

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA  
CATARINA - CAMPUS JARAGUÁ DO SUL - RAU  
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA

LUCAS DE SOUZA

INFLUÊNCIA DO PREAQUECIMENTO E DO SENTIDO DE SOLDAGEM NO  
PROCESSO TIG SOBRE A MICROESTRUTURA E AS PROPRIEDADES  
MECÂNICAS DO AÇO ABNT 1020

JARAGUÁ DO SUL

DEZEMBRO, 2021

LUCAS DE SOUZA

INFLUÊNCIA DO PREAQUECIMENTO E DO SENTIDO DE SOLDAGEM NO  
PROCESSO TIG SOBRE A MICROESTRUTURA E AS PROPRIEDADES  
MECÂNICAS DO AÇO ABNT 1020

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica do Campus Jaraguá do Sul – Rau, do Instituto Federal de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do diploma de Tecnólogo em Fabricação Mecânica.

Orientador: Almir Turazi, Dr. Eng.

JARAGUÁ DO SUL

DEZEMBRO, 2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
por meio do programa de geração automática do câmpus Rau, do IFSC

Souza, Lucas de  
INFLUÊNCIA DO PREAQUECIMENTO E DO SENTIDO DE SOLDAGEM  
NO PROCESSO TIG SOBRE A MICROESTRUTURA E AS PROPRIEDADES  
MECÂNICAS DO AÇO ABNT 1020 / Lucas de Souza ; orientação  
de Almir Turazi. Jaraguá do Sul, SC, 2022 .  
59 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal  
de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul -  
Rau. Tecnologia em Fabricação Mecânica. .  
Inclui Referências.

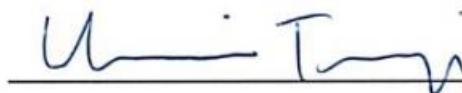
1. Preaquecimento. 2. Zona afetada pelo calor. 3.  
Soldagem TIG. 4. Crescimento de grãos. I. Turazi, Almir  
. II. Instituto Federal de Santa Catarina. . III. Título.

LUCAS DE SOUZA

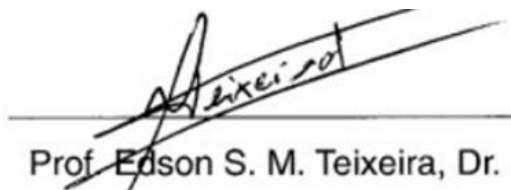
INFLUÊNCIA DO PREAQUECIMENTO E DO SENTIDO DE SOLDAGEM NO  
PROCESSO TIG SOBRE A MICROESTRUTURA E AS PROPRIEDADES  
MECÂNICAS DO AÇO ABNT 1020

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Tecnólogo em  
Fabricação Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de  
Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo  
indicada.

Jaraguá do Sul, 13, dezembro de 2021.



Prof. Almir Turazi, Dr. Eng.  
Orientador  
IFSC – Campus Jaraguá do Sul - RAU



Prof. Edson S. M. Teixeira, Dr.  
IFSC – Campus Jaraguá do Sul - Rau



Prof. Dr. Gil Magno Portal Chagas  
IFSC – Campus Jaraguá do Sul – Rau

Dedico a todos que contribuíram para meu desenvolvimento profissional e pessoal, principalmente a toda minha família.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador Dr. Almir Turazi por todo o seu tempo e dedicação o qual disponibilizou a mim, possibilitando a elaboração, desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

A meus pais por sempre me apoiarem e me incentivarem na busca do desenvolvimento pessoal e profissional, e por sempre me motivarem a buscar novos desafios.

A minha namorada Thaisa pela paciência e toda a compreensão durante a elaboração deste trabalho.

Aos demais professores, alunos e funcionários do Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Jaraguá do Sul/Rau, que quando necessário prestaram todo o suporte para realização deste trabalho.

“Não há nada impossível;  
há só vontades mais ou menos enérgicas.”  
(Júlio Verne)

## RESUMO

No setor metalúrgico, a utilização de aços com baixos teores de carbono e de elementos de liga é muito difundida por proporcionar variadas aplicações de interesse na engenharia. Este fato deve-se à grande versatilidade destes materiais, que apresentam excelentes propriedades tecnológicas (usinabilidade, conformabilidade e soldabilidade, por exemplo) aliadas a um baixo custo. O emprego de processos de soldagem compreende grande parte da fabricação de componentes com tais materiais. No entanto, como para qualquer material soldado, o calor gerado durante o processo afeta a sua microestrutura, não só na região onde ocorre a fusão, mas também em regiões não fundidas, denominadas de zonas termicamente afetadas (ZTA). Em materiais metálicos, estas mudanças microestruturais impactam nas características mecânicas e podem interferir na aplicação em que a junta seria submetida. Para evitar problemas decorrentes desta transformação indesejável algumas técnicas são recomendadas, como tratamentos pós soldagem, visando recuperação microestrutural, ou aquecimento da peça antes do processo, visando a redução dos ciclos térmicos gerados. O conhecimento e domínio dos ciclos térmicos à que as peças são submetidas durante a soldagem, propicia melhor controle sobre o resultado final da junta. Com este intuito, o presente trabalho teve como objetivo a avaliação da influência do preaquecimento da peça e do sentido de soldagem na microestrutura e nas propriedades mecânicas de juntas soldadas com o aço ABNT 1020. Para isto foram realizados procedimentos, através do processo TIG alimentado, sem preaquecimento e com preaquecimento em três temperaturas distintas, variando-se, também, o sentido de soldagem. As análises da variação microestrutural e das propriedades mecânicas foram realizadas através de microscopia óptica, ensaio de dureza Vickers e ensaio de resistência à tração. Como resultado percebeu-se que a utilização de preaquecimento resulta em mudanças na microestrutura do aço, porém não produz alteração significativa nas propriedades mecânicas. Do mesmo modo o sentido de soldagem não gerou efeito nas propriedades e microestrutura do material, sugerindo que o ciclo térmico de soldagem, nas condições estudadas, é governado, principalmente, pelo aporte térmico utilizado.

Palavras-Chave: Preaquecimento. Soldagem TIG. Crescimento de grãos. ZTA.



## ABSTRACT

In the metallurgical sector, the use of low carbon and low alloy steel is widespread because it provides several applications of interest in engineering. This fact is due to the great versatility of these materials, which present excellent technological properties (machinability, formability, and weldability, for example) allied to low cost. The use of welding processes comprises a large part of the manufacturing of components with such materials. However, as for any welded material, the heat generated during the process affects its microstructure, not only in the region where the melting occurs but also in non-melted regions, called heat affected zones (HAZ). In metallic materials, these microstructural changes impact the mechanical characteristics and can interfere in the application in which the joint would be submitted. To avoid problems arising from this undesirable transformation, some techniques are recommended, such as post-welding treatments, aiming at microstructural recovering, or heating of the part before the process, aiming at reducing the generated thermal cycles. The knowledge and control of the thermal cycles to which the pieces are submitted during welding provides better control over the final result of the joint. With this intention, the present work had as objective the evaluation of the influence of the preheating of the piece and the welding direction in the microstructure, and the mechanical properties of welded joints with the ABNT 1020 steel. For this, procedures were performed through the automated TIG process, without preheating and with preheating at three different temperatures, also varying the welding direction. The microstructural variation and mechanical properties were analyzed through optical microscopy, Vickers hardness test and tensile strength test. As a result, it was noticed that the use of preheating results in changes in the microstructure of the steel but does not produce significant changes in the mechanical properties. Similarly, the welding direction did not affect the properties and microstructure of the material, suggesting that the thermal welding cycle, under the conditions studied, is governed mainly by the heat input used.

Keywords: Preheating. TIG Welding. Grain growth. HAZ.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação geral de alguns aços em função da composição química. .	17
Figura 2 – Variação do tamanho de grão em metais. ....	18
Figura 3 – Microestruturas típicas do aço carbono.....	18
Figura 4 – Classificação dos processos de soldagem.....	20
Figura 5 – Ilustração do processo de soldagem TIG.....	21
Figura 6 – Exemplo de processo TIG alimentado. ....	23
Figura 7 – Sentidos de soldagem: a) soldagem à direita; b) soldagem à esquerda. .	25
Figura 8 – Regiões da junta soldada.....	26
Figura 9 – Microestrutura típica da ZTA em aços.....	28
Figura 10 – Metodologia experimental utilizada. ....	34
Figura 11 – Corpo de prova soldado. ....	36
Figura 12 – Equipamento de soldagem.....	38
Figura 13 – Microscópio óptico com câmera acoplada. ....	39
Figura 14 – Pontos de medição de dureza.....	40
Figura 15 – Dimensional do corpo de prova.....	40
Figura 16 – Máquina de eletroerosão em funcionamento. ....	41
Figura 17 – Corpo de prova cortado.....	41
Figura 18 – Corpo de prova cortado.....	42
Figura 19 – Máquina de ensaios de tração. ....	42
Figura 20 – Microestrutura do metal base (Ampliação 400x). ....	43
Figura 21 – Microestrutura da zona fundida (Ampliação 400x). ....	44
Figura 22 – Regiões de refino de grãos (Ampliação 400x). ....	45
Figura 23 – Gráfico tamanho médio de grãos na região de refino. ....	46
Figura 24 – Regiões crescimento de grão (ampliação 400x). ....	48
Figura 25 – Gráfico tamanho médio de grãos na região de crescimento de grãos. ..	49
Figura 26 – Perfis de microdureza para cada condição de soldagem.....	51
Figura 27 – Comparativo entre os perfis de microdureza.....	52
Figura 28 – Gráfico dos valores de resistência a tração. ....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores típicos de eficiência térmica. ....	30
Tabela 2 – Temperatura de preaquecimento recomendada. ....	32
Tabela 3 – Temperatura de preaquecimento recomendada por tipo de aço. ....	32
Tabela 4 – Composição química do aço ABNT 1020. ....	35
Tabela 5 – Parâmetros da máquina. ....	36
Tabela 6 – Corpos de prova. ....	37
Tabela 7 – Tamanho médio de grãos na região de refino. ....	46
Tabela 8 – Tamanho médio de grãos na região de crescimento de grãos. ....	49
Tabela 9 – Valores do ensaio de microdureza Vickers. ....	50
Tabela 10 – Valores do ensaio de tração. ....	53

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

$\varepsilon$  - Alongamento

$\mu\text{m}$  – Micrómetro

$\eta$  – Eficiência térmica

A – Ampere

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AIISI – American Iron and Steel Institute

AWS – American Welding Society

C – Carbono

Ceq – Carbono equivalente

CP – Corpo de prova

Cr – Cromo

Cu – Cobre

DP – Desvio padrão

E – Aporte térmico

$E_{ab}$  – Energia absorvida

GTAW – Gas Tungsten Arc Welding

HAZ – Heat affected zones

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

IIW – International Institute of Welding

J – Joule

MB – Metal base

MIG/MAG – Metal Inert Gas / Metal Active Gas

Mn – Manganês

Mo – Molibdênio

Ni – Níquel

SAE – Society of Automotive Engineers

TIG – Tungsten Inert Gas

V – Vanádio

V – Volt

W – Tungstênio

ZF – Zona fundida

ZTA – Zonas Termicamente Afetadas

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	14
1.1 Objetivos .....	15
1.1.1 Objetivo geral.....	15
1.1.2 Objetivos específicos.....	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	16
2.1 Aços baixo carbono .....	16
2.2 Processos de Soldagem.....	19
2.2.1 Processo de Soldagem TIG .....	20
2.2.1.1 Soldagem TIG alimentada .....	23
2.2.1.2 Parâmetros de Soldagem.....	24
2.3 Metalurgia de soldagem .....	26
2.3.1 Características da Zona Termicamente Afetada (ZTA).....	27
2.3.2 Aporte térmico .....	29
2.4 Preaquecimento na soldagem.....	31
3 MATERIAIS E MÉTODOS .....	34
3.1 Materiais.....	34
3.1.1 Metal Base .....	34
3.1.2 Consumíveis.....	35
3.2 Metodologia.....	35
3.2.1 Regulagem e definição dos parâmetros de soldagem .....	35
3.2.2 Soldagem das amostras.....	36
3.2.3 Microscopia óptica.....	38
3.2.4 Ensaio de microdureza Vickers .....	39
3.2.5 Ensaio de resistência à tração .....	40
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	43
4.1 Análise microestrutural ao longo das juntas soldadas.....	43
4.1.1 ZTA com refino de grãos .....	44
4.1.2 ZTA com crescimento de grãos .....	47
4.2 Análise dos perfis de microdureza Vickers .....	50
4.3 Limite de resistência à tração.....	53
5 CONCLUSÃO.....	55
REFERÊNCIAS.....	57

## 1 INTRODUÇÃO

A soldagem é um processo de fabricação com aplicação em diversos segmentos, desde uniões simples em portões, grades e pequenas estruturas, até o uso em linhas de produção totalmente automatizadas, como ocorre na indústria automobilística, por exemplo (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Este processo apresenta algumas vantagens em relação a outros métodos utilizados em união de peças. As principais são redução de custo e estanqueidade, quando comparado à união através da utilização de parafusos e rebites. No entanto, este processo também possui desvantagens como, por exemplo, a impossibilidade de desmontar as peças unidas após a soldagem, a necessidade de grande habilidade do operador e as mudanças sofridas pelo material devido às altas temperaturas (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Por definição, a soldagem compreende um conjunto de processos térmicos que visa a união permanente de peças, garantindo a continuidade das propriedades químicas, metalúrgicas e físicas do material soldado (QUITES, 2002)

O resultado destes processos térmicos é a formação de regiões microestruturais distintas na junta: metal base, zona fundida e zona termicamente afetada (ZTA). Estas variações implicam em mudanças nas propriedades mecânicas e podem definir o tipo de aplicação da peça soldada.

Um grupo de materiais que apresenta boa soldabilidade é a dos aços baixa liga e alguns aços carbono, o que os torna atrativos aos setores de construção e fabricação mecânica além do baixo custo. No entanto, devido as altas temperaturas geradas no processo de soldagem por fusão, podem ocorrer alguns problemas como a formação de trincas na região da soldagem (zona fundida) ou ainda variação microestrutural com perda de tenacidade, principalmente na ZTA.

Após a escolha do material deve-se analisar as condições de soldagem, pois estas acarretam efeitos na microestrutura final de uma junta. Parâmetros como corrente, tensão, velocidade e sentido de soldagem, por exemplo, resultam em alterações na penetração e na capacidade de fusão, gerando alterações na zona termicamente afetada. Outras variáveis como o material de adição utilizado e a velocidade em que este é alimentado, também possuem influência no resultado da soldagem. Ou seja, o controle de alguns parâmetros de soldagem pode acarretar juntas soldadas com menor quantidade de defeitos, além de menor custo e tempo de

execução.

Com a finalidade de evitar problemas na junta soldada, algumas técnicas também podem ser utilizadas como, por exemplo, a aplicação de tratamentos térmicos para homogeneização e correção da microestrutura, ou o preaquecimento da peça realizado antes do processo de soldagem, a fim de minimizar o ciclo térmico e seu efeito nas propriedades do material. Estas técnicas visam o controle microestrutural e das tensões residuais geradas, que somadas podem provocar defeitos graves.

Nos aços carbono é recomendado a aplicação de processos de preaquecimento quando se tem como objetivo principal, a redução da ocorrência de altos níveis de dureza na ZTA. Com o controle da velocidade de resfriamento gerado, é possível ainda, reduzir as tensões residuais da junta soldada. No caso específico de aços com baixo teor de carbono, embora alguns catálogos comerciais indiquem a aplicação, são encontradas poucas recomendações nas literaturas, e existem poucos estudos dos efeitos do preaquecimento em aços de baixo carbono.

Sendo assim, o presente trabalho tem como pergunta de pesquisa: Qual a influência do uso da técnica de preaquecimento e da variação do sentido de soldagem em peças soldadas do aço ABNT 1020?

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Avaliar a influência do preaquecimento da peça e do sentido de soldagem na microestrutura e nas propriedades mecânicas do aço ABNT 1020 em juntas soldadas pelo processo TIG alimentado.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Parametrização do equipamento e realização do processo de soldagem TIG alimentado com passe único e penetração total;
- Análise da variação microestrutural do aço ABNT 1020 em função da temperatura de preaquecimento e do sentido de soldagem;
- Análise, via realização de ensaios de microdureza Vickers e de resistência a tração, das propriedades mecânicas das juntas soldadas.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Aços baixo carbono

Para Chiaverini (2005), o aço é uma liga de ferro e carbono que contém em sua composição de 0,008% a 2,11% de carbono, em conjunto com outros elementos residuais. O limite inferior a 0,008% é correspondente à máxima solubilidade do carbono no ferro à temperatura ambiente, e o limite superior 2,11% corresponde à quantidade máxima que o carbono tem capacidade de se dissolver no ferro a 1140°C

O aço é o produto obtido através da siderurgia, por meio líquido, utilizando a fusão do ferro como componente básico, e acrescentado o carbono para então criar uma liga de ferro-carbono. Nessa liga também são encontrados níquel, manganês, enxofre, cromo, fósforo, entre outros elementos residuais resultantes do processo de fabricação (CHIAVERINI, 2005).

Quando os aços possuem outros elementos de liga, são classificados de acordo com o teor destes elementos em sua composição química, sendo divididos em aços de baixa liga (teor de liga inferior a 5%), aços de média liga (com teor de liga entre 5 e 10%) e aços de alta liga (com teor de liga acima de 10%) (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

A adição destes elementos de liga tem como efeitos: elevação da dureza, elevação da resistência mecânica, elevação da tenacidade a baixas temperaturas, melhoria da temperabilidade e usinabilidade, aumento da resistência à oxidação, à corrosão, à abrasão, e resistência em altas temperaturas (SOUZA, 1989).

O Instituto Americano de Ferro e Aço (AISI), e a Sociedade de Engenheiros automotivos (SAE), desenvolveram um sistema para designar os aços, onde são utilizados de quatro a cinco dígitos para identificar cada liga. Dessa forma, os primeiros dois números são utilizados para identificar os principais elementos presentes na liga, e os últimos dois ou três números, identificam a porcentagem de carbono (ASKELAND; WRIGHT, 2016). Na Figura 1, é possível verificar alguns exemplos de identificação dos aços carbono.



Figura 1 – Classificação geral de alguns aços em função da composição química.

Número AISI-SAE	% C	% Mn	% Si	% Ni	% Cr	Outros
1020	0,18-0,23	0,30-0,60				
1040	0,37-0,44	0,60-0,90				
1060	0,55-0,65	0,60-0,90				
1080	0,75-0,88	0,60-0,90				
1095	0,90-1,03	0,30-0,50				
1140	0,37-0,44	0,70-1,00				0,08-0,13% S
4140	0,38-0,43	0,75-1,00	0,15-0,30		0,80-1,10	0,15-0,25% Mo
4340	0,38-0,43	0,60-0,80	0,15-0,30	1,65-2,00	0,70-0,90	0,20-0,300% Mo
4620	0,17-0,22	0,45-0,65	0,15-0,30	1,65-2,00		0,20-0,30% Mo
52100	0,98-1,10	0,25-0,45	0,15-0,30		1,30-1,60	
8620	0,18-0,23	0,70-0,90	0,15-0,30	0,40-0,70	0,40-0,60	0,15-0,25% Y
9260	0,56-0,64	0,75-1,00	1,80-2,20			

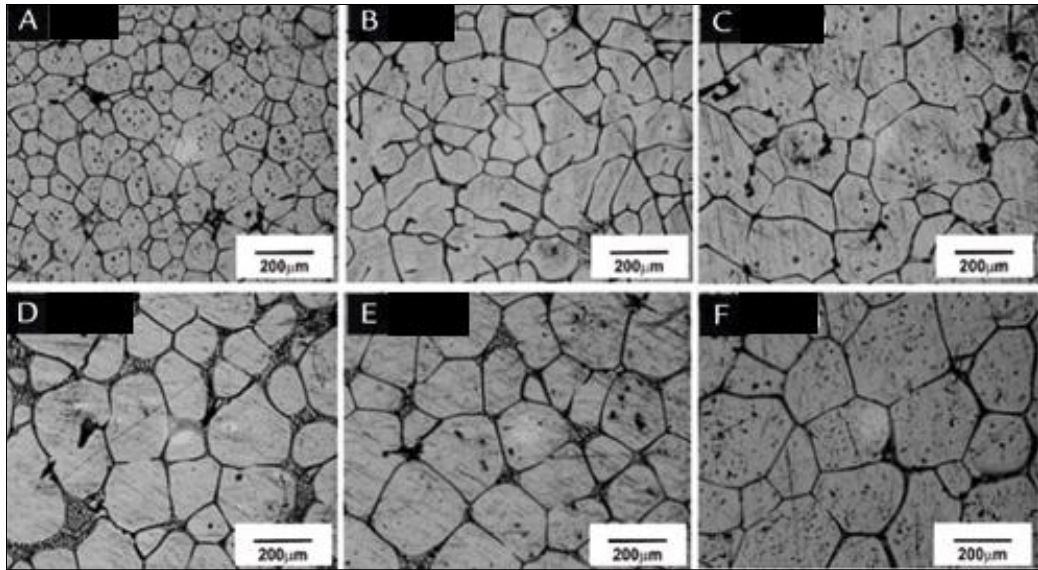
Fonte: ASKELAND E WRIGHT (2016).

Um dos grupos de aços que possuem diversas aplicações na indústria são os aços de baixo carbono. Para Callister e Rethwisch (2012), estes aços geralmente possuem um teor de carbono inferior à 0,25%, sendo considerados aços de boa ductibilidade.

Segundo Chiaverini (2005), a microestrutura de um material tem influência nas propriedades mecânicas, onde devido à quantidade de carbono presente, podem surgir fases microestruturais diferentes, que geram variações nas propriedades do material. Fatores como, taxa de resfriamento, e a forma pelo qual foi produzido também podem afetar as propriedades de um material, pois afetam sua microestrutura.

O método utilizado na fabricação afeta a microestrutura devido a alteração do tamanho dos grãos. Aços trabalhados a frio apresentam tamanhos menores de grãos, apresentando maior qualidade nas propriedades mecânicas. Já os aços forjados e laminados a quente, devido ao tempo que são expostos a altas temperaturas (chegando a temperaturas acima de 800 °C), possuem grãos maiores apresentando perdas nas propriedades mecânicas. Por fim, os aços fundidos apresentam propriedades razoáveis, mas ainda inferiores aos aços trabalhados, devido à formação de grãos diferentes, em formato colunar (CHIAVERINI, 2005). Na Figura 2 é possível verificar alguns exemplos da microestrutura de uma liga com diferentes tamanhos de grãos.

Figura 2 – Variação do tamanho de grão em metais.

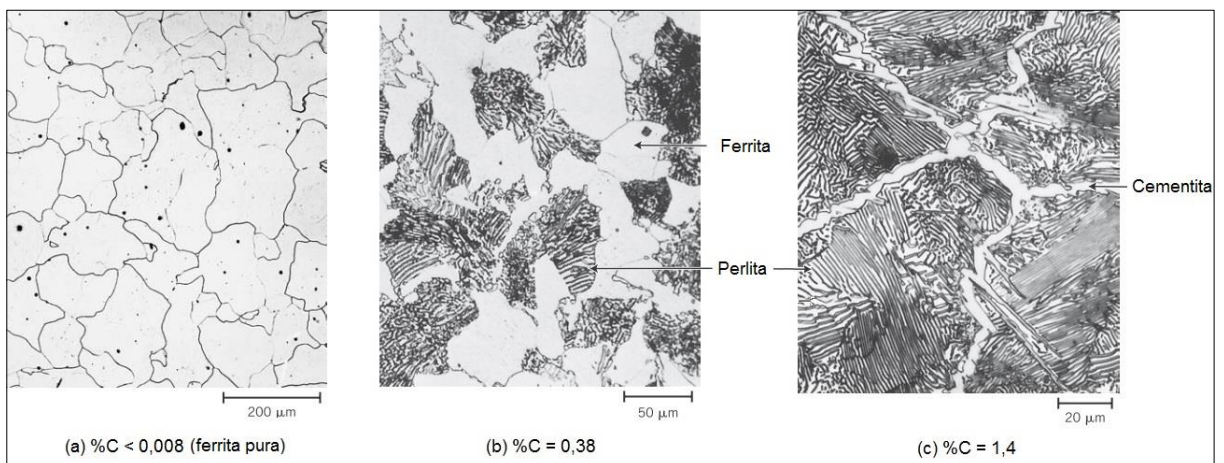


Fonte: ALVES, VIEIRA E OLIVEIRA (2012).

Aços que possuem como características grãos menores, apresentam melhores resultados quando submetidos a tração, e também apresentam melhores valores de dureza. Isso ocorre devido ao contorno dos grãos, que funcionam como uma barreira, fazendo com que evite a movimentação dos grãos, também evitando a propagação de defeitos (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Os aços de baixo carbono possuem em sua microestrutura quantidades variáveis de duas fases a ferrita e a perlita (COLPAERT, 2008). Na Figura 3 é possível observar estas fases do aço.

Figura 3 – Microestruturas típicas do aço carbono.



Fonte: ADAPTADO DE CALLISTER E RETHWISCH (2012).

A ferrita tem sua forma característica variando conforme resfriamento. Quando

realizada de forma lenta, os grãos apresentam forma equiaxial, e quando ocorre mais rapidamente, os grãos apresentam forma de agulhas. Já a perlita, que é caracterizada por apresentar maior teor de carbono que a ferrita, é uma mistura de duas fases em forma de lâminas, a ferrita e a cementita (COLPAERT, 2008).

A cementita que é encontrada dentro da perlita, é um carboneto de ferro que possui uma estrutura ortorrômbica, presente no aço-carbono até a temperatura de 727°C (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Quando o percentual de carbono em um aço é aumentado, são obtidos melhores valores de resistência a tração e dureza, devido a maior quantidade de perlita que é encontrada no aço. Entretanto, a inclusão de carbono em valores acima de 0,8%, inicia a formação da cementita pura (conforme mostrado na Figura 3c), que pode reduzir a tenacidade do material (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

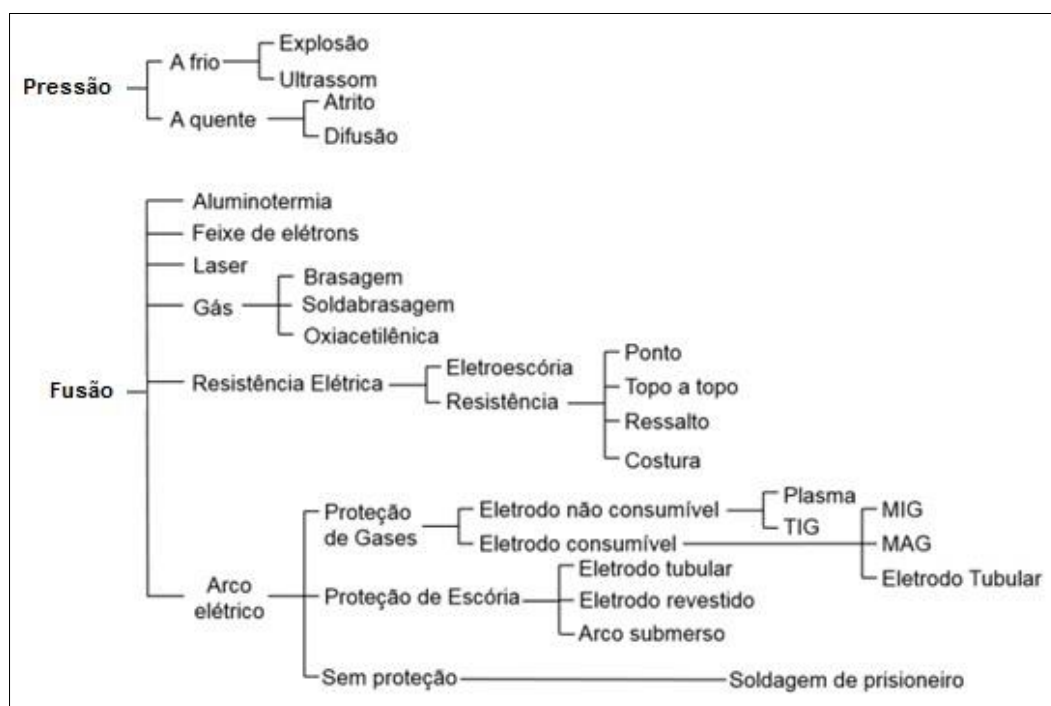
Um dos aços de baixo carbono mais utilizados no setor metal mecânico é o aço ABNT 1020. Este material alia um baixo custo com boa usinabilidade e boa conformabilidade, permitindo sua utilização em diversas aplicações, tais como: engrenagens, virabrequins, eixos de maquinários, tubos, vergalhões de construção civil, entre outros (DIAS, 2018). Os aços de baixo carbono, em geral, apresentam também uma ótima soldabilidade, facilitando a montagem e fabricação de equipamentos (MODENESI, 2011).

## **2.2 Processos de Soldagem**

Soldagem é a operação que busca realizar a união de duas ou mais peças, garantindo na junta, a continuidade das propriedades físicas e químicas (QUITES, 2002). Este processo possui vantagens, quando comparado a outros processos de união de peças, como a flexibilidade na alteração de projeto, o custo competitivo e a possibilidade de se trabalhar com a união de diversos materiais e de diversas espessuras. No entanto também apresenta desvantagens, como os defeitos eventualmente ocasionados pela utilização de elevada energia térmica, afetando as propriedades dos materiais (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Os processos de soldagem podem ser classificados através dos métodos utilizados para produzir a solda, podendo ser divididos em processos de soldagem por fusão e por pressão (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). A Figura 4 mostra uma classificação dos processos de soldagem.

Figura 4 – Classificação dos processos de soldagem.



Fonte: ADAPTADO DE WAINER, BRANDI E MELLO (1992).

Em processos de soldagem por fusão, a principal fonte de calor utilizada é o arco elétrico, que é definido por Veiga (2011) como uma fonte de calor que tem como objetivo formar a poça de fusão, aquecer o eletrodo e realizar o ciclo térmico. O arco consiste em uma descarga elétrica que é mantida por uma região ionizada que possui alta temperatura, onde é produzida energia térmica suficiente para realizar a união de materiais por meio de fusão.

Dentre os principais processos que possuem o arco elétrico como fonte de calor podemos citar os processos: MIG/MAG, arco submerso, soldagem por eletrodo revestido e TIG (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Cada processo possui suas características e aplicações. O processo TIG, por exemplo, é especialmente indicado para soldar alumínio, magnésio, aços inoxidáveis e outros aços especiais. Para alguns casos específicos pode ser utilizado também para soldagem de aços comuns, principalmente para espessuras finas e médias, devido à alta estabilidade e grau de controle do arco elétrico gerado (QUITES, 2002).

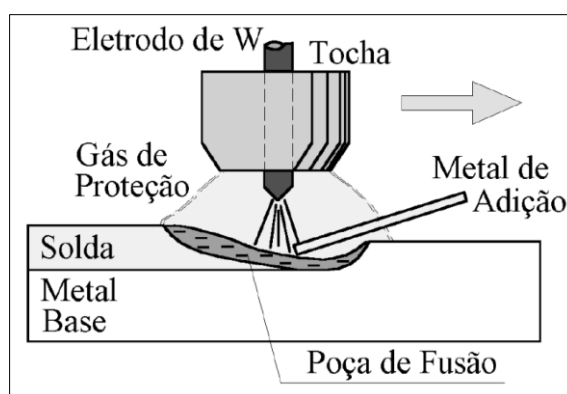
### 2.2.1 Processo de Soldagem TIG

O processo TIG (“*Tungsten Inert Gas*”), ou GTAW (“*Gas Tungsten Arc*”

*Welding*”), é um processo que foi patenteado no final dos anos 20 e começou a ser utilizado de forma comercial apenas em 1948 (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

A soldagem TIG consiste em um processo de soldagem por fusão, em que a fonte de calor utilizada é um arco elétrico formado entre um eletrodo de tungstênio, não consumível, e a peça a ser soldada, podendo também ser utilizado um material de adição. A região onde ocorre a soldagem é protegida por uma atmosfera constituída por um gás inerte, responsável por proteger o eletrodo, o arco, e a poça de fusão. Este processo pode ser realizado de forma automatizada, ou manual (VEIGA, 2011). Na Figura 5 um esquema do processo é exemplificado.

Figura 5 – Ilustração do processo de soldagem TIG.



Fonte: MARQUES, MODENESI E BRACARENSE (2009).

Para utilização deste tipo de soldagem é necessário realizar a avaliação das variáveis do processo, sendo eles: o metal base, metal de adição, preaquecimento, tipo de gás utilizado na proteção, qual o tipo de junta utilizada, a posição a ser realizada a soldagem, sendo que o metal base e de adição, junto com a utilização de preaquecimento e o gás de proteção correto, são as variáveis consideradas essenciais (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

A utilização do processo TIG é indicada para diversas aplicações, realizadas em vasos de pressão, soldas em equipamentos utilizados em aplicações criogênicas, soldagem de estruturas críticas, soldagens em tubos de aços utilizadas na indústria petrolífera, entre outras (MASCARENHAS, 2005).

Os principais consumíveis utilizados na soldagem TIG são os gases de proteção, os materiais de adição (em forma de varetas) e os eletrodos (de tungstênio), que embora esses eletrodos não sejam considerados consumíveis, possuem um certo desgaste durante a realização da soldagem, fazendo com que seja necessário o

recondicionamento do eletrodo ou a sua troca (MARQUES; MODENESI; BRACAENSE, 2009).

A soldagem TIG possui vantagens como: baixa produção de escórias e fumos, boa visibilidade da poça de fusão, ótimo controle da energia que é transferida e, a geração de soldas onde não é necessária a realização de limpeza ou acabamento. Entre as desvantagens do processo estão: baixo rendimento e baixa produtividade, gases de proteção mais caros, riscos de inclusão de tungstênio, grande sensibilidade a correntes de ar, e exigência de experiência do soldador quando realizada de forma manual (MARQUES; MODENESI; BRACAENSE, 2009).

Dos diversos gases inertes que poderiam ser utilizados para o processo TIG, somente o argônio e o hélio são utilizados de forma comercial, sendo também muito mais baratos que outras opções de gases inertes (QUITES, 2002).

O hélio permite uma tensão de arco de valores que chegam quase ao dobro, se comparados com a do argônio, em situações de corrente e comprimento de arcos semelhantes, mas por ser um gás mais leve do que o ar, tem tendência a subir de maneira mais rápida, causando uma certa turbulência, gerando uma mistura entre o arco e o ar da atmosfera, fazendo com que o arco do hélio seja mais instável e tenha uma ignição difícil. Outro ponto negativo do hélio é o preço que pode chegar ao triplo se comparado ao valor do argônio, e a vazão utilizada para o hélio também é maior que o argônio, resultando em um considerável aumento de custo no processo (QUITES, 2002).

O argônio é um gás com peso específico maior que o ar atmosférico, isso faz com que este peso o faça recobrir uma área maior de solda, pois tem dificuldade de dispersar como ocorre com o hélio. Juntando o fator de que o arco do hélio é mais instável e a utilização seja mais cara, se comparada ao argônio, é preferível priorizar a utilização do argônio, ou também, a utilização do argônio em mistura com o hélio (QUITES, 2002).

O processo de soldagem TIG é geralmente realizado de forma manual, devido à necessidade de adição de metal de adição (em forma de varetas). No entanto, permite sua automatização através de mecanismos acopláveis de alimentação de metal de adição (em forma de bobinas de arames). Esta variação é chamada de TIG alimentada (AWS, 1991).

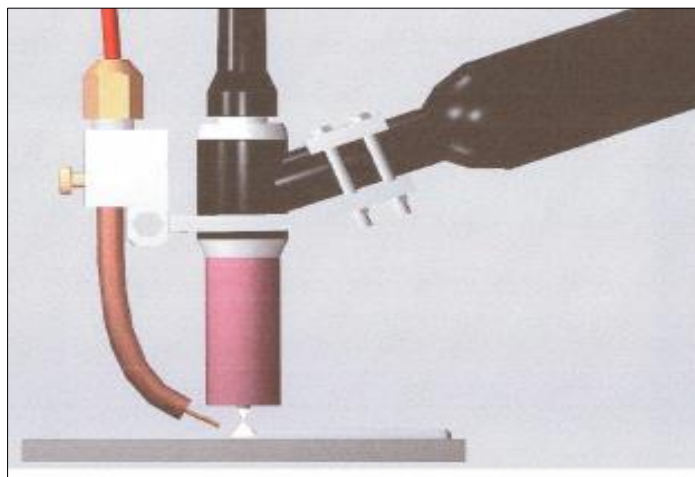
Além da alimentação do material de adição, também é possível automatizar o deslocamento da tocha, onde o movimento e a velocidade de soldagem são

controlados por um dispositivo automatizado, dispensando o uso das duas mãos do responsável pela soldagem (DELGADO, 2000).

### 2.2.1.1 Soldagem TIG alimentada

O processo TIG alimentado é uma variação da soldagem TIG, onde a adição de metal é realizada de forma automática, utilizando um equipamento denominado sistema tracionador de arame. Este equipamento é constituído por um eixo para suportar a bobina e um sistema semelhante a um freio, para que a bobina não continue girando por inércia quando o sistema que traciona o arame parar. O tracionador consiste em um conjunto de no mínimo 2 roletes, que possuem ranhuras dimensionadas de acordo com o diâmetro do arame que vai ser tracionado. Para a rotação destes roletes, são utilizados um motor e um controle que permita o ajuste de velocidade, podendo o controle ser desde um potenciômetro até um microcontrolador. (RIBEIRO, 2012). Na Figura 6 é possível observar um exemplo onde ocorre a alimentação automática do arame na poça de fusão.

Figura 6 – Exemplo de processo TIG alimentado.



Fonte: DELGADO (2000).

De acordo com Mascarenhas (2005), com a utilização da soldagem TIG alimentado, é possível obter uma maior produção, devido a maior quantidade de material depositado por tempo, e ainda obter uma maior regularidade na taxa de fusão do arame, fazendo com que seja possível um maior controle dos parâmetros de soldagem. Um outro fator importante é que com o TIG alimentado é possível remover

variações ocorridas pela falta de experiência do soldador, o que garante repetibilidade e confiabilidade nos resultados.

### 2.2.1.2 Parâmetros de Soldagem

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2009), podem ser consideradas como principais variáveis na soldagem TIG:

- a) o comprimento do arco,
- b) a corrente de soldagem,
- c) a velocidade de soldagem,
- d) a vazão de gás de proteção, e
- e) o sentido de soldagem (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

O comprimento do arco é definido como a distância entre a ponta do eletrodo e a peça soldada. Para uma dada corrente em conjunto com o gás de proteção, é possível aumentar a tensão da soldagem, aumentando este comprimento. Também pode ser tomado como base a definição que, quanto maior este comprimento, mais raso e largo é o cordão de solda. Quando este comprimento é aumentado em soldagens com metal de adição, o reforço do cordão também tende a diminuir (MARQUES; MODENESI; BRACAENSE, 2009).

A corrente de soldagem exerce grande influência na taxa de fusão, na penetração, e no tamanho do reforço do cordão. O aumento desta, gera um aumento na taxa de deposição de material, e uma maior penetração do cordão de solda (FORTES, 2005).

As dimensões do cordão, junto com as do reforço, também sofrem alterações quando ocorrem variações na velocidade de soldagem. De maneira geral, se aumentado a velocidade de soldagem, é possível obter uma melhor produtividade e eficiência da produção, e conseqüentemente, é alcançada uma redução de custo. Porém, altas velocidades de soldagem acarretam descontinuidades no processo, como por exemplo, mordeduras, e falta de penetração e fusão (MARQUES; MODENESI; BRACAENSE, 2009).

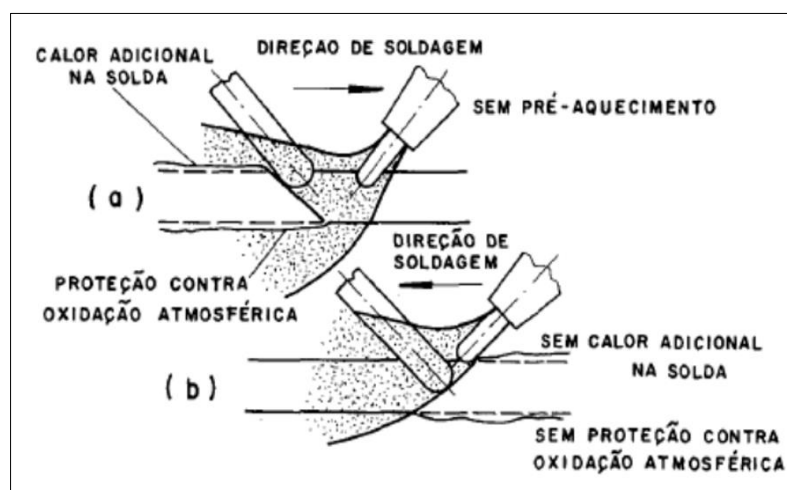
A vazão do gás de proteção exerce influência direta na qualidade de um cordão de solda. Onde a baixa vazão gera proteção insuficiente, levando o cordão de solda a oxidar e formar porosidade. Já a vazão elevada, embora não traga problemas, pode encarecer o processo. Entretanto, em casos em que a vazão é extremamente elevada,



pode ocasionar turbulência no fluxo de gás, fazendo com que apresente efeitos semelhantes a baixa vazão (MARQUES; MODENESI; BRACAENSE, 2009).

Quanto ao sentido de soldagem, conforme Wainer, Brandi e Mello (1992), existem dois modos: a direita (*backhand*) e à esquerda (*forehand*), conforme Figura 7. Na soldagem a direita (Figura 7a), a chama é direcionada para o cordão de solda, e a soldagem é realizada da esquerda para direita. Já na soldagem a esquerda (Figura 7b), a chama é direcionada na frente do cordão, e a soldagem é realizada da direita para esquerda.

Figura 7 – Sentidos de soldagem: a) soldagem à direita; b) soldagem à esquerda.



Fonte: WAINER, BRANDI E MELLO (1992).

Cada um dos sentidos utilizados possui suas aplicações e indicações, onde a soldagem a esquerda é mais indicada para ser utilizada em chapas com espessuras de até aproximadamente 3 mm, e a soldagem à direita, indicada para espessuras maiores. Na soldagem à direita, é possível obter uma maior velocidade de soldagem, devido à maior energia de soldagem, pois neste sentido, a parte mais quente da chama está mais afastada do local a ser fundido (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

A definição e utilização dos parâmetros de soldagem combinados define as características finais da junta soldada. Como mencionado anteriormente, nos processos de soldagem que utilizam o arco elétrico como fonte de calor, acontece o aquecimento e fusão do metal de base com o metal de adição, que posteriormente se solidificam e formam o cordão de solda. Com esta operação além do surgimento de tensões internas também ocorrem transformações microestruturais, tanto na zona fundida quanto nas zonas próximas que são termicamente afetadas (SANTOS, 2009).

Estas variações microestruturais, que definem as propriedades mecânicas da junta, compreendem a metalurgia da soldagem e serão descritas a seguir.

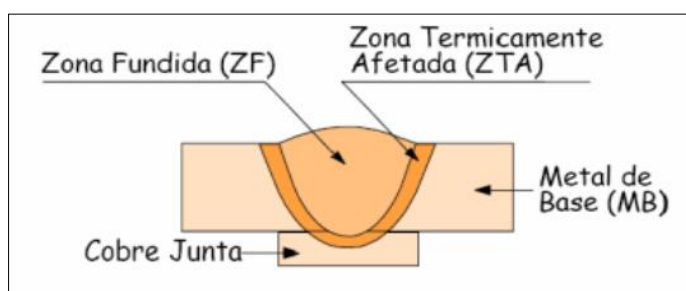
### 2.3 Metalurgia de soldagem

Os processos de soldagem utilizam o calor como fonte de energia, onde é necessário aplicar intensidade suficiente para que se realize a poça de fusão e se garanta a execução da junta soldada. Embora seja um elemento essencial para a soldagem, este calor também representa um potencial fonte de problemas, devido à influência que exerce de forma direta nas transformações metalúrgicas, e nos fenômenos mecânicos que ocorrem na soldagem (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Os metais se solidificam em forma de cristal, que são compostos por átomos ou moléculas, formando uma rede chamada de rede cristalina. Durante a absorção de energia térmica, os átomos ou moléculas que constituem essa rede cristalina, se agitam, o que faz com que se afastem uns dos outros, dessa forma a rede se desfaz e o cristal se funde. Se essa rede for composta de apenas um tipo de átomo, como no ferro puro, as condições serão as mesmas em qualquer ponto da rede, onde o cristal irá fundir-se (FORTES, 2005).

Após a fusão realizada na soldagem, e a solidificação, são formadas algumas áreas, que constituem a junta soldada. Segundo Abreu Filho (2008) todas as regiões, onde ocorreram alterações consideráveis com relação a suas condições iniciais, são consideradas constituintes da junta solda. Então a junta soldada consiste não apenas na poça de fusão, mas também em toda região próxima à região de soldagem. Na Figura 8 é indicado de forma esquemática as partes constituintes de uma junta soldada.

Figura 8 – Regiões da junta soldada.



Fonte: MARQUES, MODENESI E BRACARENSE (2009).

A primeira zona, nomeada como zona fundida (ZF), é constituída pela diluição entre o metal de adição, quando utilizado, e o metal de base. Em processos de soldagem, a zona fundida pode ser formada sob diversas condições, fazendo com que características macro e microestruturais do cordão de solda se alterem, e fazendo com que seja uma área com um importante efeito exercido sobre as propriedades mecânicas e o comportamento da junta soldada (MARQUES; MODENESI; BRACANNESE, 2009).

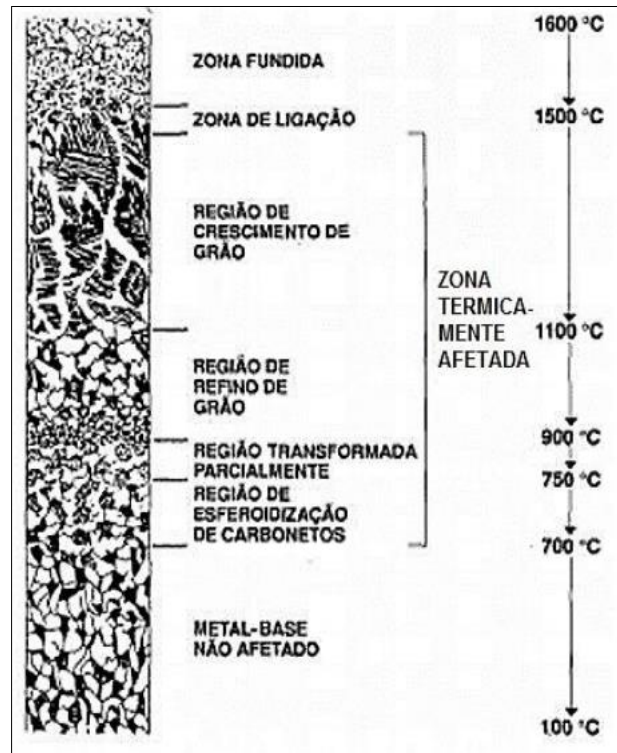
A segunda zona é a do metal de base (MB), que é a região onde não ocorre nenhum tipo de alteração em suas propriedades mecânicas, ou seja, é a região que não foi influenciada pelo processo de soldagem (ABREU FILHO, 2008).

A terceira zona, é a zona termicamente afetada (ZTA), que é a região próxima à zona fundida, e que devido ao ciclo térmico gerado durante a soldagem sofre alterações microestruturais. Esta região pode variar conforme a alteração do metal de base, o procedimento para execução da soldagem e o processo de soldagem utilizado. Os efeitos do ciclo térmico poderão ser os mais variados, dependendo do material utilizado na soldagem. Para materiais que não sofrem transformações no estado sólido, conhecidos como não transformáveis, a mudança mais influente é a alteração dos tamanhos de grão, já em materiais transformáveis, podem ocorrer mudanças estruturais mais complexas (MARQUES; MODENESI; BRACAENSE, 2009).

### 2.3.1 Características da Zona Termicamente Afetada (ZTA)

A ZTA de uma junta soldada pode ser constituída por quatro regiões que apresentam características metalúrgicas e propriedades mecânicas distintas entre si, são elas: região de crescimento de grãos; região de refino de grãos; região de transformação parcial de fases; e região de esferoidização (LIMA JÚNIOR, 2013). Na Figura 9 estão representadas estas variações microestruturais.

Figura 9 – Microestrutura típica da ZTA em aços.



Fonte: WAINER, BRANDI, MELLO (1992).

Segundo Modenesi (2011), as principais características de cada região podem ser descritas como:

- Região de crescimento de grão: Também conhecida como região de granulação grosseira, é a região que é atingida pelas maiores temperaturas, fazendo com que ocorra um ciclo de aquecimento e resfriamento rápido, o que gera a mudança microestrutural tornando a granulação grosseira;
- Região de Normalização (refino de grão): Fica localizada em uma região mais afastada da linha de fusão que a região de granulação grosseira, onde durante a soldagem é submetida a uma faixa de temperatura entre a 900 a 1.100 °C. Sua estrutura possui uma granulação fina, similar à dos aços normalizados. Esta região não é considerada crítica para a maioria dos aços, com exceção dos aços temperados e revenidos, onde esta região apresenta menor resistência mecânica que o metal de base;
- Região Intercrítica (transformação de fases): Região em que o material é

aquecido, a uma faixa de temperatura entre 900 a 750°C. A microestrutura encontrada nesta região pode variar dependendo da velocidade de resfriamento, na qual a austenita poderá se decompor em forma de perlita, bainita ou martensita maclada;

- Região Subcrítica (esferoidização): Esta região possui pequenas alterações microestruturais, que se resumem a uma pequena esferoidização da perlita. Essa esferoidização pode diminuir a resistência mecânica de forma quase imperceptível, se comparada com o metal de base.

A extensão da ZTA depende de alguns fatores como: geometria da junta, propriedades térmicas do material, espessura da peça, temperatura de preaquecimento e, principalmente, o aporte térmico (PINTO, 2006).

### 2.3.2 Aporte térmico

É considerado como aporte térmico ou energia específica de soldagem, a quantidade de calor aplicada em um material, por uma unidade de comprimento linear, onde este comprimento linear é o passe de soldagem (QUITES, 2008).

Segundo Lima Júnior (2013), quanto maior a energia de soldagem aplicada na peça durante o processo, maior será o calor transferido, resultando numa maior poça de fusão, com uma zona termicamente afetada mais larga. Já no inverso, a utilização de baixos valores pode gerar falhas de penetração, e elevadas velocidades de resfriamento, que podem ser prejudiciais em algumas ocasiões.

Na soldagem a arco elétrico, o cálculo do aporte térmico pode ser expresso pela Equação 1:

$$E = U \cdot I / v \quad (1)$$

Onde:

E – Aporte térmico (J/mm)

v – Velocidade linear de soldagem (mm/s)

I – Corrente elétrica em (A)

U – Tensão do arco (V)

No entanto, apenas uma parte deste aporte térmico é efetivamente transferida para o metal de base. Essa parcela que realmente é transferida, é chamada de energia absorvida (QUITES, 2008). Para prever o valor de energia absorvida, é utilizada a Equação 2.

$$E_{ab} = \eta \cdot E \quad (2)$$

Onde:

$E_{ab}$  – Energia absorvida (J/mm)

$\eta$  – Eficiência térmica

E – Aporte térmico (J/mm)

Na Tabela 1 é possível verificar alguns valores de eficiência térmica para vários processos.

Tabela 1 – Valores típicos de eficiência térmica.

Processo	Metal de base / gás de proteção	Eficiência térmica	
		Faixa	Média
Eletrodo revestido	Aço	0,66-0,85	0,80
MIG	Aço / Argônio	0,66-0,72	0,70
MAG	Aço / CO <sub>2</sub>	0,75-0,93	0,85
TIG	Aço / Argônio	0,25-0,75	0,40
TIG	Alumínio / Argônio	0,22-0,46	0,40
TIG	Alumínio / Hélio	0,55-0,80	0,60
Arco submerso	Aço	0,91-0,99	0,95

Fonte: ADAPTADO DE QUITES (2008).

A alteração da energia absorvida e de outros fatores, como o preaquecimento do material, a geometria da junta e a natureza do metal de base, influenciam no tamanho e a forma do passe de soldagem, como também afetam o resfriamento e o aquecimento das zonas próximas da soldagem (QUITES, 2008).

## 2.4 Preaquecimento na soldagem

A temperatura de preaquecimento pode ser definida como a temperatura em que toda peça, ou a região a ser soldada, está submetida antes de ser realizado o processo de soldagem (GODOY, 2008).

Os metais possuem boa condutividade térmica, e o calor que é gerado na soldagem devido ao arco elétrico na poça de fusão é rapidamente transferido para o metal de base. Devido a esta diferença de temperatura, entre o metal de base e a poça de fusão, pode ser gerado um resfriamento rápido. Este resfriamento rápido pode trazer efeitos prejudiciais para as propriedades mecânicas da junta soldada. Para os aços carbonos, a alta taxa de resfriamento pode formar fases duras e com baixa tenacidade, podendo também gerar trincas durante o resfriamento (FORTES, 2005).

A velocidade de resfriamento é importante na formação da microestrutura da solda de materiais que sofrem transformações em suas microestruturas, particularmente os aços (GODOY, 2008). O uso de preaquecimento permite alterar o ciclo térmico do material fundido, buscando a redução da taxa de resfriamento. Sua utilização antes do processo de soldagem também pode reduzir tensões residuais, promover a remoção do hidrogênio e alterar a quantidade de microconstituintes duros na microestrutura (MARTINS et al., 2011). A influência na taxa de resfriamento se dá devido ao aumento da temperatura do material em contato com a zona fundida, de modo que o gradiente de temperatura, ou seja, a diferença entre as temperaturas entre a solda e o material não fundido, seja reduzido. Este aquecimento nos materiais próximos a zona fundida tem como resultado o resfriamento mais lento de toda a peça (FORTES, 2005).

Segundo Reis Sobrinho et al. (2007), quanto maior a temperatura de preaquecimento, menor será o gradiente térmico da região da solda, gerando um fluxo mais lento durante o resfriamento e também o aumento na largura da ZTA.

Segundo Qites (2008), o preaquecimento também afeta analogamente o aumento da energia absorvida, pois como a soldagem já inicia com uma energia calorífica presente no material de base por antecipação, o calor de soldagem tende a se difundir com maior dificuldade.

A técnica de preaquecimento apresenta boa eficiência quando os corpos de provas soldados não são submetidos a tratamentos térmicos e apresentarem baixa

ductilidade e alta dureza (FORTES, 2005).

Em diferentes literaturas, é possível encontrar definições de temperatura para o preaquecimento e uma das formas de determinar a condição ideal é baseada na quantidade de carbono equivalente da liga (YURIOKA, 2004). O carbono equivalente é calculado com base nos elementos de liga presentes no material, conforme mostrado na Equação (3), definida pelo IIW (*International Institute of Welding*):

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} \quad (3)$$

Basicamente, quanto maior for o carbono equivalente, maior será a temperatura de preaquecimento necessária (GODOY, 2008). Um exemplo é o indicado por Fortes (2005), na Tabela 2, onde são identificadas temperaturas levando em consideração apenas o carbono equivalente do material.

Tabela 2 – Temperatura de preaquecimento recomendada.

Carbono Equivalente - Ceq (%)	Temperatura de preaquecimento recomendada
<0,30	Opcional
0,31 - 0,45	100°C - 200°C
0,45 - 0,60	200°C - 250°C
>0,60	250°C - 300°C

Fonte: ADAPTADO DE FORTES (2005).

Um outro exemplo de faixas de temperaturas recomendadas é indicado por Modenesi (2011), representado na Tabela 3, onde são indicadas as temperaturas de preaquecimento em relação ao tipo do aço a ser soldado.

Tabela 3 – Temperatura de preaquecimento recomendada por tipo de aço.

Tipo de aço	Temperatura (°C)
Baixo carbono (%C<0,30)	90°C - 150°C
Médio carbono (0,30 < %C < 0,55)	150°C - 260°C
Alto carbono (0,50 < %C < 0,83)	260°C - 430°C
Aços C-Mo (0,10 <%C < 0,30)	250°C - 300°C
Aços C-Mo (0,30 <%C < 0,35)	260°C - 430°C
Aços Ni (<3,5%Ni)	90°C - 370°C
Aços Cr	150°C - 260°C
Aços Cr-Ni	90°C - 90°C

Fonte: ADAPTADO DE MODENESI (2011).

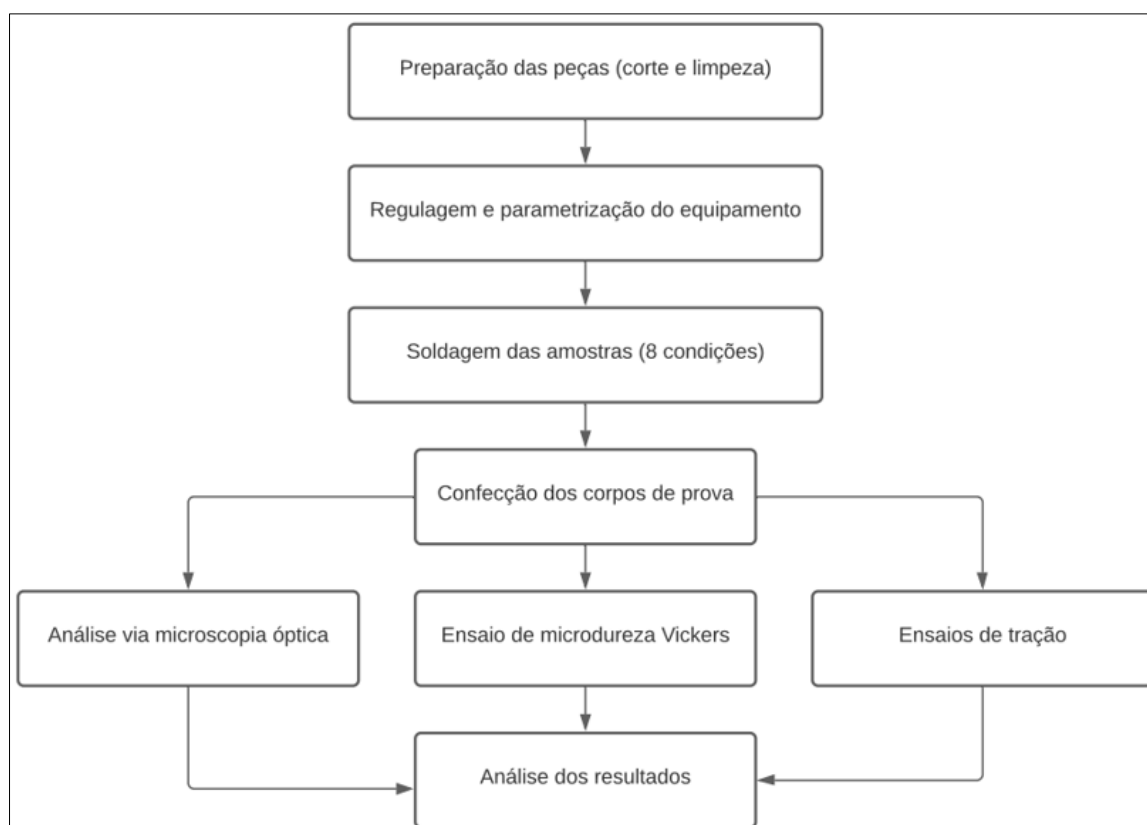


Na Tabela 3 é possível verificar a indicação de uma faixa de temperatura de preaquecimento de 90°C - 150°C para aços baixo carbono, diferente da Tabela 2 onde segundo Fortes (2005) para estes aços o uso de preaquecimento seria opcional, ou seja, não é claro o efeito real de sua aplicação e qual a temperatura ideal para que se reduza a ocorrência de defeitos gerados pelo ciclo térmico de soldagem.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento deste trabalho foi realizado de forma experimental, objetivando a avaliação da influência do preaquecimento na microestrutura e propriedades mecânicas do aço ABNT 1020. Ao longo dos experimentos também foi abordado o parâmetro “sentido de soldagem”, onde foram avaliados seus efeitos nas características da junta soldada. A sequência de procedimentos realizados está descrita no fluxograma representado na Figura 10. Todas as etapas e procedimentos foram realizados utilizando as instalações dos laboratórios do IFSC – Campus Jaraguá do Sul/Rau.

Figura 10 – Metodologia experimental utilizada.



Fonte: O AUTOR (2021).

#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1 Metal Base

O metal de base utilizado para realização do experimento foi o aço ABNT 1020,

um material com uma extensa gama de utilizações nas indústrias.

Na Tabela 4 é demonstrada sua composição conforme a norma NBR 87/2000.

Tabela 4 – Composição química do aço ABNT 1020.

C	Mn	P máx.	S máx.
0,18-0,23	0,30-0,60	0,040	0,050

Fonte: ABNT, NBR 87/2000.

Para os experimentos foram utilizadas chapas de 4,762 mm (3/16") de espessura. Os corpos de prova para soldagem foram dimensionados em 200 x 200 mm.

### 3.1.2 Consumíveis

O metal adicionado na soldagem foi o arame ER70S-6 (conforme especificado pela norma AWS A5.18-2001), com diâmetro de 1,2 mm. Aplicou-se o argônio como gás de proteção e utilizou-se, na tocha de soldagem, um eletrodo de tungstênio (2%Th) com 3,2 mm de diâmetro.

## 3.2 Metodologia

### 3.2.1 Regulagem e definição dos parâmetros de soldagem

Para o início do procedimento, foram realizados pré-testes de soldagem alterando diversos parâmetros e condições de soldagem, e variando a distância entre o eletrodo e a peça (comprimento do arco), a vazão do gás de proteção, a velocidade de deslocamento da tocha, a velocidade da alimentação do arame e a corrente de soldagem, visando a obtenção de penetração total da peça. Em seguida, foram estabelecidos os parâmetros da máquina para realização dos experimentos, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros da máquina.

Corrente (A)	Velocidade de deslocamento da tocha (mm/s)	Velocidade de alimentação do arame (m/min)	Tensão (V)	Aporte térmico (J/mm)	Energia absorvida (J/mm)
260	6,5	1,6	17	680	272

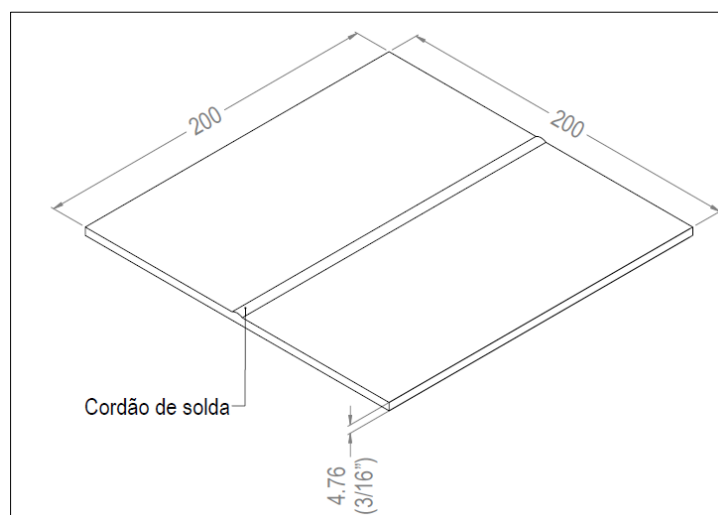
Fonte: O AUTOR (2021).

O comprimento de arco utilizado foi de 3mm e o ângulo da tocha utilizado foi de 70°.

### 3.2.2 Soldagem das amostras

Foram produzidos corpos de provas em 8 condições (conforme mostrado Tabela 5), variando-se a temperatura de preaquecimento e o sentido de soldagem. A confecção dos cordões de solda foi realizada na superfície dos corpos de prova, de modo centralizado e ao longo de todo o comprimento da chapa buscando a penetração da peça, conforme pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 – Corpo de prova soldado.



Fonte: O AUTOR (2021).

As temperaturas utilizadas para realização dos testes foram baseadas na Tabela 2 que utiliza o valor de carbono equivalente para indicar a aplicação de temperaturas de preaquecimento. Foram definidas 3 temperaturas, sendo a primeira de 95°C, para ser o valor correspondente à menor faixa de carbono equivalente da tabela (<0,30), a segunda de 150°C, onde foi utilizada como referência o valor médio

de temperatura da segunda faixa de carbono equivalente (0,31 – 0,45), e a terceira temperatura de 250°C, onde foi utilizado o valor máximo da terceira faixa (0,45 – 0,60). A divisão das amostras está representada na Tabela 6.

Tabela 6 – Corpos de prova.

CP	Preaquecimento	Sentido de Soldagem
1	-	à direita
2		à esquerda
3	95°C	à direita
4		à esquerda
5	150°C	à direita
6		à esquerda
7	250°C	à direita
8		à esquerda

Fonte: O AUTOR (2021).

Os preaquecimentos foram realizados em um forno tipo mufla. Cada corpo de prova foi aquecido até a temperatura de preaquecimento definida e mantido neste patamar por 20 minutos para que houvesse a garantia de homogeneidade em todo o corpo de prova.

Após o preaquecimento, os corpos de provas foram levados do forno até a bancada de solda, onde a tocha estava posicionada corretamente, e os parâmetros da máquina de soldagem definidos e regulados.

As soldagens foram realizadas utilizando um equipamento automatizado de soldagem TIG, desenvolvido no laboratório de soldagem do IFSC – Campus Jaraguá do Sul/Rau, conforme Figura 12, onde a utilização deste equipamento permite a soldagem totalmente automatizada eliminando variações de processo geradas pelo soldador, e também permitindo a estabilidade nos parâmetros utilizados na soldagem.

Figura 12 – Equipamento de soldagem.



Fonte: O AUTOR (2021).

### 3.2.3 Microscopia óptica

Para a análise microscópica, as amostras foram obtidas via procedimento metalográfico padrão. Primeiramente foram extraídas amostras com o uso de cortadora metalográfica e posteriormente foi realizado o embutimento em resina (a frio). As amostras foram cortadas de maneira que o cordão de solda ficasse no centro da amostra, para que fosse possível avaliar todas as zonas constituintes da junta soldada.

Em seguida as amostras foram lixadas e polidas. Para o lixamento foram utilizadas 6 lixas com granulometrias variadas, iniciando com a lixa de granulometria 80, seguindo para, 180, 320, 600, 800 e pôr fim a lixa 1200. Para o polimento utilizou-se alumina (1  $\mu\text{m}$ ).

Após o polimento, foi realizado o ataque químico, para revelar a microestrutura das peças. Para este ataque foi utilizada uma solução de ácido nítrico (Nital 3%), sendo as peças mergulhadas nesta solução por aproximadamente 10 segundos.

Com o ataque químico realizado, as peças foram analisadas em um microscópio óptico com câmera acoplada, (conforme mostrado na Figura 13), visando, principalmente, a análise das regiões microestruturais da ZTA.

Figura 13 – Microscópio óptico com câmera acoplada.



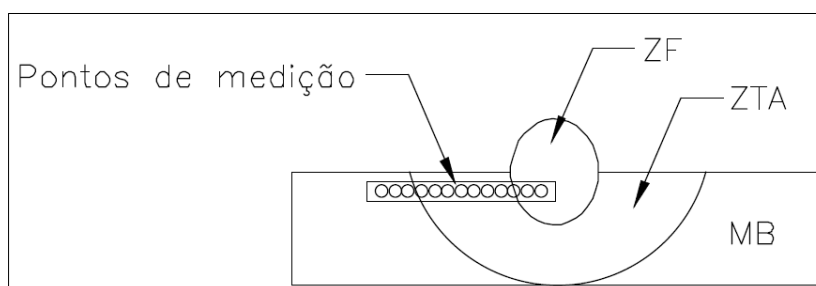
Fonte: O AUTOR (2021).

Nas micrografias obtidas também foram realizadas as medições de tamanho de grãos. O procedimento adotado para o cálculo do tamanho de grão foi baseado na norma ASTM E112-96. Trata-se, basicamente, da contagem de contornos de grãos interseccionados por uma linha reta com comprimento conhecido. Para cada amostra foram feitas dez contagens (retas sobrepostas). Os resultados de tamanho médio de grão para todas as condições foram calculados através da média aritmética e desvio padrão.

#### 3.2.4 Ensaio de microdureza Vickers

Os ensaios foram realizados nas mesmas amostras submetidas a microscopia (procedimento metalográfico padrão) de modo a se obter um perfil de microdureza. Os pontos de medição abrangeram o metal base, a ZTA e a zona fundida. A distância mantida entre cada medição foi de 0,5 mm, também foi mantida a distância de 2mm da superfície superior da peça, foram realizadas um total de 13 medições para cada amostra. Com esse procedimento de medição foi possível determinar como a dureza varia ao longo da junta soldada nas diversas condições de soldagem utilizadas. A representação das medições pode ser observada na Figura 14.

Figura 14 – Pontos de medição de dureza.



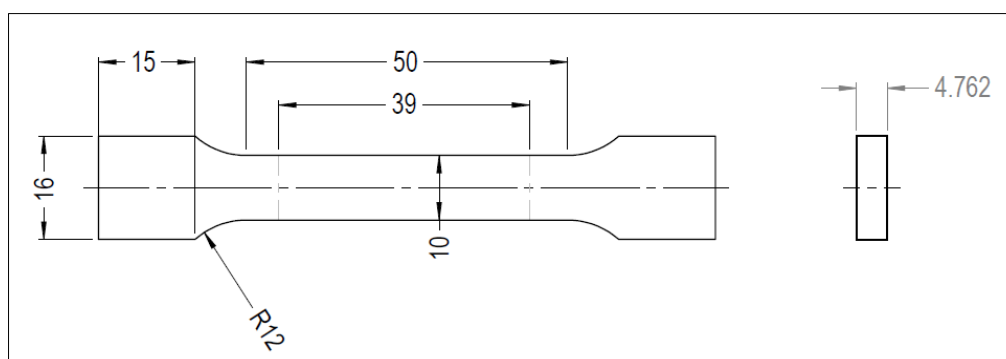
Fonte: O AUTOR (2021).

As medições da microdureza Vickers foram realizadas utilizando-se um durômetro da marca *Future Tech*, modelo FM800, com penetrador de diamante. As condições utilizadas para as medições foram: aplicação de uma carga de 500 gf e tempo de aplicação da carga de 10 segundos.

### 3.2.5 Ensaio de resistência à tração

As amostras para ensaios de tração foram cortadas com dimensões calculadas segundo a norma ABNT NBR ISO 6892-1:2013. Estas dimensões podem ser verificadas na Figura 15.

Figura 15 – Dimensional do corpo de prova.

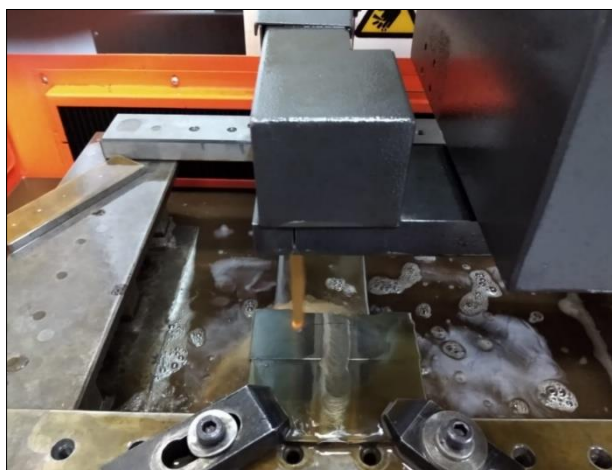


Fonte: O AUTOR (2021).

As amostras para tração foram cortadas utilizando-se uma máquina de eletro erosão a fio, marca AgieCharmilles modelo FW 1U, encontrada no laboratório de usinagem do IFSC/Rau (Figura 16).



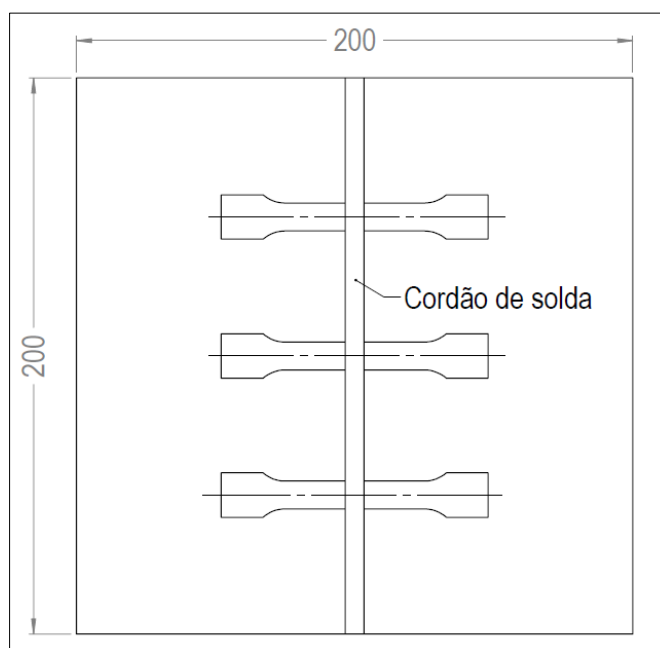
Figura 16 – Máquina de eletroerosão em funcionamento.



Fonte: O AUTOR (2021).

Foram retirados 3 CP's para cada condição, e os cortes foram realizados de forma que a região soldada ficasse no centro do corpo útil, na Figura 17 é possível verificar a distribuição dos corpos de prova nas chapas soldadas.

Figura 17 – Corpo de prova cortado.



Fonte: O AUTOR (2021).

Na Figura 18 é possível ver um dos corpos de prova confeccionados.

Figura 18 – Corpo de prova cortado.



Fonte: O AUTOR (2021).

Com os corpos de prova separados foram realizados os ensaios de tração, seguindo a norma NBR ISO 6892, utilizando a máquina de ensaios universal da marca EMIC, modelo DL-10000 (Figura 19). Com este ensaio foram obtidos os valores de resistência máxima e alongamento.

Figura 19 – Máquina de ensaios de tração.



Fonte: O AUTOR (2021).

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

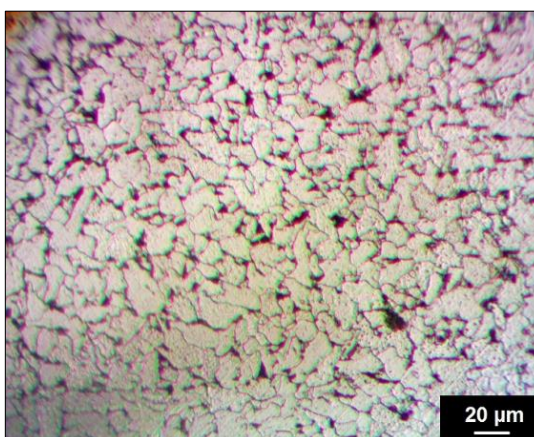
Conforme mencionado no tópico 3.1.1, o metal base utilizado para realização dos experimentos foi o aço ABNT 1020. Primeiramente, baseando-se na equação 3, o percentual de carbono equivalente calculado para o material foi de  $0,28 \pm 0,05\%$ , indicando que a execução da técnica de preaquecimento é opcional e sem temperatura específica preestabelecida (conforme indicado na Tabela 2). Sendo assim, justifica-se o estudo da aplicação da técnica de preaquecimento em temperaturas distintas para permitir estipular e avaliar seus reais efeitos.

As análises referentes à influência do preaquecimento, assim como do sentido de soldagem nas características das juntas soldadas estão descritas a seguir.

### 4.1 Análise microestrutural ao longo das juntas soldadas

Primeiramente, na Figura 20 está apresentada a microestrutura do metal base para permitir as análises de modo comparativo.

Figura 20 – Microestrutura do metal base (Ampliação 400x).



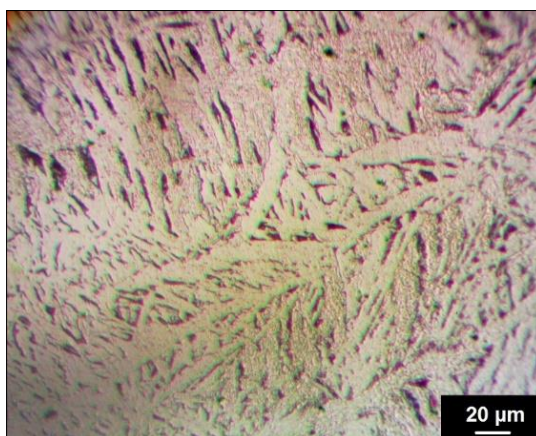
Fonte: O AUTOR (2021).

O material apresenta a microestrutura padrão do aço ABNT 1020, onde é possível verificar a presença de duas fases, a ferrita (grãos claros) e a perlita (grãos escuros). O valor medido para o tamanho médio de grãos no metal base foi de  $8,02 \mu\text{m}$  ( $DP = 0,44 \mu\text{m}$ ).

As zonas fundidas dos corpos de prova mantiveram-se iguais para todas as condições de soldagem (com e sem preaquecimento, e em ambos os sentidos de

soldagem). Na Figura 21 está mostrada uma micrografia representativa desta região. Por se tratar de material fundido (grãos dendríticos) e com composição química modificada, esta região não sofre efeito do preaquecimento e, portanto, não foi alvo do presente estudo.

Figura 21 – Microestrutura da zona fundida (Ampliação 400x).



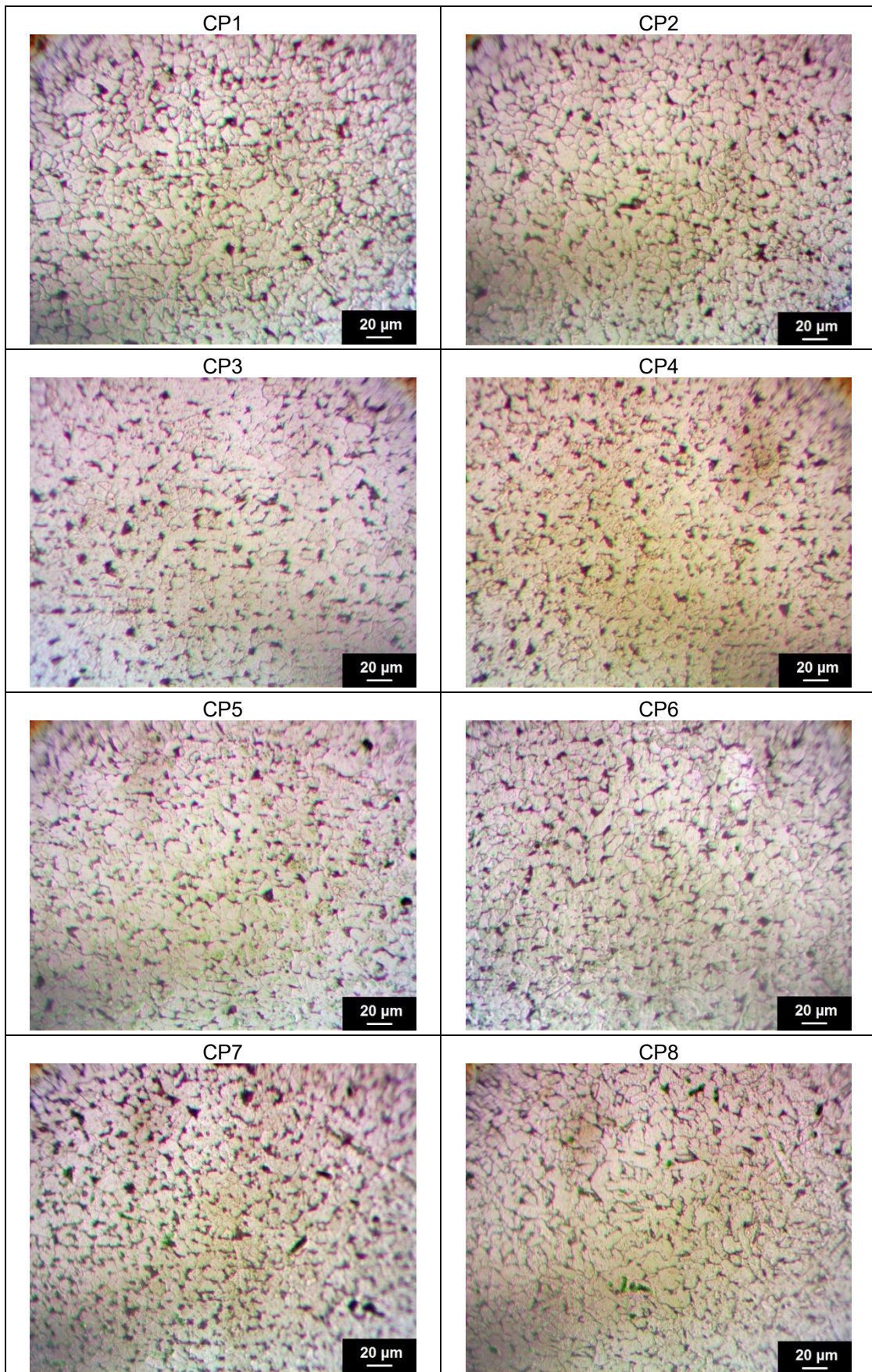
Fonte: O AUTOR (2021).

Na ZTA, região que apresenta maior complexidade em uma junta soldada, foi possível observar duas áreas distintas em todos os corpos de prova. A primeira região sofreu refino de grão com relação ao metal base soldado, mantendo a sua morfologia. Já a segunda região, que fica mais próxima da zona fundida, apresenta uma granulação mais grosseira quando comparada a primeira região. A seguir, estas regiões estão tratadas separadamente.

#### 4.1.1 ZTA com refino de grãos

A Figura 22 mostra a microestrutura obtida para cada condição de soldagem na região de refino de grão das ZTA's.

Figura 22 – Regiões de refino de grãos (Ampliação 400x).



Fonte: O AUTOR (2021).

Na Tabela 7 estão apresentados os valores de tamanho de grãos medidos para cada condição, na região de refino de grãos da ZTA.

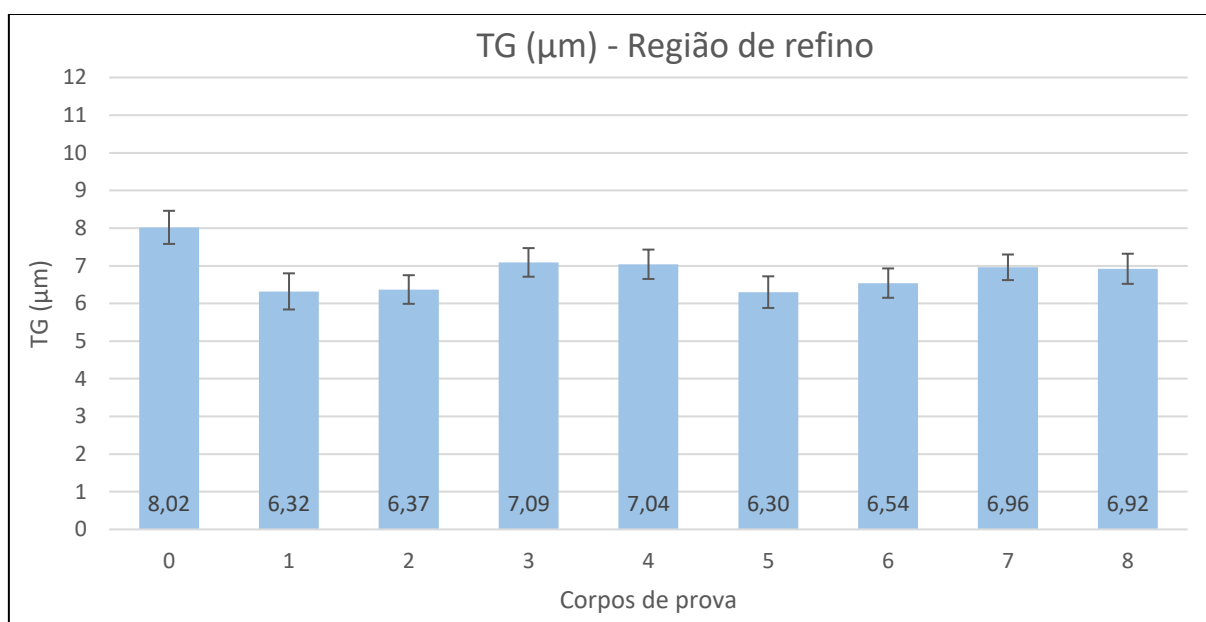
Tabela 7 – Tamanho médio de grãos na região de refino.

CP	TG ( $\mu\text{m}$ )	DP
1	6,32	0,48
2	6,37	0,38
3	7,09	0,38
4	7,04	0,39
5	6,30	0,42
6	6,54	0,39
7	6,96	0,34
8	6,92	0,40

Fonte: O AUTOR (2021).

Com os dados da Tabela 7 foi gerado um gráfico para comparação das medições, neste gráfico também foi inserido o valor do tamanho médio de grão do metal base (sem soldagem) para comparação (Corpo de prova 0), o gráfico está representado na Figura 23.

Figura 23 – Gráfico tamanho médio de grãos na região de refino.



Fonte: O AUTOR (2021).

Com os valores da Tabela 7, e a visualização gráfica da figura 23, é possível observar que houve redução do tamanho médio de grãos nas regiões de refino quando comparado ao metal base. O refino de grãos que ocorre na soldagem pode aumentar a resistência mecânica do material, mas também sua fragilidade (redução da ductilidade e tenacidade).

Com relação ao preaquecimento, não foram observados efeitos significantes nesta região, já que os valores para cada condição foram semelhantes, também não foi observado nenhum padrão de alteração ou tendência em relação ao aumento da temperatura de preaquecimento.

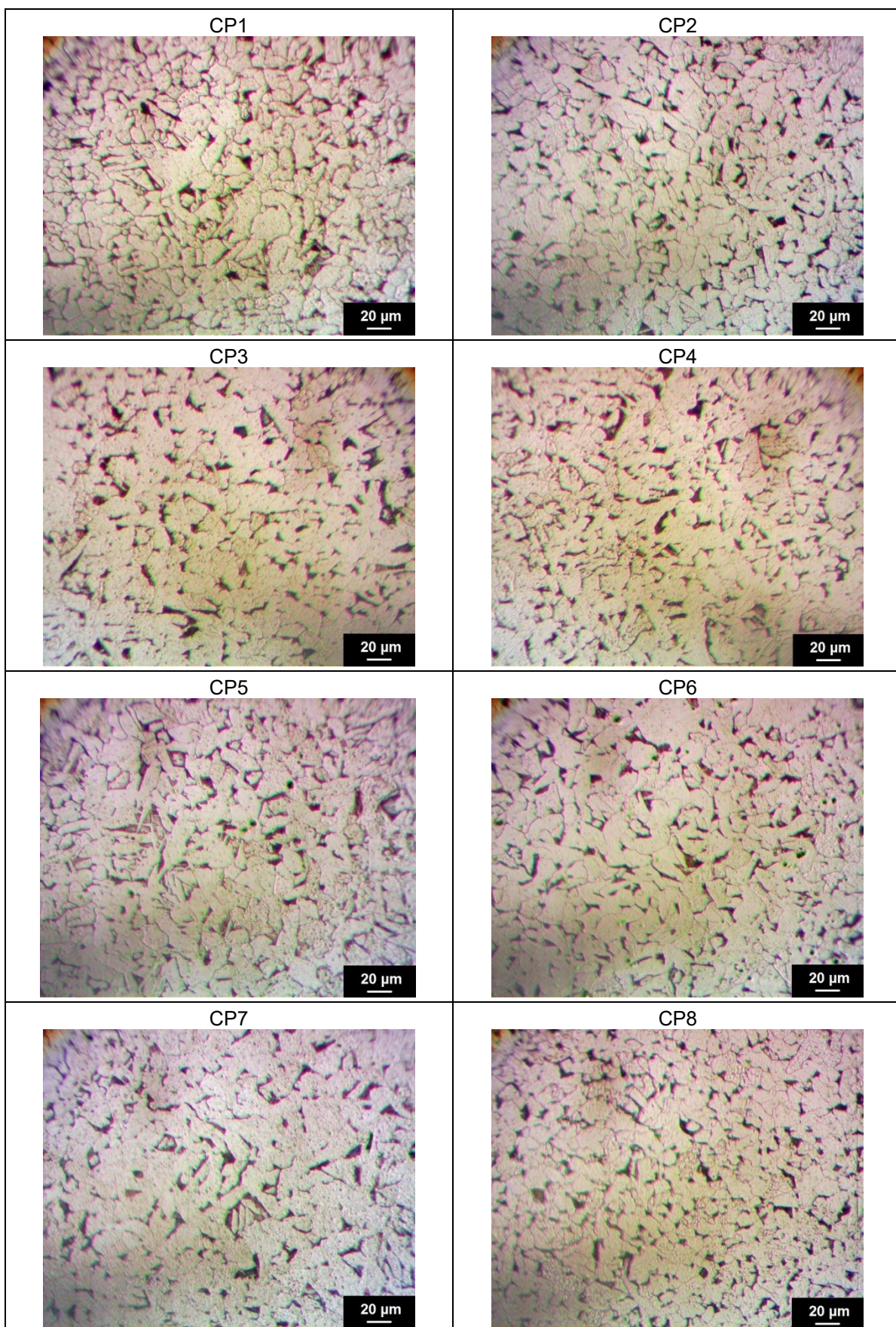
Quando comparado os corpos de prova em que houve a variação do sentido de soldagem, é possível verificar que esta variação não apresentou efeitos significantes no tamanho de grãos, apresentando resultados semelhantes em todas as condições estudadas.

Os resultados obtidos sugerem que o parâmetro com maior influência na variação microestrutural da ZTA foi o aporte térmico. Com o valor único de aporte utilizado (680 J/mm), tanto o uso de preaquecimento como a variação do sentido de soldagem não afetaram a microestrutura nesta região para as condições estudadas.

#### 4.1.2 ZTA com crescimento de grãos

A Figura 24 mostra a microestrutura obtida para cada condição de soldagem na região de crescimento de grãos das ZTA's.

Figura 24 – Regiões crescimento de grão (ampliação 400x).



Fonte: O AUTOR (2021).



Na Tabela 8 estão apresentados os valores de tamanho de grãos medidos para cada condição na região de crescimento de grãos da ZTA.

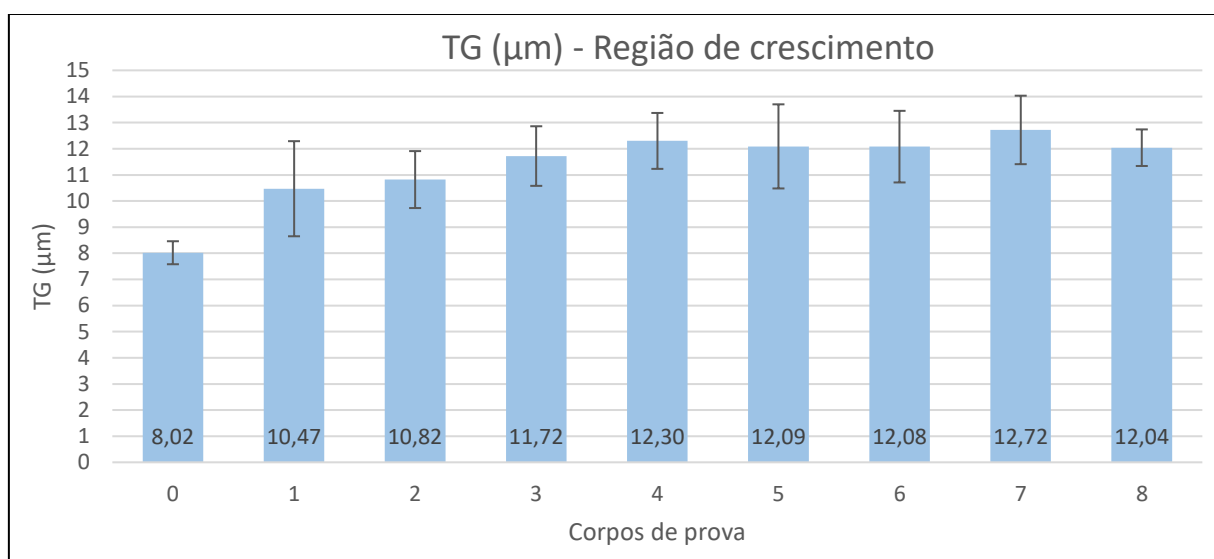
Tabela 8 – Tamanho médio de grãos na região de crescimento de grãos.

CP	TG ( $\mu\text{m}$ )	DP
1	10,47	1,82
2	10,82	1,09
3	11,72	1,14
4	12,30	1,07
5	12,09	1,61
6	12,08	1,37
7	12,72	1,31
8	12,04	0,70

Fonte: O AUTOR (2021).

Com os dados da Tabela 8 também foi gerado um gráfico para comparação das medições, neste gráfico foi inserido o valor do tamanho médio de grãos do metal base (sem soldagem) para comparação (Corpo de prova 0), o gráfico está representado na Figura 25.

Figura 25 – Gráfico tamanho médio de grãos na região de crescimento de grãos.



Fonte: O AUTOR (2021).

Com os dados da Tabela 8 e o gráfico apresentado na figura 25 é possível

observar que nas condições de soldagem sem o uso de preaquecimento (CP1 e CP2) o tamanho de grãos na região de crescimento de grãos apresentou aumento em relação ao metal base. No entanto, conforme aplicação de temperaturas distintas de preaquecimento, observa-se uma tendência de aumento no tamanho médio dos grãos. Nesta região a temperatura de preaquecimento teve mais influência no tamanho de grãos se comparado com a zona de refino de grãos. Constata-se, então, que o uso de preaquecimento na soldagem do aço ABNT 1020 tem capacidade de modificar sua microestrutura.

O aumento no tamanho de grãos gerado pela soldagem pode gerar redução na resistência mecânica do material, mas com a redução da área total de contornos de grãos, o material pode ser apresentar maior ductilidade e tenacidade.

Novamente, com relação ao sentido de soldagem, também não se observou influência na microestrutura do material nesta região da junta soldada.

#### 4.2 Análise dos perfis de microdureza Vickers

Os resultados obtidos no ensaio de dureza estão mostrados na Tabela 9. As medições foram realizadas mantendo uma distância fixa de 0,5mm entre elas (todas as medições foram iniciadas no metal base e seguiram em direção à zona fundida).

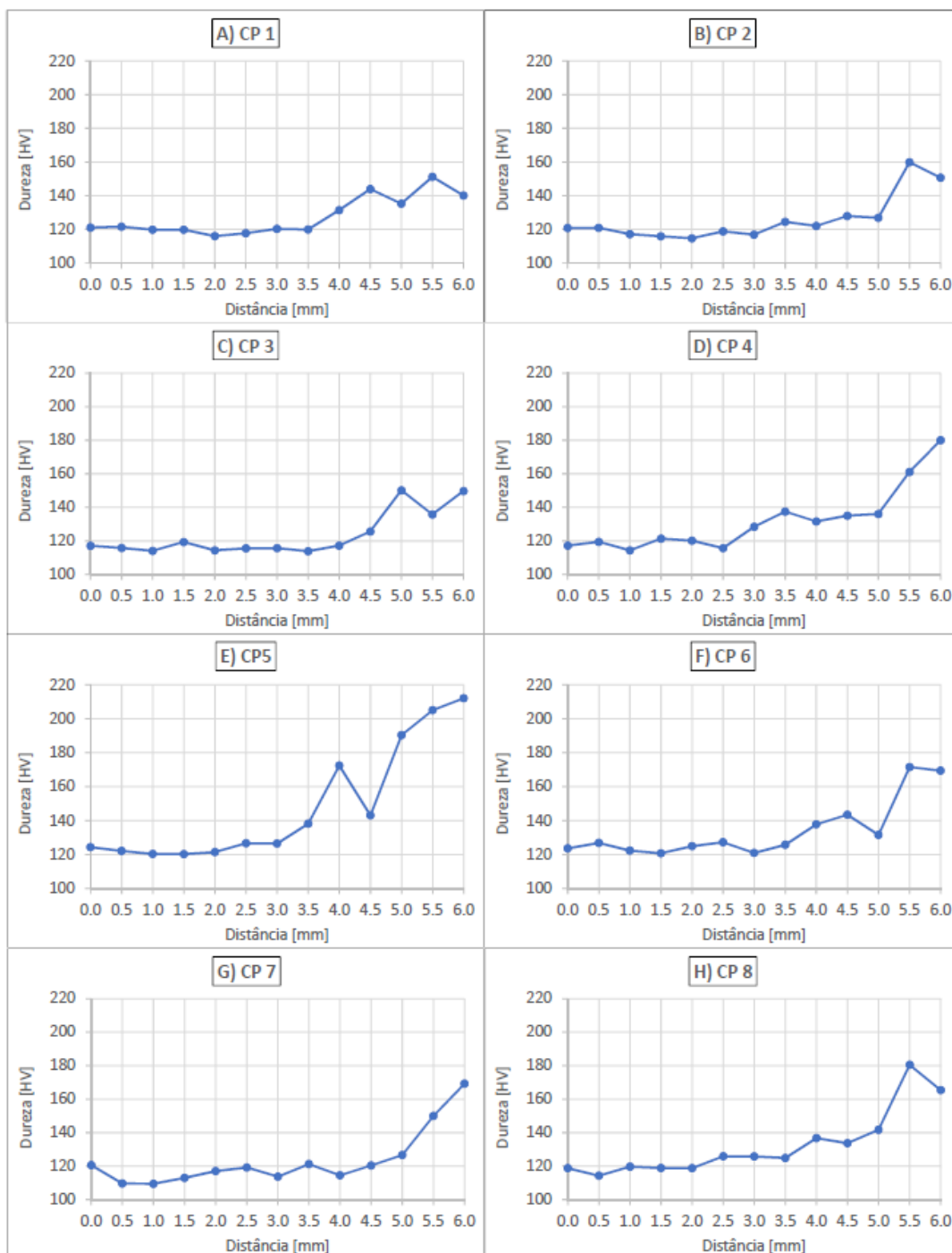
Tabela 9 – Valores do ensaio de microdureza Vickers.

Distância entre medições (mm)	Dureza Vickers (HV)							
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8
0,0	121,0	120,8	117,1	117,2	124,3	123,6	120,5	118,7
0,5	121,6	120,9	115,8	119,5	122,1	126,8	109,6	114,2
1,0	119,8	117,2	114,1	114,4	120,3	122,3	109,4	119,6
1,5	119,8	115,9	119,4	121,4	120,2	120,7	112,9	118,8
2,0	116,0	114,7	114,4	120,2	121,4	124,9	117,0	118,7
2,5	117,7	118,8	115,6	115,7	126,6	127,2	119,1	125,8
3,0	120,3	116,9	115,7	128,5	126,4	120,9	113,6	125,7
3,5	119,9	124,5	113,9	137,5	138,1	125,7	121,2	124,8
4,0	131,4	122,1	117,2	131,6	172,4	137,7	114,4	136,7
4,5	144,0	127,9	125,6	135,1	143,0	143,4	120,3	133,7
5,0	135,3	126,9	150,2	136,1	190,3	131,5	126,5	141,7
5,5	151,2	159,9	135,8	161,1	205,0	171,5	149,9	180,5
6,0	140,1	150,7	149,8	180,0	212,0	169,3	169,2	165,4

Fonte: O AUTOR (2021).

Com os dados da Tabela 9 foram gerados os perfis de microdureza Vickers das diferentes amostras, e representados em forma de gráficos conforme Figura 26.

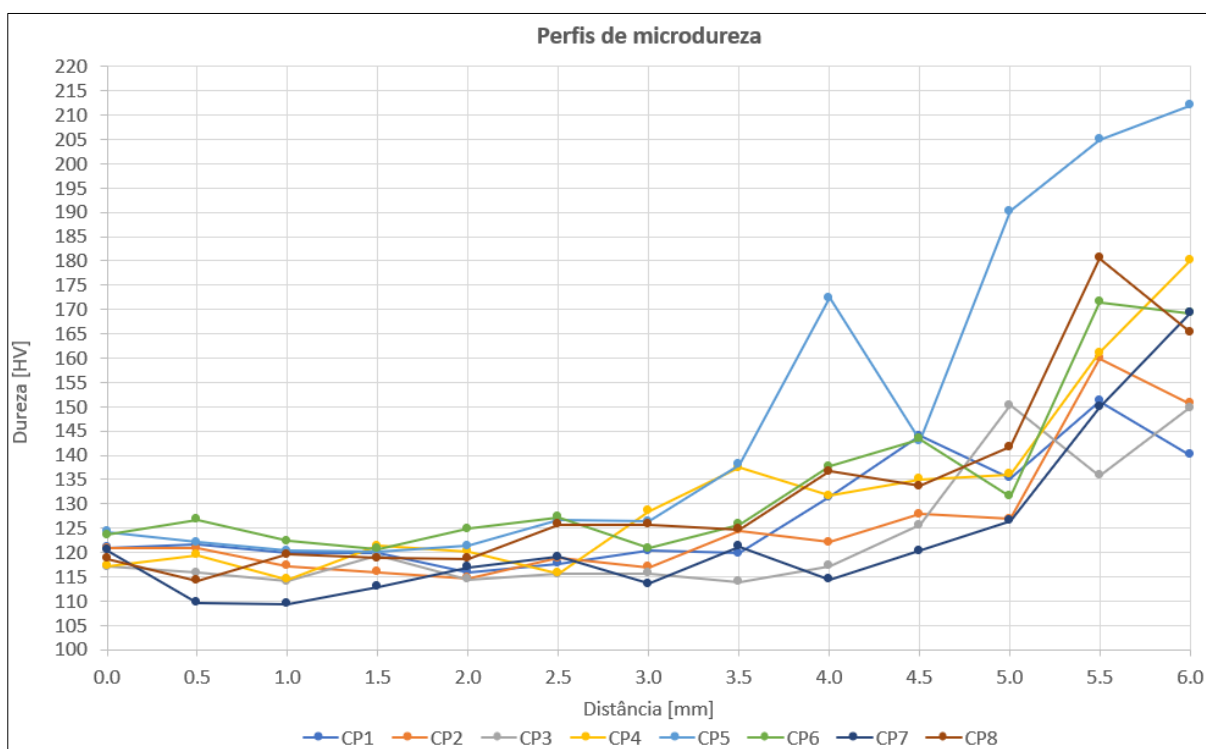
Figura 26 – Perfis de microdureza para cada condição de soldagem.



Fonte: O AUTOR (2021).

Do mesmo modo, foi gerado um gráfico com a análise comparativa de todos os perfis de microdureza das diferentes amostras, apresentado na Figura 27.

Figura 27 – Comparativo entre os perfis de microdureza.



Fonte: O AUTOR (2021).

Com estes gráficos é possível observar que independente da condição de preaquecimento e sentido de soldagem utilizada, não houve influência considerável na microdureza entre os corpos de prova. Os perfis gerados foram semelhantes.

O aumento de dureza que pode ser observado ao longo de todos os perfis representa o início da transição da ZTA para ZF de todas as condições estudadas. É um resultado esperado devido ao material de adição utilizado, que modificou a composição química e, como consequência, sua dureza.

Desde a região do metal base até a ZTA os valores de dureza se mantiveram constantes. Mesmo tendo sido verificado na região de refino de grãos a redução do tamanho médios dos grãos, e o oposto na região de crescimento de grão, onde houve um aumento do tamanho médio do grão, sendo que ambas as transformações ocorreram em função da soldagem, percebe-se que a resistência mecânica (dureza) não foi afetada nestas regiões mesmo para os corpos de provas que foram submetidos as maiores temperaturas de preaquecimento (150°C e 250°C). É possível afirmar que o objetivo que uma soldagem de qualidade tem, que é manter as propriedades ao longo da junta constantes, foi alcançado em todas as condições deste estudo.

Os resultados de microdureza dos corpos de prova soldados sem

preaquecimento mantiveram-se dentro da especificação da liga, de 126 HV de acordo com Luz (2021), e não apresentaram valores que pudessem prejudicar a união soldada. Os perfis foram semelhantes aos resultados encontrados nas condições com preaquecimento.

Novamente, os resultados obtidos no presente estudo sugerem que o parâmetro com maior influência na variação microestrutural da ZTA foi o aporte térmico. Com o valor único de aporte utilizado (680 J/mm), tanto o uso de preaquecimento como a variação do sentido de soldagem não geraram efeitos significativos no perfil de dureza da junta.

### 4.3 Limite de resistência à tração

Foram realizados ensaios de tração com o objetivo de determinar a variação das propriedades mecânicas de cada corpo de prova. Os valores do limite de resistência à tração gerado pelo equipamento estão apresentados na Tabela 10 (média dos 3 ensaios realizados por condição com desvio padrão). Nesta mesma tabela, também estão registrados os valores de alongamento ( $\epsilon$ ) para condição de soldagem (de 1 a 8) e do metal base sem soldagem (corpo de prova 0).

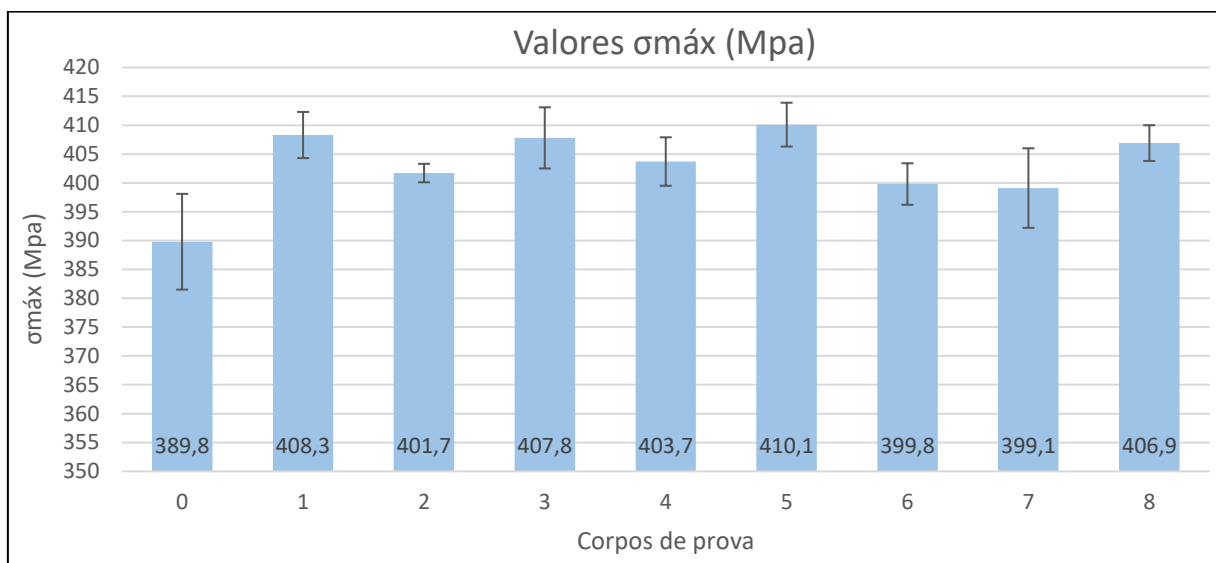
Tabela 10 – Valores do ensaio de tração.

Corpo de prova	Alongamento		Resistência a tração	
	$\epsilon$ (%)	DP	$\sigma_{\text{máx}}$ (Mpa)	DP
0	40,0	1,9	389,8	8,3
1	24,2	0,7	408,3	4,0
2	23,6	1,2	401,7	1,6
3	21,1	3,0	407,8	5,3
4	20,9	1,3	403,7	4,2
5	21,5	1,4	410,1	3,8
6	27,7	1,1	399,8	3,6
7	20,4	2,0	399,1	6,9
8	21,9	0,4	406,9	3,1

Fonte: O AUTOR (2021).

Para comparação dos valores de resistência à tração foi elaborado um gráfico comparando os valores obtidos, o gráfico está representado na Figura 28.

Figura 28 – Gráfico dos valores de resistência a tração.



Fonte: O AUTOR (2021).

Todos os corpos de provas romperam dentro do comprimento útil do corpo de prova e apresentaram perda da ductibilidade após a soldagem para todas as condições.

A soldagem sem preaquecimento obteve o valor de limite de resistência a tração superior ao metal base, e semelhante aos processos com uso de preaquecimento, indicando que este procedimento não prejudicou a resistência mecânica da junta.

O aumento do tamanho médio dos grãos na região de crescimento de grãos não gerou redução de resistência mecânica.

Nas condições de soldagem utilizadas, o uso de preaquecimento não apresentou variações significativas na resistência mecânica nas diferentes temperaturas utilizadas, assim como a variação do sentido de soldagem também não apresentou influência.

Novamente, os resultados sugerem que o aporte térmico utilizado é o parâmetro que comandou o ciclo térmico e seus efeitos tanto na microestrutura como nas propriedades mecânicas do material soldado.

## 5 CONCLUSÃO

Como foi utilizado neste trabalho o TIG alimentado e automatizado, que é um processo de soldagem que entrega uma boa repetibilidade de resultados entre as amostras soldadas, foi possível levantar algumas conclusões através da avaliação dos resultados obtidos nos ensaios, mesmo com um número reduzido de amostras.

O uso de preaquecimento na soldagem do aço ABNT 1020 via processo TIG alimentado, segundo condições propostas neste trabalho, causa efeito no tamanho de grãos na região de crescimento de grãos. No entanto não é suficiente para alteração das propriedades mecânicas do material.

Os valores obtidos nas análises de tamanho de grãos, microdureza Vickers e limite de resistência a tração, para os experimentos com e sem preaquecimento, foram satisfatórios, ou seja, a soldagem sem uso de preaquecimento não demonstrou resultados significativos que pudessem torná-la inaceitável.

A falta de influência do preaquecimento e do sentido de soldagem nas propriedades mecânicas do material soldado sugerem que o ciclo térmico de soldagem, nas condições estudadas, é governado, principalmente, pelo aporte térmico utilizado. Como um único valor de aporte foi utilizado para todas as condições, os resultados obtidos foram semelhantes.

Os parâmetros de soldagem propostos foram adequados por manterem constantes as propriedades mecânicas ao longo de toda a junta soldada para ambas as condições, com e sem preaquecimento. Sendo assim, a soldagem do aço ABNT 1020, nas condições propostas, pode ser realizada pelo processo TIG alimentado, sem uso de preaquecimento e sem perda de propriedades mecânicas.

## **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Com as avaliações e conclusões deste trabalho, foram levantadas duas sugestões para trabalhos futuros.

A primeira sugestão seria avaliar a influência do preaquecimento na microestrutura do aço ABNT 1020 avaliando o efeito em relação a diferentes aportes térmicos, pois na avaliação dos resultados deste trabalho foi levantada a hipótese que nas condições estudadas o aporte térmico é o principal responsável pelo ciclo térmico.

A segunda sugestão seria avaliar a influência do preaquecimento e do sentido de soldagem em ligas com maior teor de carbono como os aços ABNT 1045 e 1060, para entender o efeito desses fatores em relação ao percentual de carbono.



## REFERÊNCIAS

- ABREU FILHO, Carlos. **Metalurgia da soldagem**. Curso técnico em mecânica. CEFET. Pará: [s.n.] 2008.
- ALVES, Gianni Ferreira; VIEIRA, Estéfano Aparecido; OLIVEIRA, José Roberto de. **Influência do tempo e deformação na microestrutura de ligas de alumínio reciclado condicionadas para tixoconformação**. Rem: Revista Escola de Minas, v. 65, p. 107-112, 2012.
- ASKELAND, Donald R.; WRIGHT, Wendelin J. **Ciência e engenharia dos materiais**. 2 ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016. 648 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Aços Carbono e Ligados para Construção Mecânica** - Designação e Composição Química, NBR NM87:2000. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais metálicos — Ensaio de Tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente**, NBR ISO 6892-1:2013. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. **ASTM E112** – 96. West Conshohocken, PA, USA. 1996.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **Gas Tungsten Arc Welding. Welding Handbook**, 8. ed., vol. 2, p. 73-107, 1991.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding**, AWS A5.18, 2001.
- CALLISTER, William D. Jr.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia dos Materiais**, uma Introdução. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- CHIAVERINI, VICENTE. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed. São Paulo: Ed. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 2005.
- COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008. 652 p.
- DIAS, Felipe Rodrigues. **Caracterização da junta soldada de aço SAE 1020 com tratamento térmico pós soldagem**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2018.
- DELGADO, Luiz Carlos. **Estudo e desenvolvimento do processo TIG com alimentação automática de arame**. 2000. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2000.

FORTES, Cleber. **Metalurgia da soldagem**. Escola Superior Aberta do Brasil (ESAB), Brasil, Apostila, 2005.

GODOY, Wagner Lopes de. **Efeito da temperatura de pré-aquecimento e características do pulso na microestrutura de aço estrutural de alta resistência e baixa liga soldado com arco elétrico e proteção gasosa**. 2008. xi, 159 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Bauru, 2008.

LIMA JÚNIOR, Diniz Ramos de. **Caracterização microestrutural e mecânica de juntas soldadas utilizando os processos GTAW, FCAW E SMAW**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, UFPE. Recife, 2013.

LUZ, Gelson. **Aço SAE 1020 Propriedades (e Fornecedores do Aço 1020)**. Blog Materiais, [s. l.], 2017. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/a-co-sae-1020-propriedades-mecanicas.html>. Acesso em: 15 out. 2021.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3.ed. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2009.

MARTINS, W. P.; NASCIMENTO, C.C.F.; MENESES, V.A.; PAIVA, A.E.M.; LEAL, V.S. **Influência dos Parâmetros de Soldagem no Comportamento Microestrutural e nas Propriedades Mecânicas de Juntas Soldadas em Aços ARBL**. In: 6º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 6o COBEF. **Anais...** Caxias do Sul, RS, 2011.

MASCARENHAS, Luís Alberto Brêda. **Estudo da Aplicação do Processo TIG alimentado para a Soldagem em Operação**. 2005. 106f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2005.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade de algumas ligas metálicas**. 2011. 26 p. Trabalho acadêmico não identificado - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais. 2011.

PINTO, P.M.A.S. **Soldagem circunferencial de tubo API 5L X80 empregando processo manual e semiautomático**. 113p. Dissertação (Mestrado), Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

QUITES, Almir Monteiro. **Introdução à Soldagem a Arco Voltaico**. Florianópolis: Soldasoft, 2002. 328 p.

QUITES, Almir Monteiro. **Metalurgia da Soldagem**. Florianópolis: Soldasoft, 2008. 256 p.

REIS SOBRINHO, J. F.; ALCÂNTARA, N. G. **Análise dos ciclos térmicos obtidos na zona afetada termicamente da junta soldada de um aço de alta resistência**. Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação

Tecnológica, João Pessoa, Paraíba, 2007

RIBEIRO, Júlio César Bento. **Análise de técnicas para a Soldagem TIG automatizada**. 2012. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2012.

SANTOS, F. J. **Soldagem de Alumínio: Influência dos Parâmetros de Pulso na Distorção Angular**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual Paulista – UNESP. Bauru, 2009.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Composição Química dos Aços**. São Paulo: Edgard Blücher, 1989. 134 p.

VEIGA, Emilio. **Processos de soldagem TIG**. São Paulo: Globus, 2011. 186p.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sergio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem: processos e metalurgia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1992. 494 p.

YURIOKA, N. Comparison of preheat predictive methods. **Welding in the World**, v. 48, n. 1, p. 21-27, 2004.