

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
ENGENHARIA MECÂNICA**

JOÃO VÍTOR BARONI RAZENTE

**AVALIAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA NO PROCESSO DE
SOLDAGEM MIG UTILIZANDO ARAME AWS A5.18 ER70S-6 EM AÇO
SAE 4140**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GUARAPUAVA

2018

JOÃO VÍTOR BARONI RAZENTE

**AVALIAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA NO PROCESSO DE
SOLDAGEM MIG UTILIZANDO ARAME AWS A5.18 ER70S-6 EM AÇO
SAE 4140**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, em Engenharia Mecânica, da coordenação do Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Msc. Henrique Ajuz Holmann

GUARAPUAVA

2018



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa

Nome da Diretoria
Nome da Coordenação
Nome do Curso



TERMO DE APROVAÇÃO

**AVALIAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA NO PROCESSO DE SOLDAGEM MIG
UTILIZANDO ARAME AWS A5.18 ER70S-6 EM AÇO SAE 4140**

por

JOÃO VÍTOR BARONI RAZENTE

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 18 de junho de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Henrique Ajuz Holzmann
Prof.(a) Orientador(a)

Ricardo Vinicius Bibna Biscaia
Membro titular

João Paulo Gabre Ferreira
Membro titular

Aldo Przybysz
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso –

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço ao meu orientador Prof. Msc. Henrique Ajuz Holzmann, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Aos meus colegas de sala.

A Secretaria do Curso, pela cooperação.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

Eu denomino meu campo de Gestão do
Conhecimento, mas você não pode
gerenciar conhecimento. Ninguém pode.
O que você pode fazer, o que a empresa
pode fazer é gerenciar o ambiente que
otimize o conhecimento.
(PRUSAK, Laurence, 1997)

RESUMO

RAZENTE, João Vítor Baroni. **Avaliação do cordão de solda no processo de soldagem MIG utilizando arame AWS A5.18 ER70S-6 em aço SAE 4140.** 2018. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Bacharelado em Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2018.

Em decorrência do avanço tecnológico crescente e para a contribuição com a demanda de mercado e desenvolvimento tecnológico atual, o estudo e aplicação do aço focados em desenvolver diferentes propriedades mecânicas e estrutural se tornou importante para o ramo industrial. Nesse contexto, a soldagem se faz presente. Portanto, este trabalho tem por objetivo avaliar o cordão de solda no processo de soldagem MIG utilizando arame AWS A5.18 ER70S-6 depositado em aço SAE 4140, selecionando parâmetros de soldagem que mais aproximam a restauração da condição original do metal base do aço. Para tal, foi realizado o corte e a preparação de 5 amostras soldadas pelo processo MIG de soldagem, na qual variou-se os parâmetros de corrente e tensão de soldagem com velocidade de solda constante. No qual foi realizado repetições de medição de dureza das amostras e então o embutimento seguido por análise microestrutural. Os resultados obtidos com as análises realizadas foram concretos perante a dureza obtida, todavia ocorreu o aumento do índice martensítico devido elevada taxa de resfriamento, possibilitando a fragilização do material e limitando sua aplicabilidade.

Palavras-chave: Avanço Tecnológico. Aço SAE 4140. Soldagem MIG. Parâmetros de soldagem. Dureza. Índice martensítico. Fragilização.

ABSTRACT

RAZENTE, João Vítor Baroni. Evaluation of the weld bead in the MIG welding process using AWS A5.18 ER70S-6 wire in SAE 4140 steel. 2018. 47 f. Course Completion Work, Bachelor of Mechanical Engineering - Federal Technological University of Parana. Guarapuava, 2018.

As a result of the growing technological advance and contribution to market demand and current technological development, the study and application of steel focused on developing different mechanical and structural properties has become important for the industrial branch. In this context, welding is present. Therefore, the objective of this work is to evaluate the weld bead in the MIG welding process using AWS A5.18 ER70S-6 wire deposited in SAE 4140 steel, selecting welding parameters that are closer to the restoration of the original condition of the steel base metal. For this, the cut and the preparation of 5 samples welded by the MIG welding process were performed, in which the welding current and voltage parameters were varied with constant welding speed. In which the hardness measurements of the samples were performed and then the inlay followed by microstructural analysis. The results obtained with the analyzes were concrete due to the hardness obtained, however, the martensitic index increased due to the high cooling rate, allowing the embrittlement of the material and limiting its applicability.

Keywords: Technological Advancement. Steel SAE 4140. Welding MIG. Welding Parameters. Toughness. Martensitic index. Fragilization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Processo de desgaste por cavitação, onde a) onda de choque produzida pelo impacto e b) microjato causado pelo impacto da bolha.	17
Figura 2- Etapas a serem seguidas na soldagem de manutenção.....	19
Figura 3 – Processo de soldagem MIG/MAG.....	20
Figura 4 - Perfil geométrico de um cordão de solda.....	24
Figura 5– Microestruturas do aço AISI 4140 no estado recebido, bruto de laminação-Nital 2%. Aumentado 500x.....	26
Figura 6 - Fluxograma metodológico.....	29
Figura 7 – Pontos de interesse para ensaio de dureza.....	31
Figura 8 – Região de medição do Perfil Geométrico do cordão de solda.....	32
Figura 9 – Microscopia da amostra 1 - região do cordão de solda com aproximação de 20x.....	37
Figura 10 – Microscopia da amostra 2 - região do cordão de solda com ampliação de 20x.....	37
Figura 11 – Microscopia da amostra 3 - região do cordão de solda com aproximação de 20x.....	38
Figura 12 – Microscopia da amostra 4 - região do cordão de solda com aproximação de 20x.....	38
Figura 13 – Microscopia da amostra 5 - região do cordão de solda com aproximação de 20x.....	39

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Perfil de dureza no sentido vertical da amostra 1	34
Gráfico 2 – Perfil de dureza no sentido vertical da amostra 2	34
Gráfico 3 – Perfil de dureza no sentido vertical da amostra 3	35
Gráfico 4 – Perfil de dureza no sentido vertical da amostra 4	35
Gráfico 5 – Perfil de dureza no sentido vertical da amostra 5	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição Química do aço SAE 4140	25
Tabela 2 – Propriedades Mecânicas do aço SAE 4140	25
Tabela 3 – Propriedades Mecânicas de arames de classificação AWS.....	27
Tabela 4 – Composição Química dos arames de classificação AWS	28
Tabela 5 – Parâmetros de soldagem utilizados na soldagem MIG	30
Tabela 6 – Desvio padrão obtido no ensaio de dureza	36
Tabela 7 – Características do cordão de solda	33

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

LISTA DE ABREVIATURAS

Tc	Temperatura crítica
Tp	Temperatura de pico

LISTA DE SIGLAS

KSI	Unidade de medida de pressão
TTR	Time to repair – Tempo para reparo
ZTA	Zona Termicamente Afetada
L	Largura
A	Altura
P	Penetração da solda
D	Diluição
LB	Linha base
MB	Metal base
Ad	Área depositada
Af	Área fundida

LISTA DE ACRÔNIMOS

AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas – Shielded Tungsten Arc Welding
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
PAW	Plasma Arc Welding
SAE	Society of Automotive Engineers

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVO GERAL	12
1.1.1 Objetivos Específicos.....	12
1.2 JUSTIFICATIVA.....	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 MANUTENÇÃO INDUSTRIAL	15
2.2 FALHAS NA MANUTENÇÃO INDUSTRIAL	15
2.3 FALHAS POR DESGASTE	16
2.4 ETAPAS A SEREM SEGUIDAS PARA SOLDAGEM NA MANUTENÇÃO	18
2.5 PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG.....	19
2.5.1 Parâmetros do Processo de Soldagem MIG/MAG.....	21
2.6 AVALIAÇÃO DA REGIÃO DE SOLDA.....	23
2.7 AÇO SAE 4140	25
2.8 ARAME AWS A5.18 ER70S-6	27
3 METODOLOGIA.....	29
3.1 DELIMITAÇÃO POR PROCESSOS E OBTENÇÃO DOS MATERIAIS.....	29
3.2 PROCESSO DE SOLDAGEM	29
3.3 PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE DUREZA	30
3.4 ENSAIO METALOGRÁFICO	31
3.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1 ENSAIO MECÂNICO DE DUREZA.....	33
4.2 ENSAIO METALOGRÁFICO	36
5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	40
REFERÊNCIAS.....	41

1 INTRODUÇÃO

Em decorrência do grande avanço tecnológico das últimas décadas, diversos segmentos industriais foram afetados, tais como construção civil, mecânica, elétrica e eletrônica. Dessa forma, para se manter estáveis no mercado industrial, se fez necessário o estudo, desenvolvimento e renovação nas mais diversas áreas do conhecimento científico. Logo, a área de ciência dos materiais também foi alvo de inúmeras pesquisas.

Buscando contribuir com a demanda de mercado e o desenvolvimento tecnológico, o estudo e aplicação do aço focados em desenvolver diferentes propriedades mecânicas, principalmente no quesito de soldabilidade, se tornou ponto chave para indústrias produtoras de navios, pontes, oleodutos, componentes automotivos e vasos de pressão, dentre outras, as quais dependem do fator soldabilidade em seus materiais.

Nesse contexto, a importância da soldagem se faz presente. O processo de solda, denominado soldagem, é um processo nos quais foram sendo pesquisados e atualizados com o decorrer da evolução tecnológica, afim de facilitar a solda e minimizar os defeitos de ordem metalúrgica, impactando diretamente na qualidade do produto final, custo de fabricação, manutenção e recuperação de materiais soldados. O processo de soldagem mais utilizado nas indústrias é o processo MIG/MAG (Metal Inert Gas/ Metal Active Gas) (SILVERIO, 1998).

A soldagem possui diferentes métodos de procedimento, com diversas variações de parâmetros. Dessa forma, para garantir um cordão de solda eficiente, minimizar os custos do processo de fabricação e eliminar a geração de trincas no processo de soldagem MIG/MAG, é necessário controlar os parâmetros de soldagem, como a intensidade da corrente, gases de proteção e vazão (MODENESI, 2001; SOUZA, 2011).

Em um processo de soldagem, a ZTA (Zona Térmica Afetada) compreende as regiões do metal base que tiveram a estrutura ou propriedades afetadas pelas variações de temperatura durante a soldagem (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2005).

Para Modenesi, Marques e Bracarense (2012), a variação de temperatura sofrida por um ponto e/ou região durante a soldagem é descrita por seu ciclo térmico de soldagem, no qual é descrita pela temperatura de pico (T_p), velocidade de

resfriamento (ϕ) e a temperatura crítica (T_c). A temperatura de pico corresponde a temperatura máxima atingida em um determinado ponto e indica a possibilidade de ocorrência de transformações microestruturais. Já o tempo de permanência é o tempo acima de determinada temperatura, comumente referenciado em relação a temperatura crítica. O tempo de permanência acima da temperatura crítica está relacionado com a dissolução de precipitados e crescimento dos grãos.

O presente trabalho visa avaliar o cordão de solda no processo de soldagem MIG utilizando arame AWS A5.18 ER70S-6 depositado em aço SAE 4140.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o cordão de solda no processo de soldagem MIG utilizando arame AWS A5.18 ER70S-6 depositado em aço SAE 4140.

1.1.1 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, faz-se necessário executar os seguintes objetivos específicos:

- Realizar ensaios de soldagem MIG com variação dos parâmetros de corrente e tensão para o aço SAE 4140;
- Analisar o perfil de dureza das amostras;
- Analisar a micrografia das amostras e a influência dos parâmetros de soldagem na Zona Termicamente Afetada.

1.2 JUSTIFICATIVA

A preocupação das organizações industriais em manter o pleno funcionamento do maquinário industrial cresce a cada dia. Dessa forma, a modernização de equipamentos, a diversificação na gestão de funcionários e treinamentos de capacitação são algumas das maneiras que as organizações que objetivam maior competitividade, qualidade, produtividade e lucro no mercado industrial estão seguindo. No ramo da manutenção industrial focada em processos de fabricação, um dos focos está concentrado em qualidade no processo de

soldagem, na agilidade, no avanço tecnológico das soldas e na solução corretiva das falhas causadas.

Um dos maiores desafios enfrentados pelas indústrias de cana-de-açúcar e álcool e também por indústrias que utilizam turbinas hidráulicas, como por exemplo usinas hidroelétricas, são as falhas na manutenção de eixos e turbinas quando expostas a ambientes agressivos, tais como o desgaste excessivo do material, erosão por cavitação e a geração de trincas em regiões de alta concentração de tensões em turbinas hidráulicas.

O reparo dessas falhas é essencial para o programa de manutenção, visto que tem por uma de suas funções prolongar a vida útil de materiais. Esse comportamento é visto amplamente em indústrias alcooleiras e em usinas hidroelétricas, os quais a maioria das falhas acontecem por desgastes mecânicos (abrasão e impacto). As falhas ocorridas tanto nas turbinas hidráulicas quanto nas moendas podem ser minimizadas, e em muitos casos sanadas por completo a partir do processo de soldagem, utilizando-se para efetuar o preenchimento do material e corrigir as falhas (DUTRA, 2005; GOUVEIA, 2008; BENTO, 2011).

Dutra (2005) e Gouveia (2008) enfatizam que a qualificação do procedimento de soldagem é um ponto crítico no trabalho de indústrias, principalmente devido a qualidade do depósito da solda, a qual é influenciada pelo aparecimento de porosidades. Dessa forma, se faz necessário rigorosos critérios durante o processo de soldagem devido as condições em que os materiais deficientes se encontram, tais como a determinação dos materiais a serem utilizados, o TTR (tempo para reparo) limite perante o custo de máquina parada, a preparação da área afetada e o procedimento de soldagem (intensidade da corrente elétrica do arco, velocidade da solda, dentre outros), para esse tipo de solda geralmente é utilizado o processo MIG/MAG.

Em um processo de soldagem MIG/MAG, os parâmetros de soldagem influem perante a geometria do cordão de solda, impactando assim nas propriedades mecânicas, defeitos operacionais, estabilidade do arco de solda, qualidade, produtividade e os custos da junta soldada. No processo MIG/MAG, as variáveis primárias que influenciam diretamente na taxa de deposição, penetração e reforço do cordão de solda, assim como a deposição e geometria do cordão são a intensidade de corrente e a velocidade da solda, as quais devem ser avaliadas e

controladas cuidadosamente para minimização de falhas e manter as propriedades do material (TEIXEIRA, 2011).

De acordo com Gerdau (2015), presente na sessão de catálogos para arames de solda, uma das mais indicadas opções de arame para solda MIG a serem utilizadas em indústrias nos ramos de implementos agrícolas, automobilística, implementos rodoviários, caldeirarias e construções mecânicas é o arame AWS A 5.18 ER70S-6, o qual pode ser aplicado nas mais diversas espessuras e também pode ser aplicado nos mais variados processos de fabricação, além de fácil disponibilidade no mercado.

Devido a composição química presente no aço SAE 4140, sua empregabilidade industrial se faz requerida em peças que exijam elevada dureza, resistência e tenacidade. É também levado em conta características como alta temperabilidade, usinagem razoável e boa resistência à torção e fadiga presente quando comparado com aços da mesma classe de médio carbono. O aço SAE 4140 é comumente chamado de aço-cromo-molibdênio e sua fabricação se faz principalmente em eixos, engrenagens, armas, rolamentos, virabrequins, bielas, dentre outros (ROCHA, 2004).

Portanto, se faz necessário analisar diversas tecnologias com variações nos parâmetros de soldagem, visando garantir melhores resultados no TTR, possibilitando atender aos requisitos de disponibilidade, aliados com diminuição de custos e com o aumento de produtividade.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

A preocupação das organizações industriais em manter o pleno funcionamento do maquinário industrial cresce a cada dia, isso se deve ao fato do crescimento do custo de operação e dos eventos de falhas que ocasionam a indisponibilidade no sistema produtivo. A manutenção industrial além de manter o pleno funcionamento do maquinário, objetiva o prolongamento de sua vida útil e também uma produção contínua.

A manutenção industrial visa garantir o pleno funcionamento dos ativos industriais por meio de técnicas, ferramentas e metodologias, as quais melhoram a eficiência operacional do processo produtivo, assegurando aumento, principalmente, da disponibilidade operacional (AL-NAJJAR, 2004; ENOFE; AIMIENROVIYE, 2010).

Para Dhillon (2002) e Mobley (2014), grande parte dos esforços gastos com manutenção é dedicado à manutenção corretiva (devido ao fato da dificuldade de prever todas as falhas aleatórias ocorridas no processo produtivo), sendo esse tipo de manutenção caracterizada pela realização da ação do conserto da máquina após a ocorrência do evento da falha.

2.2 FALHAS NA MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

No ramo da manutenção industrial, o objetivo é manter alta disponibilidade do maquinário. Dessa forma, uma das maiores dificuldades das indústrias está no reparo das falhas que incapacitam o processo produtivo. Nesse quesito, destacam-se as falhas por fratura e as falhas por desgaste.

Para Uliana (1997), as falhas por fraturas ocorrem em resultado à propagação de trincas no material. Essas trincas no material podem surgir quando a peça sofre solicitações de trabalho acima do suportado e recomendado de fábrica, ou devido a fadiga do material, originada a partir de tensões cíclicas e residuais que, por consequência, excedem as tensões limites suportadas pelo material. Já no quesito de falhas por desgaste, existem diversos fatores que podem ocasionar o desgaste excessivo no equipamento/material, uma vez que dependendo dos fatores,

podem ser classificados em desgastes: abrasivo, adesivo, 'fretting', cavitação, erosão e fadiga (NEALE E GEE, 2001).

2.3 FALHAS POR DESGASTE

O desgaste é um dos principais fatores que influenciam diretamente no custo da manutenção e produção de uma empresa, impactando diretamente no funcionamento do maquinário em consequência de ocorrências de falha, ocasionando a interrupção do processo produtivo (GREGOLIN, 1990). Os desgastes podem ser:

- Desgastes mecânicos são definidos como a degradação da superfície do material/equipamento, geralmente ocorrendo a remoção do material. Essa falha pode ser subdividida em dois tipos, desgaste mecânico por abrasão ou impacto. O desgaste por abrasão ocorre entre superfícies deslizantes, as quais, em contato, provocam o desprendimento de partículas da superfície, ocasionando deformações no material. O atrito entre as superfícies gera calor, ocasionando micro fusões entre as superfícies em contato, desgastando-as. Já os desgastes por impacto resultam em deformações localizadas, podendo até mesmo gerar fraturas no material. Com o impacto entre as superfícies e uma alta pressão, partículas metálicas dos materiais são arrancadas, provocando o desgaste do material (ULIANA, 1997).

- Desgaste por erosão segundo Uliana (1997) é o processo onde ocorre a destruição dos materiais devido a fatores mecânicos, os quais podem ser acarretados a partir de partículas sólidas envoltas em um fluxo de gases ou líquidos. Defende também que, para o material suportar determinado processo, se faz necessário uma adequada dureza, microestrutura e condições de superfície.

- Desgaste por cavitação é causado por fluídos acelerados que, ao colidirem com o material sólido, formam cavidades que podem conter vapor, gás ou ambos. Esse fenômeno ocorre em decorrência à redução localizada da pressão hidrostática e como resultado dessas cavidades, há a fragilidade e desgaste do material. A Figura 1 mostra o processo de perda de massa (OKADA, et al., 1995; KRELLA et al., 2006; LI, 2006; PARK et al., 2012).

A bolha causadora do desgaste por cavitação pode ter diferentes comportamentos durante o impacto, comportamento esse que é diferente devido a diferença de pressão entre o líquido e o vapor.

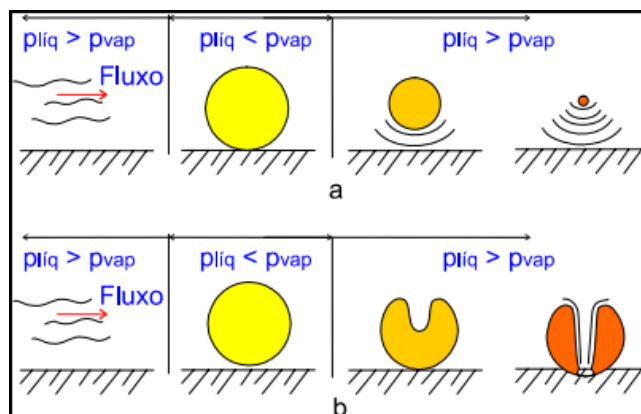


Figura 1 - Processo de desgaste por cavitação, onde a) onda de choque produzida pelo impacto e b) microjato causado pelo impacto da bolha.

Fonte: Will, 2008

A Figura 1 retrata o processo de desgaste por cavitação e destaca os acontecimentos em relação à variação de pressão em uma mesma temperatura. Pode-se observar que no momento em que a pressão do líquido se torna menor que a pressão de vapor, ocorre a formação de bolhas ou também chamadas de películas as quais são preenchidas por gases e/ou vapores. Ao passo que a pressão do líquido se torna maior que a pressão de vapor, ocorre o processo de desgaste com duas possibilidades, sendo a criação de um microjato devido ao impacto da bolha ou a produção de onda de choque em relação ao impacto causado.

- Desgaste por corrosão ocorre, geralmente, entre um material e um meio ou entre dois materiais. Sua definição se baseia na deterioração do material e de suas propriedades devido as reações químicas e eletroquímicas causadas (ASTM G5-02). Este processo, quando não desejado, pode resultar principalmente na destruição de equipamentos, materiais, instalações e afins, podendo causar prejuízos devido a degradação do material provocada (SILVA, 2008).

O fenômeno de lascamento está presente em ferramentas constituídas de metal frágil, ocorre geralmente em eixos durante funcionamento. Pode ser explicado como sendo a razão do encontro entre trincas originadas termicamente e trincas paralelas originadas por choques mecânicos, no qual já consta desgaste excessivo no material afetado (MACHADO E DA SILVA, 2004).

Para garantir a disponibilidade do maquinário industrial e minimizar as perdas devido as horas de máquina parada, ações corretivas de manutenção são necessárias, dentre elas, a soldagem de equipamentos mecânicos. O processo de soldagem na manutenção visa reparar o maquinário rapidamente, mantendo o mesmo padrão de funcionamento, objetivando prolongar a vida útil dos componentes mecânicos, aumentar a disponibilidade do maquinário e minimizar os custos de manutenção (MARQUES, 2010).

Existem duas importantes aplicações dos processos de soldagem no meio industrial, são elas o processo de soldagem aplicado à produção e o processo de soldagem aplicado à manutenção. Enquanto a soldagem de produção é feita em ambientes controlados, utilizando de corpos de provas, com equipamentos apropriados e conhecimento da composição química do metal base, a soldagem de manutenção por sua vez, é realizada em casos de extrema necessidade devido as falhas, dessa forma, existem limitações de trabalho para esse tipo de aplicação, devido principalmente à rapidez com que o processo deve ser feito para repor o equipamento ao processo produtivo da indústria (ULIANA, 1997).

2.4 ETAPAS A SEREM SEGUIDAS PARA SOLDAGEM NA MANUTENÇÃO

A qualidade do depósito da solda é influenciada pela qualificação do procedimento de soldagem, caracterizando-se como um ponto crítico na rotina das indústrias, tanto quanto pelo acúmulo de porosidades no material. Para que isso não ocorra, um controle rígido deve ser feito, utilizando rigorosos critérios durante o processo de soldagem (DUTRA, 2005; GOUVEIA, 2008; MARQUES, 2010).

A Figura 2 retrata os principais passos a serem seguidos em procedimentos de soldagem de manutenção adequados:

Para Schio (2013), a soldagem de manutenção a ser utilizado depende principalmente em relação ao tipo de material a ser soldado, uma vez que há grande diversificação de materiais e composições químicas de metais presentes na rotina industrial, logo, a escolha do processo de soldagem MIG/MAG é destaque devido sua gama de aplicabilidade no segmento industrial.

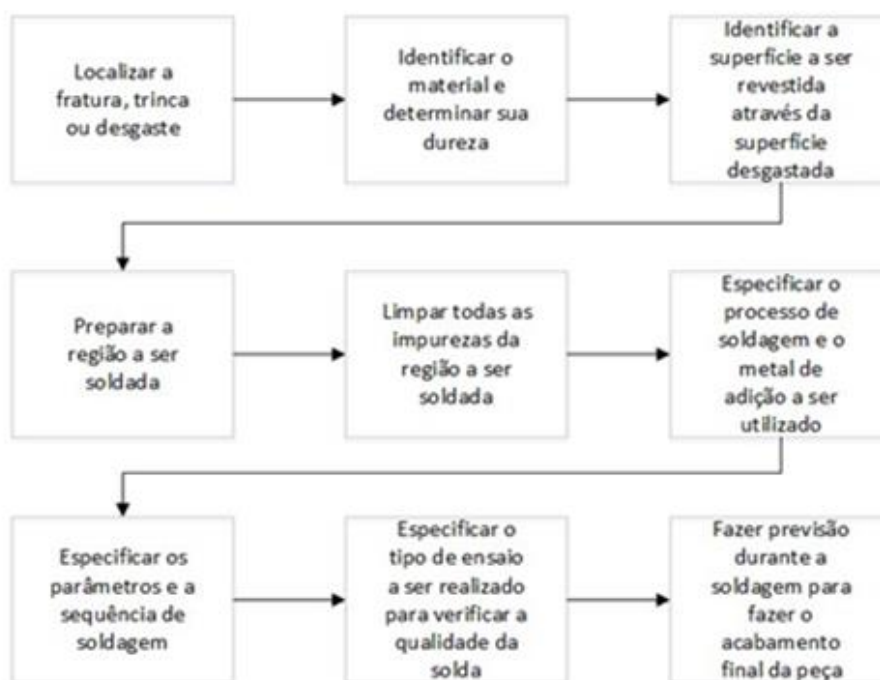


Figura 2- Etapas a serem seguidas na soldagem de manutenção.
Fonte: Adaptado de Uliana (1997)

2.5 PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG

A soldagem a arco com proteção gasosa (*Gas Metal Arc Welding – GMAW*), conhecido também como processo MIG/MAG, visa unir (soldar) as peças metálicas por meio do aquecimento dessas peças. O processo de soldagem MIG/MAG constitui-se pela formação de um arco elétrico, no qual um metal de adição (eletrodo consumível arame) alimenta continuamente e é protegido por um gás de proteção constante.

O processo de soldagem MIG/MAG pode ser semiautomático, ou seja, algumas etapas são feitas mecanicamente e outras manualmente (ao encargo do operador), como por exemplo a alimentação do arame, a qual é feita mecanicamente através de um alimentador motorizado. No processo semiautomático, o operador fica com o encargo de iniciar e finalizar o processo de soldagem, assim como o posicionamento da tocha de soldagem (MARQUES et al., 2005; TEIXEIRA, 2011).

A soldagem MIG/MAG é amplamente utilizada para a fabricação e manutenção de peças e equipamentos industriais, principalmente devido à alta taxa

de deposição, capacidade de soldagem em diversos tipos de materiais (TEIXEIRA, 2011).

“De modo geral, pode-se dizer que as principais vantagens da soldagem MIG/MAG quando comparada à soldagem com eletrodos revestidos são: alta taxa de deposição e alto fator de ocupação do soldador, grande versatilidade quanto ao tipo de material e espessuras aplicáveis, não existência de fluxos de soldagem e, conseqüentemente, ausência de operações de remoção de escória e limpeza e exigência de menor habilidade do soldador.” (MARQUES et al., 2005).

Dessa maneira, o processo de soldagem MIG/MAG é caracterizado como um ótimo processo de soldagem para as indústrias, principalmente para a área de manutenção mecânica e fabricação de peças metálicas.

Para Marques et al (2005), um dos motivos que resultam na diferenciação entre o processo de soldagem MIG e MAG pode estar relacionado com a gama de aplicabilidade de cada processo, uma vez que o processo MAG é utilizado apenas em materiais ferrosos constituídos como gás de proteção o CO₂. Já o processo MIG pode ser usado tanto na soldagem de materiais ferrosos como de não ferrosos, tais como alumínio, cobre, magnésio, níquel e suas ligas.

O processo MIG ocorre quando a atmosfera gasosa é inerte ou a maior parte de sua mistura possui características inertes, não ocorrendo interação física entre a atmosfera gasosa e a poça de fusão, analogamente, o processo MAG ocorre quando a atmosfera gasosa ou a mistura é ativa, portanto há interações com a poça de fusão por meio do gás ativo. Essas alterações podem gerar incrustações e possibilitar a alteração das propriedades mecânicas e físicas do material, tal como a geração de discordâncias e a possível elevação ou não da dureza no cordão de solda (MARQUES et al., 2005; TEIXEIRA, 2011; FBTS, 2017). A Figura 3 ilustra processo de soldagem MIG/MAG.

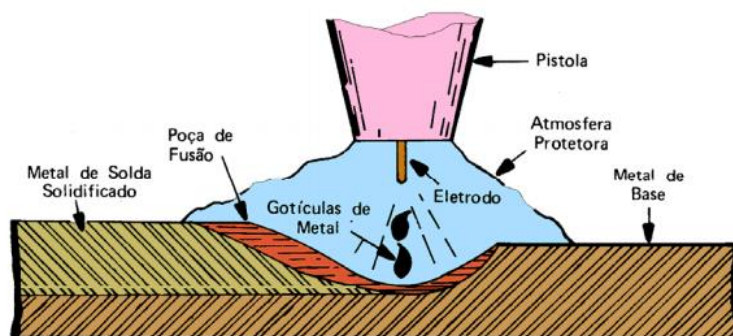


Figura 3 – Processo de soldagem MIG/MAG.

Fonte: Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem (FBTS): Processos de Soldagem MIG/MAG

A transferência do metal de adição à poça de fusão ocorre em forma de gotas, todavia, essa transferência possui diferentes características em relação à forma, quantidade e dimensões das gotas, possibilitando a classificação da transferência em três tipos: spray, globular ou curto-circuito. Durante o todo processo de soldagem o gás de proteção é injetado controladamente através do bocal da pistola, visando evitar a contaminação do metal líquido da poça de fusão e as gotas fundidas do metal de adição perante a contaminação no ar atmosférico (FBTS, 2017). Para Marques et al (2005) as transferências de metal do eletrodo para a peça podem ser descritas em:

- A transferência curto-circuito ocorre ao utilizar baixa tensão e corrente de soldagem. Geralmente é necessário utilizar para soldagem for a de posição ou a chapa a ser feita a união possuir pequena espessura, devido requerir baixa energia de soldagem, resultando em grande instabilidade do arco de solda e maior ocorrência de respingos;

- Já a transferência globular pode ocorrer com valores intermediários de tensão e corrente, possibilitando maior controle do arco de solda ao custo de ser uma transferência conturbada. O diâmetro das gotas transferidas podem diminuir com o aumento da corrente de soldagem, dessa forma é limitada para aplicações em posição plana.

É possível observar que devido o aumento gradual da corrente, novas formas de transferências são necessárias, dessa forma, a medida que a corrente de soldagem é aumentada a transferência de metal líquido transferidos por gota diminui, dessa forma ocorre a mudança no modo de transferência, passando a ser o método por spray.

- A transferência por spray possibilita arco de solda estável, quase sem ocorrência de respingos e uma geometria suave e regular do cordão de solda. Isso é possível em razão do diâmetro das gotas de metal serem menores que o diâmetro do eletrodo.

2.5.1 Parâmetros do Processo de Soldagem MIG/MAG

Em um processo MIG/MAG, os parâmetros de soldagem podem influenciar de forma definitiva nas características do material, tais como provocar a alteração

microestrutural do crescimento e nucleação dos grãos, possibilitando uma possível alteração de dureza e geometria do cordão de solda em razão, também, dos defeitos operacionais gerados.

Os parâmetros de soldagem também podem modificar as propriedades mecânicas do material devido ao ciclo térmico e ao aparecimento de defeitos nos poros da ZTA, os quais podem aparecer de acordo com a diluição do material de solda com o material base e/ou a falta de controle do gás de proteção. Essas alterações nas características do material podem ser propositais ou não, podendo variar em diferentes processos de soldagem (TEIXEIRA, 2011).

Dentre as variáveis primárias dos parâmetros de soldagem que podem vir a influenciar no material, se destacam: a intensidade da corrente e velocidade de solda, essas que por sua vez, podem influenciar na taxa de deposição de solda, na penetração e reforço do cordão de solda e na deposição e geometria do cordão de solda, sendo necessário controlar essas variáveis para se obter o resultado desejado.

Para Modenesi (2007), os parâmetros intensidade e velocidade de solda são dependentes entre si, por exemplo, para a intensidade da corrente, o aumento da corrente de soldagem pode ocasionar o aumento da taxa de deposição de material e conseqüentemente resultar no aumento da penetração da solda e da largura do cordão de solda. Já a diminuição da velocidade de soldagem acarreta na redução da largura e penetração do cordão e pode ser explicado pela diminuição da energia fornecida para a junta soldada. O reforço do material está associado a redução da quantidade do material de adição fornecido com o aumento da velocidade.

Para Teixeira (2011), a intensidade da corrente é resultado direto da taxa de fusão do arame, ou seja, quanto maior a corrente aplicada ao equipamento de soldagem, maior a fusão do arame, podendo impactar na taxa de deposição do material, na transferência e seus respingos, assim como na penetração do material.

Já a velocidade de soldagem pode alterar a taxa de deposição do material e a geometria do cordão de solda, principalmente devido as discordâncias que podem ocorrer em decorrência à falta de controle desse parâmetro. Dessa forma, velocidades elevadas de soldagem são preferíveis quando se faz necessário altas produções, entretanto, na falta de um controle rigoroso, podem ocorrer trincas no material e danificar toda a peça (TEIXEIRA, 2011).

2.6 AVALIAÇÃO DA REGIÃO DE SOLDA

Para Forte (2005), a região da solda apresenta uma zona termicamente afetada, a qual compreende o local em que regiões da solda não se fundiram durante o processo de soldagem, mas a microestrutura e as propriedades térmicas, químicas e físicas podem ter sido alteradas devido ao calor gerado pela soldagem, na qual pode influenciar a taxa de diluição, penetração, dentre outros, podendo resultar em diferentes comportamentos no crescimento dos grãos, taxa de resfriamento, possibilitando no aumento de discordâncias, principalmente por acúmulo de hidrogênio e assim, alterando também a dureza da região. As alterações das propriedades dependem também do material base, do metal de enchimento e da energia térmica do processo de soldagem, podendo ocasionar um acentuado crescimento dos grãos da estrutura do metal base.

Forte (2005) ainda afirma que, por possuir menor resistência, a região da zona termicamente afetada pode comprometer a resistência de uma junta soldada. Esse déficit em sua resistência pode ocorrer devido à falta de refinamento da estrutura granular da ZTA, em razão do tempo de permanência do metal base em alta temperatura durante o processo de soldagem, ou seja, em influência do ciclo térmico.

Para Wainer, Brandi e Mello (1992), durante a soldagem, cada ponto de material processado passa por um ciclo térmico, variando de acordo com a temperatura atingida em cada ponto específico. Assim, esse conjunto de temperaturas é função de diversas variáveis do processo, como, intensidade da fonte de calor, propriedades termodinâmicas do material, temperatura inicial do sólido e velocidade de deslocamento da solda. Fatores como o tipo de processo, pré ou pós aquecimento, aporte térmico, dentre outros, pode influenciar na formação do ciclo térmico.

O próprio ciclo térmico pode influenciar alterando as propriedades na microestrutura do cordão de solda, na geometria do cordão e também na ZTA.

Para a avaliação geométrica do cordão de solda, pode-se observar as principais características pela Figura 4, estas informações permitem saber se a junta de solda foi adequadamente preenchida com o mínimo de defeitos (PESSOA et al, 2010).

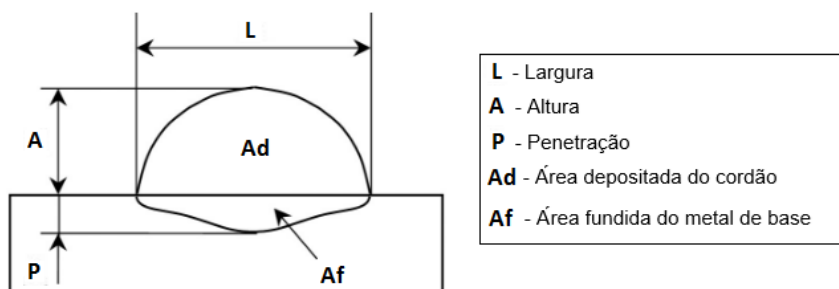


Figura 4 - Perfil geométrico de um cordão de solda
Fonte: Pessoa et al (2010), adaptado.

Pode-se observar no perfil geométrico de um cordão de solda, mostrado na Figura 4, que as características que definem o tamanho do cordão são altura e largura, as quais podem ser influenciadas de acordo com a corrente e velocidade de soldagem. Esses parâmetros podem influir na taxa de deposição do material, na penetração e reforço, assim como ocasionar discordâncias perante a falta de controle dos mesmos.

A penetração de soldagem é delimitada entre a superfície do material soldado e o limite da zona de fusão. Essa penetração é fortemente influenciada pela intensidade da corrente de soldagem, uma vez que a corrente influi diretamente na taxa de fusão do arame (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

Demais características ainda são presentes na soldagem por fusão, tal como a diluição. Para Pessoa *et. Al* (2010), a diluição é a parcela do metal de base que entra na composição da zona fundida, dessa forma, pode ser analisada como a solubilização do material de adição no material base. A equação que estabelece o regime da diluição pode ser observada na Equação 1.

$$D = \frac{Af}{Ad + Af} \quad (1)$$

Para o departamento de engenharia mecânica e soldagem (FENG PUC), em razão das alterações na composição química, micruestrutural e no desempenho de revestimento para os casos em que ocorre diluição excessiva do metal de solda, se faz necessário o controle cuidadoso dessa propriedade em algumas circunstâncias, tais são: a soldagem de metais de diferentes propriedades químicas, na deposição de revestimentos especiais em superfícies metálicas e na soldagem de metais que possuem composição química desconhecida. Situações frequentes na soldagem para manutenção, uma vez que nem sempre é possível conhecer toda a composição

química de um material que se tenha que realizar um processo de solda, principalmente no que diz respeito ao trato industrial de equipamentos.

2.7 AÇO SAE 4140

Devido à grande demanda de aço em geral, analisar e trabalhar com suas propriedades mecânicas e falhas a fim de melhorar processos e reduzir custos, faz com que o aço seja um ramo pertinente para estudo.

As características do aço SAE 4140 são resultados, principalmente, do Cromo e Molibdênio presentes em sua composição química. A composição química detalhada pode ser vista na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição Química do aço SAE 4140

Elemento	Concentração (%)
Cromo	0,80 - 1,10
Molibdênio	0,15 - 0,25
Manganês	0,75 - 1,00
Carbono	0,38 - 0,43
Silício	0,15 - 0,30
Enxofre	0,04 (máx)
Fósforo	0,035 (máx)

Fonte: Gelson Luz, disponível em: <http://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-4140-propriedades-mecanicas.html>, adaptado.

As propriedades mecânicas do aço SAE 4140 podem ser encontradas em diversas normas e especificações, tais como ASTM 29, A193, A194, A320, A322, A331, A506, A513, A519, A646, A752, A829. Todavia, em razão dos encargos dispendiosos para a aquisição dos documentos, somente algumas condições marcantes do aço SAE 4140 são expostas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades Mecânicas do aço SAE 4140

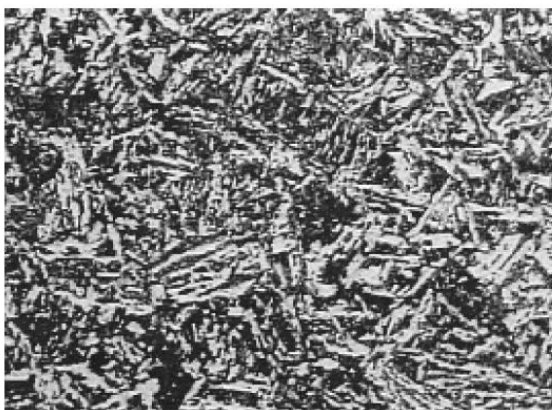
Propriedades	
Densidade (g/cm ³)	7,85
Limite de escoamento (MPa)	415
Resistência a tração (MPa)	665
Módulo de elasticidade (GPa)	190
Coefficiente de Poisson	0,27 - 0,30
Dureza Brinell	197
Dureza Rockwell B	92
Dureza Vickers	207

Fonte: Gelson Luz, disponível em: <http://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-4140-propriedades-mecanicas.html>, adaptado.

As propriedades mecânicas mostradas na Tabela 2 visam ressaltar as características do aço SAE 4140, tais quais podem impactar na temperabilidade, na usinabilidade e na soldabilidade do aço. Esses impactos podem ser causados devido a elevada dureza do material se comparado com outros aços da mesma classe, também pode ser relacionado as alterações microestruturais, processos de recozimento, encruamento, dentre outros.

Para sanar os impasses de presença de impurezas, deformações, baixo aporte térmico, têmpera não desejada, dentre outros, Linnert (1967) ressaltar a importância do pré-aquecimento na soldagem, visto que retarda o efeito de têmpera e aumenta o tempo de resfriamento, possibilitando maior tempo para o hidrogênio então retido escapar por difusão.

O aço AISI-SAE 4140, laminado feito tratamento térmico e ataque químico com Nital 2%, contém presença de ferrita acicular e perlita do tipo esboroadada. A ferrita acicular forma-se intragranularmente, ocorrendo sua nucleação de forma heterogênea em localidades possuintes de inclusões, na soldagem, a Zona Fundida favorece a presença de precipitados e inclusões, principalmente a do hidrogênio. Já a perlita, são encontradas próximas as bandas de ferrita. Essas características podem ser observadas na Figura 5 (PANNONNI E PINEDO, 2006).



**Figura 5– Microestruturas do aço AISI 4140 no estado recebido, bruto de laminação-Nital 2%.
Aumentado 500x.**

Fonte: Pannoni e Pinedo, 2006.

Para Linnert (1967) devido ao teor de carbono do aço SAE 4140 ao realizar o processo de soldagem o aço pode ser temperado ao ar, isso influi diretamente em cordões de solda estreitos, causando um rápido resfriamento devido a falta de aporte térmico, originando a formação de martensita já na ZTA. Dessa forma, como o aço pode ser temperado logo após a soldagem, há menor tempo para a saída das

moléculas de hidrogênio saírem da poça de fusão, possibilitando um aumento da fragilização do material e o aumento do aparecimento de trincas, comprometendo a utilização do material.

2.8 ARAME AWS A5.18 ER70S-6

De acordo com LINCOLN ELETRIC (2018), a especificação AWS A5.18 é utilizada para classificações de eletrodos sólidos ou compostos, assim como arames para os processos GMAW (Gas Metal Arc Welding), GTAW (Gas-Shielded Tungsten Arc Welding) e PAW (Plasma Arc Welding) na soldagem de aço carbono.

A classificação ER70S-6 se faz presente devido a classificação obrigatória, a qual acompanha o padrão ER XX Y – X, o qual o termo “XX” diz respeito ao limite de ruptura no ensaio de tração em Ksi, “X” designa a faixa de composição química e “Y” se refere se o eletrodo é sólido ou composto. Dessa forma, as propriedades mecânicas dos principais eletrodos e arames da especificação já mencionada são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades Mecânicas de arames de classificação AWS

Classificação AWS	Gás de proteção (a)	Ensaio de Tração			Ensaio impacto
		LR Ksi - MPa	LE Ksi - MPa	A(%)	
ER70S-3	SG - C	70 - 480	58 - 400	22	27J a -20°C
ER70S-6	SG - C	71 - 480	59 - 400	23	27J a -30°C
ER70S-G	SG - C	72 - 480	60 - 400	24	(c)
ER70C-6(X)	(b)	73 - 480	61 - 400	25	27J a -30°C
ER70C-G(X)	(b)	74 - 480	62 - 400	26	(c)

Fonte: Lincoln Eletric do Brasil, disponível em:

<https://inspecaosoldagem.files.wordpress.com/2011/08/apostila-consumc3adveis-de-soldagem.pdf>, p.25, adaptado.

- (a) No processo de soldagem GTAW deve-se utilizar SG – A;
- (b) O gás de proteção é definido pelo fornecedor/cliente, logo, o (X) pode ser definido como “C” ao utilizar SG-C ou M em mistura de gases;
- (c) O requerimento de ensaio de impacto é definido pelo fornecedor/cliente.

Assim como as propriedades mecânicas dos principais eletrodos e varetas da especificação ER XX Y- X estão mostradas na tabela acima, a composição

química dos principais eletrodos e varetas dessa especificação estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Composição Química dos arames de classificação AWS

Classificação AWS	Análise Química (%)									
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
ER70S-3	0,06 - 0,15	0,9 - 1,4	0,45 - 0,75	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,5
ER70S-6	0,06 - 0,15	1,4 - 1,85	0,8 - 1,15	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,5
ER70S-G	Não especificado - acordo entre fornecedor/cliente									
ER70C-6(X)	0,12	1,75	0,9	0,03	0,03	0,5	0,2	0,3	0,08	0,5
ER70C-G(X)	Não especificado - acordo entre fornecedor/cliente									

Fonte: Lincoln Eletric do Brasil, disponível em:

<https://inspecaosoldagem.files.wordpress.com/2011/08/apostila-consumc3adveis-de-soldagem.pdf>, p.25, adaptado.

3 METODOLOGIA

A figura 6 retrata o fluxograma das atividades realizadas no procedimento metodológico.

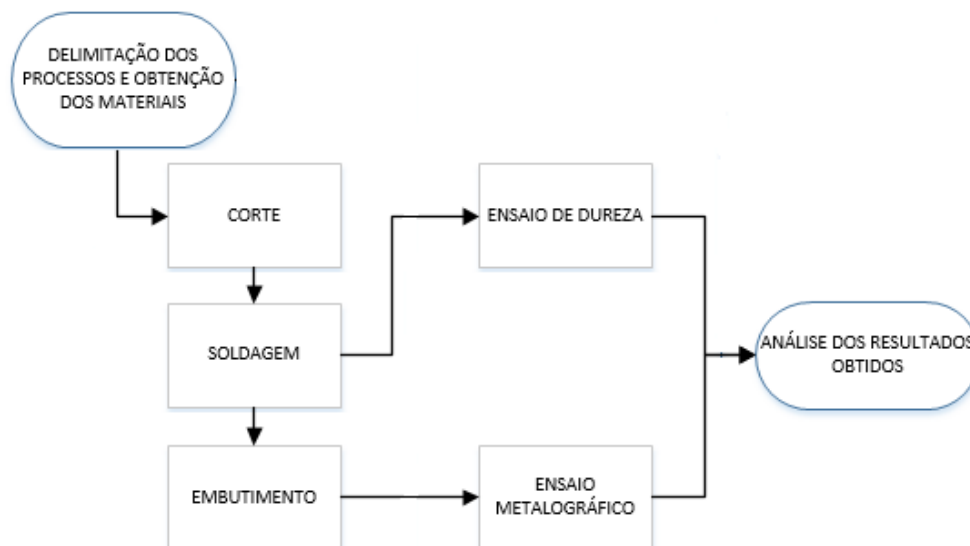


Figura 6 - Fluxograma metodológico
 Fonte: Autoria Própria

3.1 DELIMITAÇÃO POR PROCESSOS E OBTENÇÃO DOS MATERIAIS

Esta atividade teve como objetivo avaliar o cordão de solda no processo de soldagem MIG utilizando arame AWS A5.18 ER70S-6 depositado em aço SAE 4140. Para isso, foi realizado corte da barra de aço SAE 4140 (considerando o metal base de ensaio com uma dureza de 92 HRB) e dividida em 05 partes iguais, constituindo 20 mm de espessura; 50 mm de comprimento e 30 mm de largura.

3.2 PROCESSO DE SOLDAGEM

Após o corte, as chapas foram soldadas pelo processo MIG de soldagem, realizado no laboratório da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Guarapuava. Para a soldagem MIG, foi utilizado a Máquina de Soldagem MIG/MAG SUMIG, modelo Hank 335. O arame utilizado no processo foi o arame de classe AWS A5.18, tipo ER70S-6.

Durante todo o processo de soldagem preocupou-se com a evidência em diferenciar os impactos causados em razão da variação dos parâmetros utilizados.

Desta forma, foram feitas cinco amostras utilizando os cinco parâmetros da máquina de soldagem MIG e para cada amostra foram feitos três cordões de solda para então verificar os resultados de corrente e tensão contidos na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros de soldagem utilizados na soldagem MIG

Amostra	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Velocidade de alimentação do arame de solda (m/min)	Vazão do gás de proteção (L/min)
1	100 - 125	15 - 16	25	5	10
2	125 - 150	17 - 18	25	5	10
3	150 - 175	18 - 20	25	5	10
4	175 - 190	22 - 25	25	5	10
5	190 - 205	25 - 28	25	5	10

Fonte: Autoria própria

É importante ressaltar que mesmo com o aumento de corrente e tensão, o objetivo do processo de soldagem foi manter a velocidade de soldagem constante. Após a soldagem, as chapas foram deixadas expostas a temperatura ambiente, aproximadamente 24°C, para refrigerarem.

Após as amostras resfriarem, foi utilizado a Cortadora Metalográfica CM40/60 para separar amostras destinadas ao ensaio de dureza, embutimento e análise metalográfica. Os dois cortes formam um perfil de metal que abrangem do centro do material à extremidade, sem perda ou alteração estrutural entre os cortes.

3.3 PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE DUREZA

Nesta etapa foram realizadas as análises de dureza em cada uma das amostras, por meio do gradiente de dureza. Já com as amostras cortadas e o cordão de solda em destaque, foram marcados pontos para a medição de dureza com espaçamento de 3 mm a partir do cordão de solda. Logo, a medição de dureza das amostras foram repetidas diversas vezes entre as extremidades da amostra e realizado cálculo de desvio padrão. Para caráter comparativo, o ponto inicial da comparação inicia-se a partir da linha base das amostras, possibilitando a comparação dos resultados de acordo com a variação dos parâmetros de soldagem nas diferentes amostras. As marcações são evidenciadas na Figura 7.

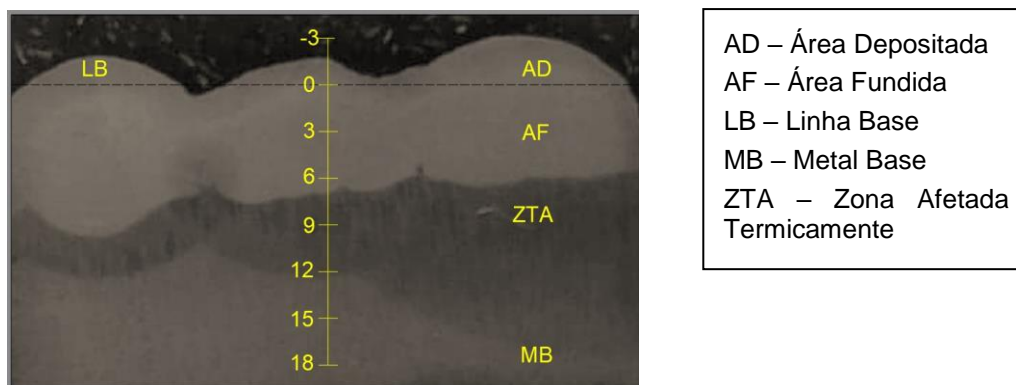


Figura 7 – Pontos de interesse para ensaio de dureza

Fonte: Autoria própria.

Para a medição do perfil de dureza utilizou-se o Durômetro Mecânico de Bancada com pré-carga de 150 kgf, presente no laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Guarapuava. Foi utilizado como parâmetro de medida a escala de dureza Rockwell B.

3.4 ENSAIO METALOGRAFICO

Após o ensaio de dureza, foi realizado o embutimento com a outra parte obtida pelo corte pós soldagem e realizado o embutimento através da Prensa Embutidora Metalográfica Manuam EM30D (Ø30mm), utilizando o baquelite.

A próxima etapa para a realização do ensaio metalográfico foi o lixamento, realizado utilizando a Politriz Lixadeira Metalográfica – PL02, seguindo a sequência de lixas de carbeto de silício desde 220, 320, 400, 600 até a 1200 mesh. Esse procedimento foi feito por diversas lixas para garantir que os riscos oriundos do corte e as marcas profundas desaparecessem e não interferissem na análise.

Após o lixamento, foi realizado um polimento utilizando abrasivo de alumina 1,0 micron. O polimento foi efetuado através da Politriz Lixadeira Metalográfica – PL02E.

Para destacar os contornos de grão e as estruturas do metal, realizou-se um ataque químico, feito através do reagente Nital a 10% com o tempo de ataque de 5 segundos. Dessa forma, utilizando de um microscópio óptico, as micrografias das amostras foram analisadas com o objetivo de verificar as microestruturas do cordão de solda em uma ampliação de 20x.

3.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Para análise dos resultados obtidos, foi necessário obter o perfil de dureza das amostras após procedimento de soldagem e então traçar gráficos com o perfil de dureza das amostras e seu respectivo desvio padrão. Os gráficos poderão ser analisados a partir da linha base do cordão de solda para não existir discrepâncias devido a altura e largura do cordão de solda na área depositada. Concomitantemente, a análise da influência dos parâmetros de soldagem na ZTA irá decorrer a partir de comparações entre as regiões geradas pela soldagem, possibilitando uma análise mais concisa dos resultados.

Já a microestrutura formada, será comparada por região e aos impactos causados pelo aumento dos parâmetros de corrente e tensão de soldagem.

Para análise do perfil geométrico das amostras, fez-se necessário determinar largura, altura e penetração do cordão de solda, assim como a área de fusão do metal base e a área depositada do cordão, nesse processo foi utilizado o software AutoCAD. A Figura 8 retrata a delimitação da região de estudo aplicada.

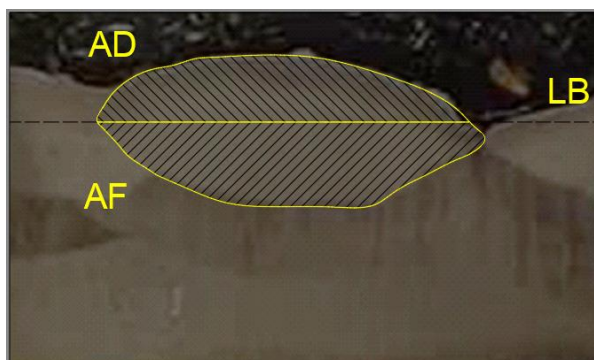


Figura 8 – Região de medição do Perfil Geométrico do cordão de solda
Fonte: Autoria própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com a variação das propriedades e dos parâmetros adotados, foram feitos diferentes cordões de solda com diferentes características. Dessa forma, as dimensões do cordão de solda de cada amostra, assim como a diluição (D) encontram-se na Tabela 6.

Os cálculos da diluição dos cordões de solda foram baseados seguindo a equação 1.

Tabela 6 – Características do cordão de soldaFonte

Amostra	ZTA (mm)	L (mm)	A (mm)	P (mm)	Ad (mm ²)	Af (mm ²)	D
1	2,01	8,023	5,750	0,993	39,559	4,599	0,104
2	2,34	10,649	2,110	2,823	17,037	22,717	0,571
3	2,85	9,425	2,605	5,339	21,793	32,794	0,601
4	3,23	8,588	1,525	2,330	10,068	15,376	0,604
5	3,56	7,248	2,357	3,436	5,281	18,946	0,782

Fonte: Autoria própria

É possível observar na Tabela 6 que tanto a ZTA quanto a diluição aumentam em decorrência do aumento dos parâmetros de tensão e corrente de soldagem. O aumento da diluição se deve ao aumento da corrente e tensão de soldagem na qual influencia o aporte térmico na região soldada e por consequência altera a disposição da área fundida, uma vez que ao diminuir a velocidade de soldagem aumenta-se o aporte térmico e a penetração da solda (SILVA, 2010).

4.1 ENSAIO MECÂNICO DE DUREZA

O ensaio de dureza foi realizado após procedimento de soldagem e corte, visando verificar as variações ocasionadas pelo processo de soldagem no material.

Foram realizados gráficos do perfil de dureza para cada amostra feita, diferenciando-as pela escolha do parâmetro utilizado no procedimento de soldagem. Os resultados podem ser observados nos Gráficos 1, 2, 3, 4 e 5.

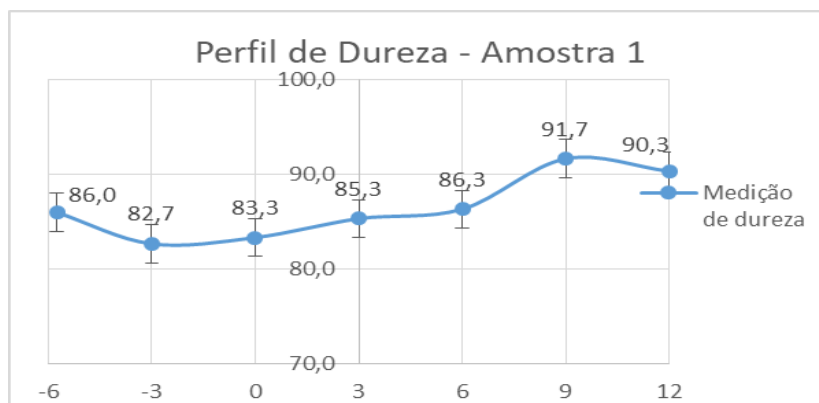


Gráfico 1 – Perfil de dureza no sentido vertical da amostra 1

Fonte: Autoria própria.

É possível observar que no Gráfico 1 a dureza média da amostra está abaixo da dureza padrão do metal base, atingindo valores de 86,5 de dureza Rockwell B. Uma das explicações do resultado de dureza é a possível diminuição do gradiente térmico durante o processo de solda.

Esse resultado é razão da intensidade mais baixa de corrente de soldagem, se comparado as outras amostras, afetando a penetração do cordão de solda.

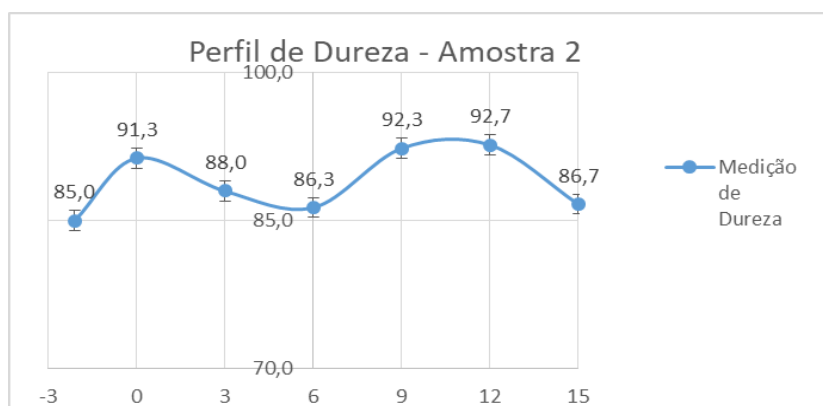


Gráfico 2 – Perfil de dureza no sentido vertical da amostra 2

Fonte: Autoria própria.

Após a linha base indicada previamente, nota-se que ocorreu o aumento da dureza devido ao efeito da temperatura, resultando em grãos grosseiros de fase austenítica e ao resfriar a região poder se transformar em martensítica. Nota-se que o ponto central da amostra é o ponto de menor dureza do ciclo, isso ocorre devido ao resfriamento lento e a menor porcentagem de martensita nessa região. Por fim, quanto mais próximo às extremidades da amostra, menor a influência do ciclo térmico, possibilitando em maiores taxas de resfriamento e maiores percentuais de estrutura martensítica (SILVA, 2010).

O Gráfico 3 aborda o perfil de dureza da amostra 3 com parâmetro de soldagem 3, vide tabela 9.

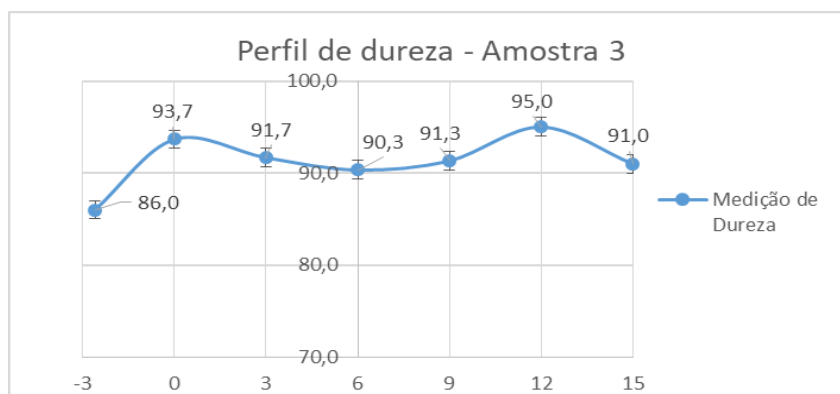


Gráfico 3 – Perfil de dureza no sentido vertical da amostra 3
Fonte: Autoria própria.

No gráfico 3, observa-se uma elevação da dureza no centro da amostra, fato esse ocorrido em razão dos parâmetros de soldagem utilizados, pois por utilizar maior corrente, resulta em um maior gradiente de temperatura no centro da amostra. Este padrão de leve aumento de dureza é verificado em quase todas as regiões analisadas.

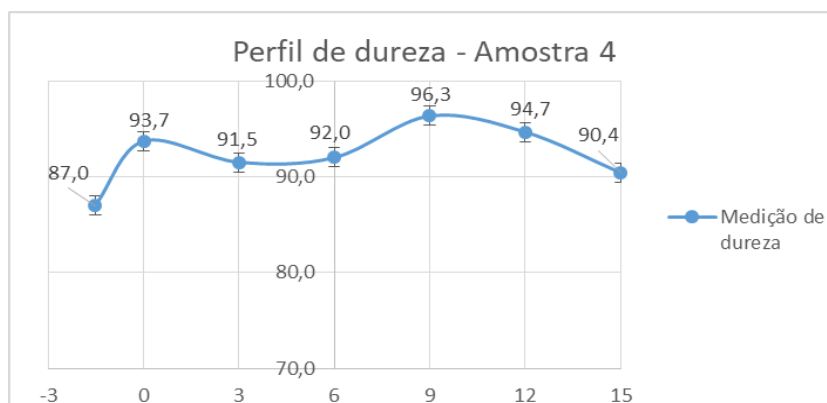


Gráfico 4 – Perfil de dureza no sentido vertical da amostra 4
Fonte: Autoria própria.

Na amostra 4, como observado na amostra 3, a variação dos parâmetros de soldagem, principalmente corrente, alteram a formação do cordão de solda devido o calor gerado pela soldagem, possibilitando alteração no crescimento dos grãos, taxa de resfriamento e maior aparecimento de discordâncias, explicação essa que corrobora com Forte (2005).

Já no Gráfico 5, é possível observar que o perfil de dureza é o menor das 5 amostras, no qual o ponto mais afastado da solda resultou na diminuição de dureza

local. Isso ocorre devido ao aumento de fusão de materiais e permanência em temperaturas elevadas durante um maior tempo, findando em maior tempo para resfriar a parte mais externa do cordão de solda.

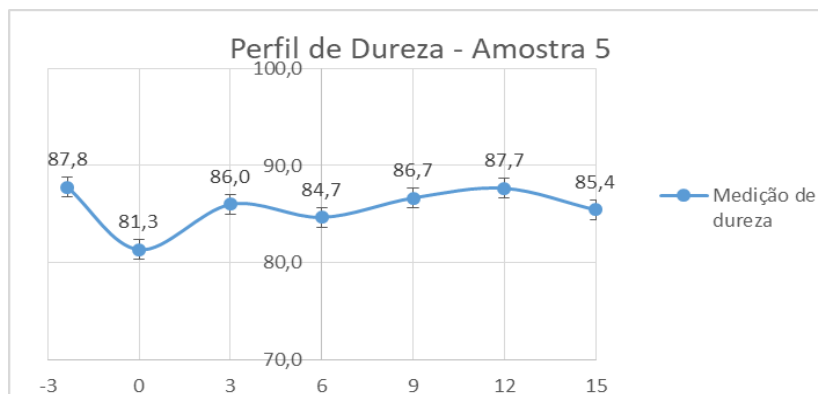


Gráfico 5 – Perfil de dureza no sentido vertical da amostra 5
Fonte: Autoria própria.

O desvio padrão obtido no ensaio de dureza de cada amostra pode ser observado na Tabela 6.

Tabela 7 – Desvio padrão obtido no ensaio de dureza

Amostra	Desvio padrão
1	3,360209114
2	3,148863909
3	2,84428323
4	3,05945212
5	2,213596801
Média	2,925281035

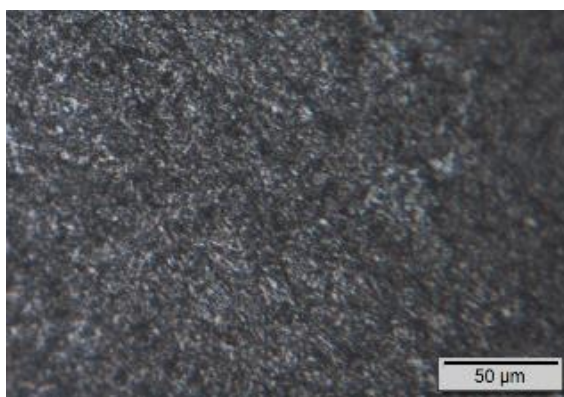
Fonte: Autoria própria

4.2 ENSAIO METALOGRAFICO

Foram analisadas as 5 amostras soldadas com os diferentes parâmetros, visando verificar as microestruturas do cordão de solda em uma ampliação de 20x. As Figuras 9, 10, 11, 12 e 13 retratam análises microscópicas realizadas após procedimento de soldagem MIG.

A amostra 1 destacada na Figura 9, retrata resultados referentes a baixa penetração de solda ocorrida na amostra em relação aos parâmetros de soldagem adotados. Mesmo com baixa penetração de solda, foi a amostra que possui maior área de material depositado. Sendo assim, a diminuição do perfil de dureza ocorreu em razão do aumento do gradient térmico e de menor tempo de permanência da

amostra em altas temperaturas, entretanto quanto mais afastada a região estava da poça de fusão, menor foi a influência desse tempo de temperatura elevada, sendo assim, a dureza na extremidade superficial do MB não foi fortemente afetada pelo ciclo térmico, mantendo a dureza e a micro estrutura do metal base.



**Figura 9 – Microscopia da amostra 1 - região do cordão de solda com aproximação de 20x.
Fonte: Autoria própria.**

Na Figura 10 apresentam-se regiões com formação de martensita de alta dureza, em função do alto teor de carbono existente na estrutura cristalina do aço e pelas altas velocidades de resfriamento.

O metal de solda é formado por regiões dendríticas, com composição heterogênea, sendo que a microestrutura se apresenta mais grosseira no cordão de solda, que na própria ZTA e metal base (SILVA, 2010).



**Figura 10 – Microscopia da amostra 2 - região do cordão de solda com ampliação de 20x.
Fonte: Autoria própria.**

Na Figura 11, percebe-se o mesmo padrão de formação martensítica da estrutura da amostra 2, apenas com uma diferenciação quanto ao aumento das estruturas aciculares.

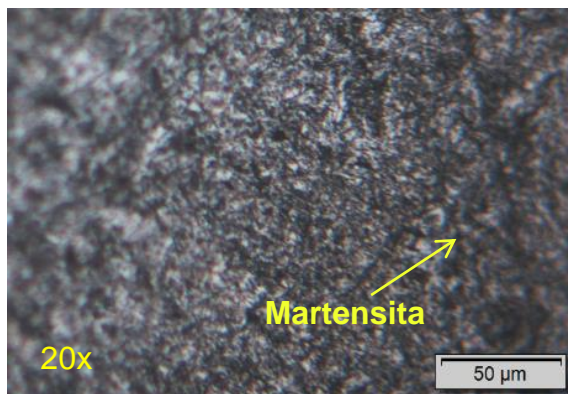


Figura 11 – Microscopia da amostra 3 - região do cordão de solda com aproximação de 20x
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 12 pode-se observar no início da ZTA, a presença de grãos colunares de perlita, ferrita de contorno de grão e ferrita acicular (ripas claras), juntamente com a formação austenítica próxima a ZTA.

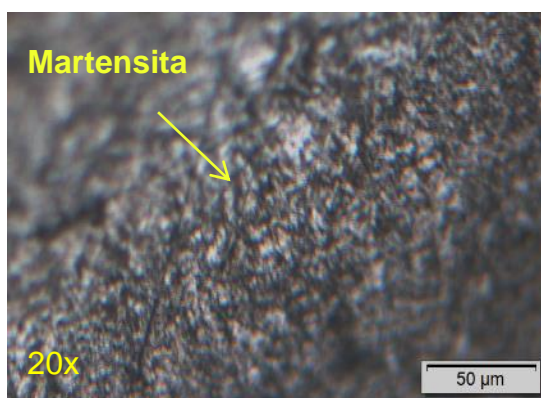
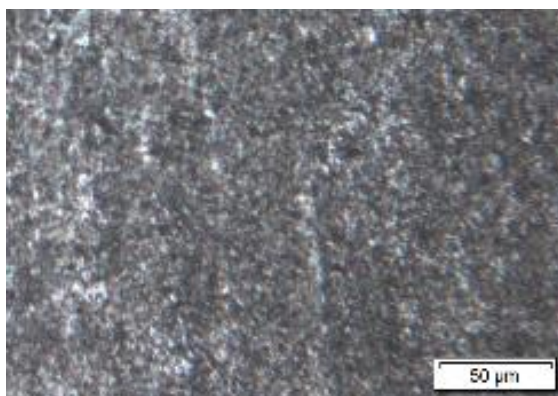


Figura 12 – Microscopia da amostra 4 - região do cordão de solda com aproximação de 20x.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 13 retrata a última amostra realizada, na qual é possível perceber uma coloração amarronzada mesclada com colorações cinzas, indicando austenita retida com a cor amarronzada e a formação de martensita de cor acinzentada. É notável a diferença da disposição geral dos contornos de grãos, nos quais na última amostra estão organizadas em formas de filete. Utilizando as informações do ensaio de dureza, observa-se que a menor dureza média foi causada pelo maior parâmetro escolhido, isso ocorreu devido maior tempo de permanência da amostra em temperaturas elevadas, ocasionando maiores taxas de resfriamento, possibilitando na queda significativa de dureza geral.

Para Silva (2010), o resfriamento do cordão de solda é mais abrupto na superfície e mais lento na parte central do cordão, originando aumento de dureza,

resistência ao desgaste e tração, causando uma diminuição da ductilidade e aumento da fragilidade do material.



**Figura 13 – Microscopia da amostra 5 - região do cordão de solda com aproximação de 20x.
Fonte: Autoria própria.**

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Com base nas análises realizadas e resultados obtidos, pode-se concluir que:

O aumento dos parâmetros tensão e corrente de soldagem no processo de soldagem MIG, possibilitou o aumento diretamente proporcional no índice de diluição das amostras. Esse aumento por sua vez, influi no aporte térmico da soldagem o qual impacta diretamente na penetração da solda e na disposição da área fundida.

Os aumentos dos parâmetros também propiciaram aumento no perfil médio de dureza nas amostras 1,2,3,4 respectivas. Entretanto, ocorreu uma queda no perfil de dureza da amostra 5 que pode ser explicada devido ao elevado índice de diluição.

Com a análise metalográfica realizada, é possível concluir que ocorreu a formação de martensita nas amostras 1,2,3 e a formação de grãos colunares de perlita, ferrita de contorno de grão e ferrita acicular na amostra 4. Já a amostra 5 apresentou características de formação de austenita retida ao mesmo passo que ocorria a formação de martensita.

Por fim, conclui-se que as amostras 3 e 4 obtiveram os melhores resultados no quesito de restabelecer a condição básica de dureza do material, atingindo dureza media HRB 91,29 e 92,23 respectivamente. Todavia, com o aumento de dureza ocorrido devido maiores formações de martensita em detrimento a elevada taxa de resfriamento, ocorre a fragilização do material, possibilitando na formação de trincas e podendo inviabilizar seu uso em casos que ocorrem inúmeros impactos mecânicos.

Sugestão para trabalhos futuros:

- Realizar o pré-aquecimento das amostras antes do procedimento de soldagem;
- Realizar amostras para ensaios de tração e compressão;
- Realizar comparação com soldagem utilizando arame tubular (AWS A5.20 E71T-1C) devido a gama de aplicabilidade e posições de soldagem e comparar os resultados com o obtido utilizando arame sólido utilizado neste trabalho.

REFERÊNCIAS

AL-NAJJAR, Basim; ALSYOUF, Imad. **Enhancing a company's profitability and competitiveness using integrated vibration-based maintenance: A case study**. European Journal of Operational Research, v. 157, n. 3, p. 643-657, 2004.

ARAMES PARA SOLDA, GERDAU. **CATÁLOGO ARAMES PARA SOLDA**. Disponível em: <<http://www.comercialgerdau.com.br/pt/productservices/products/Document%20Gallery/catalogo-arames-para-solda.pdf>>. Acesso em: 20 de jun. 2018.

BENTO, Emerson André Pinto; SARNI, Mírian Isabel Junqueira. **Melhoria do processo de soldagem da recuperação de eixos de moenda**. Ciência & Tecnologia, v. 3, n. 1, 2011.

DHILLON, B. S. **Engineering maintenance: a modern approach**. New York: CRC PRESS LLC, 2002. 224 p.

DUTRA, Jair Carlos. **Sistema e processo de soldagem vencendo a erosão das turbinas hidráulicas de grande porte**. ENERGIA PARA O MERCOSUL, p. 101, 2005.

ENOFE, Obamwonyi Martyn; AIMIENROVBIYE, Gregory. **Maintenance impact on Production Profitability-A Case Study**. 2010.

FORTE, Cleber. **Soldagem MIG / MAG - traduzido e adaptado**. Contagem: ESAB, 2005.

FBTS – Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem. **PROCESSOS DE SOLDAGEM MIG/MAG.**, Disponível em: <http://www.fbts.org.br/quantum/cursos/000071/downloads/M1_D4_T4_MIG%20MAG.pdf>. Acesso em: 09 de nov. 2017.

GREGOLIN, Jose Angelo Rodrigues et al. **Desenvolvimento de ligas Fe-C-Cr-(Nb) resistentes ao desgaste**. (Publicação FEC), 1990.

GOUVEIA, Ruimar Rubens. “A influência da temperatura de interpasse na tenacidade do metal de solda na soldagem multipasse do aço inoxidável martensítico CA6NM pelo processo TIG”. 2008.

KRELLA, Alicja; CZYŻNIEWSKI, Andrzej. **Cavitation erosion resistance of Cr–N coating deposited on stainless steel**. *Wear*, v. 260, n. 11, p. 1324-1332, 2006.

LANCASTER, John Frederick. **Metallurgy of welding**. Elsevier, 1999.

LINCOLN ELETRIC. **CONSUMÍVEIS DE SOLDAGEM**. Disponível em: <https://inspecaosoldagem.files.wordpress.com/2011/08/apostila-consumc3adveis-de-soldagem.pdf>. Acesso em: 29 de mar. 2018.

LINNERT, George E. **Welding metallurgy**. New York: American Welding Society, 1967.

LUZ, GELSON. **AÇO CROMO-MOLIBDÊNIO SAE 4140**. Disponível em: <<http://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-4140-propriedades-mecanicas.html>>. Acesso em: 28 de mar. 2018.

MACHADO, Alisson Rocha; SILVA, MB da. Usinagem dos metais. **8ª versão. LEPU–UFU**. Uberlândia, 2004.

MARQUES, Marcelo Fernando de Sousa. **Aplicação da soldagem na manutenção industrial**. 2010.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. Ed. da UFMG, 2005.

MOBLEY, R. Keith. **Maintenance fundamentals: 2 edition**. [S.L.]: Butterworth-Heinemann, 2004. 424 p.

MODENESI, Paulo J. **Estimativa de Custos em Soldagem**. Universidade Federal de Minas Gerais, 2001.

MODENESI, Paulo José; MARQUES, Paulo Villani; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem-fundamentos e tecnologia**. Editora UFMG, 2005.

MODENESI, Paulo J. Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais. **Belo Horizonte**, 2007.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. Introdução à metalurgia da soldagem. **Belo Horizonte: UFMG**, 2012.

NEALE, Michael; GEE, Mark. **A guide to wear problems and testing for industry**. William Andrew, 2001.

OKADA, Tsunenori et al. **Relation between impact load and the damage produced by cavitation bubble collapse**. Wear, v. 184, n. 2, p. 231-239, 1995.

PARK, Myung Chul et al. **Effects of strain induced martensitic transformation on the cavitation erosion resistance and incubation time of Fe–Cr–Ni–C alloys**. Wear, v. 274, p. 28-33, 2012.

PANNONI, Fábio D.; PINEDO, Carlos E. **Comportamento à corrosão do aço AISI 4140 nitretado sob plasma em diferentes misturas gasosas**. Congresso Anual da ABM, v. 61, 2006.

PESSOA, Antonio Rodolfo Paulino et al. Using the Taguchi method to select welding parameters for weld overlay with nickel alloy through the GMAW process. **Soldagem & Inspeção**, v. 15, n. 4, p. 317-324, 2010.

RASMA, E. T. **Caracterização Estrutural e Mecânica do Aço AISI/SAE 4140 tratado sob diferentes tratamentos térmicos**. Universidade Estadual do Norte Fluminense-UENF, Campos do Goytacazes-RJ, 2015.

ROCHA, M. A. C. et al. **Análise das propriedades Mecânicas do aço SAE 4140 com estrutura bifásica**. UFF-Universidade Federal Fluminense. Niterói-RJ, 2004.

RODRIGUES, Lino Alberto Soares et al. **Caracterização microestrutural e de propriedades mecânicas de soldas do aço ASTM A 131 pelos processos FCAW convencional e com adição de arame frio**. 2011.

SCHIO, Fernando. **Análise comparativa entre soldagem MIG/MAG manual e robotizada**. 2013.

SHENGCAI, L. I. **Cavitation enhancement of silt erosion—an envisaged micro model.** *Wear*, v. 260, n. 9, p. 1145-1150, 2006.

SILVA, Flávio José da et al. **Erosão, corrosão, erosão-corrosão e cavitação do aço ABNT 8550 nitretado a plasma.** 2008.

SILVA, Jorge Alexandre Santos Pinheiro da et al. **Tratamento térmico de juntas soldadas.** 2010.

SILVERIO, Raimundo Carlos. **INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM NA FORMAÇÃO DE TRINCAS A FRIO EM JUNTAS SOLDADAS DE AÇOS ARL.** 1998.

SOUZA, Daniel et al. **Influência da Regulagem de Parâmetros de Soldagem sobre a Estabilidade do Processo MIG/MAG Operando em Curto-Circuito.** *Revista Soldagem e Inspeção*, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 022-031, 2011.

SOUZA, Sergio Augusto de. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos teóricos e práticos.** 5 ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2000.

TEIXEIRA, Gustavo Simões. **Análise da influência dos Parâmetros de Soldagem sobre a geometria do Cordão de Solda depositado pelo processo de Soldagem TIG-MAG em tandem.** 2011.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio DH. **Soldagem: processos e metalurgia.** Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1992.

WILL, Cristhian Ramos. **Ligas inoxidáveis resistentes à cavitação depositadas por Plasma-PTA-Arame.** 2008.