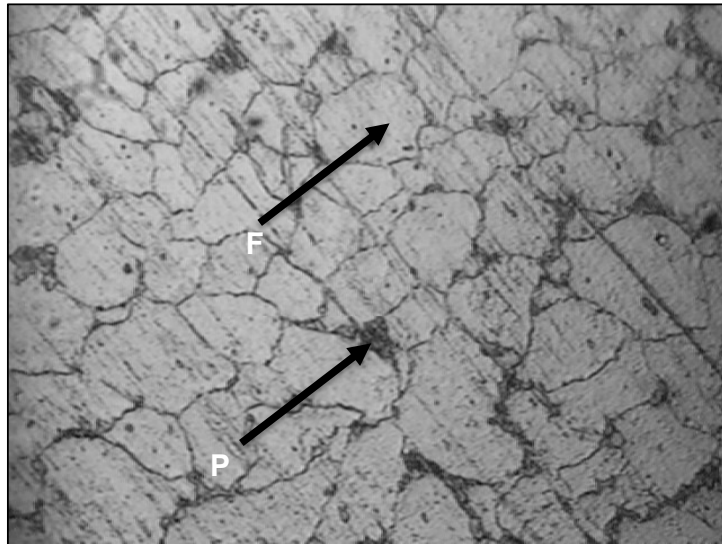
Os defeitos como mordeduras, rugosidades e descontinuidades podem ser influência da alta corrente usada na soldagem, tendo que ser considerada uma corrente menor em função da espessura da chapa.

4.2 Análise Metalográfica

4.2.1 Metal base

No material base, foi realizado o mesmo procedimento dos materiais soldados, de modo que fosse possível observar a microestrutura e característica típica do aço 1030.

Figura 21 - Microestrutura do metal base, aumento de 800x.



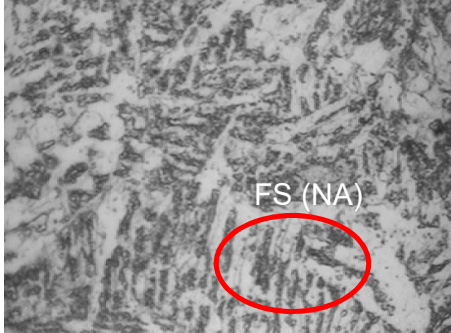
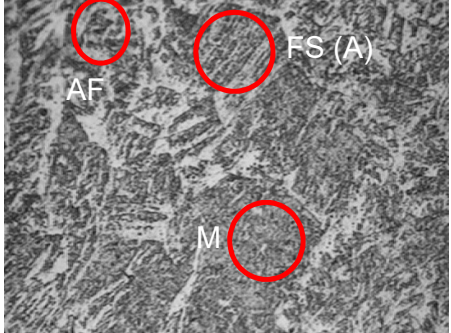
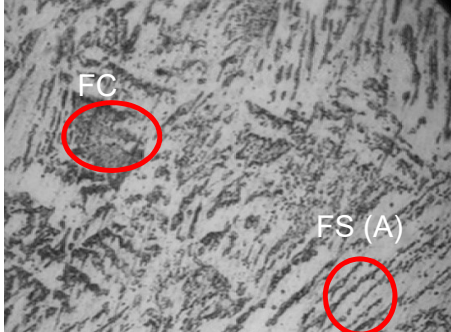

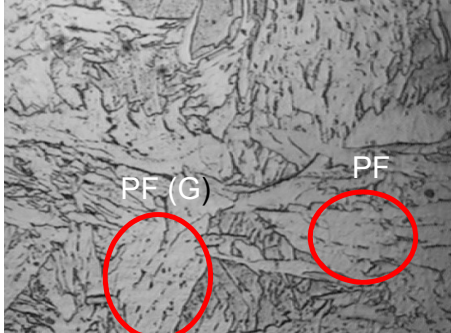
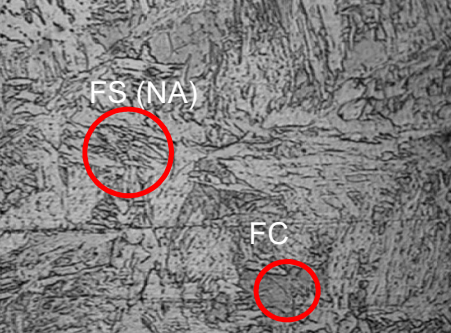
Fonte: acervo do autor.

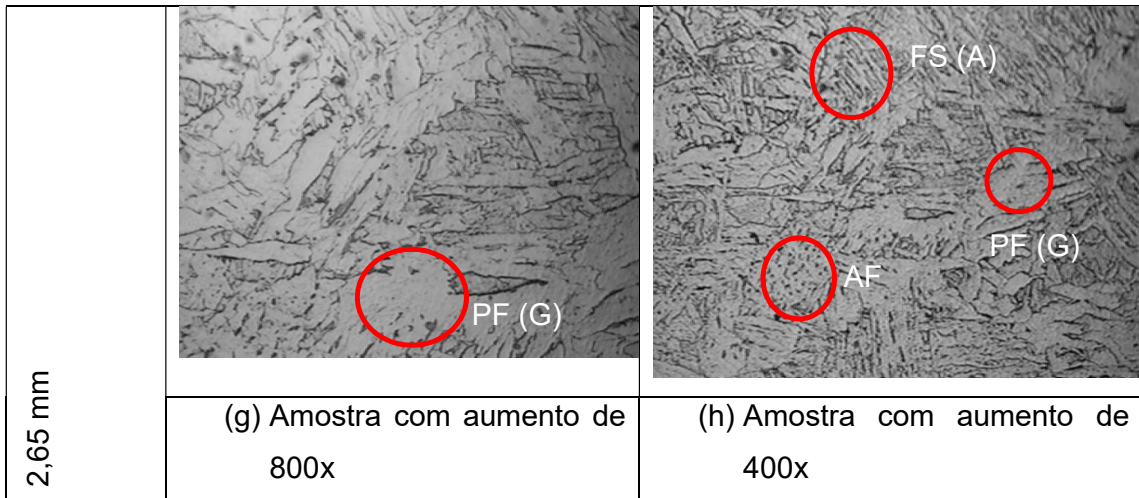
Analisando a Figura 21, visualiza-se a microestrutura típica de aço carbono, com a presença de perlita (P) e ferrita (F).

4.2.2 Zona fundida

Analisando as amostras através da microestrutura revelada através da metalografia, é possível conhecer os constituintes presentes nas amostras na região da zona fundida, de acordo com as espessuras específicas do trabalho.

Figura 22 – Micrografias da zona fundida para espessuras estudadas.

Amostra		
1,8 mm		
	(a) Amostra com aumento de 800x	(b) Amostra com aumento de 400x
2 mm		
	(c) Amostra com aumento de 800x	(d) Amostra com aumento de 400x
2,25 mm		
	(e) Amostra com aumento de 800x	(f) Amostra com aumento de 400x



Fonte: acervo do autor.

Utilizando a classificação do Instituto Internacional de Soldagem, são identificadas as seguintes microestruturas do metal de solda e também defeitos pontuais, quando existentes. Na Figura 22 foram identificadas as seguintes microestruturas: FS (A) - Ferrita com segunda fase alinhada (b, h); FS (NA) - ferrita com segunda fase não alinhada (a, f); M - martensita (c, d); PF - ferrita acicular (b, h); PF (G) - ferrita de contorno de grão (e, g, h); FC - agregado ferrita (c, f).

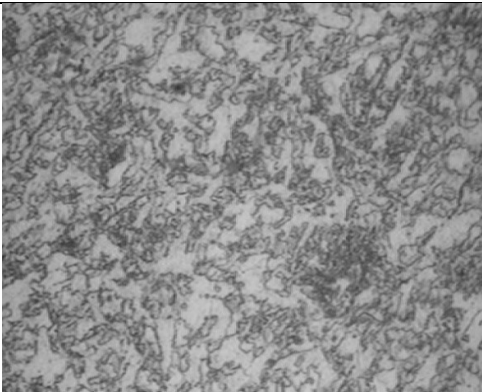
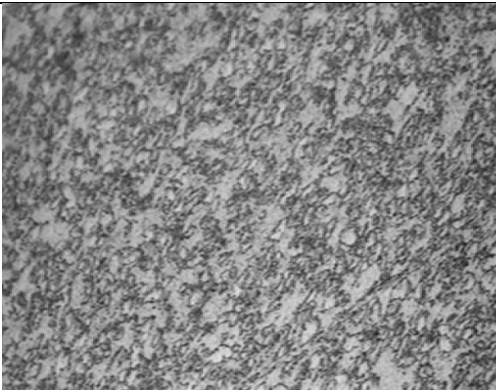
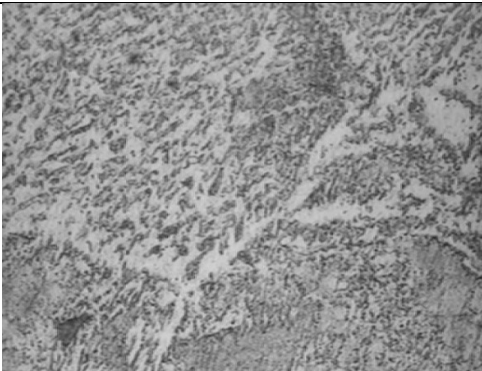

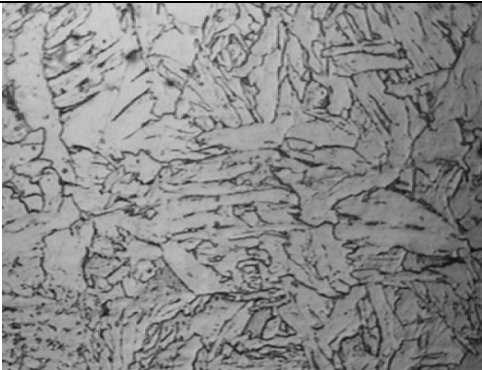

Nota-se que a microestrutura presente nas amostras é característica da zona fundida para aço carbono, sem identificação de trincas ou porosidade nos microconstituintes, com exceção da amostra de 2 mm que apresentou porosidade.

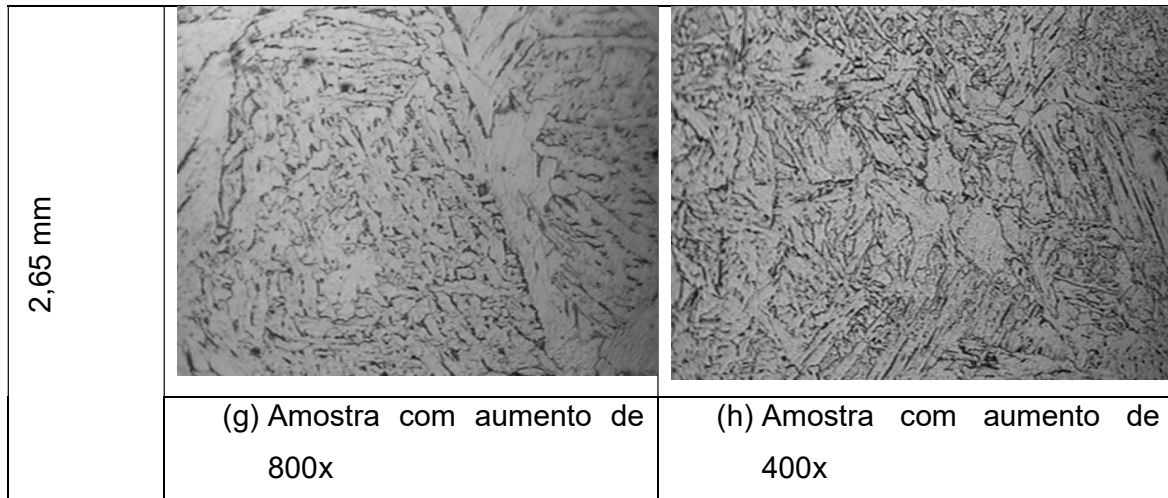
A presença de martensita nas amostras de menor espessura indica que houve rápido resfriamento da peça, o que pode comprometer a integridade da junta. As amostras que possuem ferritas alinhadas estão mais próximas do ideal para uma solda com confiabilidade.

4.2.3 Zona termicamente afetada

Assim como analisado no item anterior, a microestrutura característica da zona termicamente afetada das espessuras é exibida na Figura 23.

Figura 23 – Micrografias da zona termicamente afetada para espessuras estudadas.

Amostra		
1,8 mm		
	(a) Amostra com aumento de 800x	(b) Amostra com aumento de 400x
2 mm		
	(c) Amostra com aumento de 800x	(d) Amostra com aumento de 400x
2,25 mm		
	(e) Amostra com aumento de 800x	(f) Amostra com aumento de 400x



Fonte: acervo do autor.

As microestruturas da zona termicamente afetada são identificadas de acordo com o exposto no item 2.3.2 deste trabalho. Foram encontradas microestruturas características para as transformações que ocorrem na região da zona termicamente afetada, semelhantes as microestruturas encontradas na região da zona fundida, o que pode indicar que o não pré-aquecimento da chapa pode ter sido afetada pela ausência de aporte térmico gerado na soldagem (figura 23 c, d). Observa-se a presença de trincas na ZTA na figura 23 d.

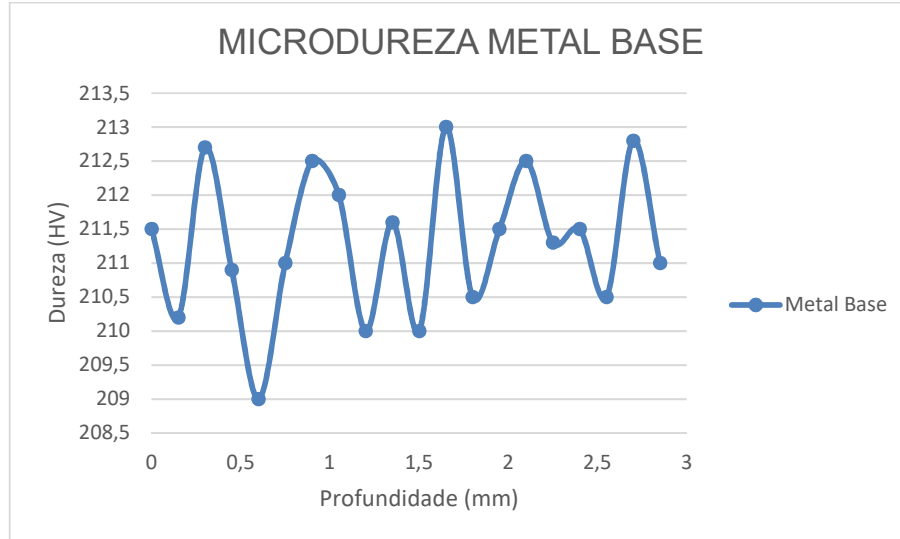
O ciclo térmico de soldagem pode criar condições para que se forme martensita ou crescimento de estruturas grosseiras. Caso houvesse um fornecimento de calor para aquecimento da junta, menor seria a taxa de resfriamento e menor seria o aparecimento de grãos grosseiros.

Nota-se que nas amostras de menor espessura (Figura 23 a, b, c, d) há predominância da ZTA-GG, a qual indica que o gradiente de temperatura foi maior para estas amostras em relação as de maior espessura (Figura 23 e, f, g, h), que apresentou microestruturas mais refinadas, apresentando característica de ZTA-GF e ZTA-IC. Nas zonas de transição entre a ZTA e o MB, notou-se ZTA-SC característico, não apresentando grandes transformações de microestrutura.

4.3 Análise da Microdureza Vickers

Os valores exibidos nas Figuras 24, 25 e 26 mostram os valores de microdureza para cada ponto medido, e os valores de cada uma das medições estão discriminados na Tabela 7.

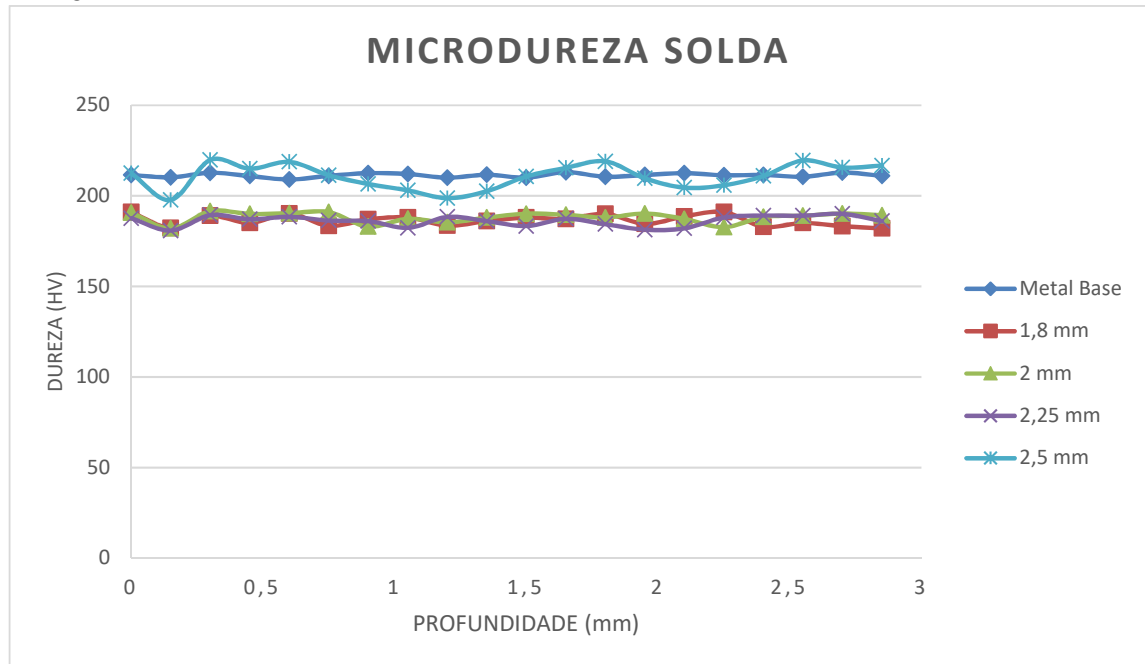
Figura 24 – Microdureza do metal base



Fonte: autoria própria.

Foram medidos os valores de microdureza do metal base para comparação com os valores encontrados nas demais regiões da junta soldada. Em via de regra, os valores de microdureza do metal base geralmente são maiores que os valores encontrados no metal fundido e na zona termicamente afetada. Os valores encontrados condizem com o material estudado e as oscilações nos valores se devem a heterogeneidade da composição do material.

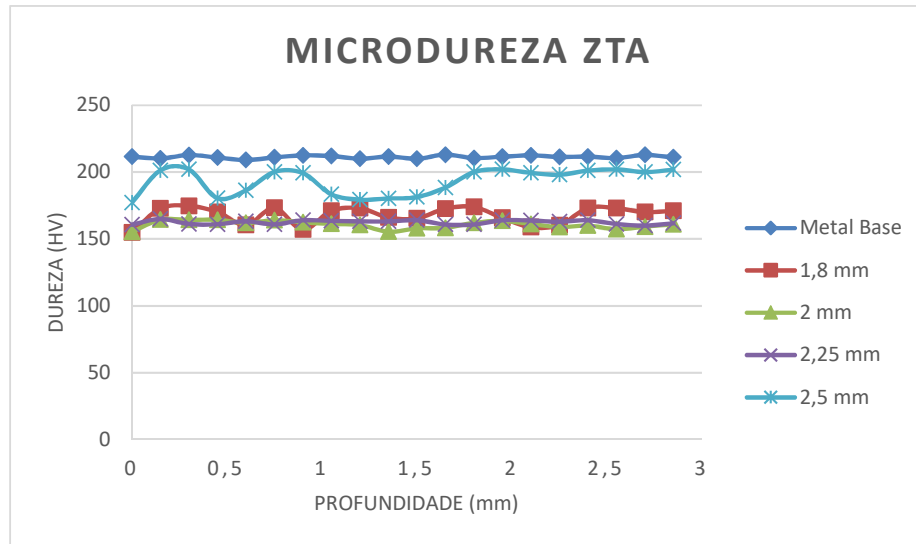
Figura 25 – Microdureza solda.



Fonte: autoria própria.

Ao analisar a Figura 25, percebe-se que os valores de microdureza do metal base são superiores aos valores das amostras com metal de solda, o que é característico, com exceção de uma das medidas da amostra de 2,5 mm, que também apresentou maior variação nos valores medidos. Os valores mais baixos que o metal base representam menor resistência mecânica, o que é aceitável para o metal fundido. Os valores de microdureza do metal de solda variam entre 182 a 219,8 HV (entre todas as espessuras) mostrando endurecimento na região, principalmente nas peças de maior espessura, aumentando a resistência mecânica do metal fundido.

Figura 26 – Microdureza ZTA.



Fonte: autoria própria.

A Figura 26 mostra os valores de microdureza da zona termicamente afetada. Nota-se que em relação aos valores de microdureza da região da solda (Figura 25), houve uma diminuição destes. Para amostras de menor espessura, foram verificados valores menores de microdureza, indicando que não houve recristalização das amostras, o que se confirma pelas imagens obtidas nas micrografias (Figuras 23 a, b, c e d). Baixos valores de microdureza indicam que o ciclo térmico de soldagem não produziu endurecimento significativo na região.

Tabela 7 - Medições, média e desvio padrão do ensaio de microdureza.

Ensaio de Microdureza Vickers											
Carga: 0,5 kgf											
Amostra	Região	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5	Medição 6	Medição 7	Medição 8	Média	Desvio padrão
1,8	MF	191	182,2	189	185	-	-	-	-	186,8	3,9530
1,8	ZTA	154,8	172,8	174,7	160,4	173,2	157	171	170,2	166,7	8,0139
2	MF	190,7	182	191,5	190	-	-	-	-	188,5	4,4094
2	ZTA	155,2	164,4	164,2	164,3	162	164	162,5	161,3	162,2	3,0803
2,25	MF	187,6	180,8	189,3	187	-	-	-	-	186,1	3,7133
2,25	ZTA	160,7	164,9	161,2	161	164,2	162	162,5	161,3	162,4	1,6559
2,5	MF	212,4	197,7	219,8	215	-	-	-	-	211,2	9,5234
2,5	ZTA	177,2	201,2	202	180,5	186,3	200,1	199,3	183,4	191,2	10,397

Fonte: autoria própria.

A Tabela 7 mostra os valores de medições de ensaio para cada região e amostra de solda estudada. Também são mostrados as médias e desvio padrão para as medições realizadas.

Para as amostras analisadas na zona termicamente afetada, nenhuma das amostras teve valor acima de 350 HV, indicando que não há sensibilidade a fissuração e fragilização, apresentando propriedade mecânica de tenacidade.

4.4 Análise do Ensaio de Tração

O resultado do ensaio de tração está presente na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultado dos ensaios de tração.

	Amostra	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Localização da Fratura
Metal base	01	350	422	-
	02	380	441	-
	03	360	429	-
2 mm	01	500	622	Fora da solda
	02	350	427	Rompeu na solda
	03	324	485	Rompeu na solda
	04	350	439	Rompeu na solda
2,5 mm	01	392	493	Fora da solda
	02	230	240	Rompeu na solda
	03	300	318	Rompeu na solda
	04	400	500	Rompeu na solda
2,65	01	350	412	Fora da solda
	02	350	398	Fora da solda
	03	350	388	Rompeu na solda
	04	361	421	Fora da solda

Fonte: autoria própria.

Nota-se que nos corpos de prova soldados metade destes se romperam na solda, sendo que nos corpos de prova de 2 mm e 2,5 mm, três das quatro amostras romperam na solda. Nas amostras de 2,65 mm, apenas uma rompeu na solda.

O valor do limite de escoamento e limite de resistência da amostra 01 da chapa de 2 mm pode ser relacionado com a heterogeneidade do material e escorregamento do corpo de prova na máquina de tração.

Com os dados dos limites de escoamento (LE) e limite de resistência (LR), compara-se os valores aos estabelecidos pela AISI/SAE, sendo que para o metal base o limite de escoamento é 270 MPa e o limite de resistência a tração é de 470 MPa. Em comparação, com o metal de adição (arame sólido ER70S-5) o LE é de 480 MPa e LR 560 MPa.

Os corpos de prova de metal base romperam com fratura de característica dúctil e os valores encontrados de LR e LE estão de acordo com o indicado pela AISI/SAE.

Figura 27 – Aspecto da fratura.



Fonte: acervo do autor.

Nenhuma das amostras que rompeu na solda possuem valores acima dos indicados pela ESAB (valores teóricos), indicando que é possível que os defeitos encontrados tanto na micrografia quanto na inspeção visual influenciaram no rompimento do corpo de prova abaixo do usual.

As amostras que romperam no metal base apresentaram valores de LR e LE aceitáveis e de acordo com os valores teóricos da AISI/SAE.

De acordo com esses valores é possível calcular a eficiência da junta, como descrito no tópico 2.2.4. Foram avaliados apenas os corpos de prova que não romperam na solda (Tabela 9).

Tabela 9 – Valores de eficiência da junta para CPs que romperam fora da zona fundida.

Corpo de prova		Eficiência (%)
2 mm	1	0,99
2,5	1	0,99
2,65	1	0,99
	2	0,99
	4	0,95

Fonte: acervo do autor.

Os valores encontrados para eficiência são altos e aceitáveis para o processo realizado, tendo em vista as variáveis que influenciam diretamente no cálculo da eficiência da junta.

5. CONCLUSÃO

A proposta deste trabalho foi avaliar as juntas soldadas através do processo GMAW, sendo estas soldas realizadas pela empresa PS Zamprogna, de Canoas/RS. O processo é realizado para unir chapas de aço 1030, ligando as bobinas de aço para otimizar o processo, antes destas passarem pelo processo de conformação mecânica para tomarem forma dos mais diversos perfis.

Tomando como base os conceitos abordados na metodologia e ensaios mecânicos realizados, conclui-se que:

- Com os parâmetros de soldagem utilizados para realização da solda, não foi possível obter rendimento satisfatório, principalmente nas chapas de menor espessura, em função do grande gradiente de temperatura, fato que foi confirmado através das micrografias que apresentaram microconstituintes de estrutura grosseira;
- O ensaio de tração mostrou que as chapas de menor espessura foram comprometidas, em função da fratura ter sido na zona fundida; porém, as de maior espessura tiveram desempenho satisfatório;
- A investigação da região soldada através das micrografias mostrou microestrutura característica do aço de médio carbono, bem como presença de trincas, porosidade e vazios.
- A microdureza permitiu avaliar o endurecimento das regiões, mostrando que nas chapas de menor espessura (1,8 e 2 mm) não endureceram devido o ciclo térmico de soldagem, mas as chapas de maior espessura recristalizaram, tendo uma região de refino do grão e apresentando maior valor de dureza e, conseqüentemente, maior resistência mecânica.
- A resistência mecânica para chapas de maior espessura apresentou resultado esperado, garantindo tenacidade a junta e resistência a fissurações. Para chapas de menor espessura (1,8 mm e 2 mm), como já constatado na metalografia, foi identificado região de crescimento de grão grosseiro, por apresentar valor menor para dureza Vickers;
- O processo GMAW é ideal para atender a necessidade da empresa, sendo necessário que se faça um estudo acerca dos parâmetros de soldagem e que se considere um pré-aquecimento da peça,

principalmente das peças de menor espessura, garantindo um aporte térmico.

- O gás utilizado no processo mostrou-se eficiente, pois não houve defeitos relacionados ao uso deste.
- Deve-se avaliar os parâmetros de soldagem que podem ser modificados no equipamento e ajustá-los de acordo com a espessura, principalmente a corrente utilizada no processo, diâmetro e altura do eletrodo.
- A contribuição da pesquisa deste trabalho é avaliar a solda realizada pela empresa e identificar a origem dos defeitos, quando existentes para correção e melhoria do processo.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

Várias pesquisas podem ser realizadas com este trabalho. A partir dos defeitos identificados neste trabalho, pode-se modificar os parâmetros de acordo com a espessura, variando a corrente e o diâmetro do eletrodo, além de realizar pré-aquecimento da chapa.

Com os parâmetros corrigidos, deve-se realizar novamente os ensaios já feitos neste trabalho, mas também executar os ensaios de impacto e dobramento para verificar a tenacidade da junta soldada.

Realizar microscopia eletrônica de varredura para verificar a existência de corpos intermetálicos que possam influenciar na dureza da junta.

REFERÊNCIAS

ABREU, C. **Metalurgia da soldagem**. 2008. CEFET-PA. Belém, 2008. Notas de aula. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAM0YAF/metalurgia-soldagem>>. Acesso em: 15 de novembro de 2015.

ANACOM CIENTÍFICA. **Espectrômetro de emissão óptica para análise de metais**. Catálogo. Disponível em: <<http://anacomci.com.br/produtos/b2-advanced/>>. Acesso em: 18 de junho de 2017.

ASTM E8/E8M. ASTM E8/E8M-09. **ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS**. Metals Test Methods and Analytical Procedures.

ASTM. **Book of ASTM Standards**. Vol. 4. University of Michigan, 2009.

AZEVEDO, D. **Espectrometria de Massas**. Notas de aula. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Disponível em: <<http://cebime.propesq.ufsc.br/files/2012/07/Apostila-Espectrometria-de-Massas-D%C3%A9bora-Azevedo.pdf>>. Acesso em: 18 de junho de 2017.

BAPTISTA, A. L. B.; SOARES, A. R.; NASCIMENTO, I. A. **O Ensaio Metalográfico no Controle da Qualidade**. 2015, UFF, Rio de Janeiro, 2015. Laboratório de metalografia. Disponível em: <http://www.spectru.com.br/ensaio_metal.pdf>. Acesso em 20 de outubro de 2015.

BARBEDO, N. D. D.; **Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando aço ASTM A-36 para verificar a soldabilidade, propriedades metalúrgicas e geométrica, e resistência mecânica**. 2011. UNIFEI. Itajubá, 2011. Dissertação de mestrado. Disponível em: <<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0038675.pdf>>. Acesso em 29 de setembro de 2015.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. 7ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 705p.

CHANG, S. C. et al. **J. of Mater. Sci**, v.11, p.623, 1976

DURAND, R. **Avaliação da Microestrutura e Propriedades Mecânicas da Soldagem Circunferencial do Aço API 5L X80 por Processo de Soldagem Semi-automáticos com Proteção Gasosa**. Dissertação de Mestrado. PUC/RJ. 2007.

ESAB BR. **Metalurgia de Soldagem**. Apostila. Disponível em: <<http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/apostilametalurgiasoldagem.pdf>>. Acesso em: 29 de setembro de 2015.

ESAB BR. **Catálogo de Consumíveis**. Disponível em: <<http://www.esab.com.br/br/pt/support/documentation/upload/catalogo-consumiveis-esab.pdf>>. Acesso em: 16 de maio de 2017.

FOSCA PASTOR, C. **Introducción a la Metalurgia de la Soldadura**, Pontificia Universidad Católica del Perú, 4º Ed. Lima, Perú, 2003.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4ª edição. São Paulo: Atlas, 2002. 175 p.

INFOSOLDA. **Processo MIG/MAG – Consumíveis**. INFOSOLDA – Portal Brasileiro da Soldagem. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/176-processo-mig-mag-consumiveis.html>>. Acesso em: 09 de dezembro de 2015.

KOU, S. **Welding Metallurgy**. 2ª edição. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003, 461 p.

LANCASTER, J. F. **Metallurgy of Welding**. 6ª Edição. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 1999.

MARTINS FILHO, E. G. **Estudo da influência relativa das variáveis do processo de soldagem MIG-MAG (GMAW)**. 2012. CEFET/MG. Belo Horizonte. Dissertação de mestrado. Disponível em: <http://www.posmat.cefetmg.br/galerias/arquivos_download/Dissertacao_Euclides_0503_FINAL.pdf>. Acesso em 09 de dezembro de 2016.

MODENESI, P, J. **Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas**. Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <<http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/soldabilidade.pdf>>. Acesso em: 14 de abril de 2017.

MODENESI, P, J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D, B. **Introdução à Metalurgia Da Soldagem**. Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <<http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>>. Acesso em: 16 de março de 2017.

MOREIRA, A. F.; GALLEGO, J.; TOKIMATSU, R, C.; YAMAKAMI, W. J.; VENTRELLA, V. A. **Caracterização de revestimentos soldados com arame tubular AWS E309LT-1 em função da adição de CO2 no gás de proteção**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17. Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu, 2006.

OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 1982. 461 p.

PORTAL METÁLICA. **O que é aço carbono?** Disponível em: <<http://www.o-metalica.com.br/o-que-e-aco-carbono>>. Acesso em: 22 de novembro de 2016.

PORTER, D. A., EASTERLING, K. E. **Phase transformations in Metals and Alloys**, 2ª Edição. Chapman and Hall, New York, US, 1992.

ROSENDO, T. S. **Ensaio de tração e mecanismos de fratura**. 2014. UNIPAMPA. Alegrete, 2014. Notas de aula. Disponível em:

<https://moodle.unipampa.edu.br/pluginfile.php/166918/mod_folder/content/0/06_Ensaio_Tracao.pdf?forcedownload=1>. Acesso em: 15 de novembro de 2015.

SHIO, F. **Análise Comparativa entre Soldagem MIG/MAG Manual e Robotizada**. 2013. UNIJUI. Panambi, 2013. Trabalho de Conclusão de Curso. Disponível em: <<http://bibliodigital.unijui.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1871/TCC.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 15 de novembro de 2016.

SOUZA, S. A. **Ensaaios mecânicos de materiais metálicos**: fundamentos teóricos e práticos. São Paulo: Editora Blucher, 1982. 286 p.

TAGAWA, T., MIYATA, T., AIHARA, S., OKAMOTO, K. **Influence of martensiticland on cleavage fracture toughness of weld heat-affected zone in low carbono steels**. In: International symposium on low-carbon steels for the 90's. Oct., 1993.

TEÓFILO, J. **Ensaaios Mecânicos dos Materiais**. 2014. UFPA. Belém, 2014. Notas de aula. Disponível em: <<https://jorgeteofilo.files.wordpress.com/2013/11/epm-apostila-cap3adtulo09-ensaaios-mod.pdf>>. Acesso em: 20 de outubro de 2016.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Editora Blucher, 1992. 494 p.

ZIKELI INDÚSTRIA MECÂNICA. **Mesa de corte e emendas**. Catálogo. Disponível em: <<http://www.zikeli.com.br/portfolio/ Mesa-de-corte-e-emendas/>>. Acesso em: 19 de outubro de 2016.