



ANDERSON LUIS PAVAN

**INFLUÊNCIA DOS MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA E DA ENERGIA DE
SOLDAGEM SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO HARDOX 500**

Horizontina - RS

2022

ANDERSON LUIS PAVAN

**INFLUÊNCIA DOS MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA E DA ENERGIA DE
SOLDAGEM SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO HARDOX 500**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Rafael Luciano Dalcin.

Horizontina - RS

2022



**FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:

**“INFLUÊNCIA DOS MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA E DA ENERGIA
DE SOLDAGEM SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO HARDOX
500”**

Elaborada por:

Anderson Luis Pavan

Aprovado em: 29/11/2022
Pela Comissão Examinadora

Prof. Dr. Rafael Luciano Dalcin
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador

Prof. Me. Tiago Sinigaglia
FAHOR – Faculdade Horizontina

Prof. Dr. Augusto Cesar Huppes da Silva
FAHOR – Faculdade Horizontina

HORIZONTINA – RS
2022

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho em especial aos meus pais Carlos e Marlete, a minha irmã Alessandra e a minha namorada Katiane, os quais sempre estiveram do meu lado me apoiando e incentivando durante a graduação, pois sem vocês não seria possível chegar até aqui.

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradecer a Deus por ter me guiado a seguir o melhor caminho e permitir a conclusão deste trabalho.

Agradeço aos meus pais pelo constante apoio ao longo destes anos, ao incentivo para eu não desistir, pelos ensinamentos e ajuda nos momentos de dificuldade.

A minha namorada Katiane por ter prestado todo apoio, incentivo e ajuda durante esses anos, além de ter muita compreensão nos momentos que estive ausente.

Agradeço a todos familiares, amigos e colegas que de alguma forma contribuíram para essa conquista, e sempre estiveram me apoiando nessa ao longo desses anos da graduação.

Aos professores que me ajudaram em todo período da graduação, em especial o professor Rafael L. Dalcin, pela orientação, empenho e conhecimento durante a realização do trabalho.

“Nossa maior fraqueza é a desistência. O caminho mais certo para o sucesso é sempre tentar uma vez mais.”

Thomas Edison.

RESUMO

Nos dias atuais a modernização dos processos e modos de transferência de soldagem tem sido cada vez mais explorada, devido às crescentes demandas produtivas e às exigências metalúrgicas e mecânicas provenientes dos desenvolvimentos de novos materiais. Portanto, o objetivo do presente trabalho é avaliar a influência dos modos de transferência metálica e da energia de soldagem sobre as modificações metalúrgicas ocorridas no aço Hardox 500. Os corpos de prova soldados pelo processo MAG foram submetidos a análise metalográfica, ensaios de tração, microdureza e dobramento. Independentemente dos parâmetros utilizados, as amostras apresentaram defeitos, como falta de fusão, trincas e rupturas na região da raiz da solda, logo, os parâmetros utilizados neste estudo para a união do aço Hardox 500 não são adequados para atender as especificações exigidas pela indústria metal mecânica.

Palavras-chave: Aço Hardox 500, Processo MAG, Energia de Soldagem, Modos de Transferência Metálica, Resistência Mecânica da Junta Soldada.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Soldagem MIG/MAG	18
Figura 2 – Equipamento básico de soldagem MIG/MAG.....	19
Figura 3 – Zonas do material base afetada pelas temperaturas de soldagem	23
Figura 4 – Perfil Típico de Cordões de solda feitos com diferentes gases.....	25
Figura 5 – Modo de transferência por curto-circuito	27
Figura 6 – Modo de transferência globular	27
Figura 7 –Transferência por <i>spray</i>	29
Figura 8 – Modo de transferência controlada.....	29
Figura 9 – Influência de energia de soldagem na taxa de resfriamento	32
Figura 10 – Microestrutura do aço Hardox 500	34
Figura 11 – Diagrama de Graville.....	36
Figura 12 – Célula de carga	42
Figura 13 – Microdureza Vickers.....	44
Figura 14 – Ensaio de dobramento	46
Figura 15 – Ensaio de dobramento	47
Figura 16 – A Sequência das atividades realizadas.....	48
Figura 17 – (a)Fresadora ferramenteira e (b)corpos de prova fresados.....	49
Figura 18 – Equipamento de Soldagem	50
Figura 19 – (a)Peças montadas no dispositivo e posicionadas para soldagem e (b)corpos de prova após a soldagem.	52
Figura 20 – (a)Politriz metalográfica Arotec APL-4 e (b)corpos de prova após o processo de polimento.	53
Figura 21 – Dimensões do corpo de prova.....	54
Figura 22 – Máquina Universal de tração.....	54
Figura 23 – Perfil de Microdureza	55
Figura 24 – (a)Dimensões do corpo de prova e (b)operação de serramento dos corpos de prova.....	55
Figura 25 – Prensa manual com ferramenta de dobra	56
Figura 26 – Análise metalográfica dos corpos de prova.....	57
Figura 27– Limite de resistência à tração x energia de soldagem.....	59
Figura 28 – Corpos de Prova de tração soldados no curto-circuito e arco pulsado ..	60
Figura 29 – Perfil de microdureza do corpo de prova 1	60

Figura 30 – Perfil de microdureza do corpo de prova 2	61
Figura 31 – Perfil de microdureza do corpo de prova 3.....	61
Figura 32 – Perfil de microdureza do corpo de prova 4.....	62
Figura 33 – Perfil de microdureza do corpo de prova 5	62
Figura 34 – Perfil de microdureza do corpo de prova 6	63
Figura 35 – Macrografia e microestruturas do MS, RCG e RRG do aporte térmico. .	66
Figura 36 – Média das microdurezas em relação as energias de soldagem no modo de transferência curto-circuito e transferência arco pulsado	67
Figura 37 – Média dos limites de transferência de tração e alongamento x modo de transferência metálica curto-circuito e arco pulsado.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do metal base e propriedades mecânicas do Hardox 500.....	33
Tabela 2 – Propriedades mecânicas do Hardox 500 analisadas por ensaios.	34
Tabela 3 – Parâmetros e modos de transferência metálicos variados na soldagem MAG.	51
Tabela 4 – Composição química e propriedades mecânicas do arame AWS ER70S-6.	51
Tabela 5 – Corpos de prova após ensaio de dobramento.....	64

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1	TEMA.....	15
1.2	DELIMITAÇÃO DO TEMA	15
1.3	PROBLEMA DE PESQUISA.....	15
1.4	HIPÓTESES	16
1.5	OBJETIVOS.....	16
1.5.1	Objetivo geral.....	16
1.5.2	Objetivos específicos.....	16
1.6	JUSTIFICATIVA.....	16
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	18
2.1	SOLDAGEM MAG	18
2.1.1	A Zona Afetada pelo Calor (ZAC)	21
2.1.2	Gás de Proteção	24
2.1.3	Modos de Transferência Metálica	26
2.1.4	Energia de Soldagem	30
2.2	AÇO HARDOX 500.....	32
2.2.1	Soldabilidade do aço Hardox.....	35
2.2.2	Influência dos consumíveis sobre a resistência da junta soldada	39
2.3	ENSAIOS MECÂNICOS	40
2.3.1	Análise metalográfica.....	41
2.3.2	Ensaio de Tração	41
2.3.3	Ensaio de Microdureza.....	43
2.3.4	Ensaio de dobramento	45
3	METODOLOGIA.....	48
3.1	MATERIAL E MÉTODOS	48
3.1.1	Material Base.....	48
3.1.2	Preparação e procedimentos de soldagem.....	49
3.2	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	52
3.2.1	Análise Metalográfica.....	52
3.2.2	Ensaio de Tração	53
3.2.3	Ensaio de Microdureza.....	55
3.2.4	Ensaio de dobramento	55

4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	57
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	57
4.1.1	Análise Metalográfica.....	57
4.1.2	Ensaio de Tração	58
4.1.3	Ensaio de Microdureza.....	60
4.1.4	Ensaio de Dobramento.....	64
4.2	DISCUSSÃO GERAL DOS RESULTADOS.....	65
5	CONCLUSÃO	69
6	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	70
	REFERÊNCIAS.....	71

1. INTRODUÇÃO

Este estudo trata da avaliação das modificações estruturais ocorridas no aço Hardox 500 devido à influência dos modos de transferência metálica e da energia de soldagem. Nos últimos anos o processo de soldagem MAG tem se destacado cada vez mais nas indústrias, em razão desse processo apresentar cordões de solda com boa qualidade, alta produtividade e grandes possibilidades para automatização do processo (TONEL, 2016).

Ao longo do tempo as empresas vão evoluindo e de acordo com Krüger (2020) as fontes de soldagem convencionais sempre foram muito utilizadas por todos os segmentos de soldagem. Pequenas, médias e grandes empresas sempre utilizaram as fontes de soldagem convencionais, pelas suas características de serem robustas, baratas, e fácil utilização. Porém ao longo dos tempos a mão de obra das empresas vem evoluindo, com funcionários mais bem treinados, com funcionários mais acostumados com o uso de novas tecnologias e também com novas normas e regulamentações a serem seguidas.

Dessa forma, observa-se que nos últimos anos o processo de soldagem MAG tem se destacado cada vez mais nas indústrias, devido esse processo apresentar cordões de solda com boa qualidade, alta produtividade e grandes possibilidades para automatização do processo. Os modos de transferência metálica dos metais de adição no processo de solda MAG podem ser por curto circuito, spray, globular e pulsado. A taxa de resfriamento do metal de solda é relativamente rápida, sendo possível aplicar os cordões em chapas finas e/ou chapas com espessuras mais elevadas (MODENESI, 2001).

Nesse contexto, Kaupper e Merklein (2013) citam em seus estudos que os limites de dobramento para aços de alta resistência até então não haviam sido totalmente abordados. Trabalhos recentes lidam com a determinação experimental de falhas e a aplicação de modelos numéricos aperfeiçoados para prevê-las, mas a influência da microestrutura ainda não é totalmente compreendida, ambos os trabalhos realizaram avaliações sobre o comportamento de chapas de aço, quando conformadas por esta metodologia, sendo esta a mesma aplicada neste trabalho.

Entretanto, a indústria metal mecânica está investindo em materiais mais resistentes, com maior durabilidade, melhorando sua performance por estar em constante evolução e enfrentando a concorrência que se torna a cada vez mais

acirrada. Neste cenário estão inseridos os aços de média e alta resistência mecânica, que segundo SSAB (2014), foram desenvolvidos para garantir e aumentar a vida útil de componentes e conjuntos soldados que são submetidos a condições severas de uso e necessitam de elevada performance.

Dessa forma, Dorfschmidt (2015) comenta que na indústria metalúrgica de grande escala de produção um processo rápido que visa à união de dois materiais, neste caso aços, é o processo de soldagem MIG/MAG, em que necessita do arame de solda para unir. Esse tipo de consumível é encontrado em diversos diâmetros, composições químicas e fabricantes, por isso a busca por novas marcas que garantam a mesma qualidade e se possível à melhora nos preços é comumente buscada pela indústria, que neste estudo trabalha-se com o aço Hardox 500.

Contudo, para manterem-se nesse mercado as empresas tem priorizado a utilização de materiais cada vez mais resistentes, mas com custo mais baixo e inovando na forma de tratar esses produtos. Nesse contexto, a soldagem de aços especiais como Hardox vem sendo cada vez mais utilizada na indústria, porque hoje precisam materiais de alta resistência, com qualidade e, além disso, que evitem qualquer problema de trincas ou distorções. Portanto, para que o produto final da solda tenha características adequadas em relação às propriedades mecânicas e metalúrgicas, há aspectos que devem ser obedecidos, ou pelo menos avaliados, durante sua execução (HOULDCROFT, 1979).

Quando se trata do processo de soldagem de chapas de média e alta dureza pelo processo MAG, é de relevância avaliar parâmetros como o material a ser soldado, a seleção do arame, gás, bem como todos os parâmetros relacionados à sua soldabilidade, assegurando a boa fusão do metal de adição com o metal base e a obtenção de um metal fundido com boas propriedades mecânicas. Dessa forma, trabalha-se com aço Hardox 500 sendo um aço de alta resistência à abrasão que pode ser dobrado e soldado e que possui uma dureza nominal de 500 HBW. O Hardox 500 aumenta a carga e a vida útil das estruturas mantendo, ao mesmo tempo, uma boa capacidade de processamento e tenacidade (SSAB, 2020).

No entanto, verifica-se que os processos de soldagem possuem diversas variáveis, as quais se caracterizam pelos equipamentos utilizados, tipo de atmosfera de proteção e metais de adição. Dentre esses processos um deles se destaca em função de seu custo e versatilidade (ESAB, 2005). Dessa forma, a estabilidade do arco de solda e as alterações metalúrgicas se relacionam com o modo de

transferência do material de adição, o que faz com que os procedimentos de soldagem categorizem-se pelo modo de transferência que será utilizado.

1.1 TEMA

Avaliar a influência dos modos de transferência metálica e da energia de soldagem sobre as propriedades mecânicas soldadas em aço Hardox 500.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

A influência dos modos de transferência metálica e da energia de soldagem sobre as propriedades mecânicas do aço Hardox 500 serão avaliadas através de análise metalográfica, de tração, de microdureza, de dobramento, obtendo assim as características mecânicas da ZAC.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

Será realizada a soldagem do aço Hardox 500 pelo processo MAG, variando energias de soldagem e modos de transferência metálica. Utilizou-se o arame AWS ER70S-6, de 1,0 mm de diâmetro, com gases de proteção argônio Ar + CO₂ (18%). Diante desse contexto, compreende-se que o aço Hardox 500 é um material com resistência mecânica superior à boa parte dos aços comumente utilizados na indústria metal mecânica. Os ensaios mecânicos permitem a determinação das propriedades mecânicas que se referem ao comportamento do material sob a ação dos esforços e que são expressas em função de tensões ou deformações. Tensões representam a resposta interna aos esforços externos que atuam sobre uma determinada área ou corpo.

Portanto, torna-se necessário realizar uma avaliação das propriedades mecânicas quando utilizado diferentes amperagens que identificam à solda em diversas situações, principalmente onde a viabilidade econômica não pode ser afetada pelo controle detalhado do processo. O que levou à seguinte pergunta: Os modos de transferência metálica e a energia de soldagem podem comprometer as propriedades mecânicas do aço Hardox 500 soldado pelo processo MAG com os parâmetros testados?

1.4 HIPÓTESES

A energia de soldagem durante o processo de soldagem não pode ser muito elevada para não comprometer as propriedades mecânicas do aço Hardox 500 a serem realizadas pelo processo MAG com os parâmetros testados.

A energia de soldagem juntamente com o metal de adição a ser utilizado pode comprometer as propriedades mecânicas do aço Hardox 500 a serem realizadas pelo processo de soldagem MAG com os parâmetros utilizados, onde pode-se ter alterações a partir dos ensaios.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo geral

Avaliar as modificações estruturais ocorridas no aço Hardox 500 devido à influência dos modos de transferência metálica e da energia de soldagem.

1.5.2 Objetivos específicos

- Identificar os efeitos das modificações estruturais ocorridas no metal base que é o aço Hardox 500;
- Avaliar o comportamento do aço após o resfriamento;
- Avaliar o comportamento mecânico ao dobramento da junta;
- Realizar ensaios de tração nos corpos de prova para verificar as propriedades mecânicas da junta soldada com os diferentes modos de transferência metálica e energia de soldagem usada;
- Fazer metalografia de solda para avaliar a penetração na junta soldada;
- Fazer perfis de microdureza nas juntas soldadas para verificar a dureza em diversos pontos desta.

1.6 JUSTIFICATIVA

O presente estudo servirá como subsídio para compreensão referente à influência dos modos de transferência metálica e da energia de soldagem sobre as propriedades mecânicas soldadas do aço Hardox 500. Torna-se imprescindível

estudar a estabilidade do arco de solda e alterações metalúrgicas no arame, se estão relacionadas com o método de transferência, fazendo com que os procedimentos de soldagem sejam categorizados pelo método de transferência que será utilizado. Os aços da classe Hardox 500 destinam-se a altas cargas de desgaste e impacto. Os aços Hardox 500 são materiais de fácil soldabilidade, embora dependendo das condições de soldagem empregadas, são suscetíveis à formação de trincas (SSAB, 2016). Por ser um aço altamente temperável, muitas vezes, se faz necessário um tratamento térmico após a soldagem, para reestabelecer as propriedades mecânicas, principalmente a tenacidade. Porém, o tratamento térmico após soldagem, tem um custo elevado, e dependendo do tamanho da peça (AZZOLINI, 2017).

A aplicação destas características em situações em que se pratica e que já se encontram no mercado para a venda, ainda não provam cientificamente que o metal fundido resultante deste processo de solda seja suscetível às características ambientais para o qual foi destinado. No entanto, a escassez de informações específicas do aço Hardox 500, motiva a busca por informações relacionadas a diferentes formas realização de ensaios com esse material, demonstrando características do processo de solda que possam ser consideradas pelas áreas de projeto e manufatura no momento da seleção dos parâmetros do processo, facilitando o entendimento sobre as limitações tanto do material quanto do produto final soldado. Diante desse contexto, torna-se fundamental, aprofundar o entendimento sobre a influência dos modos de transferência metálica e da energia de soldagem sobre as propriedades mecânicas das juntas soldadas em aço Hardox 500.

2 REVISÃO DE LITERATURA

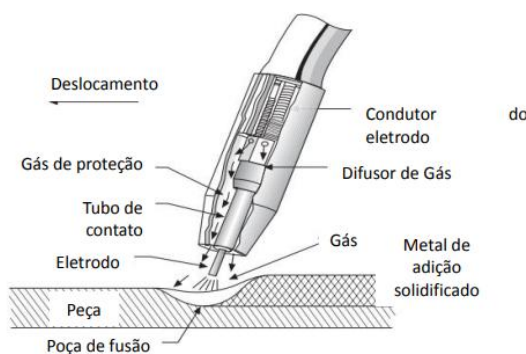
Neste capítulo são apresentadas informações relativas sobre soldagem MAG que fala sobre a Zona Afetada pelo Calor; Gás de proteção; modos de transferência metálica; energia de soldagem; aço Hardox 500; soldabilidade do aço Hardox 500; Influência dos consumíveis sobre a resistência das juntas soldadas; e ensaios mecânicos como análise metalográfica; de tração; de microdureza e de dobramento.

2.1 SOLDAGEM MAG

A soldagem MIG/MAG é o processo de união de peças metálicas através do aquecimento por meio de um arco elétrico formado entre um eletrodo metálico no consumível e a peça de trabalho. A proteção do arco e da região da solda é feita por gases, que podem ser inertes (hélio ou argônio) utilizados no processo Metal *Inert* Gás (MIG), ou ativos (O_2 , CO_2 ou mistura de Ar + CO_2) empregados no processo Metal Active Gas (MAG) (MARQUES *et al.*, 2007).

A soldagem a arco com proteção gasosa (GMAW) é um processo em que a união de peças metálicas é produzida pelo aquecimento destas com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo nu (arame) e a peça de trabalho. O arco elétrico é protegido durante o processo por um gás ou mistura de gases que podem ser ativos para soldagem MAG, ou inativos para soldagem MIG. A soldagem MIG/MAG é um processo semiautomático em que a alimentação do arame é feita mecanicamente através de um alimentador motorizado, e o soldador é responsável pela iniciação e interrupção da soldagem, além de mover a tocha ao longo da junta, como ilustrado na Figura 1 (MARQUES *et al.*, 2005).

Figura 1 - Soldagem MIG/MAG.

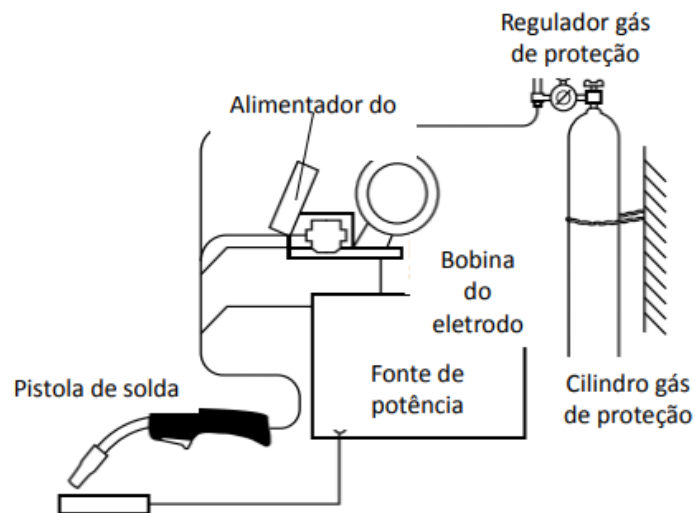


Fonte: AHMED (2005).

O processo de soldagem MAG é muito usado na soldagem robotizada, produz soldas com qualidade, limpas sem escória, pouco respingos e altas taxas de deposição com baixo custo (MARON, 2018). Entretanto, a manutenção do arco é garantida pela alimentação contínua do arame, e o comprimento do arco é em princípio mantido aproximadamente constante pelo próprio sistema, independentemente dos movimentos do soldador, dentro de certos limites, nos sistemas mais comuns usados com este processo (KRÜGER, 2020).

A soldagem MAG pode ser realizada por dois processos distintos, que se diferem pelo tipo de gás utilizado na proteção da poça de fusão. Em um deles o gás é inerte, significa que não exerce nenhuma atividade física na poça de fusão. Normalmente esse gás é monoatômico como pode ser citado o gás hélio e argônio. Enquanto que em outro o gás é ativo, tem uma interação com a poça de fusão. Neste caso normalmente; é utilizado o gás CO₂ (dióxido de carbono) e o oxigênio (MARQUES *et al.*, 2005). O equipamento básico para a soldagem MIG/MAG é composto de uma fonte de energia, um alimentador de arame, uma tocha e uma fonte de gás protetor, além de cabos e mangueiras como mostra a Figura 2.

Figura 2 - Equipamento básico para soldagem MIG/MAG.



Fonte: Lincoln Eletric (2012).

No processo MAG convencional, os parâmetros a serem definidos para a soldagem são: distância do bico de contato peça (DBCP); tensão elétrica (V); velocidade de alimentação do arame (V_a); velocidade de soldagem (V_s); e ângulo da tocha em relação à peça/chapa. Os valores de tensão e velocidade de alimentação

do arame são controlados diretamente na fonte e a velocidade de soldagem, quando robotizada, pode ser determinada no micro controlador (SSAB, 2016).

Segundo ESAB (2004) um dos principais fatores que se deve levar em consideração no momento da soldagem, é a correta escolha do metal de adição, pois quando misturado com o gás de proteção e ao metal de base iniciará o processo de formação de um depósito químico, o qual determinará as propriedades mecânicas e físicas da junta soldada.

Para Souza *et al.* (2011) o processo MIG/MAG é um dos processos de soldagem mais utilizados na indústria atualmente. Devido à importância do processo de soldagem para área de fabricação, caracteriza-se a necessidade de se garantir uma boa qualidade dos cordões de solda. Um dos modos operacionais mais utilizados desse processo é o da soldagem por curto-circuito. Com ele, a transferência de metal se dá basicamente por tensão superficial, quando a gota toca o metal líquido da poça. Este modo de transferência produz uma poça de fusão relativamente pequena, de rápida solidificação, sendo indicado para soldagem de seções finas ou soldagens fora da posição plana. Por causa da importância da aplicação desse tipo de transferência, inúmeros estudos foram realizados com objetivo de entender e aperfeiçoar este tipo de transferência.

De acordo com Villani (2016) na soldagem MIG/MAG a alimentação de arame eletrodo é feita mecanicamente, através de um alimentador motorizado, e o soldador é responsável pela iniciação e interrupção da soldagem, além de mover a tocha ao longo da junta. A manutenção do arco é garantida pela alimentação contínua do arame eletrodo, e o comprimento do arco é, em princípio, mantido aproximadamente constante pelo próprio sistema, independentemente dos movimentos do soldador, dentro de certos limites, nos sistemas mais comuns usados com este processo. O calor gerado pelo arco é usado para fundir as peças a serem unidas e o arame eletrodo, que é transferido para a junta e constitui o metal de adição.

Barbosa (2007) descreve que o processo de soldagem MAG também apresenta limitações, tais como:

- Resfriamento rápido pela ausência de escória, podendo ocasionar trincas;
- Equipamento de soldagem com custo elevado;
- Surgimento de respingos pelo processo de solda;
- Metais de adição imitados no mercado;

- Processo influenciado pelo ar;
- Grande emissão de raios ultravioletas.

Reitera dessa forma Villani (2016) que a principal limitação da soldagem MIG/MAG é a sua maior sensibilidade à variação dos parâmetros elétricos de operação do arco de soldagem, que influenciam diretamente na qualidade do cordão de solda depositado, além da necessidade de um ajuste rigoroso de parâmetros para se obter um determinado conjunto de características para o cordão de solda. A determinação destes parâmetros é dificultada pela forte interdependência destes e por sua influência no resultado final da operação. O maior custo do equipamento, a maior necessidade de manutenção deste, em comparação com o equipamento para soldagem com eletrodos revestidos, e a menor variedade de consumíveis são outras limitações deste processo.

Nos estudos de Santos (2015) na soldagem, a execução da deposição do metal de adição é de fundamental importância, pois, dependendo do movimento executado, a solda poderá apresentar defeito ou descontinuidades. Assim, temos dois tipos de passes, o linear é quando a soldagem é executada seguindo a linha de solda sem movimentos laterais, onde o metal depositado ficará com sua largura reduzida. Já na execução tecimento o soldador executa movimentos laterais compassados, para manter o aporte térmico e executar o preenchimento desse passe. Sua geometria na largura é maior nessa situação.

2.1.1 Zona Afetada pelo Calor (ZAC)

A entrada de calor de um método de soldagem depende da corrente aplicada, tensão e velocidade e descreve a energia fornecida/comprimento da junta. Durante a soldagem há perda de energia no arco. O fator de eficiência térmica (k) expressa a parte do aporte de calor que é transferido para a junta durante o processo de soldagem. Este parâmetro depende do processo de soldagem utilizado e das condições específicas de soldagem (SSAB, 2016).

A parte completa do metal de base é influenciada pelo ciclo térmico do procedimento de soldagem é chamada de ZAC. As características do tratamento térmico de soldagem são de importância crucial para as propriedades mecânicas e microestruturas na ZAC. Seu resultado depende principalmente (SSAB, 2016) da

posição na articulação; do nível de entrada de calor; da espessura da chapa; do tipo de junta; da temperatura de pré-aquecimento.

Segundo Gomes (2016) a soldagem é o mais importante processo de união de metais utilizado industrialmente. Ele é definido como sendo um processo de união entre duas partes metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão. Contudo, o processo de soldagem gera consigo regiões diferentes ao longo da junta soldada, onde as mesmas apresentam propriedades mecânicas diferentes, tornando um risco para uma futura quebra, quando submetida a um esforço. Dentre essas regiões a ZAC é que apresenta uma grande diferença de microestrutura entre pontos separados de uma pequena distância, devido à grande variação nos ciclos térmicos destes pontos. Como consequência, suas propriedades variam de região para região, dificultando a determinação destas para certa região particular e favorecendo uma elevada dispersão de resultados em certos ensaios. Para estudar as propriedades mecânicas da ZAC podem ser usados diferentes métodos. As propriedades de maior interesse da ZAC são em geral a dureza e a tenacidade (GOMES, 2016).

Na soldagem por fusão, a velocidade de resfriamento varia, com a energia cedida durante a soldagem por unidade de comprimento da solda, com a temperatura inicial da peça e com sua espessura e geometria. Este fato é de suma importância uma vez que limita a faixa de energia utilizável na soldagem de uma estrutura de aço em que se necessita boa tenacidade (MARQUES, 1991).

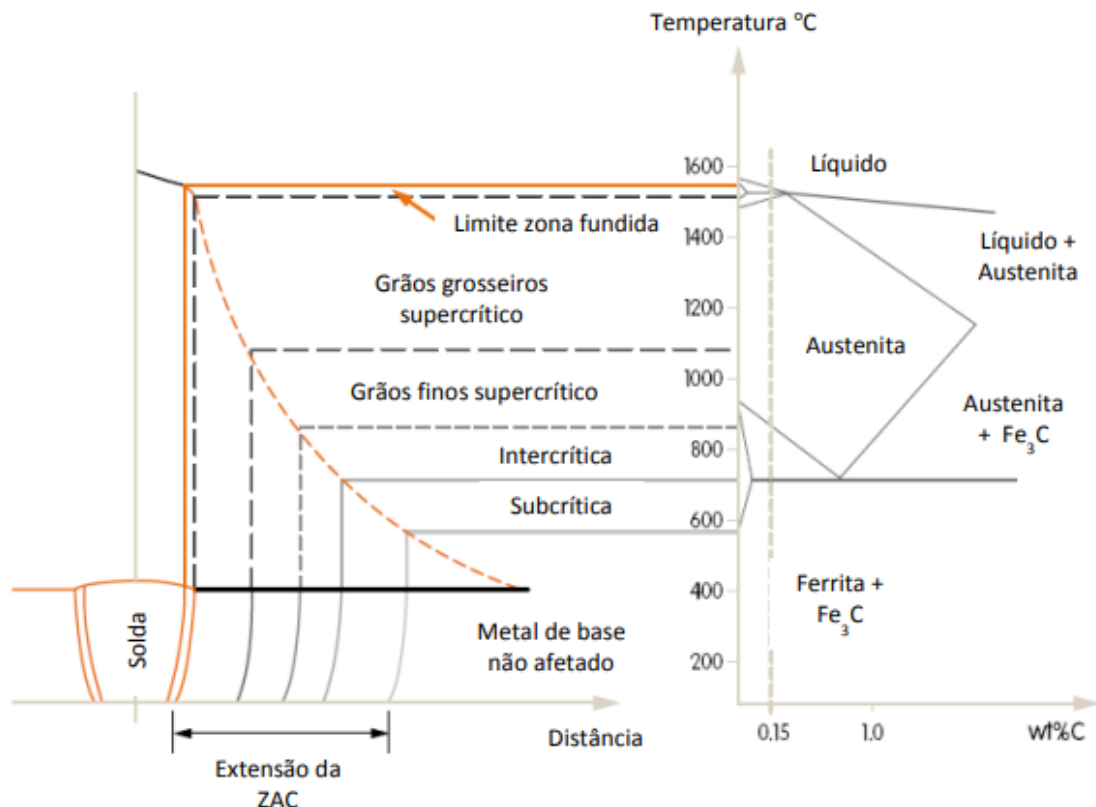
A solda é dividida em três regiões na soldagem com passe único: zona fundida (ZF) constituída pelo metal fundido; zona de ligação (ZL), constituída por uma estreita região onde ocorre uma fusão parcial do metal base junto à zona fundida e a zona afetada pelo calor (ZAC), região do metal base que sofreu alterações microestruturais causadas pelo calor da soldagem (AGUIAR, 2001; BRANDI, 1992). Segundo Carpenedo (2014) a ZAC tem início na borda da poça de fusão, onde a temperatura aumenta rapidamente e diminui rapidamente produzindo um efeito como o de têmpera. O trabalho feito por Costa (2014) teve como objetivo analisar a dureza ao longo de uma junta soldada.

Pode-se notar que partindo do metal de solda, o gráfico apresentou um pico de dureza na região de grãos grosseiros. Este pico de dureza pode ser atribuído à exposição a altas temperaturas, seguido de um resfriamento brusco, ocasionando a formação de uma microestrutura com elevada dureza, como a martensita. Conforme

o perfil se distancia, a dureza diminui, como na região de refino do grão. A dureza diminui até um valor mínimo, que corresponde à região subcrítica. Esta região caracteriza-se por um pico de temperatura abaixo da temperatura de austenitização, podendo ocasionar o revenimento da martensita, e fazendo com que a dureza diminua. A partir da região subcrítica a dureza aumenta até atingir a dureza do metal (GRANJEIRO JÚNIOR, 2017).

Segundo Kou (2003) a ZAC compreende toda a região do metal base que foi afetada, de algum modo, pelo calor gerado na soldagem, compreendendo desde a interface com o metal de solda, conhecida por linha de fusão, até regiões aquecidas a temperaturas entre 500 °C e 600 °C. Também explica que se pode visualizar com facilidade a ZAC por meio da análise macrográfica, onde fica de fácil compreensão a região afetada pelo calor, de acordo com a Figura 3.

Figura 3 – Zonas do material base afetadas pelas temperaturas de soldagem.



Fonte: EASTERLING (1992).

Segundo Matos (2014) uma forma de reduzir essa máxima dureza na região dos grãos grosseiros na ZAC seria o uso de um preaquecimento antes da soldagem, isso diminuiria a possibilidade da formação da martensita. Define-se como

temperatura de preaquecimento, a temperatura a que a região onde a solda será realizada é submetida. A quantidade de energia fornecida por determinada unidade de tamanho de cordão de solda pelo seu deslocamento de uma fonte de calor é denominada energia de soldagem. Portanto, essa energia de soldagem provoca alterações no metal base e no metal de adição, independentemente de sua origem. Os aspectos da junta soldada como a macroestrutura do metal de adição, o crescimento dos grãos e as transformações na microestrutura, são estabelecidos pelo fluxo térmico e tem grande influência nesses aspectos citados acima (DALCIN, 2016).

2.1.2 Gás de Proteção

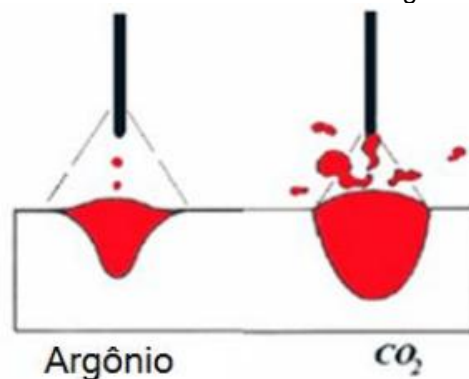
Os gases de proteção para a chapa antidesgaste Hardox são geralmente os mesmos normalmente escolhidos para aços não ligados e de baixa liga. Os gases de proteção usados no processo de soldagem MAG dos aços Hardox contêm uma mistura de argônio (Ar) e dióxido de carbono (CO_2). Uma pequena quantidade de oxigênio (O_2) às vezes é usada com Ar e CO_2 a fim de estabilizar o arco e reduzir a quantidade de respingos (SSAB, 2020). Para a soldagem com gás inerte, o Argônio é o mais utilizado, e para a soldagem com gás ativo, o dióxido de carbono é o mais utilizado. Também dependendo da geometria do cordão desejado, pode-se usar uma mistura de gases inertes e ativos para atingir o objetivo (GIMENES; RAMALHO, 2005). A mistura de gases ativos aos gases inertes tem como objetivo de gerar uma maior estabilidade do arco elétrico. A adição de pequenas quantidades de gases ativos tem as seguintes funções: aumentar a penetração; mudar o contorno na secção transversal; reduzir mordeduras e respingos (BRANDI *et al.*, 2004).

O uso correto do gás de proteção na soldagem MAG tem grande influência nas características do cordão de solda, tais como penetração, largura, formação de trincas e/ou mordeduras (SSAB 2005). De acordo com Santos (2015) como o processo utiliza como proteção da poça de fusão um tipo de gás e o seu eletrodo é nu (sem revestimento), a formação de escória é mínima. Mas quando são utilizados eletrodos banhados com cobre, é gerada uma possível fase vítrea, e que pode ser considerada de escória, pois se a limpeza não for executada com eficiência pode gerar uma inclusão, que não é condutora elétrica e pode causar uma falha. No

momento da execução, a não remoção de outro cordão sobre ela poderá gerar uma descontinuidade.

Recomenda-se uma mistura de gás de proteção com cerca de 18–20% de CO_2 em argônio para soldas manuais, a qual facilita uma boa penetração no material com uma quantidade razoável de respingos. Caso seja utilizada solda automática ou por robô, é possível usar um gás de proteção que contenha 8–10% de CO_2 em argônio, a fim de aperfeiçoar o resultado da solda com relação à produtividade e ao nível de respingos (SSAB, 2020).

Figura 4 - Perfil típico de cordões de solda feitos com diferentes gases.



Fonte: Marques *et al.* (2005).

Santos (2015) afirma que a sigla M (metal) A (ativo) G (gás) utiliza a mesma fonte de energia do processo MIG, porém sua proteção gasosa é feita com gases ativos, que reagem com a poça de fusão, como é o caso do dióxido de carbono CO_2 puro ou a mistura argônio x CO_2 . O metal de adição é diferente no processo, pois o eletrodo deve ser escolhido de acordo com o metal de base e a aplicação da solda. Além disso, cada tipo de gás poderá facilitar um tipo de transferência metálica, assim depositando metal fundido de maneira mais rápida e de melhor aplicação, e em várias posições.

Os aços Hardox são de alta resistência possuem limites de tensões semelhantes ou até superiores a aços comuns com alto teor de carbono. A diferença está nos elementos de liga que preenchem a necessidade excessiva de Carbono. Dessa forma, além do aço de alta resistência proporcionar a fabricação de uma estrutura com seções reduzidas e também tornando o equipamento mais leve, proporcionam uma soldabilidade boa durante seu processo (RODRIGUES, 2012).

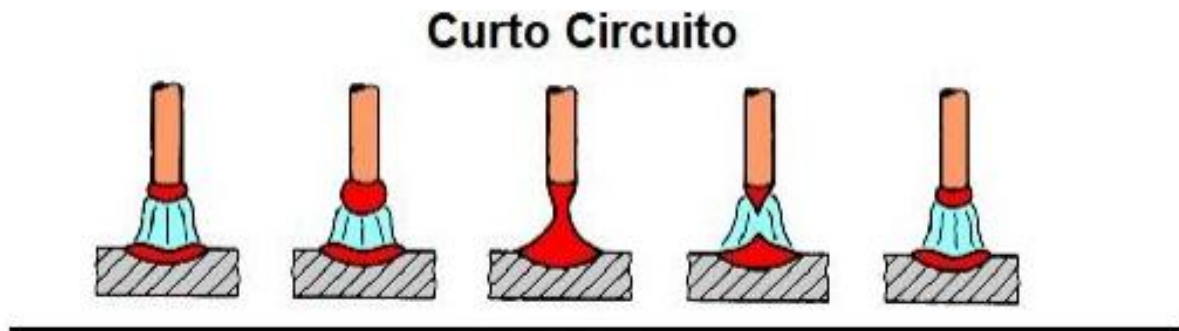
2.1.3 Modos de Transferência Metálica

Existem quatro formas principais de transferência de metal no processo de solda MAG: transferência por curto-circuito, transferência globular, transferência spray e transferência por arco pulsado (BRANDI *et al.*, 2004). Na transferência por curto-circuito as menores faixas de correntes e os menores diâmetros de arames são utilizados nesse sistema de transferência. Esse tipo de transferência produz uma poça de fusão pequena, com resfriamento rápido, sendo geralmente indicada para soldagem de seções finas, soldagem fora da posição plana e uniões com abertura excessiva de raiz. Nesse processo, o metal é transferido do eletrodo para a poça somente durante o período em que gota faz o contato (BRANDI *et al.*, 2004).

Para Souza (2011) no processo por curto-circuito, a regularidade da formação de respingos está fortemente relacionada ao efeito indutivo. Fontes convencionais de soldagem realizam o controle da indutância por meio de um indutor ligado em série com o arco. Já em fontes eletrônicas, existe um circuito que simula o efeito do indutor, ou seja, age de forma a variar a taxa de subida e descida da corrente. Em soldagem, não é possível se basear somente numa regulagem de um valor de indutância (por exemplo, em Henry) na fonte, pois a indutância do sistema não depende só do circuito da fonte, mas também do próprio arco. Por este motivo, as fontes possuem regulagens de posições de indutância e não valores de indutância. Então, a melhor forma de se fazer referência à indutância de um equipamento é pelo termo "efeito indutivo", ou seja, pelas taxas de crescimento e decrescimento da corrente para uma dada condição de soldagem.

A transferência por curto-circuito ocorre quando são usados baixos valores de tensão e corrente, normalmente usado para realizar soldagem em posições diferente da plana, ou em peças de pequena espessura quando baixa energia é necessária. Uma gota de metal se forma na ponta do eletrodo e vai aumentando de diâmetro até tocar na poça de fusão como mostra a Figura 5. Este modo de transferência caracteriza-se por apresentar grande instabilidade no arco, podendo ter formação intensa de respingos (MARQUES *et al.*, 2005).

Figura 5 - Modo de transferência por curto-circuito.

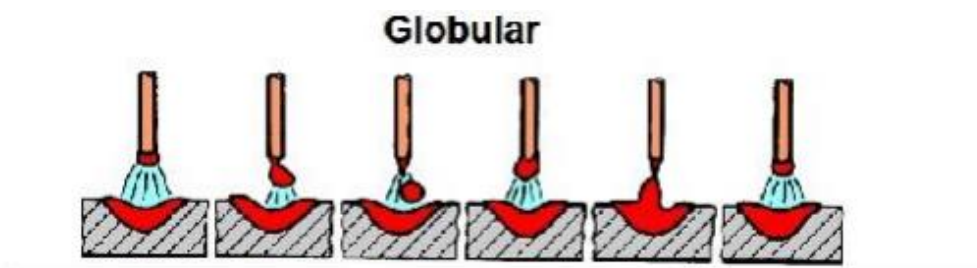


Fonte: Infosolda (2013).

Na transferência globular as tensões são mais elevadas do que na transferência por curto-circuito. Neste tipo de transferência a força gravitacional faz a transferência das gotas de metal fundido para a poça de fusão, com isso limita-se esse tipo de transferência à posição plana. É comum ocorrer respingos, falta de fusão e penetração nesse tipo de transferência (QUITES, 2002).

Ocorre quando são usados valores intermediários de corrente e tensão, resultando em um arco mais estável que o modo curto-circuito. O diâmetro médio das gotas transferidas varia com a corrente, tendendo a diminuir com o aumento da corrente, mas em geral as gotas têm um diâmetro maior que o eletrodo. Com o uso limitado em posições planas, pois o metal se desprende do eletrodo e transfere-se para a peça pela ação da gravidade, como mostra a Figura 6 (MARQUES *et al.*, 2005).

Figura 6 - Modo de transferência globular.



Fonte: Infosolda (2013).

De acordo com a Infosolda (2013), o ajuste da indutância para produzir poucos respingos depende do material e do diâmetro do eletrodo utilizado; de modo geral, eletrodos de maiores diâmetros exigem altas correntes de curto-circuito e

maior indutância. As fontes de soldagem disponíveis no mercado têm indutância fixa, com faixas pré-determinadas ou com ajuste contínuo.

Dessa forma, Santos (2015) comenta que o CO₂ trabalha-se com arco elétrico mais curto e com ar mais longo; utilizando o CO₂, obtém-se um arco elétrico mais concentrado, que oferece uma boa penetração. Já o argônio proporciona um arco mais estável, aumenta a frequência de transferência das gotas, além de reduzir a frequência de curtos-circuitos entre as mesmas gotas e a poça de fusão. A transferência se processa em forma de glóbulos que se destacam do arame eletrodo por pensamento, sendo muitas vezes lançados na direção contrária por um componente denominado força do arco elétrico, de origem eletromagnética.

Diante desse contexto, segundo Infolsolda (2013), na transferência por “*spray*”, o diâmetro médio das gotas diminui à medida que a corrente aumenta, apresentando dimensões inferiores às do diâmetro do eletrodo, de modo que a transferência se processa sob velocidade muito alta, configurando uma névoa. A transferência por “*spray*” ocorre apenas com nível de corrente acima da corrente de transição, com gás inerte ou com misturas de gases inertes contendo no máximo de 15 a 18% de CO₂.

Assim, ainda de acordo com Infolsolda (2013), a corrente de transição depende do material de que é feito o eletrodo, de seu diâmetro e do tipo de gás de proteção; quanto maior o diâmetro do eletrodo, maior será a corrente; também a adição de CO₂ ao argônio, por exemplo, aumenta o valor da corrente. No entanto, a adição excessiva de CO₂ na transferência por “*spray*” eleva demais a corrente, deixando-a fora da faixa comum de utilização e dificultando a soldagem. A relação existente entre a corrente de transição e o diâmetro do eletrodo para diferentes tipos de metais pode ser mostrada por um gráfico.

Na transferência por “*spray*” ou aerossol à medida que se aumenta a corrente de soldagem, o diâmetro médio das gotas de metal líquido que se transferem para a peça diminui, até que acima de uma faixa há uma mudança brusca no modo de transferência que passa de globular para aerossol. Neste modo as gotas de metal são pequenas com diâmetro menor que o eletrodo como observado na Figura 7, o arco é bastante estável e praticamente não há ocorrência de respingos. (MARQUES *et al.*, 2005).

Figura 7 - Transferência por “*spray*”

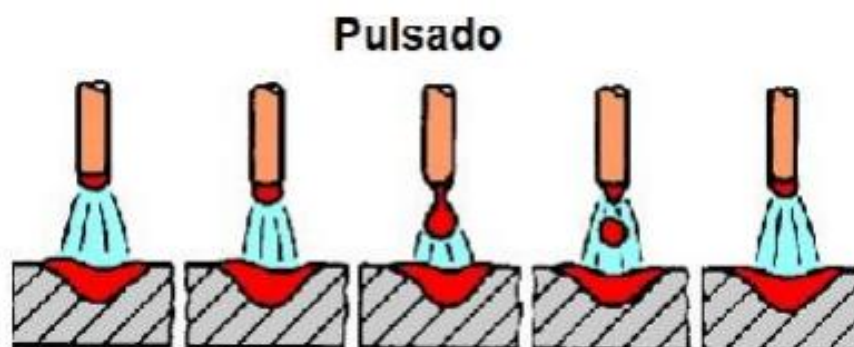


Fonte: Infosolda (2013).

A transferência por *spray* ocorre para maiores densidades de correntes e quando utilizado gás de proteção argônio ou mistura de argônio. Uma gota menor que o diâmetro do eletrodo é formada em sua ponta para que esse tipo de transferência possa acontecer. Neste processo a quantidade de calor transferida para a peça é elevada, sendo aconselhada a soldagem em chapas grossas (BRANDI *et al.*, 2004).

A transferência controlada mais usada é a pulsada, que é um tipo de transferência globular, porém mais estável e uniforme, consegue-se esse efeito usando dois níveis de corrente, um inferior e outro superior à corrente de transição para modo globular. Quando a corrente está no nível baixo ocorre à formação da gota e quando a corrente passa para o nível superior ocorre à transferência da gota conforme mostra a Figura 8. Esse processo só é realizado por equipamentos eletrônicos não sendo possível em fontes convencionais (MARQUES *et al.*, 2005).

Figura 8: Modo de transferência controlada.



Fonte: Infosolda (2013).

2.1.4 Energia de Soldagem

De acordo com a Infosolda (2022), a energia de soldagem (E) é a energia introduzida no metal de base por unidade de comprimento do cordão de solda. A energia de soldagem é calculada por meio da Equação 1. De acordo com a própria definição de energia de soldagem, a energia elétrica produzida pelo arco deve ser corrigida para a energia térmica que efetivamente foi introduzida na peça. A fração de energia térmica perdida é função das particularidades de cada processo de soldagem. Por isso, para corrigir a energia de soldagem é definido o adimensional η que é chamado eficiência térmica do processo de soldagem (INFOSOLDA, 2022). Durante o processo de soldagem, onde ocorre a fusão do metal base com metal de adição, a energia necessária para ativar a movimentação atômica entre os metais é definida como sendo a energia liberada da fonte de calor por unidade de comprimento da solda (MARQUES, 2009). É uma informação útil na avaliação dos efeitos metalúrgicos da operação de soldagem sobre o material que está sendo soldado. A equação 1 define esta grandeza.

$$At = \frac{V \times I}{v_s} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

At : Energia de soldagem (kJ/mm)

V : Tensão (volt)

I : Corrente elétrica (A)

V_s : Velocidade de soldagem (mm/min)

Segundo Marques (2009), a energia além de ser concentrada “gera pequenas regiões de temperaturas elevadas, altos gradientes térmicos, variações bruscas de temperaturas e, conseqüentemente, extensas variações de microestrutura e propriedades em um pequeno volume de material”. De acordo com o SENAI (2013) reitera-se que a soldagem envolve aquecimento, fusão, solidificação e resfriamento de um material ou de diversos materiais, dependendo da aplicação do componente soldado. Portanto o aquecimento é necessário, porque as transformações que ocorrem no aquecimento formam fases durante a fusão, a solidificação e as transformações que ocorrem no resfriamento determinam o desempenho da junta

soldada. Desta forma, a metalurgia da soldagem está intimamente ligada à qualidade da junta soldada.

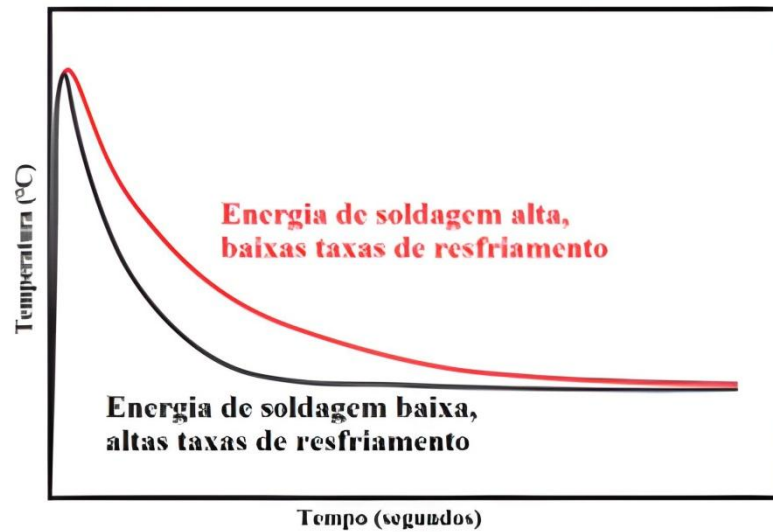
De acordo com SSAB (2020), iniciando com o processamento de aço na SSAB, a linha completa de classes Hardox e Weldox é projetada para soldabilidade favorável. A seleção do teor de liga química juntamente com os níveis extremamente baixos de contaminantes para cada grau de aço individual contribui para essas condições. Além disso, o processamento do aço na SSAB é desenvolvido de forma a oferecer propriedades benéficas nas juntas desses tipos de aço.

Uma grande proporção de inclusões e precipitações se dissolve quando a temperatura é alta. Quando isso acontece, não há inclusões nem precipitações próximas ou na linha de fusão. Normalmente as descontinuidades ocorrem nas zonas de menor dureza da ZAC, pois nestas regiões a resistência da junta soldada será menor que o MB (SSAB TUNNPLAT, 2004). Testes laboratoriais com soldas de filete mostraram que não irão ocorrer trincas na ZAC se a dureza dos aços com tensão de escoamento 700 MPa for inferior a 400 Vickers (AWS D1.1, 2006).

O tempo de resfriamento entre 800°C e 500°C, é frequentemente usado na soldagem. A razão é que a taxa de resfriamento da junta soldada é muito importante para determinar a microestrutura e as propriedades mecânicas obtidas na junta (SSAB TUNNPLAT, 2004; EASTERLING, 1992; MACHADO, 2000), e principalmente, na ZAC (PIRINEN, 2013). A microestrutura local e as propriedades de qualquer ponto ao longo do cordão de solda são determinadas pelo ciclo térmico sofrido no ponto em questão, com o pico de temperatura diminuindo conforme o aumento da distância da linha central do cordão (MACHADO, 2000; KOU, 2003).

Conforme mostrado na Figura 10, as taxas de resfriamento são baixas com o uso de altas energias de soldagem; contudo, as taxas de resfriamento são altas quando empregado baixas energias de soldagem (FUNDERBURK, 1999; LANCASTER, 1999). A largura da ZAC irá aumentar e a dureza irá cair quando a soldagem for realizada com energias mais elevadas; portanto estes fatores devem ser controlados durante a soldagem (SSAB TUNNPLAT, 2004; KAPUSTKA et al., 2008; HOCHHAUSER et al., 2012; GÓRKA, 2013; PIRINEN, 2013; BUNAZIV, 2013). A Figura 9 mostra os efeitos da energia de soldagem em relação a temperatura e tempo de resfriamento.

Figura 9 – Influência de energia de soldagem na taxa de resfriamento.



Fonte: FUNDERBURK (1999).

Conforme mostrado na Figura 4, as taxas de resfriamento são baixas com o uso de altas energias de soldagem; contudo, as taxas de resfriamento são altas quando empregado baixas energias de soldagem (FUNDERBURK, 1999; LANCASTER, 1999). A largura da ZAC irá aumentar e a dureza irá cair quando a soldagem for realizada com energias mais elevadas; portanto estes fatores devem ser controlados durante a soldagem (SSAB TUNNPLAT, 2004; KAPUSTKA *et al.*, 2008; HOCHHAUSER *et al.*, 2012; GÓRKA, 2013; PIRINEN, 2013; BUNAZIV, 2013).

2.2 AÇO HARDOX 500

O Hardox é um aço amplamente utilizado em aplicações nas quais se deseja elevada resistência ao desgaste. Este aço possui resistência mecânica o suficiente para, muitas vezes e dependendo do aço comparado, dobrar o transporte de carga em diversas aplicações. Todavia, ele permite que se projetem estruturas resistentes ao desgaste, fortes e que, ao mesmo tempo, se possa obter economia de combustível, pois é conseguida uma mesma resistência estrutural com economia de peso devido a seu alto limite de escoamento (PONTES, 2016).

A composição química do aço Hardox 500 definida pelo fabricante (SSAB) em porcentagem máxima para cada elemento químico. Apresenta propriedades

mecânicas muito significativas principalmente na dureza especificada. O percentual de elementos químicos e propriedades mecânicas são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química e propriedades mecânicas do aço Hardox 500

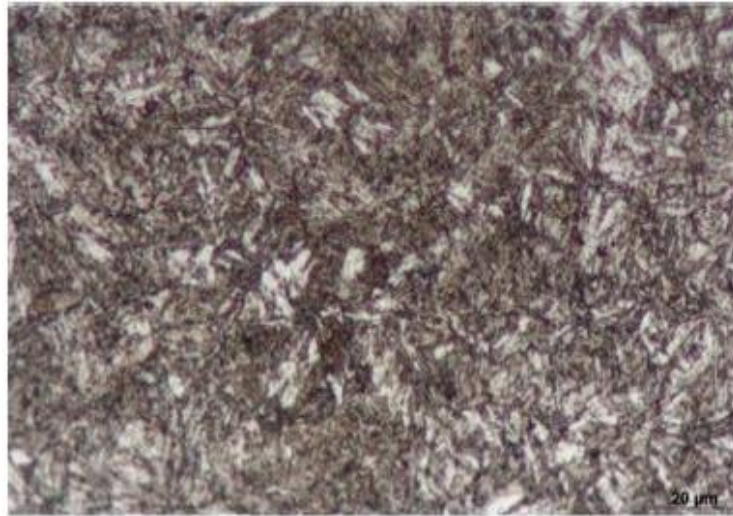
Composição química do aço Hardox 500								
C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %	B %
0,30	0,40	1,30	0,020	0,010	2,20	2,0	0,40	0,005
Dureza (HRC)			Resistência a Tração (MPa)			Resistência ao Impacto		
45-51			1250			37J – 40°C		
Classe Hardox	Espessura (mm)		Dureza (HBW) Min-Máx		Resistência ao impacto			
Hardox 400	4 – 130		370 – 430		45J / -40°C			
Hardox 450	3,2 – 130		425 – 475		50J / -40°C			
Hardox 500	4 – 103		470 – 540		37J / -40°C			
Hardox 550	8 – 65		525 – 575		30J / -40°C			
Hardox 600	6 - 65		550 - 640		-			

Fonte: SSAB (2022).

Estes aços são produzidos por laminação a quente e processado por tratamento térmico de têmpera e revenido. Eles apresentam microestrutura de martensita revenida, de elevada dureza devido à combinação entre o carbono e os elementos de liga adicionados ao aço (manganês, cromo, níquel, molibdênio e boro), conforme Löwgren *et al.* (1998) e Guimarães (2011). Os aços Hardox são processados por tratamento térmico de têmpera e revenido. Esses materiais possuem microestrutura martensítica de elevada dureza ao longo de toda espessura da chapa, em decorrência da combinação entre o carbono e os elementos de liga adicionados a esses aços, como cromo (Cr), níquel (Ni) e molibdênio (Mo) (RIME, 2018; GUIMARÃES *et al.*, 2011).

Segundo os estudos de Rodrigues (2012), os aços de alta resistência possuem elementos de liga que agregam resistência mecânica, tais como: Limite de Ruptura, Limite de Escoamento, Módulo de Elasticidade etc. que atendem aos limites requeridos na indústria de implementos rodoviários, sem precisar adicionar uma quantidade alta de carbono (C). A alta quantidade de C aumenta a dureza do material, porém em quantidade excessiva pode fragilizá-lo e causar dificuldades no processo de soldagem. Já o estudo realizado por Pontel (2016) mostrou, a partir da análise de microscopia óptica, que o aço Hardox 500 revelou uma microestrutura martensítica revenida, como mostrado na Figura 10, o que sugere dois tratamentos térmicos diferenciados para o mesmo material.

Figura 10 - Microestrutura do aço Hardox 500.



Fonte: Pontel (2016).

O aço Hardox 500 possui características que lhe conferem boa soldabilidade e facilidade de trabalho mecânico, como o dobramento, permitindo que ele seja facilmente empregado em situações onde se buscam aumentos na resistência mecânica e redução de peso. Sua comercialização é feita na forma de chapas em espessuras que vão de 0,4 mm até 103 mm (SSAB, 2015). De acordo com Mendes e Silveira (2016) entre as propriedades mecânicas que são verificadas por ensaios, destacamos como principais na Tabela 2.

Tabela 2 – Principais propriedades mecânicas analisadas por ensaios.

Resistência	Define a máxima tensão que pode ser sustentada por uma estrutura;
Elasticidade	Determina quanto o material se deforma em função da aplicação de tensão e como essa deformação desaparece quando a tensão é retirada;
Plasticidade	Verifica a capacidade de sofrer deformação permanente sem que ocorra a ruptura;
Resiliência	Avalia a capacidade do material de absorver energia quando é deformado elasticamente e, com o descarregamento posterior, tiver essa energia recuperada;
Tenacidade	Determina quanto de energia o material absorve desde seu estado inicial até a ruptura

Fonte: Mendes e Silveira (2016).

É um material com excelentes propriedades relacionadas à resistência ao desgaste, devido à sua alta dureza quando comparada aos demais aços. A elevada resistência mecânica deste material é obtida através do seu processo de fabricação altamente controlado, o qual submete o aço a um tratamento térmico após sua

laminação, alterando sua microestrutura e conferindo-o elevadas dureza e resistência mecânica (CARPENEDO, 2017).

2.2.1 Soldabilidade do Aço Hardox

O aço Hardox é o aço mais resistente à abrasão do mundo, com uma dureza e tenacidade incomparável, oferece muito mais economia para seu usuário devido sua tecnologia antidesgaste. O aço Hardox possui ótima capacidade de dobra e soldabilidade, podendo ser aplicado em vários componentes e estruturas expostas ao desgaste. O aço Hardox pode ser soldado desde que alguns cuidados sejam tomados. Estes cuidados, conseqüentemente, vão maximizar suas propriedades mecânicas e desempenho em trabalho. Os aspectos importantes são: escolha do consumível; energia de soldagem; pré-aquecimento (LÖWGREN *et al.*, 1998).

Segundo Andrade (2013), as Chapas de Aço Hardox são capazes de servir como peça de sustentação de carga em muitas aplicações, abrindo novas possibilidades para a inovação de projetos estruturais. Aplicações abrasivas e ambientes agressivos com intenso desgaste simplesmente não é páreo para Chapas de Aço Hardox e não importam quais sejam os seus desafios: a chapa resistente ao desgaste Hardox oferece uma melhor resistência, maior capacidade de carga e vida útil prolongada.

A determinação do consumível adequado é em primeiro lugar, de acordo com SSAB (2014) importante para evitar a trinca induzida pelo hidrogênio (TIH), ou seja, deve-se utilizar um consumível com baixo nível de hidrogênio, menor ou igual a 5 ml por 100 g de metal de solda depositado é requerido para se evitar possíveis problemas com trincas, já que a microestrutura dos aços Hardox é a martensita revenida e, esta microestrutura, apresenta susceptibilidade a TIH (TONEL, 2016). Dentre os requisitos para aumentar o desempenho do aço Hardox, talvez a energia de soldagem seja o mais importante destes fatores. A energia de soldagem (Q) é aplicada no metal base por unidade de comprimento, conforme Brandi *et al.* (2004).

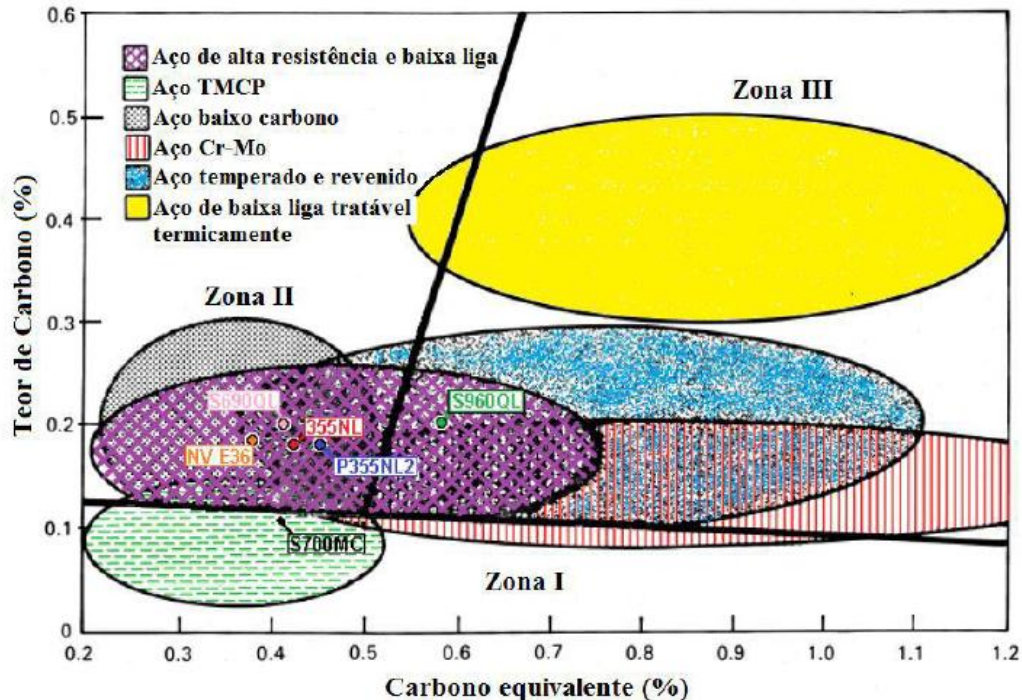
Além dos cuidados citados acima que devem ser tomados na soldagem destes aços, outra questão de suma importância é a determinação do carbono equivalente (Cev) e de teor do elemento carbono (C) na composição química do aço, pois eles permitem verificar a susceptibilidade a trinca na zona afetada pelo calor (ZAC). Um dos fatores principais que determinam a soldabilidade dos aços é a

resistência que a zona termicamente afetada apresenta contra a trinca a frio. De forma geral, a suscetibilidade da ZAC de um dado aço à trinca, depende tanto de sua composição química como de parâmetros de soldagem, conforme Machado (2007). A fórmula do C_{ev} , recomendada pela SSAB (2014) é a do “*International Institute of Welding*” (IIW) e apresentada na Equação 2, em porcentagem de massa dos elementos químicos.

$$C_{ev} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%N + \%Cu}{15} \quad (\text{Equação 2})$$

É importante observar que a utilização da Equação 3, combinada com o diagrama de Graville, ilustrado na Figura 11, mostra o vínculo da composição química com a soldabilidade do aço. Aços que geralmente apresentam boa soldabilidade são os aços cujo C_{ev} estão abaixo de 0,40, porém esta condição está também relacionada ao teor de carbono contido neste aço, conforme Datta (2002).

Figura 11 - Diagrama de Graville ilustrando o vínculo entre a soldabilidade de um aço com a sua composição química.



Fonte: Davis (2006).

O diagrama de Graville mostra a susceptibilidade a trincas induzidas por hidrogênio em função do teor de carbono e do carbono equivalente. Nessa figura a zona I é própria dos aços de baixo carbono e baixa temperabilidade, os quais não

são muito susceptíveis a trincas induzidas por hidrogênio. Na zona II os aços têm carbono mais alto que os da zona I, mas ainda apresentam baixa temperabilidade, sendo, portanto, possível evitar microestruturas sensíveis a trincas pelo controle do resfriamento da ZAC. Isso pode ser alcançado através do controle da energia de soldagem e da utilização de preaquecimento. Na zona III, os aços têm elevados teores de carbono e a temperabilidade alta, podendo facilmente produzir microestruturas sensíveis às trincas. Para se evitar as trincas induzidas por hidrogênio nessa zona, devem-se usar processos de baixo hidrogênio, preaquecimento e tratamento térmico pós-soldagem (AGUIAR, 2001).

Nos estudos de Milanez *et al.* (2016) foram feitas análises dos parâmetros de soldagem MAG em aços de alta resistência. Foram utilizadas várias posições de soldagem. Após a soldagem foram retiradas amostras dos corpos de prova soldados para analisar os defeitos de soldagem. Nesse contexto, Milanez *et al.* (2016) realizaram vários testes com o Hardox 500, fazendo uma comparação podemos observar que os resultados foram semelhantes, ou seja, em ambos ocorreu ruptura na região da solda ou na ZAC, com valores de tensão menores que a tensão de ruptura do material.

Pesquisas realizadas por Frydman *et al.* (2008) soldando chapas de 8 mm de espessura de Hardox 500 pelo processo de soldagem a arco submerso com uma energia de soldagem de 2,57 kJ/mm, mostraram que o limite de resistência da junta soldada ficou em torno de 50% menor do que o do material na condição de recebido no ensaio de tração. A dureza do metal de solda ficou em torno de 50% daquela do metal base, enquanto que na ZAC o valor mínimo de dureza foi de aproximadamente 40% da dureza do metal base. Outra questão é que a largura das regiões de queda de durezas, metal de solda mais a ZAC chegou a um valor total de 90 mm, que é bastante elevado para uma junta soldada.

Na soldagem pelo processo manual a mistura de CO₂ e Ar devem ser controlados entre os valores de 18% a 20% de CO₂ misturado em Ar, resultando em uma boa penetração do metal de adição com metal base e conseqüentemente a redução de respingos de solda. Já pelo processo robotizado, é recomendada a dosagem de 8% a 10% de CO₂ em Ar, melhorando a penetração e reduzindo os respingos de solda (CARPENEDO, 2017).

Diante desse contexto, o carbono equivalente fornece um valor numérico da contribuição da composição química para a suscetibilidade de formação de trincas

induzidas por hidrogênio em aço. O aço carbono é um dos materiais mais produzidos pelo homem, pela facilidade de controlar sua microestrutura, por ter boa soldabilidade e propriedades usuais desejadas. O processo de soldagem mais utilizado atualmente para a soldagem deste material é o aço Hardox 500 devido a suas inúmeras vantagens.

Conforme ESAB (2004) a necessidade desses tratamentos é função do teor de carbono e de elementos de liga (composição química), tamanho das peças, velocidade de soldagem, diâmetro do consumível, rigidez da junta, processo de soldagem e temperatura inicial. O pré-aquecimento reduz o risco de trincas por hidrogênio, tensões de contração e a dureza na zona termicamente afetada.

A soldabilidade de um aço é determinada pelo seu carbono equivalente, ou seja, quanto maior for o carbono equivalente, maior será a temperatura de pré-aquecimento (ESAB, 2004). A AWS D1. 1 (2001), recomenda para o caçulo do carbono equivalente a equação 2. Em função do resultado obtido de carbono equivalente, é possível verificar a necessidade de pré-aquecimento. As temperaturas de pré-aquecimento variam de acordo com o percentual de carbono equivalente obtido no material, as temperaturas recomendadas (ESAB, 2004). Para o aço Hardox 500 o carbono equivalente obtido foi de 0,3%, portanto, não é necessário realizar pré-aquecimento da junta.

2.2.2 Influência dos consumíveis sobre a resistência da junta soldada do Aço Hardox 500

Um dos fatores de grande importância a se considerar na solda MAG é a escolha correta do metal de adição (arame de solda), pois o metal de adição em soma com o gás de proteção formará um depósito químico, no qual determinará as propriedades físicas e mecânicas da solda. Existem alguns fatores que influenciam a escolha do metal de adição para a soldagem MAG, dentre eles (ESAB, 2004):

- A composição química do MB;
- As propriedades mecânicas do MB;
- O gás de proteção empregado;
- O tipo de serviço ou os requisitos da especificação aplicável;
- O tipo de projeto de junta.

Entretanto, no que diz respeito à normatização dos consumíveis, a norma AWS A 5.18 é responsável por reger a classificação dos arames-eletrodos para a soldagem dos aços. A seleção do arame em dada operação é feita em termos de composição química do metal de base, do gás de proteção a ser usado e da composição química e propriedades mecânicas desejadas para a solda (MARQUES *et al.*, 2011).

Dessa forma, se a junta soldada estiver localizada em uma área sujeita à grande desgaste, é possível usar revestimentos contra desgaste com consumíveis especiais, a fim de aumentar a resistência ao desgaste do metal de solda. As instruções para a junção e aplicação de revestimento contra desgaste do aço Hardox devem ser seguidas (SSAB, 2020).

Com a utilização de metais de adição “*undermatching*” é possível diminuir a tendência à trinca, tanto no metal de adição, quando no MB, pois o metal de adição é mais dúctil. Estes metais de adição geralmente são usados para reduzir a concentração de tensão no metal base, e sua empregabilidade pode ser para todos os tipos de solda e carregamento, com exceção a juntas soldadas com penetração completa carregados em tração. Juntas soldadas com penetração completa em cisalhamento ou carregamento paralelo ao eixo longitudinal também podem ser soldadas com este consumível (MILLER 1994; MACHADO, 2012; DALCIN, 2016).

Alguns consumíveis para revestimentos contra desgaste requerem uma temperatura de pré-aquecimento extremamente alta, que pode ultrapassar a temperatura de interpasse máxima recomendada dos aços Hardox (SSAB, 2020). De acordo com ESAB (2013) há uma série de consumíveis aptos à soldagem de aços carbono, dentre os quais se encontram o AWS ER70S-6, definidos como parâmetros de estudo deste trabalho em função de disponibilidade e aplicação na indústria. Sendo assim, utiliza-se AWS ER70S-6, que é um arame maciço indicado para soldagem de aços carbonos e com baixos níveis de impurezas. Durante a soldagem mantém o arco estável, com baixos níveis de respingos, ótimo acabamento e adequado tanto para transferência curto-circuito, *spray* e globular. Possui uma camada uniforme de revestimento de cobre e uma quantidade adequada de lubrificante que auxilia na alimentação (LINCOLN ELECTRIC, 2016).

Sua fabricação diferenciada lhe confere desempenho, maior estabilidade de arco e menores níveis de respingos, até mesmo quando utilizado com elevadas correntes de soldagem. A presença da camada de cobre em seu revestimento evita

problemas de alimentação, que o torna indicado especialmente para soldagens robotizadas e/ou mecanizadas, resultando em cordões com bom acabamento, ótimas propriedades mecânicas, baixo nível de respingos (GERDAU, 2014).

Dessa forma, compreende-se que utilizando metal de adição “*overmatching*” é possível reduzir a massa do metal de adição, porém, o uso deste metal de adição pode produzir indesejáveis e altas tensões residuais, podendo ocasionar trincas. A resistência do filete e das juntas soldadas sem penetração completa é controlada pela dimensão da garganta, comprimento de solda, e pela resistência mecânica do metal de adição. Entretanto, a resistência mecânica de uma junta soldada também depende da área da interface entre o metal de adição e o MB, ou seja, para uma carga igual quanto menor for esta área, maior será a tensão (cisalhamento ou normal), podendo gerar um esforço excessivo no MB. Em teoria, o metal de adição *overmatching* permite que os tamanhos das soldas sejam menores e com igual resistência mecânica àquelas produzidas com consumível *undermatching* (MILLER 1994; MACHADO, 2012; DALCIN, 2016).

2.3 ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos permitem a determinação de propriedades mecânicas que se referem ao comportamento do material quando sob a ação de esforços e que são expressas em função com tensões e/ou deformações. Tensões representam a resposta interna aos esforços externos que atuam sobre uma determinada área em um corpo (GARCIA *et al.*, 2012). De acordo com Santos (2020) os ensaios dos materiais consistem em métodos empregados para determinar características, propriedades e comportamento dos materiais de engenharia. É necessária a padronização dos ensaios aplicados aos materiais para que haja uma linguagem comum entre seus fornecedores e seus usuários. Dessa forma, os ensaios dos materiais são procedimentos padronizados que compreendem testes, cálculos, gráficos e consultas a tabelas, em conformidade com normas técnicas.

Para determinar as propriedades mecânicas de um material metálico são realizados vários ensaios. Geralmente esses ensaios são destrutivos, pois promovem a ruptura ou a inutilização do material. Existem ainda os ensaios chamados não destrutivos, utilizado para determinação de algumas propriedades físicas do metal, bem como detectar falhas internas do mesmo (SOUZA, 2000). Na

categoria dos ensaios destrutivos estão classificados os ensaios de tração, dobramento, flexão, torção, fadiga, impacto, compressão e outros. Os ensaios de dureza, que embora possa, em certos casos, não inutilizar a peça ensaiada, também está incluso nessa categoria. Dentre os não destrutivos, estão os ensaios com raios-X, raio gama, ultrassom, magna flux, elétricos e outros (SOUZA, 2000).

2.3.1 Análise Metalográfica

A análise metalográfica consiste em avaliar as características microestruturais e visuais da ZAC, a fim de identificar a formação de estruturas indesejadas ou ainda verificar características como diluição, geometria da poça de fusão e dimensões da ZAC. É um ensaio que pode avaliar o material tanto em nível microscópico quanto macroscópico, dependendo apenas das informações alvo da análise (CARPENEDO, 2017).

De acordo com Santos (2020) a metalografia pode ser definida como o exame ou a análise da estrutura de um material ou amostra metálica por meio de uma superfície devidamente polida e geralmente atacada com um reagente específico. É uma ferramenta muito importante para a caracterização e o controle de materiais metálicos. Compreende o estudo da estrutura em nível de micro e de macroestrutura.

Para Rohde (2010), este ensaio procura relacionar a estrutura interna do material com as suas propriedades físicas obtidas através do processo de fabricação, correlacionando-as com o desempenho de suas funções, permitindo observar possíveis defeitos gerados pela soldagem. A análise macrográfica permite que seja observado a olho nu, ou com pouca ampliação (50X), o aspecto de uma superfície após ser devidamente atacada e polida por um reagente.

2.3.2 Ensaio de Tração

Entre os diversos tipos de ensaio existentes para a avaliação das propriedades mecânicas dos materiais o mais amplamente utilizado é o ensaio de tração. Que consiste na aplicação de carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova específico até a ruptura. Mede-se a variação no comprimento como função da carga aplicada, e após o tratamento adequado dos resultados obtêm-se

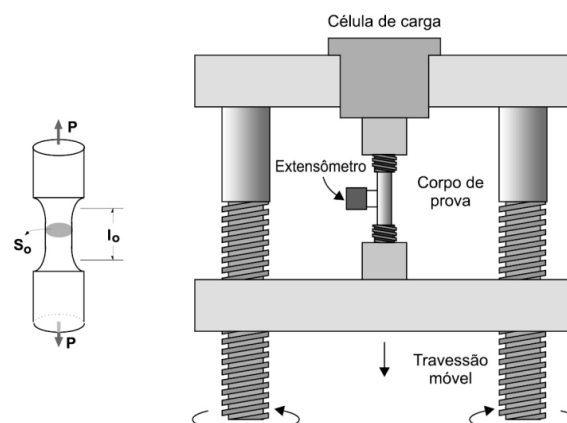
uma curva tensão versus a deformação do corpo de prova. Trata-se de um ensaio amplamente utilizado na indústria de componentes mecânicos, devido à vantagem de fornecer dados quantitativos das características mecânicas dos materiais. (GARCIA *et al.*, 2012).

O ensaio de tração consiste em submeter um corpo de prova de geometria definida a um esforço crescente na direção axial do corpo de prova, levando-o a se romper. Os esforços utilizados para realização do ensaio são medidos na própria máquina. O ensaio de tração é feito em corpos de prova de dimensões padronizadas por normas nacionais e internacionais. Para a escolha da dimensão padronizada do corpo de prova também deve ser levada em consideração a capacidade da máquina de tração, disponível para a realização do ensaio (FELIX *et al.*, 2018).

Para Santos (2020) o ensaio de tração é bastante utilizado como teste para o controle das especificações da entrada de matéria-prima. Os resultados fornecidos pelo ensaio de tração são fortemente influenciados pela temperatura, pela velocidade de deformação, pela anisotropia do material, pelo tamanho de grão, pela porcentagem de impurezas, bem como pelas condições ambientais.

No ensaio de tração, conforme esquema ilustrado na Figura 12, o corpo de prova é submetido a uma força de tração uniaxial, promovendo o seu alongamento até a ruptura, a uma velocidade constante e em curto espaço de tempo (MENDES; SILVEIRA, 2016).

Figura 12– Célula de carga.



Fonte: Santos (2020).

Como comentam Mendes e Silveira (2016), o corpo de prova é uma amostra representativa do material que será analisado, com forma e dimensões especificadas em normas, como a ISO 377: 2017. Os corpos de prova normalmente

são obtidos pela usinagem de uma amostra do produto, por forjamento ou por fundição.

De acordo com os autores Mendes e Silveira (2016) antes do início do ensaio, a máquina deve ser preparada. A fim de minimizar possíveis erros de leitura durante a execução, a máquina deve ser aquecida, se necessário, testada e zerada. O corpo de prova deve ser fixado à máquina pelas cabeças, de forma que o esforço seja aplicado o mais axialmente possível, ou seja, ao longo do eixo longitudinal. A velocidade da realização do ensaio deve obedecer às normas, respeitando a capacidade da máquina, a fim de garantir a precisão dos resultados.

2.3.3 Ensaio de Microdureza

Para Garcia (2012) dureza é a propriedade mecânica cujo conceito se segue à resistência que um material, quando pressionado por outro material ou por marcadores padronizados, apresenta ao risco ou à formação de uma marca permanente. A microdureza produz uma impressão microscópica no material, empregando uma carga menor que 1 kgf, com um penetrador de diamante. A carga pode chegar a até 10 kgf somente e a superfície do corpo de prova também pode ser plana. Quanto ao penetrador usado, há dois tipos de micro dureza: Vickers e Knoop (SOUZA, 2000).

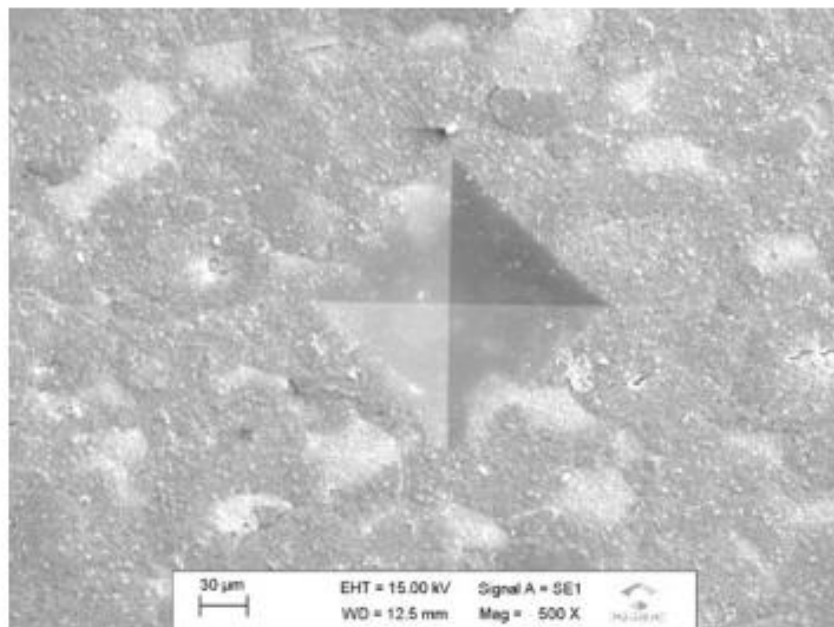
A carga para o ensaio Vickers deve ser aplicada progressivamente, sem choque nem vibrações, por meio de um pistão movido por alavanca, e mantida por um período de 10 a 15 segundos. Em seguida, retira-se a carga e movimenta-se manualmente o microscópio, de maneira a focalizar a impressão deixada pelo penetrador. O penetrador, feito de diamante, tem um tamanho praticamente indeformável e permite impressões independentes da carga aplicada; isso significa que para qualquer carga utilizada, o valor de dureza será o mesmo para materiais homogêneos (SCHIO, 2013).

A mudança de carga é necessária para obter uma impressão regular, sem deformação e de tamanho compatível para a medida no visor da máquina, o que depende naturalmente da dureza do material ensaiado. Para a dureza Vickers, as cargas recomendadas são de: 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100 e 120 kgf. Para aparelhos especiais de microdureza, as cargas variam de 1 gf a 1000 gf (1 kgf) (INFOLSOLDA, 2013).

Vários fatores influenciam a dureza de uma junta soldada; dentre eles citam-se a composição química do metal de base e seu grau de encruamento, a composição química do metal de adição, os efeitos metalúrgicos inerentes ao processo de soldagem, o tratamento térmico e os parâmetros de soldagem (INFOLSOLDA, 2013).

Na microdureza Vickers o penetrador é uma pirâmide de diamante de base quadrada. Esse ângulo produz valores de impressões semelhantes a dureza Brinell, porque a relação ideal D/d da dureza Brinell sendo 0.375 para essa relação ideal, as tangentes à esfera partindo dos cantos da impressão fazem entre si um ângulo de 136° . Como o penetrador é de diamante, 25 ele é praticamente indeformável e como todas as impressões são semelhantes entre si, não importa o seu tamanho, a dureza é independente da carga, isto é, o número da dureza obtido é o mesmo qualquer que seja a carga usada para materiais homogêneos. Para esse tipo de dureza a carga varia de 1 a 100 ou 120 kgf (SOUZA, 2000). Como pode ser analisado na Figura 13.

Figura 13 - Microdureza Vickers.



Fonte: Kavashima (2017).

Uma junta soldada apresenta regiões bastante definidas, que são denominadas metal de base, zona afetada pelo calor e zona fundida; os limites máximos de dureza para estas regiões são definidos por algumas normas e especificações. Quando esses limites são ultrapassados, significa que houve perda

de ductilidade e que a junta soldada pode estar comprometida (INFOLSOLDA, 2013). O ensaio de microdureza permite a obtenção da dureza utilizando escalas menores de cargas e punções, causando danos microscópicos no componente (Souza, 1982), permitindo a medição da dureza em peças de pequenas espessuras ou com finas camadas onde as propriedades devem ser mensuradas.

Damasceno (2010) exemplifica que a dureza de um material é a resistência que ele oferece à penetração de um corpo duro. Os ensaios de dureza são efetuados com objetivos de:

- Conhecer a resistência do material quanto ao desgaste e à penetração;
- Comparar sua resistência e avaliar o tratamento térmico realizado;
- Verificar as possibilidades de usinagem do material.

2.3.4 Ensaio de Dobramento

Os ensaios de dobramento em componentes soldados são realizados com o intuito de estudar o comportamento da solda por intermédio de uma deformação existente na zona fundida, “fornecendo uma indicação qualitativa da ductilidade do material”. Este tipo de ensaio não permite obter informações numéricas para resultados precisos, mas sim identificar a suscetibilidade do material quando exposto ao processo de dobramento, podendo verificar se há formação de defeitos sobre a superfície deformada (SOUZA, 1982).

O ensaio de dobramento fornece uma indicação qualitativa da ductilidade do material. Esse ensaio consiste em dobrar um corpo de prova. Através da máquina é aplicada uma força perpendicular ao eixo do corpo de prova, até que seja atingido um ângulo desejado, que é geralmente 90, 120 ou 180°. Ao atingir-se o ângulo especificado, examina-se a olho nu a zona dobrada, que não deve apresentar trincas, fissuras ou fendas. Caso contrário, o material não terá passado no ensaio (GARCIA *et al.*, 2012).

O ensaio de dobramento faz-se análise em segmentos retos com seções circulares, tubular, quadrada, retangular e em segmentos curvos. A grande utilização do ensaio de dobramento ocorre na indústria de fabricação e calhas, tubos tambores e de infinitos elementos de conformação plástica. Os parâmetros a serem analisados no dobramento são o encruamento do material e o raio mínimo em que esse pode

ser dobrado sem que ocorra ruptura, e o retorno elástico após a retirada da carga e a formação dos defeitos na região dobrada (GARCIA; SPIN; SANTOS, 2012). Figura 14 ensaio de dobramento.

Figura 14 – Ensaio de dobramento.



Fonte: Mendes; Silveira (2016).

No ensaio de dobramento, um lado do corpo de prova é tracionado enquanto o lado oposto é comprimido de acordo com a Figura 15. O corpo de prova pode ser retirado dos produtos acabados ou pode ser o próprio produto, como por exemplo, parafusos, pinos, barras que apresentem dimensões adequadas para serem colocados na máquina de dobramento. Para analisar o resultado do ensaio, examina-se a olho nu a zona tracionada do corpo de prova; para ser aprovado, o corpo de prova não deve conter trincas ou descontinuidades acima de um determinado valor especificado. O resultado do ensaio é considerado reprovado se o corpo de prova apresentar estes defeitos ou se romper antes de atingir o ângulo a especificado (INFOSOLDA, 2019).

Figura 15 – Ensaio de Dobramento.



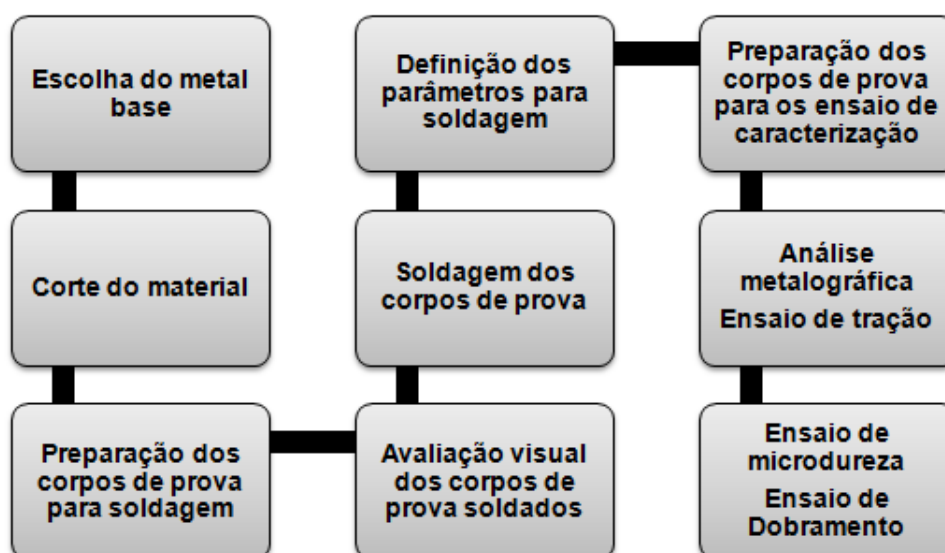
Fonte: Infosolda (2013).

Sendo assim, a carga aplicada sobre o corpo de prova não tem influência sobre os resultados. Entretanto as geometrias utilizadas para o ensaio como ferramenta de dobra, base de apoio e ângulos de dobramento define a severidade do experimento, afetando significativamente os resultados, fornecendo informações quanto à qualidade do material. O ensaio de dobramento é utilizado para análises de segmentos retos, quadrada, tubular etc. Para o dobramento de chapas, é de suma importância analisar o encruamento do material e o raio mínimo o qual será dobrado, sem ocorrência de ruptura (DALCIN, 2007).

3 METODOLOGIA

Este trabalho tem como finalidade avaliar os efeitos da energia de soldagem e a influência dos modos de transferência metálica sobre juntas soldadas em aço Hardox 500, através de ensaios mecânicos. A partir disso serão analisadas as características em relação à análise metalográfica, ensaio de tração, microdureza e dobramento. A Figura 16 demonstra a visão geral das atividades realizadas neste trabalho que vai desde a escolha do material até os ensaios realizados.

Figura 16 – Sequência das atividades realizadas.



Fonte: O autor (2022).

3.1 MATERIAL E MÉTODOS

3.1.1 Metal base

Chapas de aço Hardox 500 com dimensões 200 mm x 75 mm e 6 mm de espessura, foram utilizadas como metal base. Devido esse aço apresentar carbono equivalente relativamente baixo não necessita de pré-aquecimento para soldagem. Os corpos de prova foram realizados de acordo com a norma AWS D1.1-2004. De acordo com a revisão da literatura foram definidos os parâmetros e modos de transferência metálica para a soldagem das chapas. Depois de realizada a soldagem

dos corpos de prova, as amostras foram preparadas para realizar análise metalográfica, ensaio de tração, microdureza e dobramento.

3.1.2 Preparação e procedimento de soldagem

Para realizar o procedimento de soldagem, utilizou-se chapas de aço Hardox 500 como metal base, com as dimensões de 200 mm x 75 mm e 6,35 mm de espessura, totalizando 24 chapas de metal base, os corpos de prova foram cortados através do processo de corte laser.

Após realizar o corte das peças, foi feito um chanfro de 22,5° em uma de suas extremidades através do processo de fresamento respeitando a norma AWS A2.4, para realizar a soldagem. A usinagem foi realizada no laboratório da FAHOR, com fresadora ferramenteira da marca Sanches Blanes e com o auxílio de uma morsa angular universal para fazer os chanfros nas peças, houve também o uso de uma fresa topo para efetuar a usinagem do material. Figura 19(a) Fresadora ferramenteira, Figura 17(b) corpos de prova fresados. A fresadora é uma máquina para usinagem de matérias, que através da utilização de uma fresa remove material em forma de cavacos, essa operação de fresamento é possível quando temos a combinação de movimentos simultâneos da peça a ser usinada e da ferramenta de corte. A partir dessa operação realizamos os chanfros nos corpos de prova para serem soldados como ilustra a figura abaixo.

Figura 17 – (a) Fresadora ferramenteira; e (b) corpos de prova fresados.



(a)

(b)

Fonte: O autor (2022).

A soldagem foi realizada através do processo MAG manual nos corpos de prova, mantendo-se constantes alguns parâmetros para todos os corpos de prova que foram soldados, como:

- Metal base aço Hardox 500;
- Soldagem Manual;
- Soldagem na posição de topo;
- Arame AWS ER70S-6 sólido de 1,0 mm de diâmetro;
- Gás de proteção argônio + CO₂ (18%) e vazão de 15 l/min;
- Corpo de prova com dimensões 200 mm x 75 mm e 6,35 mm de espessura;
- Soldagem com ângulo de deslocamento positivo.

A soldagem dos corpos de prova foi realizada em uma máquina soldadora MIG/MAG da marca Lincoln, modelo S 350 Power wave, com fonte de capacidade de saída de corrente de até 350 A. Efetuado no laboratório de soldagem nas dependências da FAHOR. Figura 18 equipamento de soldagem, é uma ferramenta de trabalho que serve para fornecer energia e realizar a união de partes metálicas.

Figura 18 – Equipamento de soldagem.



Fonte: O autor (2022).

A fonte pode ser configurada para soldagem em arco pulsado e curto-circuito, onde foram utilizados os dois modos de configuração para a soldagem dos corpos de prova, sendo feitos seis corpos de prova no modo curto-circuito e seis em arco pulsado e alterando a energia de soldagem para os mesmos conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros e modos de transferência metálicos variados na soldagem MAG.

Especificação do Arame de solda	AWS ER70S-6					
	Curto Circuito			Arco Pulsado		
	Corpos de Prova					
	1	2	3	4	5	6
Parâmetros						
Corrente de Soldagem (A)	215	200	160	200	160	215
Tensão do Arco Elétrico (V)	26	22,7	18,5	22,7	18,5	26
Velocidade de Soldagem (mm/s)	4,0	4,5	4,0	5,0	5,0	4,3
Energia de Soldagem (kJ/mm)	1,4	1,0	0,7	1,0	0,7	1,4

Fonte: O autor (2022).

Para esta soldagem foi utilizado o arame de solda maciço de especificação AWS ER70S-6 de 1,0 mm de diâmetro, por ser um consumível com vasta aplicação na indústria agrícola, automobilística e entre outras, e com características de fabricação diferenciada que permite a soldagem com maior estabilidade de arco e elevadas correntes de soldagem. Além disso, é revestido com uma camada de cobre que evita os problemas de alimentação no processo de soldagem seja robotizado ou manual. A Tabela 4 apresenta as seguintes composições químicas e propriedades mecânicas.

Tabela 4 – Composição química e propriedades mecânicas do arame AWS ER70S-6.

Composição química (%)						
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V
0,2	1,2	1,9	0,15	0,15	0,15	0,03
Propriedades mecânicas						
Resistência à tração	Limite de escoamento			Alongamento		
480 MPa	400 MPa			22%		

Fonte: Adaptado da Gerdau (2014).

A solda no metal base foi realizada em um único passe, com a abertura da junta em 3 mm, utilizou-se um dispositivo para garantir a posição e fixação das peças no lugar desejado. Figura 19(a) mostra o dispositivo de solda para garantir o posicionamento das peças, Figura 19(b) corpos de prova após a soldagem.

Figura 19 – (a) Peças montadas no dispositivo e posicionadas para soldagem e (b) corpos de prova após a soldagem.



(a)
Fonte: O autor (2022).

(b)

Foram soldados ao total 12 conjuntos, 2 conjuntos para cada parâmetro. Como a soldagem foi feita de forma manual, a velocidade de soldagem obteve-se a partir da cronometragem do tempo de soldagem, em segundos, realizada com um cronômetro digital e depois de calculada pela Equação 1 da energia de soldagem.

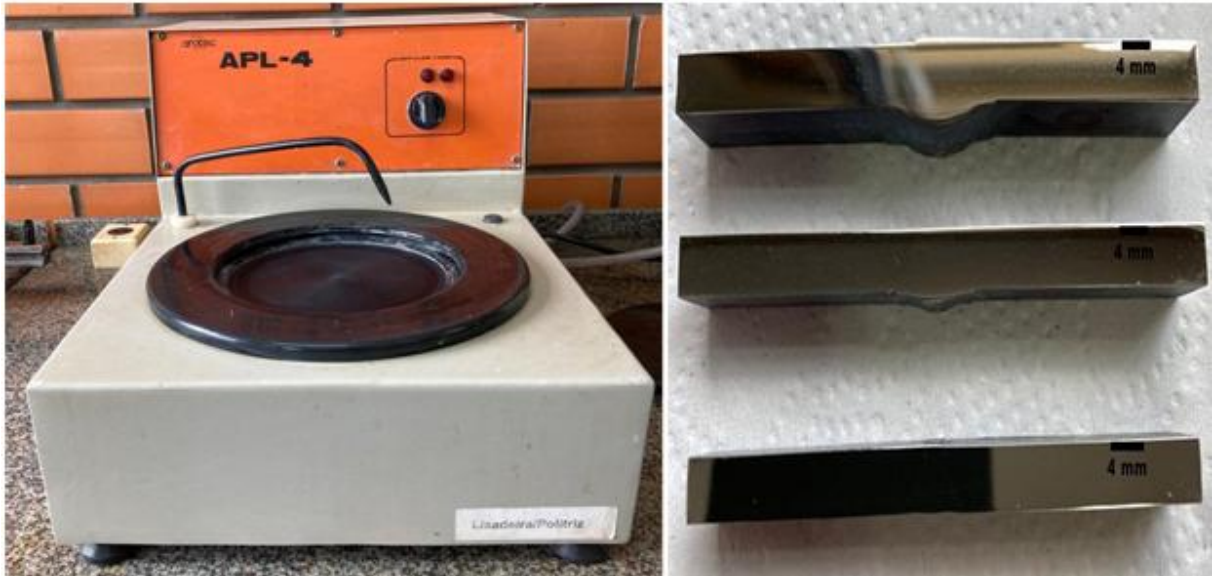
3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

3.2.1 Análise metalográfica

Para realizar a metalografia dos corpos de prova, retirou-se uma amostra de cada peça soldada levando em consideração a norma ASTM E3-95 (1995), totalizando seis corpos de prova. Para verificar as seis energias de diferentes soldagens adotadas e a realização da comparação entre os modos de transferência metálicos utilizados na soldagem foram retiradas com uma cortadora metalográfica.

Depois de realizado o corte das amostras, iniciou-se a preparação da superfície das mesmas pelo processo de lixamento, utilizando lixas de granulação 220, 320, 400, 600 e 1200. Foi realizado nessa sequência até obter uma superfície brilhante. Feito o lixamento, realizou-se o polimento das amostras com Alumina 1 μm numa politriz Arotec, modelo APL-4 eliminando todos os riscos e imperfeições das amostras. Figura 20(a) politriz metalográfica Arotec APL-4, Figura 20(b) corpos de prova após o processo de polimento.

Figura 20 – (a) Politriz metalográfica Arotec APL-4 e (b) corpos de prova após o processo de polimento.



(a)

(b)

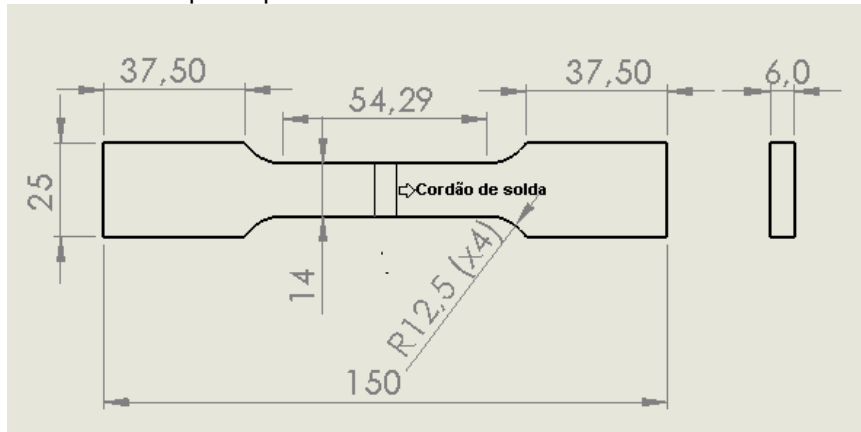
Fonte: O autor (2022).

Finalizada a preparação da superfície, as amostras foram limpas com álcool e algodão, foram secadas com ar quente, logo após cada corpo de prova foi submetido ao ataque químico imerso em nital 2,5% por aproximadamente 10 segundos, logo após foram retiradas e limpas com álcool e secado com ar quente novamente. Este procedimento tem por finalidade revelar a ZAC, penetração e a macro estrutura da zona fundida de solda.

3.2.2 Ensaio de tração

Para a realização do ensaio de tração foram retiradas 12 amostras dos corpos de prova soldados, todas as amostras contendo a mesma dimensão. Dessa forma, utilizaram-se 2 amostras de cada parâmetro para realizar o experimento, as medidas adotadas foram definidas através da norma NBR ISO 6892/2002. As amostras foram cortadas em uma máquina de corte laser. Antes de iniciar o ensaio, mediu-se a espessura e a largura da seção reduzida do corpo de prova. Para o resultado ser aprovado, é necessário que a ruptura ocorra fora da região soldada e o valor de resistência à tração não pode ser menor que a resistência do material conforme especificado pelo fabricante. Na Figura 21 apresenta-se as dimensões do corpo de prova.

Figura 21 – Dimensões do corpo de prova.



Fonte: O autor (2022).

Depois do corte das peças realizou-se o ensaio de tração na URI campus Santo Ângelo em uma máquina universal de ensaio de tração, ao longo do ensaio a máquina registra a força que está sendo aplicada, alongamento, tensão de escoamento e a resistência à tração que é a principal informação a ser analisada. Figura 22 máquina universal de ensaio de tração, equipamento que consiste na aplicação de uma força de tração axial num corpo de prova padronizado de acordo com normas técnicas, onde provoca a deformação do material conforme o esforço aplicado, isso provoca o alongamento ate fraturar o corpo de prova ensaiado.

Figura 22 - Máquina universal de ensaio de tração.



Fonte: O autor (2022).

3.2.3 Ensaio de microdureza

Para a verificação da microdureza, foi definido efetuar um perfil de medições no centro do corpo de prova, começando na esquerda e seguindo o trajeto pelo metal base, ZAC, metal de solda até atingir o outro lado do metal de base, conforme Figura 23. Para as medições de microdureza foi utilizado um microdurômetro do laboratório de metalografia da FAHOR, o aparelho foi regulado para efetuar medições com carga de 100 gramas durante 10 segundos com escala de medição de dureza Vickers. As verificações foram feitas a cada 500 μm de distância um ponto do outro.

Figura 23 – Perfil de microdureza.

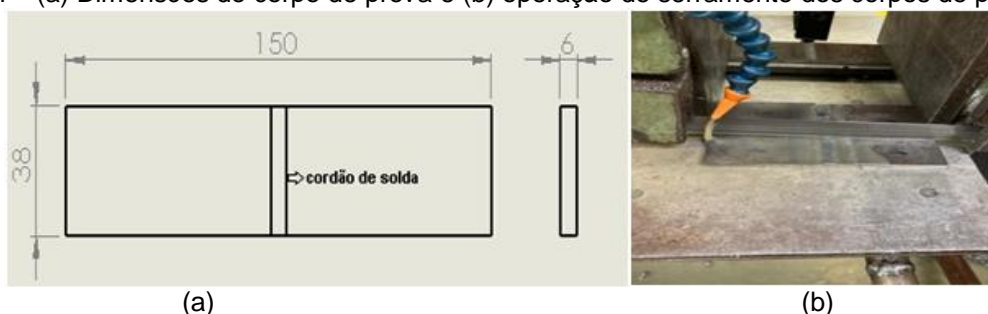


Fonte: O autor (2022).

3.2.4 Ensaio de dobramento

Para a realização do ensaio de dobramento foi retirado doze corpos de prova, sendo dois corpos de prova de cada parâmetro de soldagem e com as dimensões de acordo com a norma NBR ISO 7438/2016. Esses corpos de prova foram retirados das peças soldadas pelo processo de corte serra no laboratório de usinagem na FAHOR. Figura 24(a) dimensões do corpo de prova, Figura 24(b) operação de serramento dos corpos de prova.

Figura 24 – (a) Dimensões do corpo de prova e (b) operação de serramento dos corpos de prova.



Fonte: O autor (2022).

Após cortados todos os corpos de prova necessários, iniciou-se sua preparação com a utilização de uma esmerilhadeira angular para retirar as rebarbas provenientes do corte da serra, remover todo o excesso de solda, deixando toda superfície nivelada para que nenhuma descontinuidade influencie no resultado negativo das amostras.

Quando realizado o ensaio de dobramento, um lado do corpo de prova é tracionado enquanto o lado oposto é comprimido. Para a realização do ensaio foi utilizado uma prensa hidráulica manual com o auxílio de um punção e uma matriz, o corpo de prova é posicionado sobre os roletes e uma força é aplicada no centro do corpo de prova. Figura 25 prensa manual com ferramenta de dobra, é um equipamento que é utilizado para cortar, dobrar e modelar materiais como metal é um dispositivo de compressão que faz o uso de uma força exercida sobre um fluido a fim de criar força resultante, com esse equipamento podemos adaptar uma ferramenta de dobra para realizar os ensaios de dobramento.

Figura 25 – Prensa manual com ferramenta de dobra.



Fonte: O autor (2022).

Foi realizado um dobramento de face e um dobramento de raiz para cada parâmetro de soldagem, para observar se houve imperfeições no cordão de solda como: porosidades, trincas, inclusão de escória etc.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

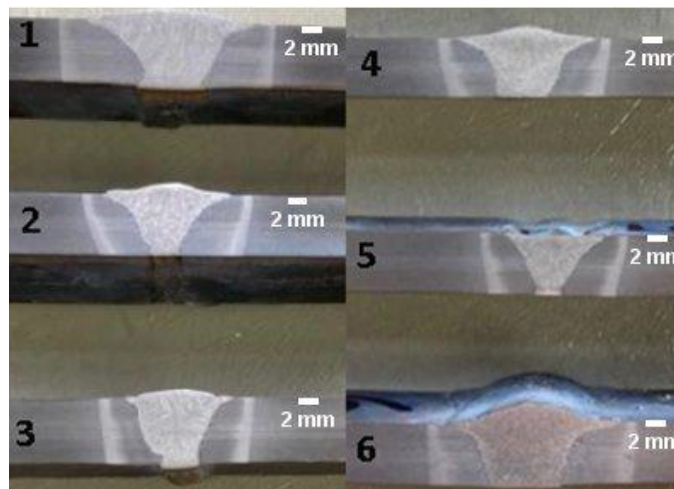
Após a realização dos ensaios dos corpos de prova, os mesmos passaram por uma inspeção visual para identificar a presença de algum defeito devido aos parâmetros utilizados.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

4.1.1 Análise metalográfica

A análise metalográfica tem por objetivo verificar a penetração da solda, a ZAC, obtendo informações dos parâmetros utilizados e as variações de soldar no modo de transferência metálica curto-circuito e arco pulsado. Na Figura 26 estão os seis corpos de prova que foram realizados a análise metalográfica.

Figura 26 - Análise metalográfica dos corpos de prova.



Fonte: O autor (2022).

Analisando os parâmetros de soldagem utilizados através dos resultados das amostras metalográficas, podemos observar que por mais que o cordão de solda tenha passado toda a espessura do metal base não ocorreu penetração do metal de solda. Entretanto, as amostras 1 e 6 se obteve uma maior região de ZAC, mas com mínima penetração do cordão de solda utilizando energia de soldagem maiores 1,4 kJ/mm, também se percebe uma maior área do metal de solda, devido à baixa velocidade de soldagem comparado com as outras amostras.

Os casos 3 e 4 independentes do modo de transferência metálica utilizado não ocorreram fusão do metal de adição com o metal base. Os casos 2 e 5 estão nítidos que só ocorreu à deposição do metal de solda, não houve penetração, devido à baixa fusão do metal de adição. Podemos observar diferentes geometrias e tamanho de área de ZAC nas amostras, outras características são nas amostras com maior energia de soldagem, o tempo de resfriamento é maior, assim a velocidade de resfriamento é menor, isso resulta em resultados insatisfatórios devido termos um metal fundido com maior tamanho de grão e isso aumenta a fragilidade na lateral e na raiz de solda.

Com todas essas características que evidenciamos, acredita-se que para ter uma maior penetração do metal de adição precisamos utilizar energias de soldagem mais elevadas, para ocorrer à fusão do metal de adição com o metal base. De acordo com Santos (2015) a descontinuidade de falta de fusão tende a ser muito severa, podendo iniciar trincas, e também, como a seção do cordão fica menor que o projetado, pode facilitar a fratura, por não aguentar a carga que foi projetada.

Através dos resultados das metalografias, observou-se que as amostras com ZAC de menor área tem uma fragilidade maior nos ensaios a que foram submetidos, e as com maiores áreas mesmo assim ocorreu enfraquecimento do cordão de solda nesta região ocorrendo à ruptura em todos os casos.

4.1.2 Ensaio de tração

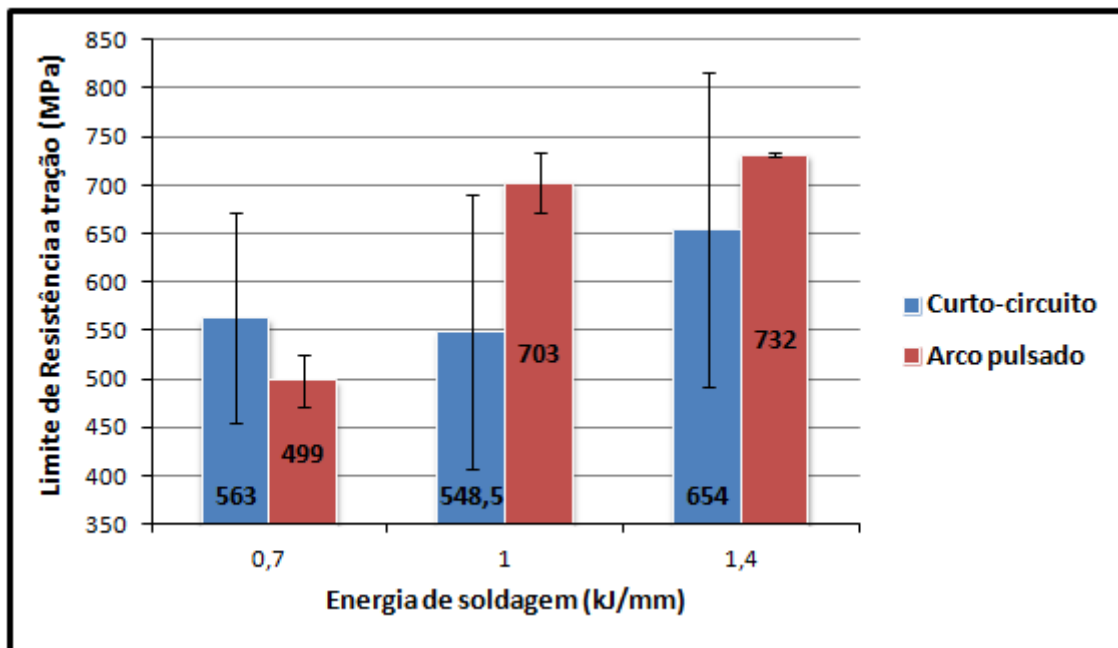
No ensaio de tração comprovou-se que não houve penetração do metal de adição AWS ER70S-6 no metal base, devido a essa ocorrência tivemos uma fragilidade na região soldada, vindo a romper bem no cordão de solda devido a ter uma elevada dureza nesta região. Através dos resultados obtidos, podemos evidenciar que em função de alguma descontinuidade existente na junta soldada e ocasionadas pelas altas taxas de resfriamento do metal de solda, ocasionou uma fragilização nesta região soldada, pois essas fraturas que ocorreram ao longo da raiz e margem da raiz são devido a concentração de tensões serem mais elevadas nestas regiões facilitando a propagação de trincas que é uma das consequências da falta de fusão

Apesar de todas as amostras ensaiadas terem reprovado, constatou-se que ocorreram falhas na zona de ligação, entre zona fundida e o metal base dos corpos

de prova, esses defeitos ocorreram devido à falta de fusão na lateral do cordão de solda, gerada por alguma falha de soldagem. Como tivemos um resultado negativo, e os limites de resistência de tração muito abaixo dos fornecidos em catálogo desse material, ficou comprovado que não podemos aplicar esses parâmetros de soldagem onde o material será submetido a esse tipo de esforços, pois poderá vir a ocorrer problemas que comprometam a integridade do produto onde for aplicado.

De acordo com Cournelius (2020), em seu estudo sobre anisotropia, tração, dobramento, metalografia e dureza utilizado o Hardox 500 num teste de ensaio de dobramento a temperaturas baixas foram detectadas trincas e nos testes de dureza apresentou fases de mudanças de martensita o que conseqüentemente reduz a dureza em níveis de até 50%. Podemos fazer uma analogia com nossos ensaios que também ocorreram trincas e a microdureza na ZAC aumentou muito em relação ao metal de adição. Na Figura 27 apresentamos os resultados dos limites de resistência à tração em relação aos parâmetros de energia de soldagem utilizados nos modos de transferência metálica curto-circuito e arco pulsado.

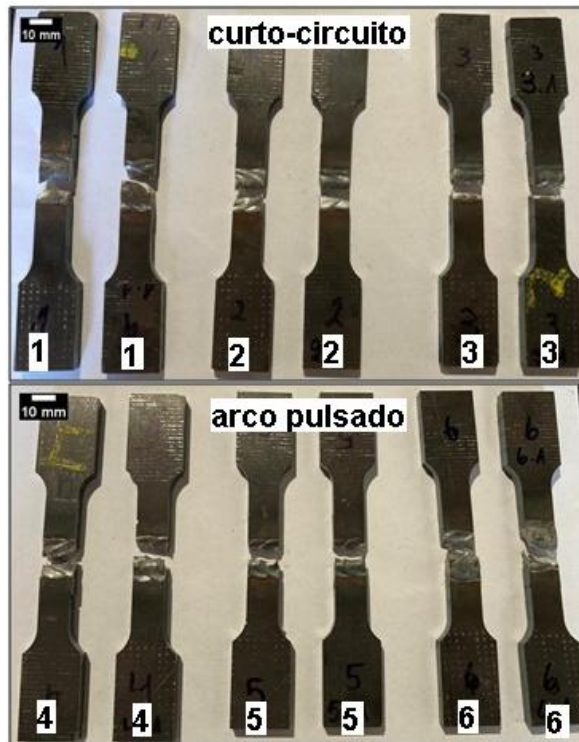
Figura 27 – Limite de resistência à tração X energia de soldagem utilizada nos modos de transferência curto-circuito e arco pulsado.



Fonte: O autor (2022).

Na Figura 28 podemos observar a ruptura dos corpos de prova soldados nos modos de transferência metálica curto-circuito e arco pulsado após o ensaio de tração.

Figura 28 – Corpos de prova de tração soldados no modo curto-circuito e arco pulsado.

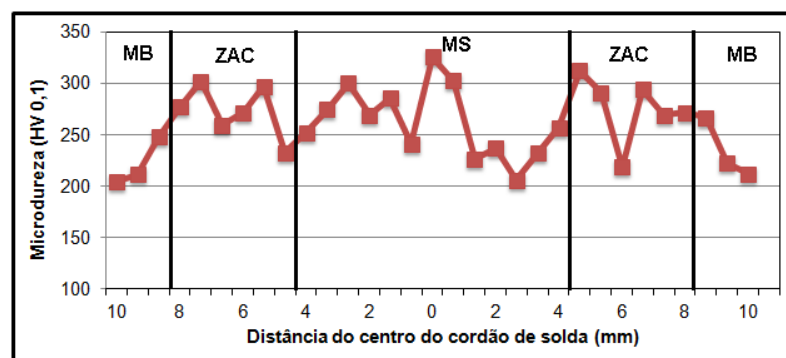


Fonte: O autor (2022).

4.1.3 Ensaio de microdureza

As microdurezas das seis amostras avaliadas tiveram uma variação de dureza conforme o esperado entre metal base, ZAC e metal de solda onde foram efetuadas as medições. Nas Figuras 29, 30 e 31 mostram-se os resultados das microdurezas dos corpos de prova 1, 2 e 3 soldados no modo de transferência metálica curto-circuito. Figura 29 apresenta os resultados da microdureza do corpo de prova 1 que foi realizado a soldagem no modo de transferência metálica curto-circuito e com energia de soldagem de 1,4 kJ/mm.

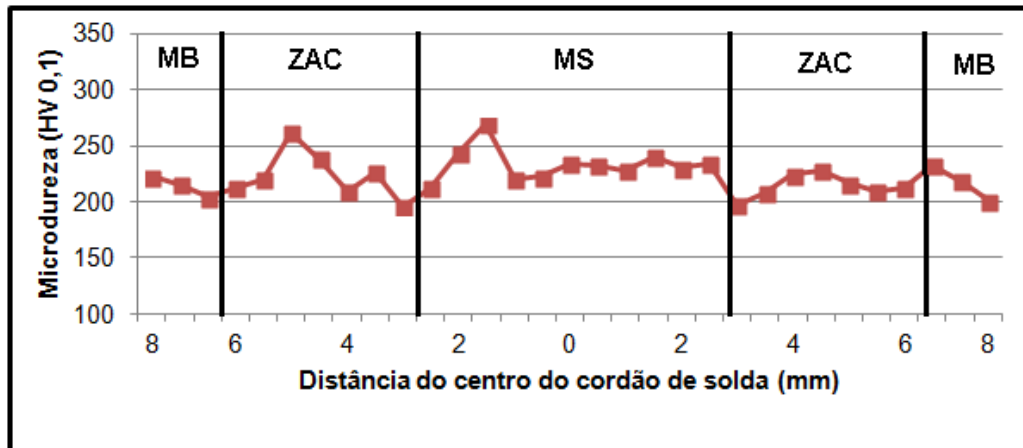
Figura 29 – Perfil de microdureza do corpo de prova 1.



Fonte: O autor (2022).

A Figura 30 apresenta os resultados da microdureza do corpo de prova 2, que foi realizada a soldagem no modo de transferência metálica curto-circuito e com energia de soldagem de 1,0 kJ/mm.

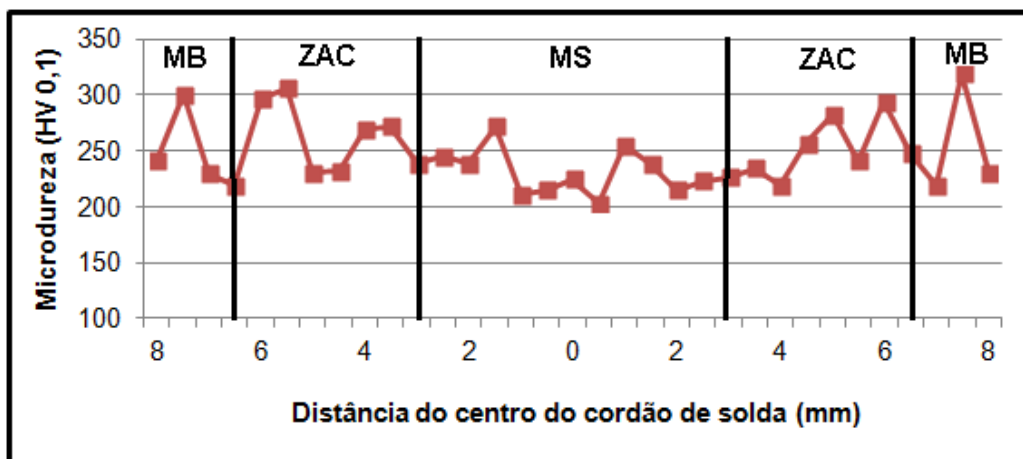
Figura 30 – Perfil de microdureza do corpo de prova 2.



Fonte: O autor (2022).

Figura 31 apresenta os resultados da microdureza do corpo de prova 3 que foi realizado a soldagem no modo de transferência metálica curto-circuito e com energia de soldagem de 0,7 kJ/mm.

Figura 31 – Perfil de microdureza do corpo de prova 3.

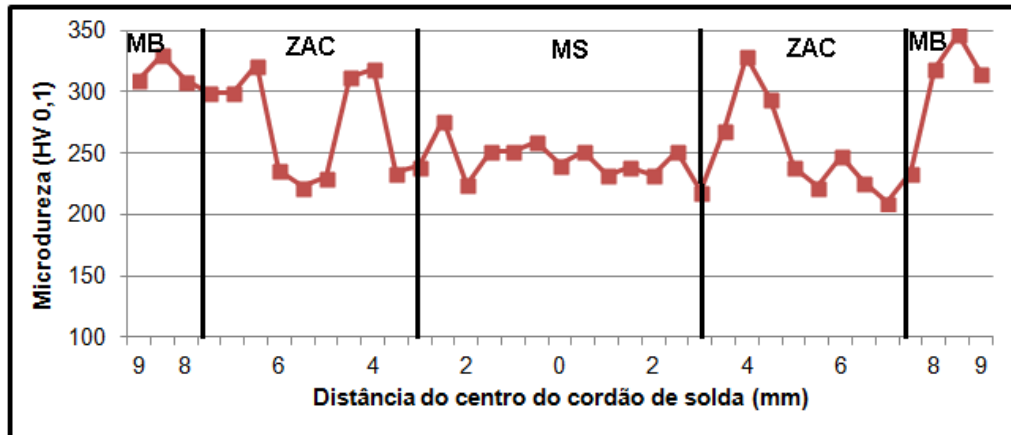


Fonte: O autor (2022).

No modo de transferência metálica, o arco pulsado teve resultados similares ao modo anterior como apresentaremos abaixo nas Figuras 32, 33 e 34 onde foi feito a soldagem em arco pulsado dos corpos de prova 4, 5 e 6. A Figura 33

apresenta os resultados da microdureza do corpo de prova 4 que foi realizado a soldagem no modo de transferência metálica curto-circuito e com energia de soldagem de 1,0 kJ/mm.

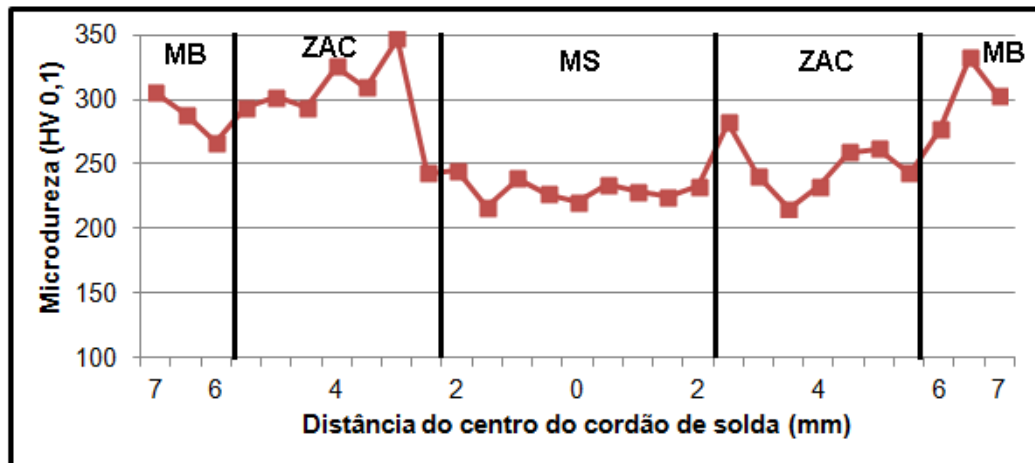
Figura 32 – Perfil de microdureza do corpo de prova 4.



Fonte: O autor (2022).

Na Figura 33 apresenta-se os resultados da microdureza do corpo de prova 5 que foi realizado a soldagem no modo de transferência metálica curto-circuito e com energia de soldagem de 0,7 kJ/mm.

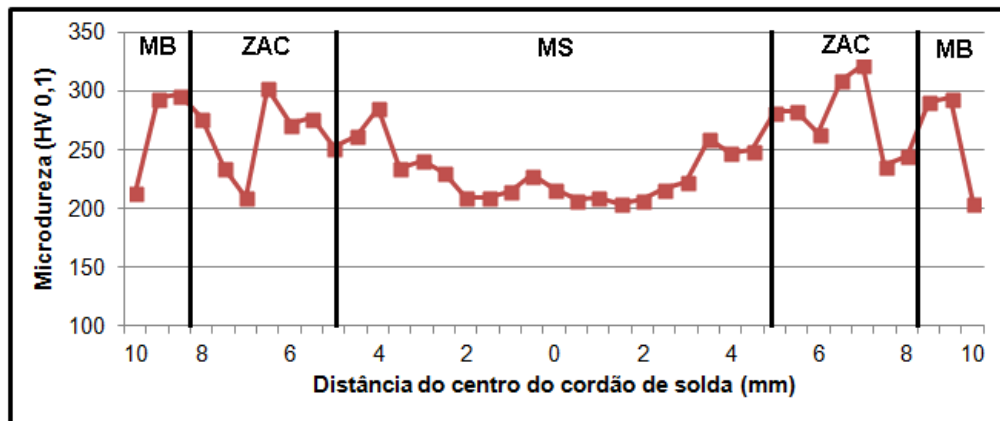
Figura 33 – Perfil de microdureza do corpo de prova 5.



Fonte: O autor (2022).

Figura 34 apresenta os resultados da microdureza do corpo de prova 6 que foi realizado a soldagem no modo de transferência metálica curto-circuito e com energia de soldagem de 1,4 kJ/mm.

Figura 34 – Perfil de microdureza do corpo de prova 6.



Fonte: O autor (2022).


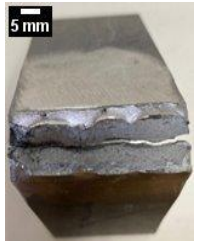

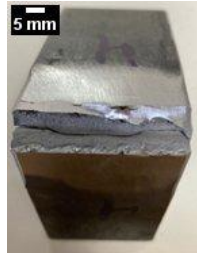

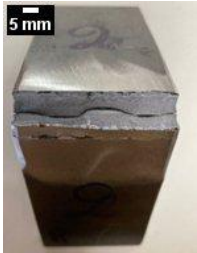
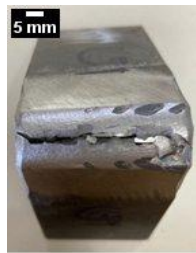


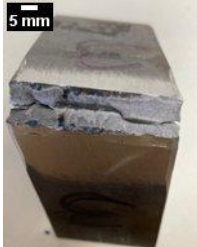


Nos resultados das microdurezas das seis amostras, observou-se que a dureza no metal base variou bastante em relação à dureza do metal de adição, independente da condição a que foi submetido. Assim os resultados mostram que o material é afetado pela temperatura do processo de soldagem alterando sua microestrutura. A avaliação dos resultados nos ensaios de dureza depende do objetivo determinado para o ensaio; de modo geral, porém, o resultado da dureza obtida é sempre comparado com valores mínimos, máximos ou com a faixa de dureza especificada para o material ensaiado (INFOSOLDA, 2013). Foi possível perceber um aumento de dureza na ZAC em relação ao metal de solda, que quanto menor o tempo de resfriamento maior é a dureza no metal base e na ZAC. Conforme analisamos, os modos de transferência metálica curto-circuito e arco pulsado exibiram microdurezas similares em função da energia de soldagem adotada no processo.

De acordo com as medições de microdureza, comprovou-se o resultado negativo dos ensaios de tração e dobramento, pois em todos os casos tivemos uma elevada dureza próxima da raiz de solda o que ocasionou uma concentração de tensões que auxiliaram na fratura do corpo de prova. Além de baixa penetração do cordão de solda, resultaram em zona fundida com maior tamanho de grão, aumentando assim a região fragilizada, esses fatores interferiram para se obter resultados positivos. Com todas essas diferenças e alterações evidenciadas nos resultados obtidos, fica constatado que dependendo da situação, o material não irá resistir a grandes esforços, impossibilitando sua aplicação em determinadas situações após o processo de soldagem.

4.1.4 Ensaio de dobramento

Para o ensaio de dobramento ser considerado aceitável, não pode ocorrer uma trinca no cordão de solda, o intuito de realizar o ensaio é verificar a ductilidade da junta soldada e a região do dobramento (zona fundida, ZAC, e metal base). Na Tabela 5 estão os corpos de prova soldados no modo de transferência curto-circuito e arco pulsado e com metal de adição AWS ER70S-6 e submetidos ao ensaio de dobramento.

Tabela 5 – Corpos de prova após o ensaio de dobramento.

Corpo de prova	Modo de Transferência curto-circuito		Corpo de prova	Modo de Transferência arco pulsado	
	Dobramento de Face	Dobramento de Raiz		Dobramento de Face	Dobramento de Raiz
1			4		
2			5		
3			6		

Fonte: O autor (2022).

Todas as amostras apresentaram defeitos na região da solda durante o ensaio de dobramento, sendo que ocorreram trincas e rompimento do cordão de solda ocasionado por um defeito de soldagem, falta de fusão lateral localizada próxima à raiz de solda. Esse fato explica a ocorrência das fraturas na raiz da solda, ocorrendo uma geração de forças de tração na mesma região da falta de fusão,

atuando como um concentrador de tensão o qual auxiliou na fratura do corpo de prova na região soldada. Quando realizamos o ensaio na face também percebemos a influência da falta de fusão lateral que gerou forças de compressão na região da raiz de solda ocasionando a fratura na região soldada.

Outro fator que está relacionado é a presença de martensita de contorno de grão, gerando altos valores de dureza e diminuindo a tenacidade do material o que contribuiu para o rompimento da junta soldada. Quando o material Hardox 500 é submetido a grandes deformações podem-se perceber muitas falhas como trincas na região longitudinal do cordão de solda, levando a ocorrer esse defeito, gerando resultados insatisfatórios, pois tivemos pouca penetração do cordão de solda acarretando esse problema comprovando que independente do modo de transferência metálica e energia de soldagem utilizada ocorreram à reprovação das amostras.

As amostras dobradas mostram que o metal base quando submetido à soldagem, possui baixa ductilidade, pois houve alterações microestruturais devido à ação do calor, com esse resultado não é indicado utilizá-lo onde irá sofrer esforços mecânicos, pois, poderão ocorrer deformações no cordão de solda.

4.2 DISCUSSÃO GERAL DOS RESULTADOS

Nos experimentos realizados nos tópicos anteriores para avaliar a influência dos modos de transferência metálica e da energia de soldagem utilizada sobre as propriedades mecânicas do Aço Hardox 500, através de ensaios mecânicos demonstrou-se que nos ensaios realizados houve a deposição do metal de solda, não havendo penetração suficiente devido à baixa fusão do metal de adição. Também se comprovou que o aço Hardox 500 não é o material correto para a realização desse experimento.

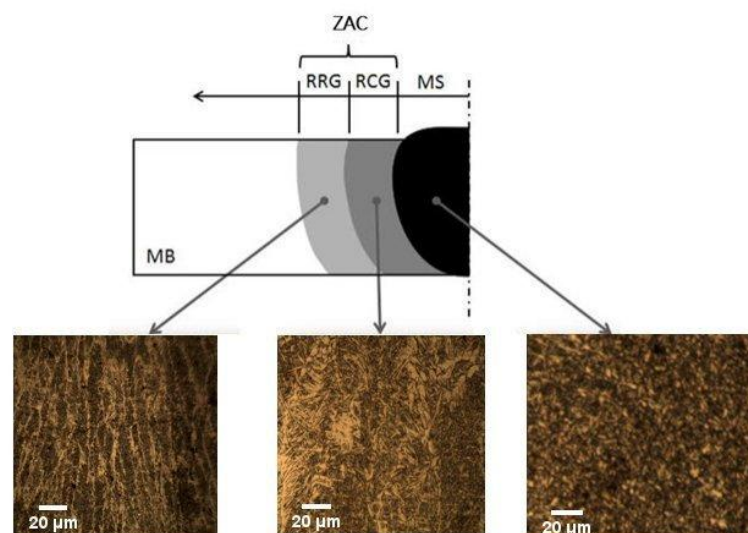
Sendo assim, a medida que se aproxima do metal de solda a dureza tende a diminuir, pois, segundo Costa (2014) o perfil passa por diversas regiões que apresentam alterações da microestrutura, como por exemplo a região de refino de grãos.

No ensaio de metalografia independente dos parâmetros utilizados não conseguimos obter a fusão e baixa penetração do cordão de solda, mesmo o metal de adição ter passado toda a espessura dos corpos de prova, porém nas amostras

com energia de soldagem maior percebeu-se uma região da ZAC maior, isso está relacionada à velocidade de soldagem e ao aporte térmico que modificou as microestruturas do metal base comprometendo suas propriedades mecânicas. A Figura 35 mostra a macrografia da junta soldada, microestrutura do metal de solda - MS, microestrutura da região de crescimento de grãos - RCG e microestrutura da região de refino de grãos – RRG.

A respeito da velocidade de soldagem, pode-se afirmar que se a mesma for muito baixa, ocasionará um aglomerado do metal de solda fundido a frente do arco elétrico, o que implica conseqüentemente na falta de fusão entre o metal de solda e o metal de base, todavia, Jovanovic *et al.* (2008) afirma que se a velocidade de soldagem for rápida, o aporte térmico será escasso para fundir este metal de base.

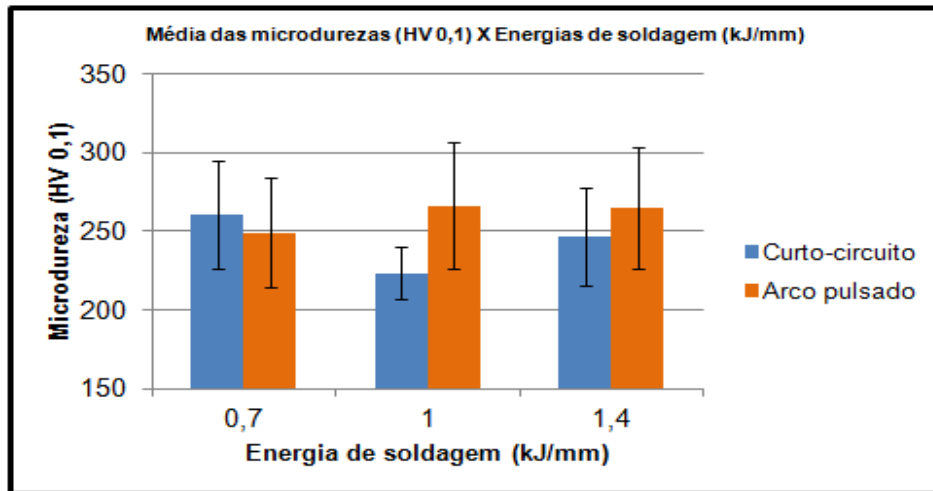
Figura 35 - Macrografia e microestruturas do MS, RCG e RRG do aporte térmico.



Fonte: O autor (2022).

Na análise dos perfis de microdureza observa-se uma discrepância grande na variação de dureza entre o metal base e o metal de soldagem adotado, com esses dados apresentados ocorreu uma junta soldada com mais fragilidade. Quando se utilizou um metal de adição com menor resistência que o metal base foi para termos alta tenacidade e diminuir a probabilidade de propagação de trincas. Na Figura 36 percebemos os valores de endentações medidos que a média não teve um valor significativo em relação às energias e modos de transferências metálicas de soldagem, apresentando baixa variação, mas o suficiente para ocasionar defeitos na região soldada.

Figura 36 – Média das microdurezas em relação às energias de soldagem nos modos de transferência curto-circuito e arco pulsado.



Fonte: O autor (2022).

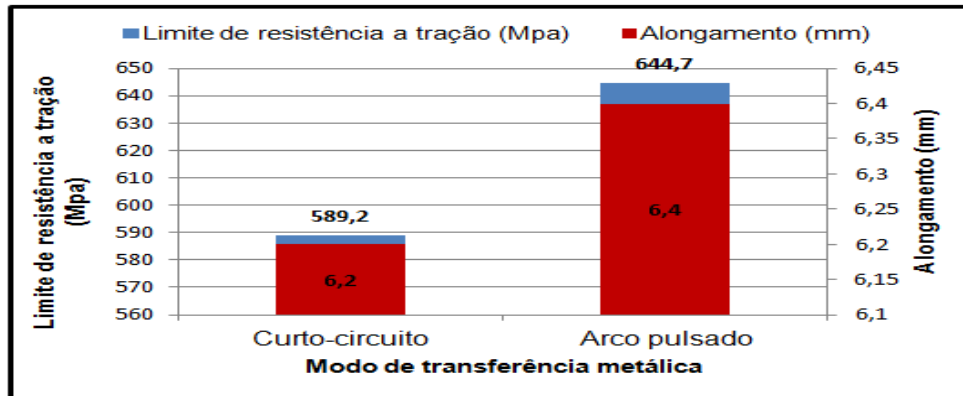
Os ensaios de tração todas as amostras apresentaram defeitos independente dos parâmetros utilizados para soldagem. Os valores de resistência à tração ficaram muito abaixo do especificado pelo fabricante, comprovou-se que ocorreram defeitos no cordão de solda como a falta de fusão e baixa penetração, além da alta taxa de resfriamento do metal de adição ocasionando fragilidade na região soldada, vindo a romper no cordão de solda.

Portanto, nos estudos relatados por Bom; Kalnin (2008) determinaram que falhas na região soldada possui uma relação direta com a diminuição da tensão de ruptura de corpos de provas com soldas transversais. O efeito do carbono na soldabilidade do aço é expresso pela fórmula de carbono equivalente indicadas na Equação 3. Quanto maior o valor do carbono equivalente, maior a suscetibilidade de ocorrência de trincas a frio na zona afetada pelo calor produzida na soldagem. Nas equações de carbono equivalente é possível perceber que, depois do boro, o carbono é o elemento químico com maior influência sobre a soldabilidade do material (GRAY e PONTREMOLI, 1987).

Comprova-se que houve fragilidade na região soldada devido à falta de fusão na lateral e raiz do cordão de solda auxiliando a propagação dos defeitos apresentados, outro fator que contribui para esses defeitos são os efeitos do carbono equivalente, quanto maior o carbono equivalente, maior a suscetibilidade de ocorrência de trincas a frio. Na Figura 37 apresentamos os resultados das médias dos limites de resistência à tração X Modo de transferência metálica curto-circuito e

arco pulsado. Além disso, apresentamos as médias dos resultados de alongamento dos ensaios de tração soldados nos modos de transferência metálica curto-circuito e arco pulsado.

Figura 37 – Média dos limites de resistência a Tração e alongamento X Modo de transferência metálica curto-circuito e arco pulsado.



Fonte: O autor (2022).

Nos ensaios de dobramento, comprovaram-se defeitos na região da solda ocorrendo trincas e rompimento do cordão de solda. Quando realizamos o ensaio de face e raiz comprovamos a influência da falta de fusão lateral que gerou forças de compressão e tração na região da raiz de solda ocasionando fratura na região soldada. Para finalizar, observamos que após a realização de vários tipos de teste laboratoriais o aço Hardox 500 não cumpre as especificações exigidas pela indústria metal mecânica de soldagem utilizando essa metodologia.

5. CONCLUSÃO

Com base no estudo realizado e partir dos ensaios utilizando o aço Hardox 500 obtemos as seguintes conclusões:

- Na análise metalográfica observou-se defeitos como a falta de fusão, não ocorreu penetração do metal de adição no metal base por mais que ele tenha passado toda espessura, somente ocorreu a deposição do metal de solda.

- Nos ensaios de tração comprovou-se que ocorreram falhas na zona de ligação, entre zona fundida e o metal base dos corpos de prova, defeitos ocasionados pela falta de fusão na lateral do cordão de solda.

- Nos ensaios de microdureza também se comprovou uma variação de dureza entre metal base e metal de solda independente do modo de transferência metálica utilizado, comparando a media das durezas independente dos parâmetros utilizados para soldagem percebemos que essa media ficou próximas a 250 Vickers em todos os corpos de prova que foi realizado as medições.

- Nos ensaios de dobramento em todas as amostras apresentaram defeitos na região da solda ocorrendo trincas e rompimento do cordão de solda ocasionado por um defeito de soldagem e também durante o ensaio na face comprovou-se a influência da falta de fusão lateral que gerou forças de compressão na região da raiz de solda ocasionando a fratura na região soldada.

Portanto, a partir dos resultados apresentados, é de extrema importância analisar as modificações da microestrutura da utilização do aço Hardox 500 quando submetido a elevadas temperaturas, para evitar problemas futuros e comprometer a qualidade das peças. Dessa forma fica limitada a utilização deste material em situações de peças que serão realizadas a partir desse processo de soldagem em que serão elevados esforços mecânicos, pois nestas situações ele é altamente suscetível a falhas.

6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Aos trabalhos futuros sugerimos que:

- Para se obter resultados satisfatórios na soldagem do Hardox 500 deve-se utilizar outro consumível de soldagem, por exemplo, o arame tubular E71T-1, pois apresenta ótimas propriedades mecânicas e é indicado para soldagem de projetos robustos onde se utiliza materiais de alta resistência.
- Fazer análise e testar outros parâmetros com energias de soldagem mais alta devida ser um aço de elevada resistência mecânica e alta dureza sendo aplicados em áreas que é necessários grandes esforços, fazer o uso de outra mistura de gás de proteção de soldagem.
- Controlar o tempo de resfriamento, pois pode ser um causador dos defeitos apresentados nos ensaios anteriores.
- Testar novas espessuras de chapas, realizar os estudos em tubos de aço Hardox 500.
- Fazer a soldagem MAG robotizada para se obter uniformidade no processo de soldagem.
- Além dos ensaios realizados, fazer ensaio de Charpy para avaliar a tenacidade do material, e analisar a microestrutura mais profundamente.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, W.M., **Soldagem do aço ABNT 4140 sem Tratamento Térmico posterior**. Fortaleza, Dissertação de mestrado-Programa de Engenharia e Ciências de Materiais, Universidade Federal do Ceará, 2001.

AHMED N., New developments in advanced welding. Woodhead Publishing Limited, 1 ed. Cambridge: England, 2005.

ALLGAYER, Manoel Augusto. **Influência dos gases de proteção utilizados no processo MIG/MAG sobre as propriedades mecânicas do metal de solda**. Dissertação de Mestrado. UFRGS: Porto Alegre, 1990.

ALVES, V. J. **Desenvolvimento de envelopes operacionais para processo MIG/MAG robotizado com diferentes gases de proteção**. Dissertação de Mestrado - Programa de PósGraduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

ALMEIDA. D. T. **Estudo dos parâmetros no processo de soldagem de mistura por atrito (FSW) DA LIGA DE ALUMÍNIO 5083-O**. Panambi, 2013.

ALMEIDA, M.A.M. **Monitoramento das forças e desgaste da ferramenta durante o fresamento concordante e discordante do aço ABNT-4140**. 2019. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

AMERICAN WELDING SOCIETY.AWS D1.1/D1.1M:2004: Structural Welding Code-Steel. Miami. 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E3-95. Standard practice for preparation of metallographic specimens. West Conshohocken: ASTM, 1995.

ANDRADE, Sebastião. **Comportamento e Projeto de Estruturas de Aço**. Disponível em: Minha Biblioteca, Grupo GEN, 2016.

ANDRADE, Rodrigo. **Aços de Alta Resistência: Quais as principais características do HARDOX 450?** Disponível em <https://modelaco.com.br/acos-de-alta-resistencia-quais-as-principais-caracteristicas-do-hardox-450>.

ANTUNES, E. V.; MORAES, S. P. **Estudo da evolução da rugosidade de dentes de engrenagens durante ensaios de desgaste tipo FZG**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 7438. **Materiais metálicos – Ensaio de dobramento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 6892. **Materiais metálicos: ensaio de tração à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

AZZOLINI, Diego. **Estudo da influência da temperatura de pré-aquecimento nas propriedades mecânicas de um aço SAE 1045, soldado pelo processo MIG/MAG.** Tecnovates.com.br. 2017.

BERGER, D. R. **Determinação dos melhores parâmetros de processo para a soldagem robotizada do aço LNE 700.** Horizontina, 2012.

BOM, R.P.I.; KALNIN, A.F. **Determinação da redução da resistência à tração em corpos de prova com Weld Line.** Revista Matéria, v. 13, n. 2, p. 267 – 274, 2008.

BRANDI, S. D.; WAINER, E.; MELLO, F. D. H.. **Soldagem Processos e Metalurgia.** Edgard Blucher, São Paulo, 2004.

CARPENEDO, M. **Caracterização mecânica de juntas soldadas do aço hardox 500 pelo processo MAG.** Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica na Faculdade Horizontina. 2017.

CARPENEDO, Marcelo. **Utilização de aços de alta resistência e baixa liga na redução de peso de máquinas agrícolas colhedoras de grãos.** Dissertação de Mestrado. Porto Alegre: UFRGS, 2014.

CHIO, Fernando. **Análise comparativa entre soldagem MIG/MAG manual e robotizada.** Trabalho de Conclusão de Curso. Panambi, 2013.

COSTA, V. **Análise da tenacidade de uma junta soldada de um aço resistente à abrasão da série 450 HB.** 2014. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2014.

COURNELIUS, M.B. **Desenvolvimento e caracterização do processo de dobramento com chapas de hardox 500.** Dissertação de Pós Graduação, 2020, UFRGS.

CUNHA, M. C. **Análise comparativa da resistência ao desgaste abrasivo utilizando um abrasômetro de tambor de revestimentos duros depositados por soldagem e de aços hardox [manuscrito] .** 2018.

DALCIN, G. B. **Ensaio dos Materiais.** Santo Ângelo: URI, 2007.

DALCIN, R. L. **Efeitos da energia de soldagem e consumíveis sobre a resistência à flexão de juntas “T” soldadas em perfis tubulares.** Dissertação de Mestrado. - Programa de PósGraduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

DATTA R.. **Weldability Characteristics of Shielded Metal Arc Welded High Strength Quenched and Tempered Plates.** Journal of Material Engineering and Performance, vol 11, p. 5 – 10, 2002.

DAVIS, J. R. Corrosion of weldments. ASM International: American Technical Publishers Ltd, 2006. 225 p.

DORFSCHMID, Marcos Vinicius. **Estudo comparativo entre diferentes diâmetros de arame maciço no processo mag robotizado com simples deposição sobre chapa.** Trabalho de Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina. 2015.

DUDZIŃSKI, W.; KONAT, Ł.; PEKALSKI, G. Structural and strength characteristics of wear-resistant martensitic steels. Archives of Foundry Engineering, v. 8, n. 2, p. 21-26, 2008.

EASTERLING, K., Introduction to the Physical Metallurgy of Welding, second edition, Butterworth-Heinemann Ltd, Linacre House, Jordan Hill, Oxford, p. 126-190, 1992.

ESAB. **Catálogo de Consumíveis. 2013.** Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/support/documentation/upload/cat>. Acesso em: 16 de outubro de 2022.

ESAB. **Soldagem MIG/MAG.** São Paulo: ESAB Soldagem e Corte, 2004. (Relatório técnico de soldagem).

FELIX, Bruno Garcia et. al. **Ensaio mecânicos dos materiais.** Revista de engenharia UNITOLEDO. v. 3, n. 2 (2018).

FRYDMAN S.,; KONAT, T. L.; PEKALSKI, G. Structure and hardness changes In weldet joints of hardox steels. Archives of civil and Machanical Engineering. V. 8, 2008.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais.** 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. D. **Ensaio Mecânicos.** Rio de Janeiro. Editora: LCT. 247 p. 2000.

GERDAU, Arames para solda. 2014. Disponível em: <<https://www.comercialgerdau.com.br/pt/productsservices/products/Document%20Gallery/catalogo-arames-para-solda.pdf>>. Acesso em: 20 out.. 2022.

GIMENES JR, L.; RAMALHO, J. P. **Conceitos de soldagem MIG/MAG.** 1° ed, São Paulo: 2005.

GOMES, José Marcos. **Efeito da Temperatura de Interpasse de Soldagem sobre a Microestrutura, Dureza e Resistência à Corrosão do Aço Inoxidável Superduplex.** In: 52 CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 22., 2016, Natal. Anais... . Silveiras: Sbeb, 2016.

GRANJEIRO JUNIOR, Francisco X. **Relação entre energia de soldagem, tenacidade e dureza na zona afetada pelo calor do aço estrutural.** Monografia. Mossoró. RN. 2017.

GRAY, Malcolm J; PONTREMOLI, M: Metallurgical options for API grade X70 and X80 linepipe. In: International Conference Pipe Technology, 1987, Roma – Itália.

HOULDCROFT, P.T. Welding Process Technology. London: Cambridge University Press, 1979

INFOSOLDA. **Processo mig/mag** - Modos de transferência. 2013. Disponível em: <https://infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/175-processo-mig-mag-modos-de-transferencias>. Acesso em: 10 de jun. de 2022.

JOVANOVIC, M., GRUM, J., URAN, M. Influence of lack of fusion defects on load capacity of MAG welded joints. 17 th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, p. 25-28, October, 2008.

KAUPPER, M., MERKLEIN, M., *Bendability of advanced high strength steels – A new evaluation*. CIRP Annals – Manufacturing technology, 2013. Volume 51

KAVASHIMA, L. H. et al. Análise da microdureza Vickers de zircônia Y-TZP pré-sinterizada para a usinagem e posterior aplicação como copings. Revista Matéria. SSN 1517-7076 artigo e11817, 2017.

KELM, Maiquel S. **Processo de Soldagem MIG/MAG**, 2021. Disponível em: <https://www.balmer.com.br/blog/2021/07/08/processo-de-soldagem-mig-mag/>. Acesso em 10 de out de 2022.

KOU, S.: Welding Metallurgy. Wiley Interscience, 2nd edition, p. 143-187, 2002.

KRÜGER, RÉGIS DOS SANTOS. **Desenvolvimento de uma interface para fonte de soldagem MIG/MAG**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica. Ijuí, 2020.

LINCOLN ELECTRIC, GMAW Welding Guide. Gas Metal Arc Welding. Carbon, Low Alloy, and Stainless Steels and Aluminium. Disponível em: Acesso em: 15 nov 2022.

LÖWGREN, C.; ORPANA V.; LÖWGREN G.. About wear a guide from SSAB. Oxelösund AB. Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland, 1998.

MACHADO, I. G.. **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**. Imprensa livre, Porto Alegre, 2007.

MARQUES, P. V., **Tecnologia da Soldagem**, 1ª ed. – Belo Horizonte/MG: ESAB, 1991.

MARQUES, Paulo V.; MODENESI, Paulo J.; BRACARENSE, Alexandre Q. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.

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

MATOS, Bruno Biazzetto Rodrigues de. **Influência da Variação do Ciclo Térmico sobre a Máxima Dureza na ZAC na Soldagem por Arco Submerso de Aço SAE 1045**. 2014. 21 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

MACHADO, I. G. **Condução do calor na soldagem: fundamentos & aplicações**. 1 ed. Porto Alegre: Imprensa Livre Editora LTDA, 2000. 119 p

MACHADO, I. G. **Novos paradigmas para especificação de juntas soldadas**. Soldagem & Inspeção, 17(3): 278-288, Jul/Set 2012.

MENDES, M. J. M. **Optimização e estudo dos parâmetros de soldadura MAG Robotizada de uma estrutura tubular de aço S235 com o fio consumível G3Si1**. Porto, 2009.

MENDES, Cláudia, L.; SILVEIRA, Aline Morais da Silveira. **Ensaaios mecânicos**. Disponível em: Minha Biblioteca, Grupo A, 2016.

MILANEZ, Alexandre. **Análise dos parâmetros de soldagem em aços de alta resistência HARDOX®**. Revista Vincci, Faculdade SATC, v. 38, n. 23, p. 58-74, jan./jul., 2016.

MILDENBERGER, Victor Hugo Grande. **Influência do tipo de trajetória no desgaste da ferramenta e na rugosidade da peça no fresamento do aço Hardox®**. 2021. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2021.

MILLER, D. K. **Welding of steel bridges: highway structures design handbook**. The Lincoln Electric Company. USA, 1994. 88 p.

MODENESI, P. J., MARQUES, P. V., SANTOS, D. B., **Curso de Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 1992.

MODENESI, P.J. **Soldabilidade dos aços Inoxidáveis**, V. 1. Osasco: SENAI, 2001

MODENESI, P. J. **Soldagem I: Descontinuidades e inspeção em juntas soldadas**. Belo Horizonte: Editado pelo autor, 2001.

MODENESI, Paulo J. **Fontes de Energia para a Soldagem a Arco**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009. 37 p.

OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1982.

PONTEL, H. F. **Estudo do desgaste abrasivo e propriedades mecânicas de um aço Hardox 500 soldado por MAG convencional**. 2016. 57 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre (RS), 2016.

Processo mig/mag – **Parâmetros de soldagem**. Disponível em: <https://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/174-processo-mig-mag-parametros-desoldagem>. Acesso em 08 de nov de 2022.

REBELLO, J.M.A.; LARA, J.A.C.; GUIMARÃES, A. S.. **Resistência ao Desgaste por Abrasão, Dureza e Microestrutura de Revestimentos Duros Depositados por Arco Submerso**. ABS – XIII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, p. 87 – 101, 1987.

ROHDE, Regis. Almir. **Metalografia: preparação de amostras**. Santo Ângelo: URI, 2010.

SENAI, 2013. **Sodabilidade**. Disponível em: <https://infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/175-processo-mig-mag-modos-de-tranferencias>. Acesso em: 10 de jun. de 2022.

SANTOS, Givanildo Alves D. **Tecnologias mecânicas**. Disponível em: Minha Biblioteca, Editora Saraiva, 2020.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos**. São Paulo. Editora Edgard Blucher Ltda: 1982.

SOUZA et al., Daniel. **Influência da Tensão de Soldagem e do Gás de Proteção sobre a Correlação entre Indutância e Regularidade da Transferência Metálica na Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito**. Soldag. insp. São Paulo, Vol.16, No. 2, p.114-122, Abr/Jun 2011 <https://doi.org/10.1590/S0104-92242011000200004>.

SSAB - Chapa resistente ao desgaste Hardox - Aço de alta - SSAB. Disponível em <https://www.ssab.com/pt-br/products/brands/hardox>. 2016.

SSAB-OXELÖSUND Steel Mill: Hardox Wear Plate, Welding Handbook. Sweden, v1, 2014.

SSAB.Hardox 500: General ProductDescription. 2015. Disponível em: http://www.mtladv.com/wpcontent/uploads/2016/01/152_HARDOX_500_UK_Da. Acesso em 10 de jun de 2022.

SSAB TUNNPLAT. Sheet steel joining handbook: joining of high strength steels. Sweden: SSAB Tunnplat AB, 2004.

TONEL, PABLO DIEGO. **ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE JUNTAS SOLDADAS SOBRE O AÇO TMCP COM CONSUMÍVEIS “UNDERMATCHING” E “OVERMATCHING”**. Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, Horizontina, 2016.

VILLANI, Paulo. **Soldagem - Fundamentos e Tecnologia**. Disponível em: Minha Biblioteca, Grupo GEN, 2016.

QUITES, A. M. **Introdução à soldagem a arco voltaico**. Florianópolis: Soldasoft, 2002