

ANÁLISE DO PROCESSO DE SOLDAGEM DE REPARO DE PEÇAS COM ÊNFASE NA ÁREA TERMICAMENTE AFETADA DO AÇO AR 415 PERFIL L

William Frezza¹

Anderson Daleffe²

Resumo: O processo de reparo de peças utilizando a soldagem figura como um dos métodos mais usados no ramo metalmeccânico. A soldagem possui um enorme destaque, pois mesmo apresentando vários problemas como a falta de penetração, porosidade e trincas causadas pela alta influência térmica, ainda é a melhor maneira de tornar um produto não conforme em aceitável ao uso desejado. Em termos de qualidade e facilidade de uso, o procedimento MAG semiautomático se posiciona a frente no cenário nacional, em conjunto, o processo MAG robotizado busca padronizar a aplicação e melhorar a soldabilidade. Desta maneira, este trabalho busca a comparação dos processos MAG semiautomatizado e robotizado nas zonas termicamente afetadas, partindo de análises microestruturais e propriedades mecânicas, visando validar o método de reparo em peças fabricadas em aço carbono NBR 7007 AR 415 perfil L. Em ambos os ensaios foram utilizados o método MAG, onde para o processo robotizado a tocha foi conduzida por um robô cartesiano. O estudo do processo de soldagem de reparos de peças apresenta a importância da utilização de uma correta amperagem. Os resultados mostram a influência do aporte térmico na formação de grãos na ZTA e defeitos de fusão presentes na região, também destaca o processo MAG semiautomático com resultados mecânicos melhores comparados a parametrização MAG robotizado.

Palavras-Chave: Soldagem, Reparos, ZTA, MAG semiautomático, MAG robotizado.

1 INTRODUÇÃO

O aço AR 415 é um material muito utilizado na indústria metalúrgica para a produção de estruturas metálicas, devido a sua alta resistência mecânica e menor peso comparado com outro aço estrutural. Suas principais aplicações se dão no setor de telecomunicações, distribuição e geração de energia.

Visando diminuir a perda de materiais por erro de fabricação, o reparo de peças envolvendo o processo de soldagem é cada vez mais uma opção no ramo

¹ Graduando em Engenharia de Mecânica. Ano 2021-2. E-mail:williamfrezzaa@gmail.com

² Professor do Cento Universitário UniSATC. E-mail:anderson.daleffe@satc.edu.br

metalmecânico. O objetivo é que sejam reduzidos os custos com sucateamento, maximizando a utilização e resultando em maior atratividade para uso.

Conseqüentemente, existem variações dos processos de soldagem aplicadas no trabalho de reparo, entre eles, o método de abertura a arco elétrico. Exemplos de usos industriais são os processos de soldagem TIG, soldagem eletrodo revestido, soldagem MIG/MAG e soldagem arco plasma. No universo da soldagem, as técnicas prosperam e se tornam cada vez mais eficientes, de modo que ferramentas, peças e equipamentos sofrem menores falhas e danos (SALVARO,2020).

Utilizando o calor como fonte de energia, a soldagem influencia diretamente o material base. Influência à qual está relacionada a formação da zona termicamente afetada do aço, zona que pode se tornar um elo fraco em um ponto que normalmente se comportaria de forma resistiva (DE MELO,2016).

Diante do contexto industrial que visa qualidade e agilidade na entrega do produto, se faz necessário à análise da soldagem usada no reparo de peças devido ao grande número de variáveis presentes no processo. Voltado ao processo de soldagem MAG semiautomática, a soldagem robotizada é uma opção para garantia de conformidade e constância de produção.

O presente trabalho tem por objetivo analisar as variações que podem ocorrer na zona termicamente afetada do aço AR 415 devido a técnica de soldagem utilizada no reparo de peças produzidas para linha de transmissão e distribuição de energia elétrica, utilizando o processo de soldagem MAG, realizando testes práticos aplicados entre o processo de soldagem MAG semiautomático comparado ao método MAG robotizado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta etapa serão abordados os temas relevantes de soldagem e ensaios para que seja necessário o entendimento deste trabalho.

2.1 SOLDAGEM

Classicamente é definido como soldagem os processos que utilizam fonte de calor para a união de metais por fusão, e o resultado deste processo é a solda.

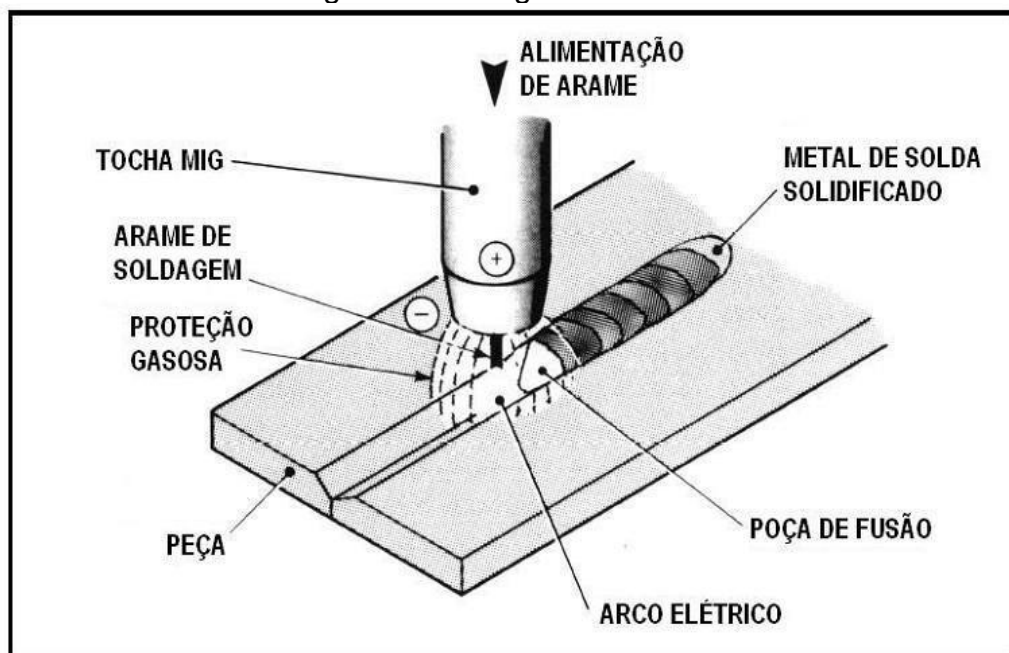
Outros conceitos podem ser apresentados para a definição de soldagem além da operação de união de metais, tal como, o reparo em peças utilizando deposição de material ou revestimentos com características especiais (SCHIO, 2013).

A soldagem é o mais importante processo de união de metais utilizado industrialmente, os processos de soldagem são utilizados para fabricar produtos e estruturas metálicas, aviões e veículos espaciais, pontes, prédios, componentes eletrônicos, entre outros. (YEH, 2012).

2.2 PROCESSO MIG/MAG

O processo de soldagem MIG/MAG utiliza o arco elétrico como fonte de calor entre um consumível (arame-eletrodo) e a peça. A região de soldagem é protegida por um fluxo de gás inerte (metal inert gas) ou gás ativo (metal active gas) (RAKOSKI, 2015). Os gases inertes comumente utilizados são, Ar (argônio) e He (hélio), já os ativos, uma mistura de um ou mais gases ativos com gases inertes e até mesmo com CO₂ (dióxido de carbono) puro. A principal função dos gases é proteger a área de solda contra impurezas que são encontradas na atmosfera (RAKOSKI, 2015). A Figura 1 ilustra o processo MIG/MAG exemplificado.

Figura 1: Soldagem MIG/MAG



Fonte: Fortes (2005)

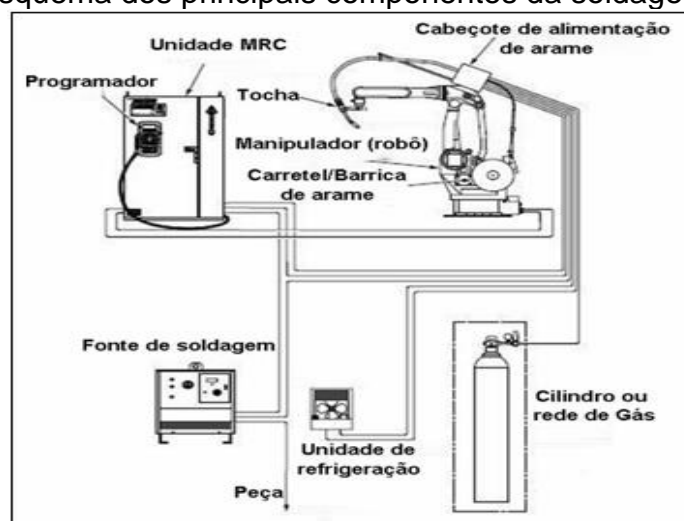
Também conhecida como GMAW (Gas Metal Arc Welding) a soldagem MIG/MAG tem como características de vantagem a elevada quantidade de deposição de solda por tempo em kg/h e facilidade na mecanização ou automatização do processo. A soldagem pode ser aplicada em todas as posições de forma semiautomática ou automática (PETRACHI,2021).

2.3 SOLDAGEM ROBOTIZADA

Trazendo o mesmo princípio de funcionamento da soldagem MIG/MAG semiautomática, o processo de soldagem robotizado MIG/MAG é considerado como um processo automático, pois o arame de soldagem é alimentado continuamente através do cabeçote e o robô controla a posição e a velocidade de avanço da tocha durante a operação (PEREZ, 2007).

A escolha da robotização se dá por vários fatores importantes quando se fala em produção industrial, este processo tende a ganhar uma maior rentabilidade na fabricação de peças em série, maior qualidade e diminuição drástica nos defeitos ocorridos durante a solda, pois uma vez que a programação foi realizada, o restante do processo de soldagem utilizará dos mesmos parâmetros (DELLAY,2021). A Figura 2 exemplifica os principais componentes que compõem um sistema de soldagem robotizada.

Figura 2: Esquema dos principais componentes da soldagem robotizada



Fonte: Dellay (2021)

2.4 DESCONTINUIDADE DE JUNTAS SOLDADAS

Comumente conhecido como defeito de soldagem, a descontinuidade é a interrupção física causada a um material por uma abertura de fissura ou pela presença de um segundo material indesejável, como a inclusão de escória ou gás (DE NOVAIS, 2010).

Segundo de Novais (2010), as descontinuidades têm relação quanto à sua forma e origem.

Descontinuidades em relação à forma:

- Planas: Geralmente ocasionadas por falta de penetração e fusão, apresentam duas dimensões, no caso de trincas de solidificação e das trincas introduzidas por hidrogênio.
- Volumétricas: Apresentam duas dimensões, geralmente ocasionadas por cavidades ou inclusões de escórias. Consideradas menos críticas que a descontinuidade plana por apresentar tensão de concentração menor.

Descontinuidades em relação à origem:

- Metalúrgicas: Estando presente na zona fundida e na zona termicamente afetada, a descontinuidade por fenômenos metalúrgicos tem origem nas poças de fusões, como o refino, transformações de fases, desoxidação e de gaseificação.
- Geométricas: Geradas na etapa de montagem e soldagem. Exemplos comuns são a falta de fusão, desalinhamento, falta de penetração e mordedura, deposição insuficiente.

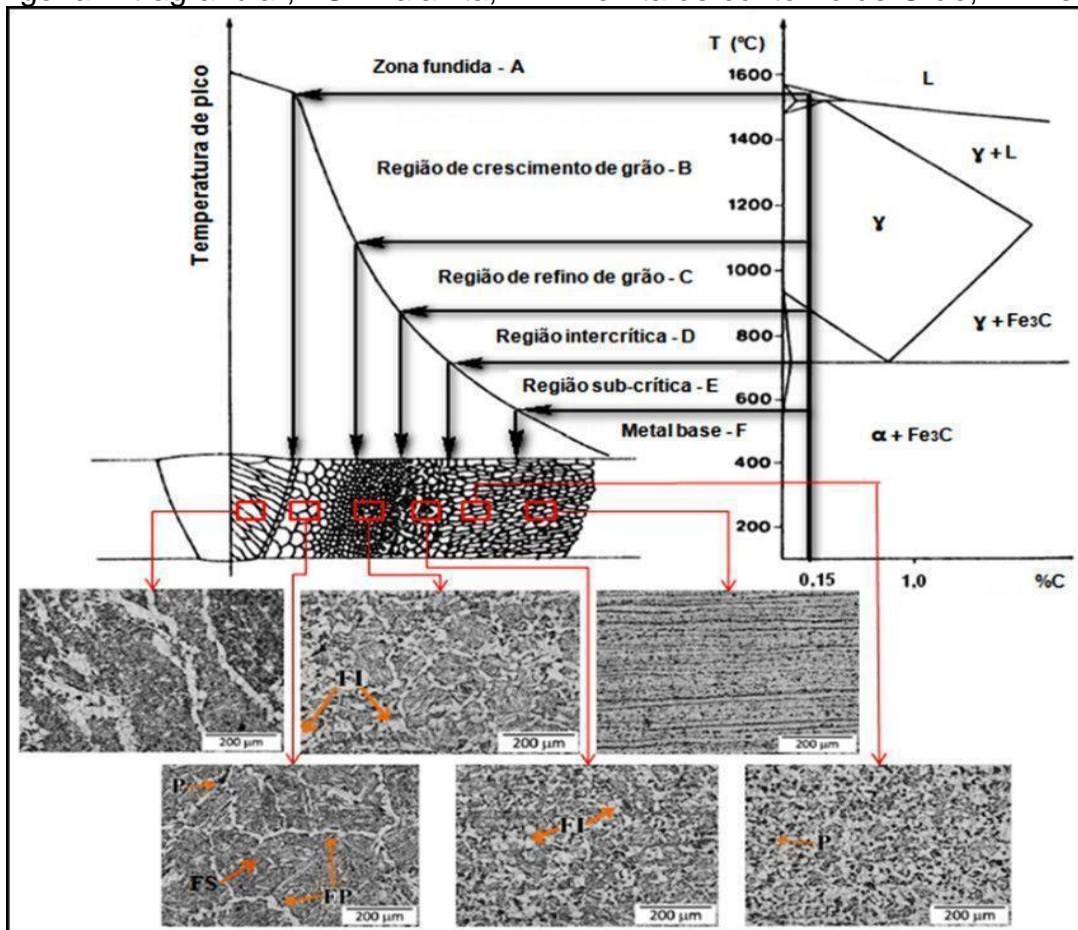
As falhas podem comprometer diretamente a integridade de um elemento estrutural, passando assim a serem identificadas como defeitos ou descontinuidades. A sua detecção e controle tornou-se de suma importância para garantir o controle de qualidade e de segurança (MAIA, 2019).

2.5 ZONA TERMICAMENTE AFETADA

Abreviada como “ZTA” (zona termicamente afetada) ou “ZAC” (zona afetada pelo calor), adjacente à poça de fusão, corresponde a área que não se funde durante o processo de soldagem, porém sofre alterações na sua microestrutura devido ao alto nível de calor a qual é exposta.

Geralmente a zona termicamente afetada da solda de um aço é dividida em quatro regiões, a temperatura atingida e a taxa de resfriamento do processo estão ligadas a formação destas regiões típicas, como observado na Figura 3.

Figura 3: Formação das microestruturas nas regiões da ZTA. Onde: FI= Ferrita Poligonal intragranular, FS= Baianita, FP= Ferrita de contorno de Grão, P= Perlita



Fonte: Corrales (2020)

As principais regiões que podem ser observadas na ZAC da Figura 3 são divididas esquematicamente em região de granulação grosseira (B), região de granulação fina (C), região intercrítica (D) e região subcrítica (E) (SCHIO, 2013).

- Região de granulação grosseira: É caracterizada por temperaturas de pico entre 1100 - 1450 °C, junto a linha de fusão inicia-se a formação de grandes grãos austeníticos. A formação da microestrutura depende das propriedades do aço e a taxa de velocidade de resfriamento após a soldagem. Tende a ser a região mais problemática da ZTA, podendo apresentar perda de tenacidade e dureza elevada, propícia a formação de trinca, problema comum em aços com elevado carbono (LIMA, 2011).

- Região de granulação fina: Região onde a temperatura de pico varia entre 950 – 1110 °C, ocorrendo formação de grãos austeníticos pequenos. Estruturas de austenita-ferrita tendem a formar grãos ferrítico-perlítico ou ferrítico-bainítico durante o resfriamento, já que o alto número de contornos de grãos promove a formação de ferrita de contorno acrescentando à austenita excedente em carbono, esta última podendo transformar também em perlita ou bainita, o que novamente vai depender da sua taxa de resfriamento e propriedades do aço (DA SILVA,2010).

- Região intercrítica: Variando entre temperaturas de pico superiores a 700 °C até 900 °C. É uma região relativamente pequena, apresentando transformações parciais de sua microestrutura original. Em casos variáveis pode apresentar uma baixa tenacidade e elevada dureza (DA SILVA,2010).

- Região subcrítica: Nesta região a temperatura de pico fica em torno de 500- 700 °C, normalmente não é observável mudanças microestruturais. Exceto em casos onde a solda é realizada em aços tratados termicamente, a região pode sofrer um super-revenimento e ocorrer perdas de resistência mecânica ou dureza em relação ao metal base (SCHIO, 2013).

Mudanças microestruturais e metalúrgicas que ocorrem na ZAC podem levar a resultados não desejáveis, devido às peculiaridades que a variação de temperatura e ao desenvolvimento de complexos estados de tensões e deformações surgem durante o processo (SCHIO, 2013). Exemplos de resultados não desejáveis ocorrem na área de grãos grosseiros (região de crescimento de grãos), a ductilidade e tenacidade nesta área são baixas, tornando o aporte térmico (calor fornecido pelo arco de solda a peça) um dos fatores mais importantes dentre os que afetam a ZTA (DE MELO, 2016).

O problema de fragilização de diferentes tipos de materiais acarretado de tensões de tração na região de solda, podem levar ao aparecimento de trincas. O

crescimento dos grãos fragilizados se dá próximo as linhas de fusão. Precipitações de carbono, nitretos e gases junto ao contorno de grão também causam a referida fragilização (SCHIO, 2013).

2.6 METALOGRAFIA

O controle de qualidade de produtos metalúrgicos é um dos métodos de caracterização denominado como metalografia, a análise pode ser dimensional e em nível estrutural. Esta última por vez se preocupa sobretudo em questões relacionadas a suas propriedades, composição de materiais, estrutura e aplicações. Neste sentido a metalografia se relaciona com a soldagem por meio de análises estruturais da junta soldada, correlacionando características químicas, físicas e mecânicas (RHODE, 2010).

Ademais, é comum a utilização de ensaios para aprovação da área soldada, os ensaios se dividem em duas classes, ensaios destrutivos e não destrutivos. Para os ensaios destrutivos são classificados aqueles que o processo agride diretamente o material analisado, ou seja, sofre alterações nas suas propriedades. Já os não destrutivos são classificados para aqueles cuja análise não agride diretamente o material analisado, suas propriedades após os testes continuam sem alterações (ZOLIN, 2016).

2.6.1 Micrografia

A micrografia corresponde ao estudo de produtos metalúrgicos em nível estrutural com auxílio de um microscópio. Onde o microscópio possui campo focal baixo, podendo observar somente as superfícies planas e polidas. Este processo busca observar aspecto como:

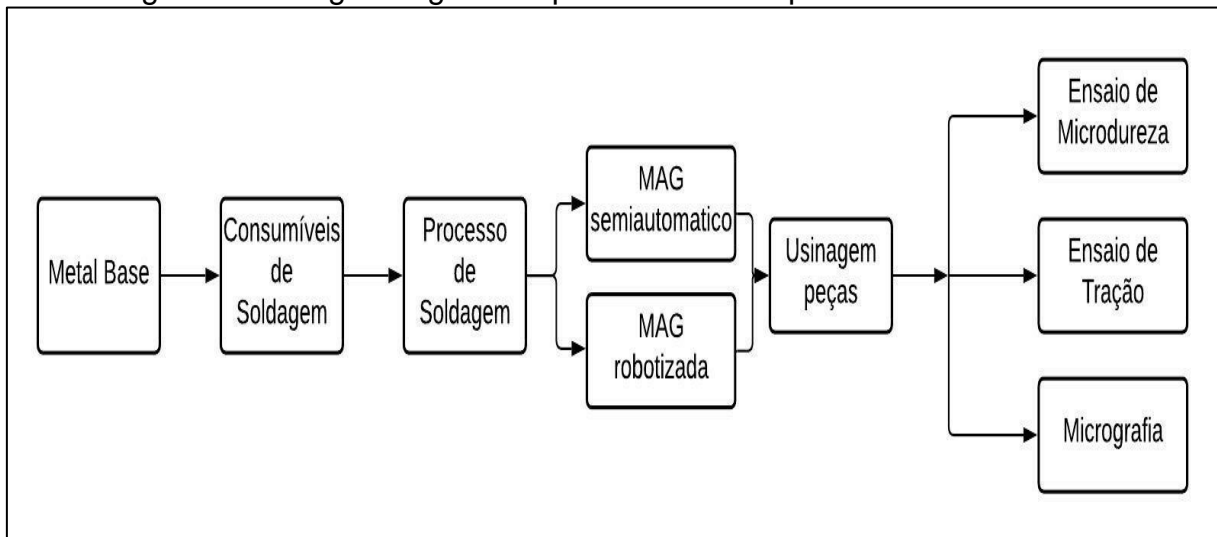
- Fases presentes.
- Granulação do material.
- Teor aproximado de carbono.
- Nível de Inclusões.
- Homogeneidade relacionada à porosidade no cordão de solda.
- Verificação de micro defeitos.

Exemplos destes processos em nível estrutural são: análises por microscópio eletrônico de varredura, ensaios químicos diversificados e análises de microdureza Vickers e Rockwell.

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção serão mencionados e explicados os procedimentos, materiais e métodos necessários para o desenvolvimento e execução deste trabalho. Na sequência, a Figura 4 apresenta o fluxograma geral das etapas desenvolvidas durante a pesquisa.

Figura 4: Fluxograma geral do procedimento experimental executado.



Fonte: Do autor (2021)

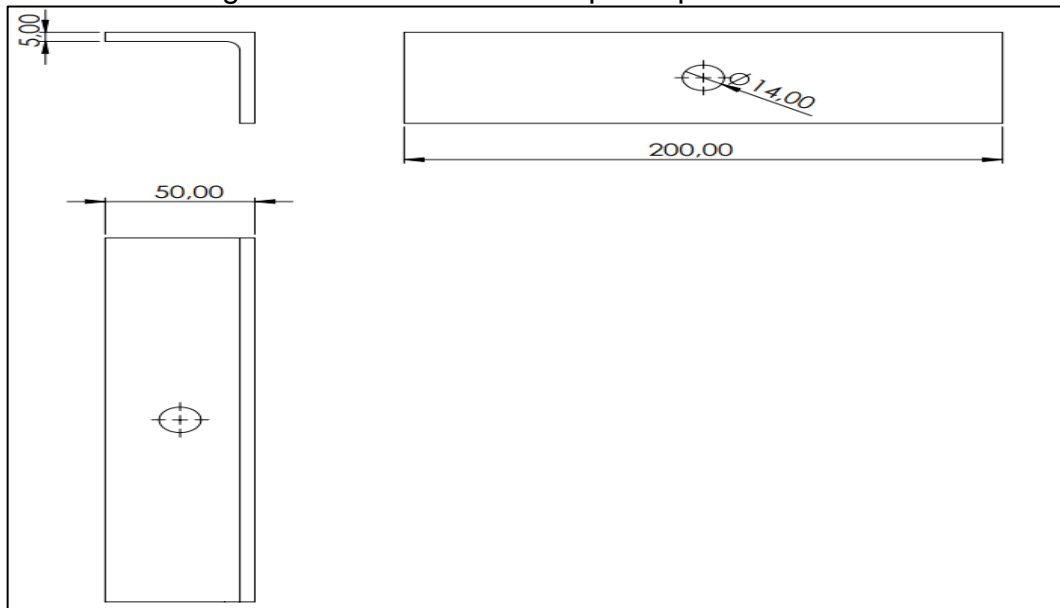
3.1 METAL BASE

Para realização desta pesquisa foram fabricadas 20 (vinte) peças conforme modelo exposto na Figura 5. O material utilizado foi o aço AR 415 perfil L com abas de 50mm, espessura de 5mm, comprimento 200mm e furação com diâmetro de 14mm. A tabela 1 traz a composição química e a tabela 2 traz as propriedades mecânicas do aço AR 415 conforme ASTM A572/ NBR 7007.

Tabela 1: Composição química do metal base.

Especificação	Grau	C Max, %	Mn Max, %	P Max, %	S Max, %	Si Max, %
ASTM A-572/ NBR 7007	60[415] "G"	0.26	1.35	0.03	0.03	0.40

Fonte: Adaptado Belgo (2021)

Figura 5: Dimensões do corpo de prova em mm.


Fonte: Do autor (2021)

Tabela 2: Propriedades mecânicas do metal base.

Especificação	Grau	Tensão de escoamento (Valor mínimo)	Tensão de Ruptura (valor mínimo)	Alongamento mínimo	
				Base 200mm	Base 50mm
ASTM A-572/ NBR 7007	60[415] "G"	42,3 kgf/mm ² - 415 Mpa	53 kgf/mm ² - 520 Mpa	16 %	18 %

Fonte: Adaptado Belgo (2021)

3.2 CONSUMÍVEIS DE SOLDAGEM

O consumível (AWS ER 70S-6) com diâmetro 1,2mm destinado a soldagem MAG é descrito pela norma AWS 15.18. Os dados de sua composição química encontram-se na tabela 3.

O gás utilizado para proteção da solda consiste na mistura de 75% Argônio (Ar) e 25% de dióxido de carbono (CO₂) com uma vazão de 12 litros por minuto (l/min).

Tabela 3: Composição química do arame.

Norma		Composição química do arame						
Classe	Tipo	Elementos	C	Si	Mn	S	P	Cu*
AWS A5.18	ER70S-6	%Min.	0,06	0,18	1,40	-----	-----	-----
		%Max.	0,15	1,15	1,85	0,035	0,025	0,50

Fonte: Adaptado Gerdau (2021).

3.3 PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM

A soldagem dos corpos de prova se dividiu em duas etapas, uma para o método de soldagem MAG semiautomático e outra para o método MAG robotizado. Para o monitoramento da corrente foi utilizado um alicate amperímetro modelo Fluke 325 e com um fluxômetro de bocal mediu-se a vazão do gás antes do início de cada processo de soldagem. As soldas foram realizadas em ambas faces (interna e externa) e abas das cantoneiras. Vale ressaltar que os parâmetros utilizados na soldagem MAG semiautomático deste trabalho são utilizados em uma metalúrgica da região de Criciúma.

3.3.1 Soldagem MAG semiautomático

Para a primeira etapa foi utilizado uma fonte de soldagem MAG do modelo ESAB Smashweld 250E, os parâmetros de soldagem MAG semiautomático foram definidos de acordo com a Tabela 4 e nomeados de P3. Onde o sentido de soldagem foi realizado para a parte externa da cantoneira de forma circular, iniciando na borda da furação fazendo o contorno do furo e finalizando no centro. Já na parte interna da cantoneira a soldagem ocorreu de forma inversa, onde a solda iniciou no centro do furo e chegou até à borda repetindo a forma circular, assim preenchendo a totalidade do furo.

Tabela 4: Parâmetros de soldagem MAG manual (P3).

Espessura (mm)	Arame (Ø)	Corrente (A)	Tensão (V)	Gás (l/min)	Face (Interna/Externa)
5	1,2	250-270	22-26	12	Externa
5	1,2	270-280	22-26	12	Interna

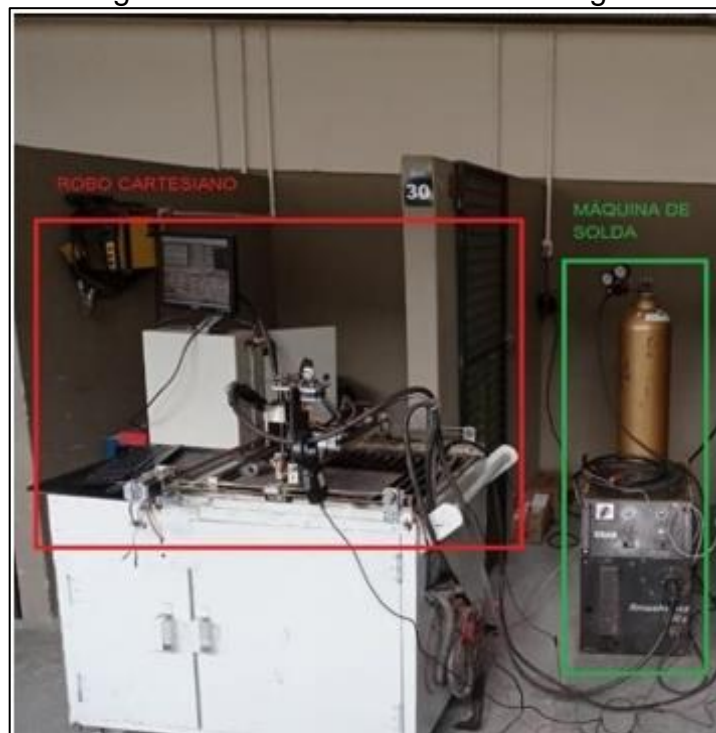
Fonte: Do autor (2021)

3.3.2 Soldagem MAG robotizada

Este ensaio foi realizado com um robô cartesiano que foi desenvolvido pelo Centro Universitário SATC conforme Figura 6. O robô possui 3 (três) eixos de deslocamento, onde toda a implementação foi feita na tocha de soldagem. A utilização deste processo apresenta vantagem por garantir que a altura da tocha e a velocidade de soldagem se mantenham iguais durante o ensaio dos corpos de prova.

Os parâmetros de soldagem MAG robotizada foram definidos de acordo com a Tabela 5. Onde nesta etapa realizou-se dois sentidos diferentes de soldagem, o primeiro procedimento seguiu o mesmo da soldagem MAG semiautomática. Já para o segundo procedimento foi realizado em ambas as faces a soldagem de forma circular, iniciando na borda da furação até chegar ao centro do furo.

Figura 6: Robô cartesiano de Soldagem



Fonte: Do autor (2021)

Foram adotados os seguintes valores de soldagem do robô:

- Velocidade de soldagem: 250 milímetros por minuto (mm/min).
- Altura da tocha: 5 milímetros (mm).

Tabela 5: Parâmetros de soldagem MAG robotizada

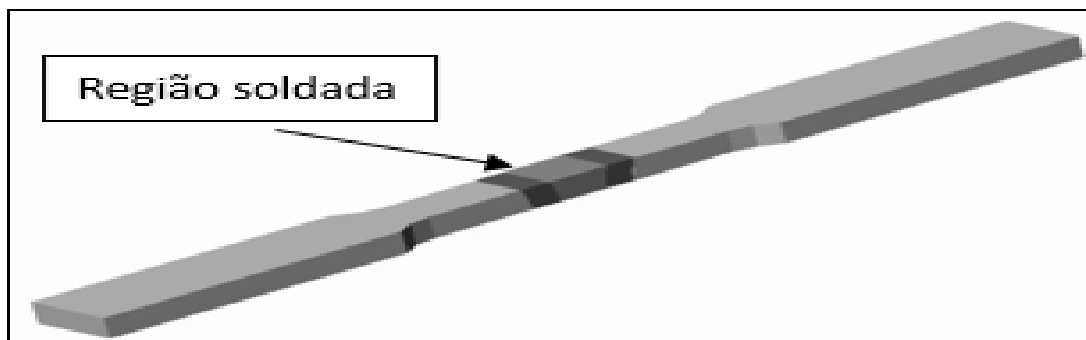
Espessura (mm)	Arame (Ø)	Corrente (A)	Tensão (V)	Gás (l/min)	Face (Interna/ Externa)	Procedimento (P1/ P2)
5	1,2	240-250	22-26	12	Interna	P1
5	1,2	220-240	22-26	12	Externa	P1
5	1,2	200-220	22-26	12	Interna	P2
5	1,2	200-220	22-26	12	Externa	P2

Fonte: Do autor (2021)

3.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

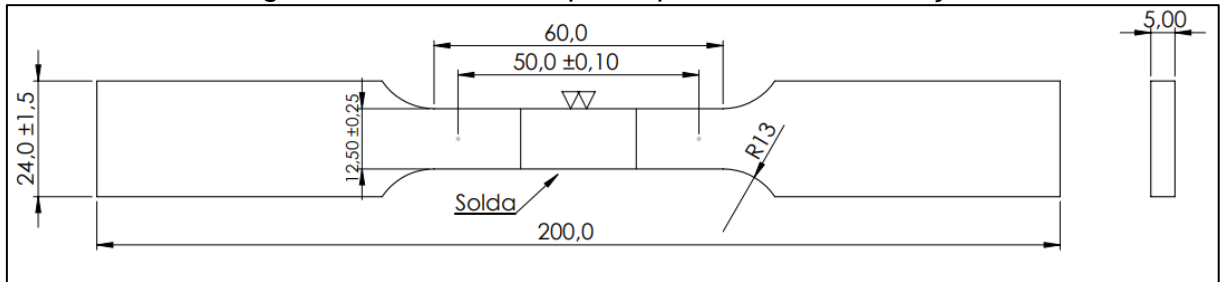
Os corpos de prova para ensaio de tração foram retirados no sentido da laminação do material na seção transversal a fim de comparar os limites de escoamento, limites de resistência e alongamento percentual dados na Tabela 2 de propriedades mecânica do metal base. Para cada situação (MAG semiautomático e robotizado) foram retirados 3 (três) corpos de prova demonstrados na Figura 7. Conforme padrão da norma ASTM A370, os mesmos foram usinados e ficaram com as dimensões mostradas na Figura 8.

Figura 7: Modelo de corpo prova ensaio de tração com região soldada



Fonte: Adaptado Barbedo (2011)

Figura 8: Dimensão corpo de prova ensaio de tração

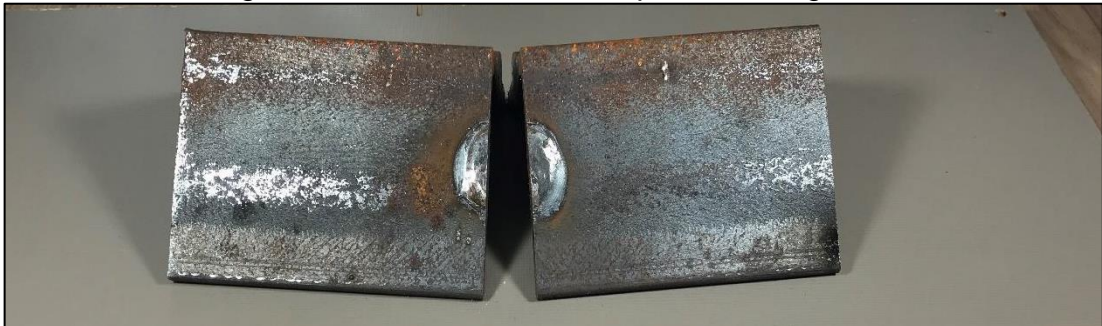


Fonte: Do autor (2021)

3.5 ANÁLISE METALOGRAFICA

Após a soldagem dos corpos de prova como descrito nos itens 3.3.1 e 3.3.2, os perfis que apresentaram melhor soldabilidade foram cortados na região soldada para assim gerar amostras menores, conforme Figura 9 e Figura 10. Foi utilizado como critério de escolha as amostras cuja inspeção visual não apresentaram mordeduras, poros e trincas.

Figura 9: Corte das amostras para metalografia.



Fonte: Do autor (2021)

Assim as amostras foram seccionadas em corpos de prova menores, retificadas, embutidas em resina e atacadas com reagente Nital 2%.

Figura 10: Preparação das amostras para metalografia.



Fonte: Do autor (2021)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na sequência serão apresentados os resultados e análises obtidos através dos ensaios previamente apresentados.

4.1 ANÁLISE MACROGRÁFICA

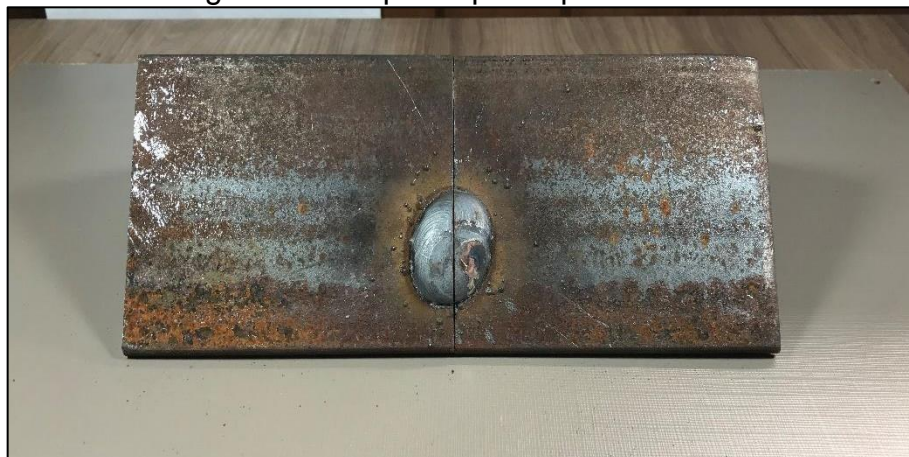
Dentre os corpos de prova soldados pelos métodos MAG semiautomático e MAG robotizada sobressaem-se uma amostra de cada procedimento, totalizando assim três amostras diferentes. A partir das Figuras 11 a 13 pode-se notar que os procedimentos tiveram uma leve diferença de altura da região soldada, diferença que está relacionada aos parâmetros utilizados para cada processo.

Figura 11: Corpo de prova processo P1.



Fonte: Do autor (2021)

Figura 12: Corpo de prova processo P2.



Fonte: Do autor (2021)

Figura 13: Corpo de prova processo P3.



Fonte: Do autor (2021)

Para efeito de análise visual foram cortadas ao meio uma amostra de cada processo soldado. Dentre os 3 (três) procedimentos apenas o processo P2 apresentou falha em relação a forma, mais especificamente uma descontinuidade por falta de penetração, neste processo a corrente não foi alterada para a soldagem em ambos os lados, diferente dos outros 2 (dois) procedimentos, que a corrente foi aumentada para a soldagem da face interna.

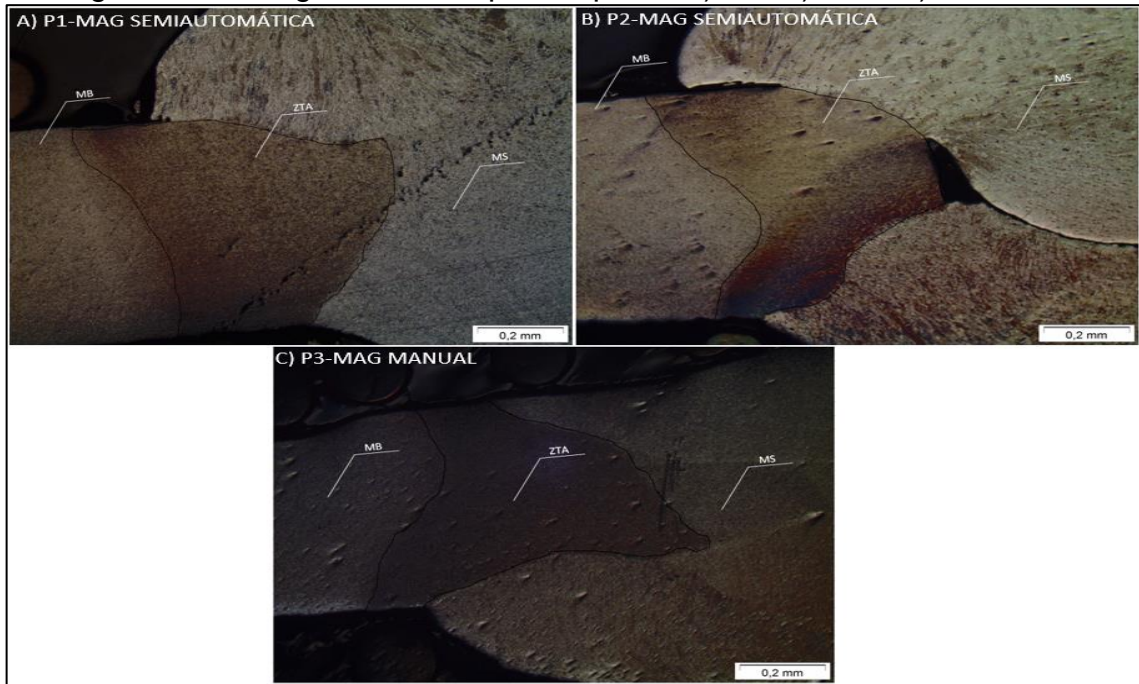
4.2 ANÁLISE MICROGRÁFICA

Conforme preparação das amostras descritas no tópico 3.5, foram extraídas um total de 7 (sete) imagens para cada um dos corpos de provas, onde eles foram analisados com lentes de ampliação de 50, 100 e 200x. As imagens foram extraídas em ambos os lados da solda e foram ampliadas entre zona termicamente afetada e metal de solda.

Salienta-se que os procedimentos de preparo ocorreram de forma igual para cada amostra, respeitando todos os requisitos estabelecidos na norma ABNT NBR 13284:1995.

Na Figura 14 tem-se o resultado das análises micrográficas sob os corpos de prova dos processos P1, P2 e P3 onde são mostradas as regiões do metal de base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e metal de solda (MS).

Figura 14: Micrografia dos corpos de prova A) P1, B) P2 e C) P3 macro.

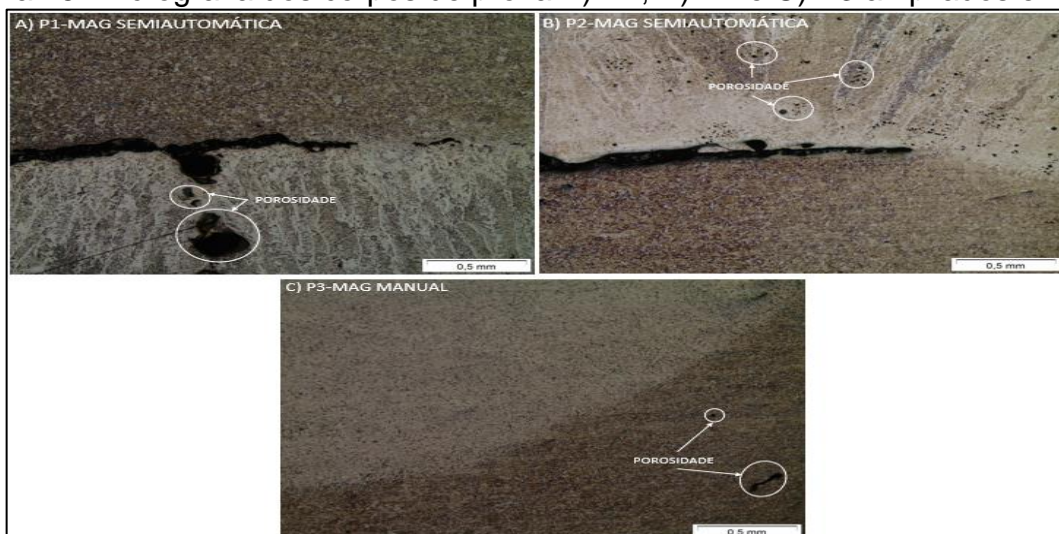


Fonte: Do autor (2021)

Dentre os três resultados notou-se uma similaridade na formação da área termicamente afetada dos processos, onde com diferentes parâmetros de corrente usados não houve uma significativa mudança, outro ponto a ser observado na região é a falta de fusão relevante do processo P2 entre a junta soldada e o metal base.

As fases presentes na ZTA podem ser melhor visualizadas na Figura 15, onde foi ampliada por meio de uma lente de aumento em 50x.

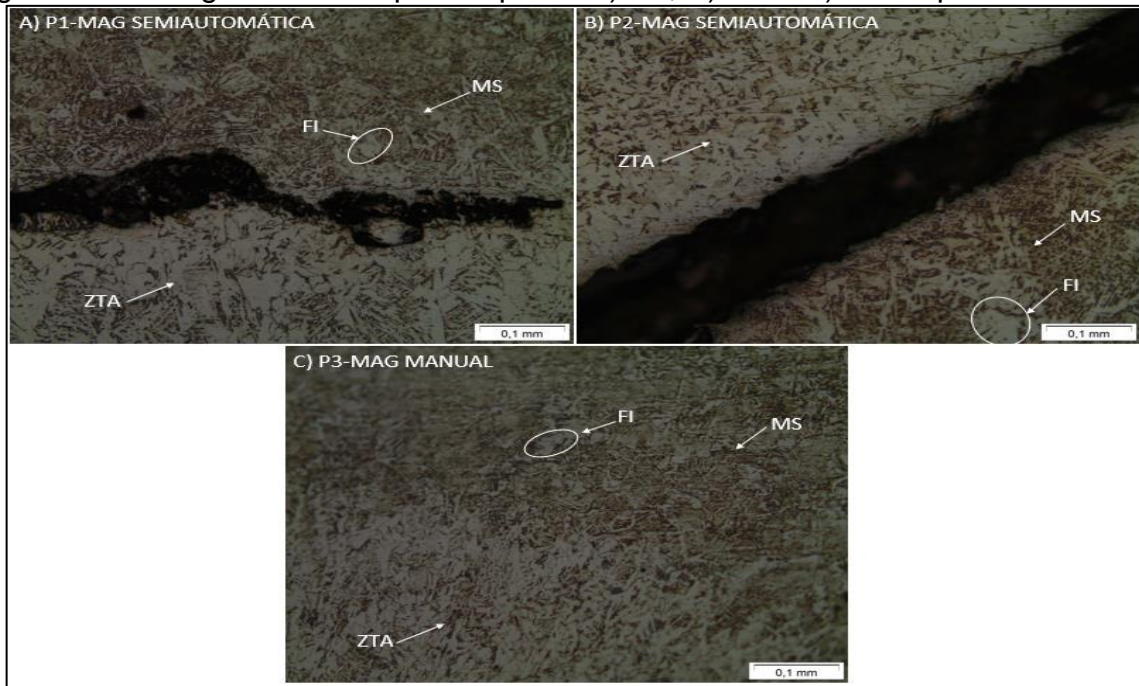
Figura 15: Micrografia dos corpos de prova A) P1, B) P2 e C) P3 ampliados em 50x.



Fonte: Do autor (2021)

Também pode ser visualizado por meio da Figura 16 os processos P1 e P2 a presença de grãos mais grosseiros na região da zona termicamente afetada em relação ao processo P3, o que sugere que mesmo com menores parâmetros de corrente a taxa de resfriamento dos processos ocorrem de forma mais acelerada.

Figura 16: Micrografia dos corpos de prova A) P1, B) P2 e C) P3 ampliados em 200x.



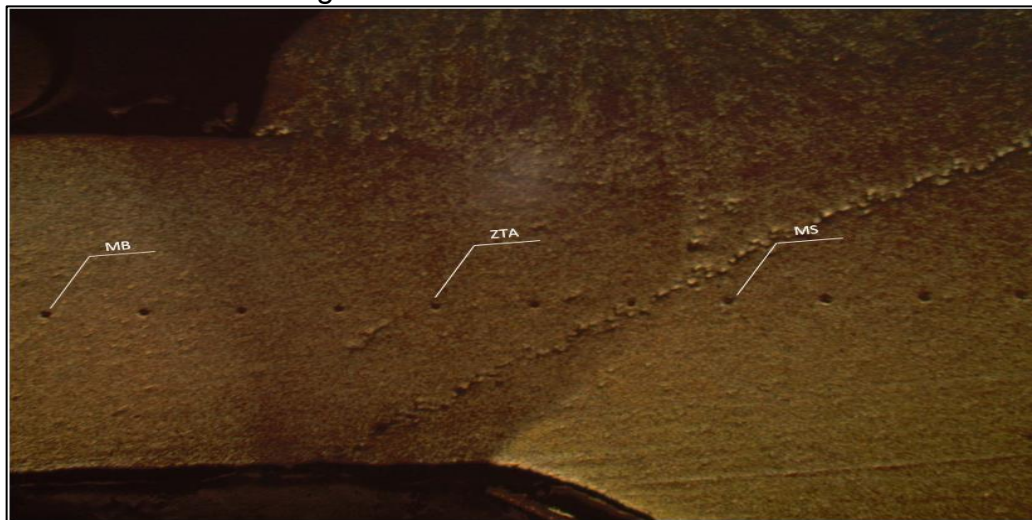
Fonte: Do autor (2021)

Com o aumento da lente em 200x é possível verificar que entre a região de solda e zona termicamente afetada do processo P1, também apresentou falta de fusão. Os três ensaios também firmaram presença de grandes grãos austeníticos na ZTA.

4.3 PERFIL DE MICRODUREZA

Para uma análise mais concreta e adequada dos resultados, foi traçado o perfil de dureza Vickers. Como visto na Figura 17 os pontos de indentação iniciam-se no metal base (MB), passam pela zona termicamente (ZTA) afetada e finalizam no metal de solda (MS). O processo seguiu de acordo com a norma ABNT NBR ISO 6507-1:2019.

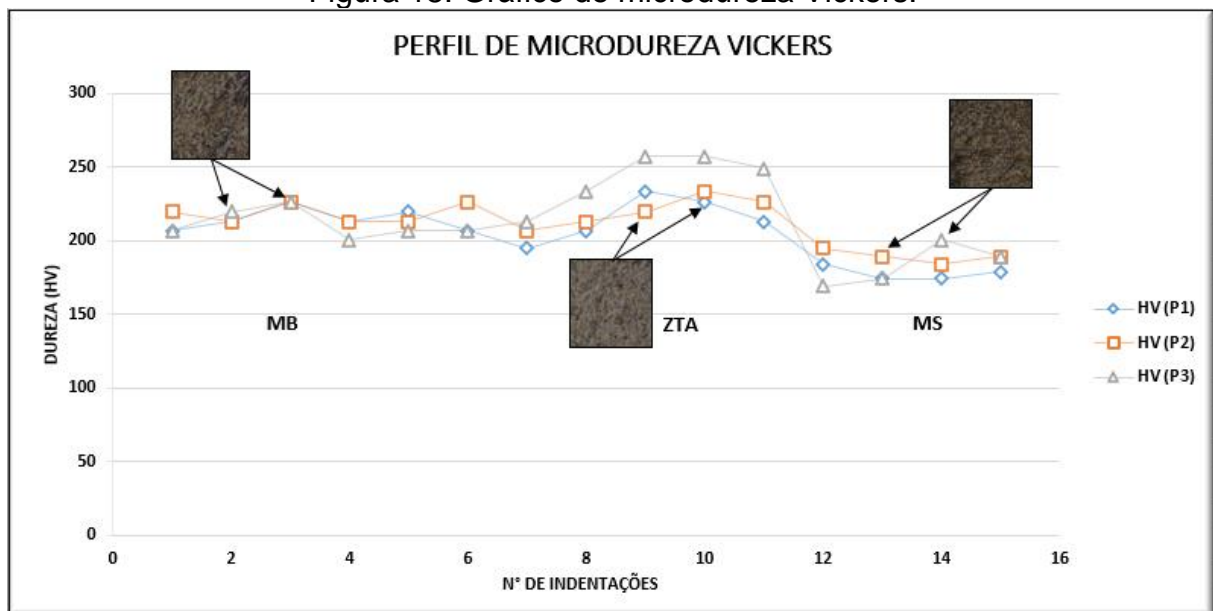
Figura 17: Perfil de microdureza.



Fonte: Do autor (2021)

Na análise obtida do Gráfico de microdureza da Figura 18, tem-se similaridade das amostras ensaiadas, sendo possível verificar na transição do metal base para a zona termicamente afetada um aumento da dureza para os três processos. Entretanto, nota-se que a ZTA possui dureza mais elevada do que o metal de solda, a ferrita presente tende a reduzir a resistência mecânica do MS, já que esta microestrutura geralmente é macia e apresenta ductilidade e tenacidade, porém tem baixa dureza e resistência mecânica.

Figura 18: Gráfico de microdureza Vickers.

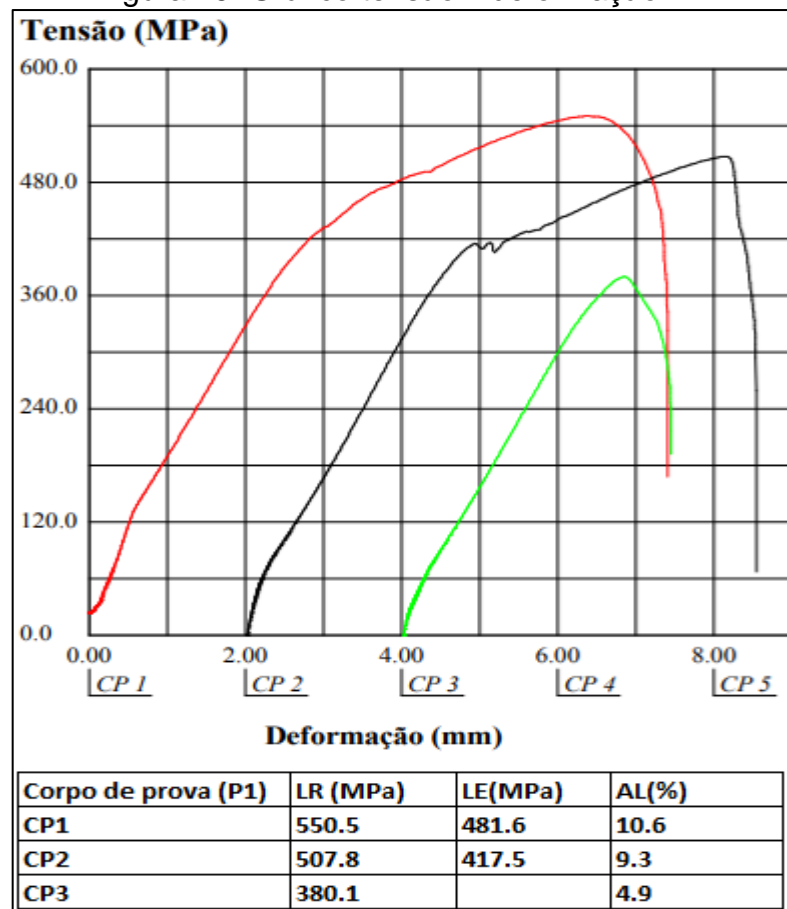


Fonte: Do autor (2021)

4.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

O resultado do ensaio mecânico em tração (limite de escoamento (LE), limites de resistência (LR) e alongamento percentual (Al)) das amostras analisadas é mostrado no Gráfico da Figura 19, neste ensaio foram analisados 3 (três) corpos de prova para cada processo de soldagem (P1, P2 e P3).

Figura 19: Gráfico tensão x deformação P1.



Fonte: Do autor (2021)

Ao fim dos ensaios se obteve o Gráfico de tensão x deformação, onde a junta rompeu entre a zona termicamente afetada e o metal de solda para os três corpos de provas como exemplo apresentado na Figura 20. Este comportamento é comum visto que a região se comporta como um concentrador de tensões devido a formação e crescimento de grãos decorrentes da variação de resfriamento e aquecimento, reduzindo assim sua resistência mecânica. O comportamento do CP3

se mostra diferente aos demais, após a ruptura do corpo de prova foi verificado que a solda estava com falta de fusão e porosidade, com isso ocorreu a ruptura prematura dentro da fase elástica, por esse motivo não foi possível determinar o limite de escoamento do material testado.

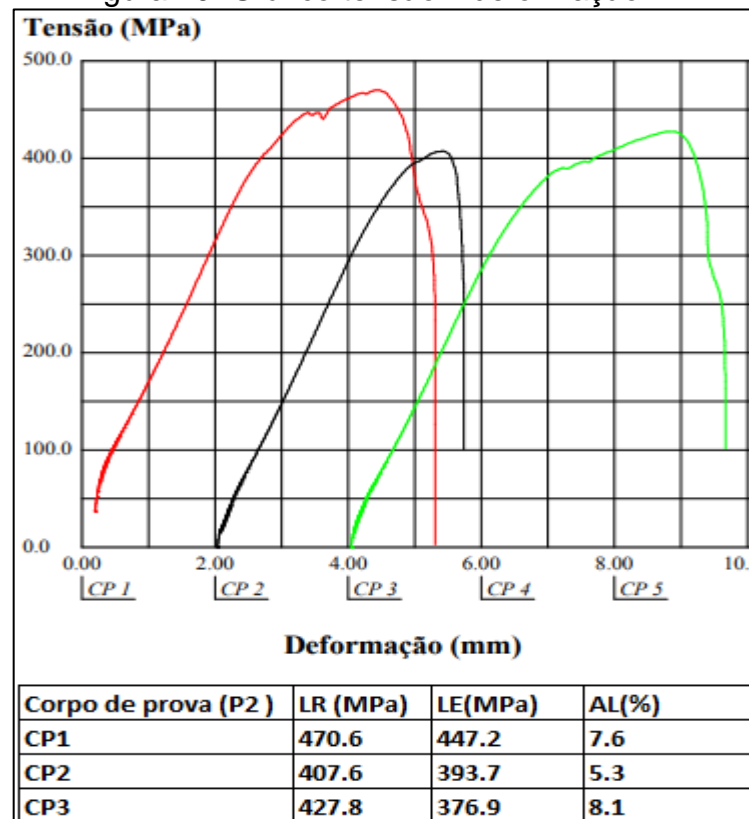
Figura 20: Corpo de prova CP 3 do processo P1.



Fonte: Do autor (2021)

Os resultados do processo P2 de soldagem são observados na Figura 20. Neste ensaio os resultados mecânicos apresentaram similaridade na tensão máxima com valores de 470,6 Mpa para o CP1 e Mínima de 407,6 Mpa para o CP2, não atingindo o valor mínimo de resistência previsto na tabela 2.

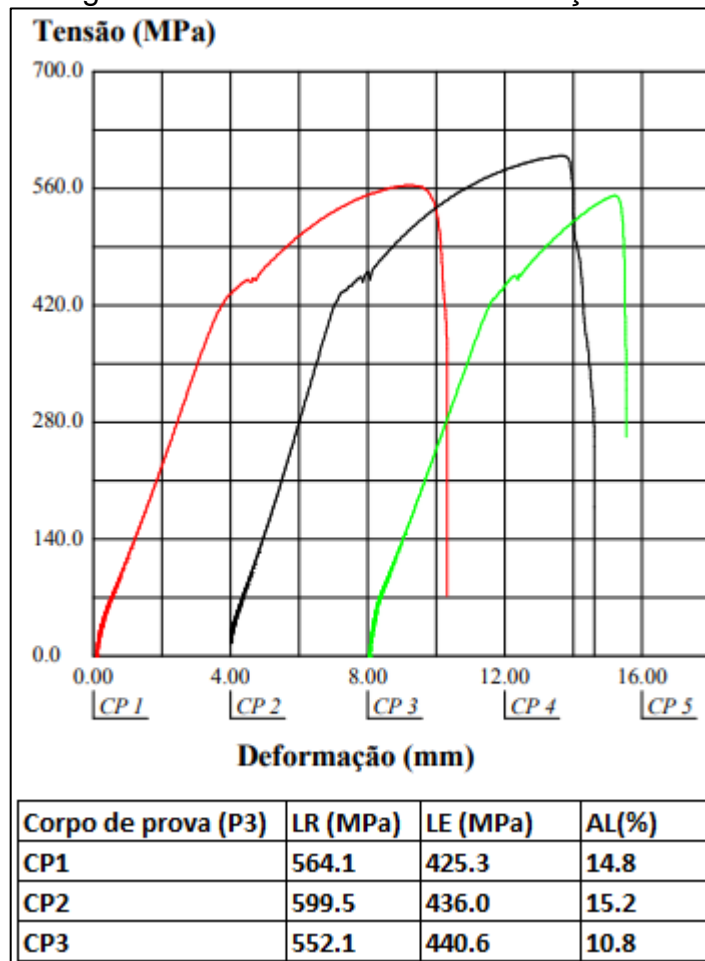
Figura 20: Gráfico tensão x deformação P2.



Fonte: Do autor (2021)

Após a ruptura das três amostras, foram analisadas e apresentam maiores pontos de porosidade e falta de fusão na junta rompida se comparadas ao processo P1, outro fator visto na região foi a inclusão de escória na solda, indicando que a velocidade de avanço para este processo precisa ser maior, evitando que a poça de fusão fique a frente do arco.

Figura 21: Gráfico tensão x deformação P3.



Fonte: Do autor (2021)

Dentre os 3 (três) parâmetros de soldagem MAG o processo semiautomático denominado de P3 se sobressai a nível de resistência mecânica como demonstra o gráfico da Figura 21, apresentando resultados mínimos de limites de resistência e escoamento imposto na tabela 2. A fratura destes corpos de prova ocorreram no metal de solda, a Figura 22 expõe o resultado visual de ruptura. Outro ponto a ser observado nos corpos de prova rompidos são a presença de pontos com porosidade, assim indicando enfraquecimento na região de solda.

Figura 22: Corpo de prova CP 1 do processo P3.



Fonte: Do autor (2021)

5 CONCLUSÕES

Nos resultados obtidos pelos ensaios realizados utilizando da variação do processo de soldagem MAG, pode ser constatado a importância da correta regulagem dos parâmetros antes de qualquer aplicação, na qual o mínimo desvio resulta em grandes impactos sobre as regiões de solda.

Pode-se notar uma melhora entre o processo P1 (MAG robotizado) para o processo P2 (MAG robotizado) onde foram alterados os sentidos de soldagem para a face interna e aumento da corrente utilizada, com isto o processo P1 (MAG robotizado) não apresentou falha de penetração.

Através das micrografias foi possível observar que o aporte térmico provocou o surgimento de grãos mais grosseiros na zona termicamente afetada, também se verificou a falta de fusão dos processos de P1 (MAG robotizado) e P2 (MAG robotizado).

Neste caso em específico a soldagem MAG semiautomático se mostrou com resultados mecânicos melhores do que a parametrização MAG robotizado, porém os parâmetros utilizados no processo P3 (MAG semiautomático) não são suficientes para validar o uso da solda MAG manual como alternativa de reparo de peças, visto que não foram atingidas todas as especificações mínimas dos parâmetros mecânicos do metal base.

REFERÊNCIAS

BARBEDO, Nancy Del Ducca. Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando aço ASTM A-36 para verificar a soldabilidade,

propriedades metalúrgicas e geométricas, e resistência mecânica. **Itajubá: UNIFEI, 2011.**

BELGO. Os Perfis Laminados Belgo e a Norma ABNT NBR 7007.Disponível em: belgo.com.br. Acesso em: 24 mai. 2021.

CALLISTER, W. R. (2016). *DG Ciência e engenharia dos materiais—uma introdução. 9. Ed. Rio de Janeiro: LTC.*

CORRALES RHÉNAL, Jorge Alejandro et al. Efecto de los procesos de soldadura al arco en las propiedades mecánicas y microestructura en aceros de alta resistencia y baja aleación. 2020

DA SILVA, Ramsés Ferreira. Caracterização da zona termicamente afetada de aço produzido via resfriamento acelerado. 2010.

DELLAY, Bruna Dal Castel. Análise da viabilidade de um projeto de aquisição de uma célula de soldagem robotizada. 2021.

DE NOVAIS, Paulo Rogerio Santos. Avaliação das principais descontinuidades encontradas nas juntas soldadas, causas e possíveis soluções. **Contribuição técnica**, n. 9, 2010.

DE MELO, Leonardo Gadelha Tumajan Costa; CARDOSO, Francisco Ilo Bezerra; FERREIRA, Ricardo Artur Sanguinetti. Previsão das dimensões da Zona Termicamente Afetada de Juntas Soldadas com Variação de Parâmetros de Soldagem. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 3, n. 1, 2016.

FORTES, Cleber. Soldagem MIG/MAG,2005. Disponível em: ufjf.br. Acesso em 03 dez. 2021.

GERDAU. **ARAMES PARA SOLDA GERDAU.** Disponível em: gerdau.com.br. Acesso em 24 mai. 2021.

LEITE, Darlan Ulhoa et al. Ensaio para Determinação de Resistência em Juntas Soldadas. **CONSTRUINDO**, p. 57-67, 2017.

LIMA, Carlos Augusto Silveira. Influência do tratamento térmico de alívio de tensões associado à elevada energia de soldagem na tenacidade da zona termicamente afetada de um aço TMCP microligado aplicado em estruturas off-shore. 2011.

MAIA, Pedro Paulo Nunes. Classificação de descontinuidades em juntas soldadas utilizando máquinas de vetores-suporte treinadas a partir de sinais de ultrassom simulados numericamente. 2019.

PEREIRA, João Adriano Vieira. Estudo e Aplicação de Ensaios Não Destrutivos. Líquidos penetrantes, Ultra sons, Radiografia digital-Técnica tangencial medição de espessuras. 2013.

PEREZ, Fabiano Ricardo da Costa. A influência da temperatura de pré-aquecimento e tecimento na microestrutura e propriedades mecânicas na soldagem MIG/MAG robotizada de aços SAE 8620 com ABNT LN28. 2007.

PETRACHI, Lucas Mariani. Avaliação da influência da distância entre o bico de contato e a peça na taxa de fusão no processo de soldagem MIG/MAG. 2021.

RAKOSKI, Fábio Santor. Estudo de caso: comparativo entre processo de soldagem manual e soldagem robotizada relativa à qualidade e produtividade. 2015.

RODRIGUES, Emanuel Rezende. **Influência de parâmetros do processo FCAW-G nas características da solda do aço ASTM A-36**. 2010. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SARTORI, Francisco; MARQUEZI, Sérgio Luis. INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO CORRENTE DE SOLDAGEM NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE JUNTA SOLDADA EM AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS. **Unoesc & Ciência-ACET**, v. 6, n. 1, p. 65-74, 2015.

ROHDE, Regis Almir. Metalografia preparação de amostras: uma abordagem prática versão-3.0. **outubro**, 2010.

SALVARO, Severo Leonardo. Parametrização e análise do método de soldagem mag convencional e pulsado em chapas de aço 1020 com baixa espessura. 2020.

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

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; DE MELLO, Fabio Decourt Homem. **Soldagem: processos e metalurgia**. Editora Blucher, 1992.

XIMENES, Matheus Costa et al. Análise da tenacidade à fratura para o carbetto de boro a partir dos ensaios de dureza vickers e knoop. 2016.

YEH, Felipe Wu Tzong. Avaliação de descontinuidades no reparo em placas de aço por "Friction Hydro Pillar Processing"(FHPP) via ultrassom e micrografia. 2012.

ZOLIN, Ivan. Ensaio Mecânicos e Análises de Falhas. 2016.