

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

WESLEY RICHAR BOLDUANN

INFLUÊNCIA DA TÉCNICA DE DUPLA CAMADA NA MICROESTRUTURA DA ZAC  
DURANTE SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO DO AÇO ABNT 1020

JARAGUÁ DO SUL  
JUNHO, 2019

WESLEY RICAR BOLDUANN

INFLUÊNCIA DA TÉCNICA DE DUPLA CAMADA NA MICROESTRUTURA DA ZAC  
DURANTE SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO 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  
JUNHO, 2019

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

Bolduann, Wesley Richar  
Influência da técnica de dupla camada na microestrutura  
da ZAC durante soldagem por arco submerso do aço ABNT 1020.  
/ Wesley Richar Bolduann; orientação de Almir  
Turazi. Jaraguá do Sul, SC, 2019.  
60 p.

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

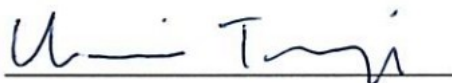
1. Arco submerso. 2. Aço ABNT 1020. 3. Zona afetada pelo  
calor. 4. Dupla camada. I. Turazi, Almir. II. Instituto  
Federal de Santa Catarina. .III. Título.

WESLEY RICAR BOLDUANN

INFLUÊNCIA DA TÉCNICA DE DUPLA CAMADA NA MICROESTRUTURA DA ZAC  
DURANTE SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO 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, 18 de junho de 2019



Prof. Dr. Almir Turazi

Orientador

IFSC – Campus Jaraguá do Sul – RAU



Prof. Me. Cassiano Rodrigues Moura

IFSC – Campus Jaraguá do Sul – RAU



Prof. Dr. Jean Senise Pimenta

IFSC – Campus Jaraguá do Sul – RAU

Dedico à minha esposa Joseane e ao meu filho Henrique,  
pelo amor e compreensão.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador Dr. Almir Turazi pelo tempo e dedicação disponibilizado na concretização deste trabalho.

A minha esposa Joseane e ao meu filho Henrique, pelo apoio e compreensão nas horas de ausência.

Aos meus pais, Elmo e Leonete, pela educação e valores ensinados.

A todos que contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

(José de Alencar)

## RESUMO

A soldagem é um processo utilizado na união permanente de peças com aplicação em diversos setores. Entre alguns exemplos estão a montagem de estruturas metálicas na construção civil, a construção e manutenção de máquinas do setor metal mecânico, a fabricação de tubulações para produtos alimentícios, entre outros. Embora muito utilizado em áreas variadas, o processo de soldagem por fusão provoca alterações indesejáveis na microestrutura e nas propriedades do material, principalmente dos aços, devido as altas temperaturas atingidas próximas à região fundida. Uma alternativa de amenizar este efeito é o uso de tratamentos térmicos pós soldagem, visando a redução de tais alterações e o reestabelecimento das propriedades do aço. Outra forma é a aplicação da soldagem multipasses, onde cada passe subsequente causa o reaquecimento da junta soldada. Este reaquecimento busca minimizar as alterações na microestrutura e melhorar as propriedades do material. O presente trabalho tem como objetivo analisar a influência da utilização da técnica de dupla camada na região da zona afetada pelo calor (ZAC) em juntas soldadas de aço ABNT 1020, pelo processo com arco submerso. Foram realizadas sequências de soldagens em chapas de 5/8" (15,9 mm) de espessura com passe simples e passe duplo de solda variando a energia de soldagem. Foi comparada a eficiência da técnica através de ensaios de microdureza e análise da microestrutura por metalografia. Observou-se que a técnica de dupla camada teve efeito relevante na recuperação das propriedades do aço. A ZAC após o primeiro passe apresentou microestrutura refinada, fase com morfologia acicular e aumento da dureza. Com a aplicação de um segundo passe de solda, aumentando-se gradativamente a energia de soldagem, observou-se nas amostras 5 e 6 o reestabelecimento da microestrutura equiaxial e da dureza na região da ZAC. Pode-se observar que, em alguns casos, o uso da técnica pode dispensar um tratamento térmico pós soldagem.

Palavras-Chave: arco submerso, aço ABNT 1020, Zona Afetada pelo Calor, dupla camada.



## ABSTRACT

Welding is a process used in the permanent joining of parts with application in various sectors. Some examples are the assembly of metal structures in civil construction, the construction and maintenance of machinery in the metalworking sector, the manufacture of pipes for food products, among others. Although widely used in various areas, the melt welding process causes undesirable changes in the microstructure and properties of the material, especially the steels, due to the high temperatures reached near the molten region. An alternative to soften this effect is the use of heat treatments after welding, aiming at the reduction of such changes and the reestablishment of the steel properties. Another way is the application of multipass welding, where each subsequent pass causes reheating of the welded joint. This reheating seeks to minimize changes in the microstructure and improve the properties of the material. The present work has the objective of analyzing the influence of the use of the double layer technique in the region of the zone affected by the heat (ZAC) in welded joints of steel ABNT 1020, by the submerged arc process. Welding sequences were performed on 5/8 "(15.9 mm) thick sheets with single pass and double pass soldering varying the welding energy. The efficiency of the technique was compared through microhardness tests and metal microstructure analysis. It was observed that the double layer technique had a relevant effect on the recovery of steel properties. The ZAC after the first pass presented refined microstructure, phase with acicular morphology and increase of hardness. With the application of a second soldering pass, the soldering energy was gradually increased, in samples 5 and 6 the reestablishment of the equiaxial microstructure and the hardness in the ZAC region were observed. It can be observed that, in some cases, the use of the technique can dispense a heat treatment after welding.

Keywords: submerged arc, steel ABNT 1020, Heat Affected Zone, double layer.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estágios da solidificação com formação de contorno de grão.....	20
Figura 2 - Origem e desenvolvimento da estrutura dendritica.....	21
Figura 3 - Evolução dos processos de soldagem.....	24
Figura 4 – Tipos de soldagem: (a) por pressão; (b) por fusão.....	25
Figura 5 - Regiões do arco elétrico.....	26
Figura 6 - Tipos de junta.....	26
Figura 7 - Tipos de chanfros.....	26
Figura 8 - Elementos dimensionais do chanfro.....	27
Figura 9 - Posições de soldagem.....	28
Figura 10 - Princípio de funcionamento do arco submerso.....	28
Figura 11 - Equipamentos de soldagem por arco submerso.....	29
Figura 12 - Termos da solda.....	30
Figura 13 - Representação (a) das regiões de uma junta soldada; (b) do tamanho do grão.....	31
Figura 14 - Regioões da ZAC e suas respectivas temperaturas.....	32
Figura 15 Morfologias da ferrita.....	34
Figura 16 Fluxograma do procedimento experimental.....	38
Figura 17 fresamento do chanfro.....	40
Figura 18 Projeto da junta soldada.....	40
Figura 19 Equipamento de soldagem por arco submerso.....	41
Figura 20 Máquina de eletroerosão.....	42
Figura 21 Amostras após corte da seção da solda.....	43
Figura 22 Representação do perfil de dureza.....	44
Figura 23 Microestrutura do metal de base.....	45
Figura 24 Perfis soldados de barra 5/8” de espessura.....	46
Figura 25 Regiões da junta soldada com passe único.....	48
Figura 26 ZAC – Região de refino de grão.....	50
Figura 27 ZAC – Região de crescimento de grão.....	51
Figura 28 Gráfico perfil de dureza.....	53
Figura 29 Microestruturas do metal base para cada condição.....	59
Figura 30 Microestruturas da zona fundida para cada condição.....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Sistema de classificação dos aços.....	19
Tabela 2 Propriedades mecânicas do aço 1020.....	22
Tabela 3 Temperatura de pré-aquecimento x Carbono equivalente.....	36
Tabela 4 Composição química do aço ABNT 1020( % em massa).....	39
Tabela 5 - Parâmetros de soldagem.....	42
Tabela 6 Dureza do metal base.....	46
Tabela 7 Aspectos do perfil do cordão de soldagem.....	47
Tabela 8 Resultados de microdureza (HV).....	52

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A - Ampere

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASME - American Society of Mechanical Engineers

AWS – American Welding Society

AISI – American Iron and Steel Institute

C – Carbono

Ceq – Carbono equivalente

CU - Cobre

CP – Corpo de prova

Cr – Cromo

E - Aporte térmico

FA – Ferrita acicular

FS(A) – Ferrita de segunda fase alinhada

FS(NA) – Ferrita de segunda fase não alinhada

FP(G) – Ferrita de contorno de grão

FP(I) – Ferrita poligonal intragranular

I – Corrente de soldagem

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

IIW - International Institute of Welding

M – Martensita

MN – Manganês

MO – Molibdenio

NI - Níquel

SAE – Society of Automotive Engineers

U – tensão de soldagem

V – volts

VS – velocidade de soldagem

ZAC – Zona Afetada pelo Calor

ZTA – Zona Termicamente Afetada

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Objetivos.....	16
1.1.1 Ojetivo geral.....	16
1.1.2 Objetivos específicos.....	16
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	18
2.1 Aços.....	18
2.1.1 Aço 1020.....	22
2.2 Soldagem.....	22
2.2.1 Arco elétrico.....	25
2.2.2 Juntas para soldagem.....	26
2.2.3 Posição de soldagem.....	27
2.2.4 Processo de soldagem por arco submerso.....	28
2.3 Metalurgia da soldagem.....	30
2.3.1 Zona afetada pelo calor.....	32
2.4 Técnicas para reduzir o efeito da ZAC.....	35
2.4.1 Pré-aquecimento.....	35
2.4.2Tratamentos térmicos.....	36
2.4.3 Técnica de soldagem com dupla camada.....	37
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
3.1 Materiais.....	38
3.2 Métodos.....	39
3.2.1 Preparação das juntas.....	39
3.2.2 Soldagem das amostras.....	41
3.2.3 Avaliação dos perfis das juntas soldadas.....	42
3.2.4 Microscopia óptica.....	43
3.2.5 Microdureza Vickers.....	44
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	45
4.1 Caracterização do metal base.....	45
4.1.1 Microestrutura.....	45
4.1.2 Microdureza.....	45
4.2 Avaliação dos perfis das juntas soldadas.....	46
4.3 Análise microestrutural das juntas soldadas.....	47

4.3.1 Regiões da junta com passe único.....	47
4.3.2 Regiões das juntas com dupla camada.....	48
4.4 Análise da microdureza das juntas soldadas.....	52
5 CONCLUSÃO.....	55
6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	56
REFERÊNCIAS.....	57
APÊNDICE A – Micrografias do metal base.....	59
APÊNDICE B – Micrografias da zona fundida.....	60

## 1 INTRODUÇÃO

A soldagem é um conjunto de processos térmicos de união permanente de peças. Além de unir, ela deve assegurar a continuidade das propriedades físicas, químicas e metalúrgicas ao longo da junta soldada.

Muito importante para a indústria, a soldagem é utilizada em diversos setores, como na soldagem de componentes eletrônicos, construção civil, montagem de estruturas e nas indústrias automobilística e naval. Apresenta vantagens se comparada com outros processos, pois pode oferecer um custo competitivo, permite flexibilidade na alteração de projetos, reduz o peso de estruturas se comparada com a união utilizando rebites e parafusos e pode ser a melhor opção na união de tubos devido à estanqueidade. Entretanto, desvantagens também são constatadas neste processo, tais como a impossibilidade de desmontar as partes unidas, a necessidade de considerável habilidade do operador em operações manuais, além de, em muitos casos, necessitar de operações posteriores para reparo de propriedades.

Em juntas soldadas podem-se distinguir três regiões principais: zona fundida, zona afetada pelo calor (ZAC) e metal de base. O metal de base é a parte mais afastada do cordão de solda e não sofre alterações microestruturais. A zona fundida é a região que esteve líquida em algum momento durante a soldagem, composta por metal de base e metal de solda. Já a ZAC é a região do metal de base que não se fundiu durante a soldagem, porém sofreu alterações devido as altas temperaturas. Esta geralmente é uma região crítica em uma junta soldada, devido as mudanças na microestrutura ocasionadas pelo aquecimento e resfriamento. Tal condição pode gerar efeitos indesejáveis como tensões residuais, distorções, formação de trincas, aumento ou diminuição no tamanho do grão, além de afetar as propriedades mecânicas.

Buscando a continuidade das propriedades físicas, químicas e metalúrgicas, as juntas soldadas podem ser submetidas a processos auxiliares com o objetivo de reduzir os efeitos da ZAC. Dentre os mais utilizados estão os tratamentos térmicos pós-soldagem (TTPS), o pré-aquecimento da peça e a aplicação da soldagem com dupla camada.

O tratamento térmico de revenimento tem por finalidade aliviar as tensões internas existentes em materiais que sofreram alterações, devido ao ciclo térmico de

aquecimento e resfriamento, reduzindo a dureza e fragilidade da peça. O inconveniente é que os TTPS são demorados devido ao tempo de permanência em fornos, são caros, além de complicada a aplicação em estruturas de grande porte.

O método de pré-aquecimento é empregado para facilitar o controle do ciclo térmico de aquecimento até a temperatura máxima e resfriamento, esse resfriamento exige um controle rigoroso, pois taxas muito altas e muito baixas de resfriamento reduzem a tenacidade da junta soldada. Além de dificuldades de utilização deste método em campo.

A técnica da dupla camada, segundo Assumpção (2006), consiste em uma sobreposição dos ciclos térmicos, onde o segundo cordão de solda deve ser confeccionado exatamente sobre o primeiro. Executada de modo adequado a segunda camada tem como objetivo proporcionar um refino de grãos e revenimento na microestrutura da ZAC.

No presente trabalho a influência da técnica de dupla camada no processo de soldagem por arco submerso foi estudada. Espera-se contribuir positivamente com a indústria, proporcionando conhecimento sobre o processo visando ganhos de tempo e custo, além de melhorias nas propriedades dos materiais soldados.

A partir disso, a pergunta de pesquisa deste trabalho é: “Qual a influência do uso da técnica de dupla camada na microestrutura e nas propriedades mecânicas do aço ABNT 1020 durante soldagem por arco submerso?”.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Avaliar o efeito da utilização da técnica de dupla camada no processo de soldagem por arco submerso, com diferentes níveis energéticos, através da variação microestrutural e a dureza da ZAC.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Realização de procedimentos de soldagem por arco submerso;
- Análise microscópica dos cordões de solda via procedimento metalográfico



padrão;

- Comparação da dureza das juntas soldadas;
- Definição da condição de soldagem com maior efeito na recuperação da ZAC.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é abordada uma revisão da literatura, trazendo ao leitor informações sobre o material e o processo de soldagem utilizados neste trabalho, relatando também os problemas e dificuldades que originaram esta pesquisa.

### 2.1 Aços

O aço, segundo Chiaverini (2002), é uma liga complexa, formada principalmente por dois elementos, o ferro e o carbono. Para ser considerado um aço esta liga deve conter de 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono. Outros elementos químicos secundários também fazem parte da composição destes materiais, que até determinadas quantidades são decorrentes do processo de fabricação. Nesta condição denomina-se esta liga de aço-carbono.

Além do aço-carbono, outro tipo fundamental desta classe de materiais é o aço-liga, que, conforme Chiaverini (2002), é composto por aço-carbono e outros elementos de liga em teores acima dos que são considerados normais do processo, ou seja, podem ser adicionados propositalmente para modificação de propriedades específicas do material.

No Brasil a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) classifica os aços-carbono e os aços de baixa liga conforme critérios das normas da *American Iron and Steel Institute* (AISI) e da *Society of Automotive Engineers* (SAE). Este método de classificação consiste numa seqüência de 4 a 5 números para identificação dos aços de acordo com a sua composição química, sendo os dois primeiros dígitos relacionados com os principais elementos de liga constituintes do aço e os dois ou três últimos dígitos com a quantidade de carbono da peça. Por exemplo, o aço ABNT 1020 classifica-se como um aço carbono comum contendo em sua composição 0,20% de carbono (ANDRADE, 2011). A tabela 1 apresenta alguns exemplos desta forma de classificação.

Tabela 1 Sistema de classificação dos aços.

Designação		Tipos de aço
AISI-SAE	UNS	
10XX	G10XXX	Aços-carbono comum
11XX	G11XXX	Aços de usinagem fácil, com alto S
12XX	G12XXX	Aços de usinagem fácil, com alto P e S
15XX	G15XXX	Aços-Mn com manganês acima de 1%
13XX	G13XXX	Aços-Mn com 1,75% de Mn médio
40XX	G40XXX	Aços-Mo com 0,25% de Mo médio
41XX	G41XXX	Aços-Cr-Mo com 0,4 a 1,1% de Cr e 0,008 a 0,35% de Mo

Fonte: ADAPTADO DE CHIAVERINI, 2002.

Segundo Chiaverini (2002) a microestrutura tem influência direta nas propriedades mecânicas de um aço. Conforme a quantidade de carbono presente, por exemplo, fases microestruturais distintas podem ser originadas ocasionando variações nas propriedades do material. Outros fatores que também afetam a microestrutura, e conseqüentemente as propriedades, são a velocidade de resfriamento, o tamanho do grão e a condição de fabricação (fundido, trabalhado a quente ou a frio, etc).

Nos aços à temperatura ambiente encontram-se basicamente três fases: ferrita, cementita e perlita).

A ferrita caracteriza-se por apresentar baixa resistência mecânica, baixa dureza e elevada tenacidade (resistência ao impacto). O seu principal elemento é o ferro, podendo conter pequenas concentrações de carbono de até 0,022% em solução sólida.

A cementita é formada quando o carbono excede o seu teor de solubilidade máxima. Esta fase é formada por carbeto de ferro ( $Fe_3C$ ) apresentando alta dureza e baixa tenacidade.

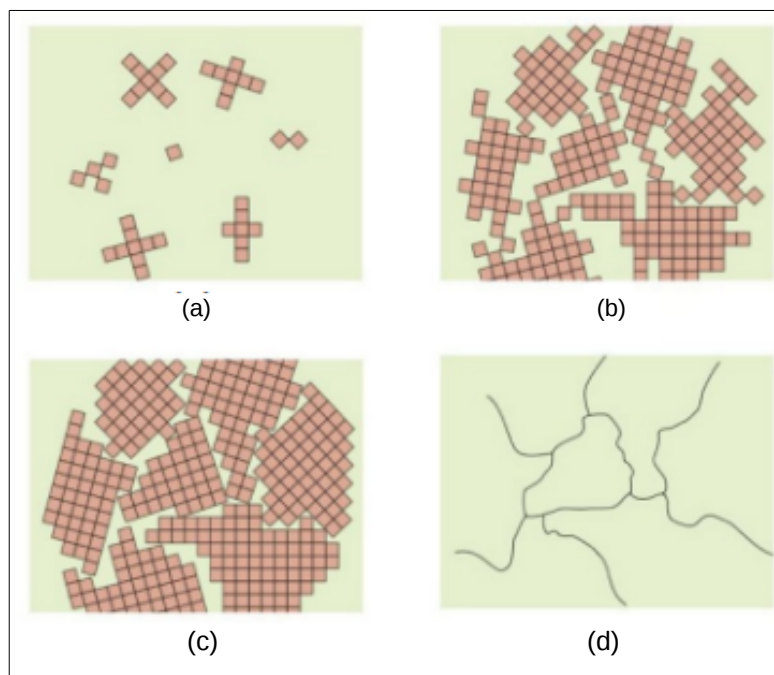
A perlita, nome derivado da estrutura de madre pérola observada ao microscópio, consiste em camadas ou lamelas alternadas de ferrita, mais grossas, e de cementita, lamelas mais finas. Um aço apresenta-se 100% perlítico quando seu teor de carbono é de aproximadamente 0,8%. Mecanicamente a perlita possui propriedades intermediárias entre a ferrita e a cementita (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Conforme Chiaverini (2002) e Callister e Rethwisch (2012), quando aumenta-se o percentual de carbono no aço, conseqüentemente melhora-se as propriedades

mecânicas, como a resistência à tração e a dureza, devido a maior quantidade da fase perlita encontrada no aço. Porém aços com teores acima de 0,8% de carbono começam a precipitar a fase cementita pura que, embora aumente a dureza e resistência mecânica a tração, acaba fragilizando o material devido a sua queda de tenacidade.

O aço é um sólido cristalino, sua microestrutura apresenta-se no formato de grãos equiaxiais, ou pequenos cristais. Durante a solidificação pequenos cristais ou núcleos se formam em diversas posições. Esses cristais possuem orientações aleatórias, como ilustram os quadrados na figura 1(a). A medida que a temperatura vai baixando os átomos restantes no líquido vão se agregando a estrutura dos grãos, fazendo-os crescer, figura 1(b). No final da solidificação as extremidades dos grãos são forçadas umas contra as outras, figura 1(c), e esse desajuste na orientação de grão para grão chama-se contorno de grão. A figura 1(d) ilustra a estrutura de grão típica de metais vista ao microscópio.

Figura 1 Estágios da solidificação com formação de contorno de grão.



Fonte: CALLISTER; RETHWISCH, 2012.

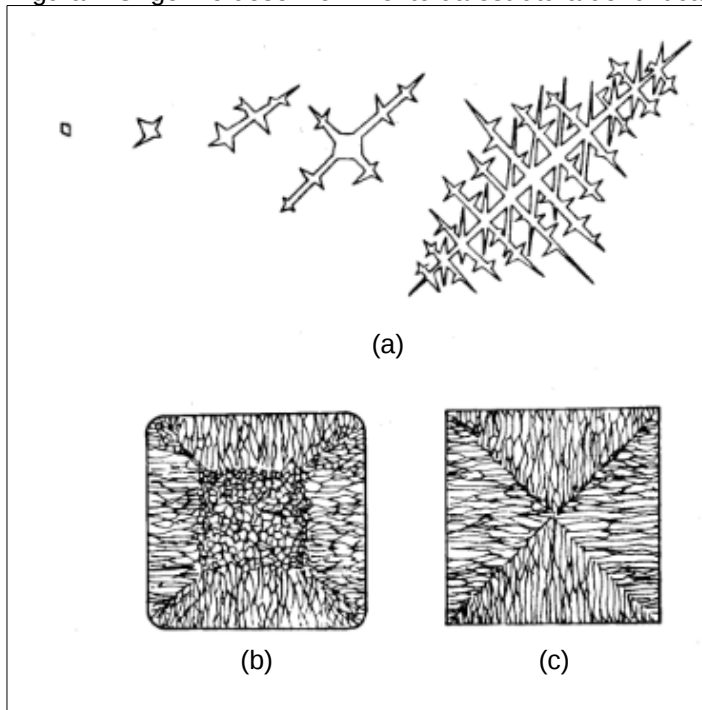
Aços que apresentam menor tamanho de grão possuem melhores propriedades mecânicas, como dureza e resistência à tração, se comparados ao mesmo aço com tamanho de grão maior. Este fato se deve ao contorno de grão funcionar como uma barreira evitando a movimentação e propagação de defeitos

internos dos grãos, tais como fissuras. Há meios de se controlar o tamanho do grão, como a velocidade de resfriamento, por exemplo (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Para Chiaverini (2002) o aço quando fabricado em temperatura ambiente apresenta um menor tamanho de grão e excelentes propriedades mecânicas. Já em aços trabalhos à quente (forjados ou laminados) o tempo elevado de exposição a temperaturas acima de 800° C acarreta no crescimento dos grãos e perda das propriedades mecânicas.

No caso de materiais fundidos, estes apresentam outro tipo de microestrutura, denominada dendrítica. Ela ocorre devido ao resfriamento no interior do molde ocorrer de maneira lenta. Essa microestrutura, diferente de grãos equiaxiais encontrados nos aços trabalhados, se origina e se desenvolve conforme representado na figura 2(a). O seu crescimento é então impedido pelo encontro com as dendritas vizinhas formando os grãos no formato colunar. As figuras 2(b) e 2(c) mostram a estrutura obtida pela solidificação no interior de um molde (CHIAVERINI, 1986).

Figura 2 Origem e desenvolvimento da estrutura dendrítica.



Fonte: CHIAVERINI, 1986.

Os aço fundidos possuem propriedades razoáveis, porém de qualidade inferior ao trabalhado e frequentemente apresentam defeitos típicos dos processos de fundição (CHIAVERINI, 2002).

### 2.1.1 Aço 1020

O aço ABNT 1020, de acordo com a norma NBR 172/2000, é classificado como um aço-carbono de construção mecânica. É utilizado na fabricação de estruturas e componentes mecânicos, devido as suas baixas propriedades mecânicas, como a resistência à tração apresentada na tabela 2. Como resultado, este aço apresenta excelente ductilidade e tenacidade.

Tabela 2 Propriedades mecânicas do aço 1020.

NÚMERO SAE/AISI	Condição	Resistência de escoamento em tração (MPa)	Resistência máxima em tração (MPa)
1020	laminado a quente	207	379
	laminado a frio	393	469

Fonte: ADAPTADO DE NORTON, 2013.

Além de suas propriedades de interesse para a indústria e de seu custo relativamente baixo (já que trata-se de um aço sem elementos de liga e de baixo percentual de carbono), o aço 1020 apresenta excelente soldabilidade. Este fato o torna um dos materiais mais consumidos por todo o mundo.

## 2.2 Soldagem

Existe uma grande variedade de métodos de união de metais que podem ser divididos em duas categorias. A união baseada na ação de forças macroscópicas, como por exemplo a parafusagem, e a união intermolecular, baseada na ação de forças microscópicas. Este método utiliza a aproximação atômica ou molecular até distâncias capazes de realizar a formação de ligações químicas, especialmente ligações metálicas e de Van der Waals. Neste método de união destaca-se a soldagem (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

Conforme *American Welding Society (AWS)* (1997) a soldagem é definida como: “Processo de união de materiais usado para obter a coalescência (união) localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição”. A solda é o

resultado do processo (WAINER; BRANDI; MELLO, 2004).

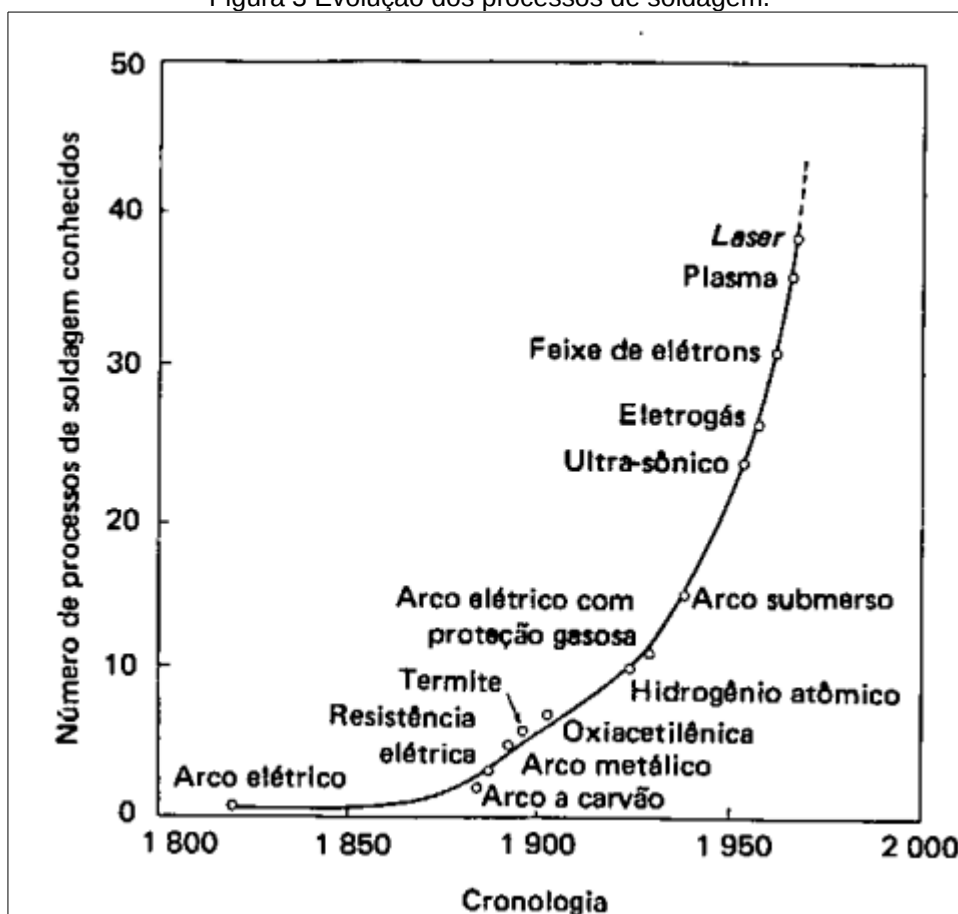
Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2011) a soldagem é o processo de união permanente de metais mais importante utilizado nas indústrias. Segundo Wainer, Brandi e Mello (2004) a soldagem tem importante aplicação na indústria para fabricação, desde componentes eletrônicos, peças e estruturas simples como grades e portões, até equipamentos de alta responsabilidade como plataformas marítimas, reatores nucleares e periféricos, oleodutos, pontes etc.

Para Marques, Modenesi e Bracarense (2011) a soldagem é muito versátil, possibilita flexibilidade na alteração de projeto, custo competitivo, grande número de processos permitindo a união da maioria das ligas metálicas e possibilidade de grande variação de espessura.

Porém algumas limitações na soldagem devem ser observadas. A solda não deve ser aplicada em juntas que necessitam ser desmontadas, por exemplo. Além disso, com a aplicação de energia térmica e mecânica na região da junta soldada podem ser observados o aparecimento de efeitos negativos metalúrgicos, mudanças na microestrutura, alterações nas propriedades mecânicas, distorções, tensões residuais e trincas na peça (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

A soldagem segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2011) já era conhecida desde a pré-história, por exemplo, no museu do Louvre existe um pingente de ouro com indicações de ter sido soldado por volta de 4000 a.C. Na figura 3 pode-se observar uma retrospectiva do número de processos de soldagem desenvolvidos em relação ao tempo. Com a descoberta da energia elétrica a soldagem teve um avanço significativo no desenvolvimento de novas tecnologias (OKUMURA; TANIGUCHI, 1992).

Figura 3 Evolução dos processos de soldagem.



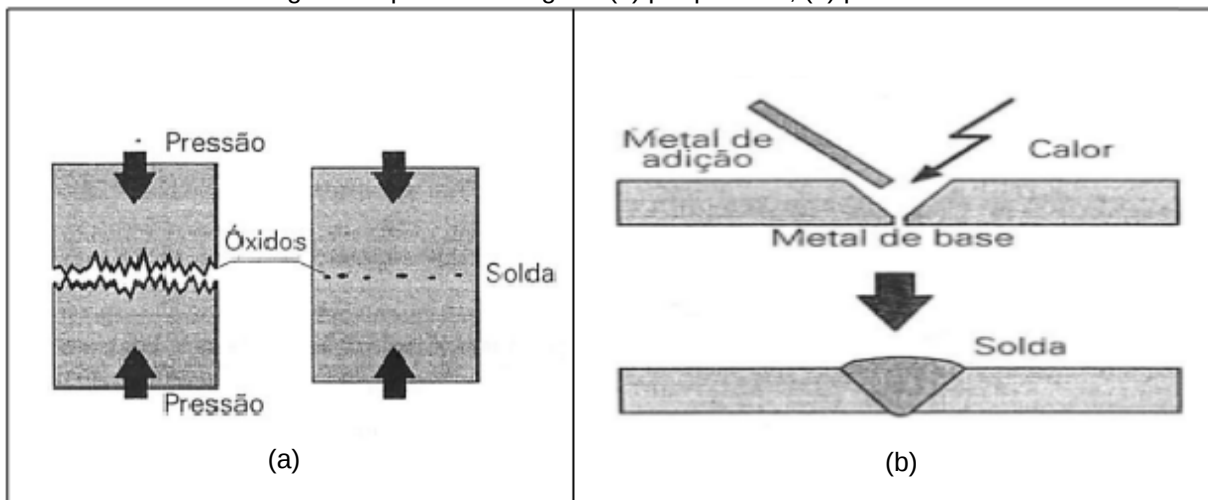
Fonte: OKUMURA; TANIGUCHI, 1992.

Conforme Marques, Modenesi e Bracarense (2011) os processos de soldagem podem ser classificados em dois grandes grupos, de acordo com o método de obtenção da solda. O primeiro se baseia em deformar as superfícies de contato possibilitando a aproximação dos átomos (as superfícies podem ser aquecidas de modo a facilitar a deformação). Este método é denominado soldagem por pressão ou por deformação (figura 4 (a)). Neste grupo encontra-se os processos de soldagem por explosão, por difusão, por fricção, entre outros.

O segundo método chamado de soldagem por fusão consiste no aquecimento localizado na região da junta até a fusão do metal base e do metal de adição. Com a fusão as superfícies são eliminadas e com a solidificação do metal fundido é formada a solda (figura 4 (b)). Este grupo compreende um grande número de processos subdivididos de acordo com tipo de fonte de energia empregada para fundir as peças. Os mais expressivos industrialmente são os processos que utilizam o arco elétrico como fonte de energia como, por exemplo, arco submerso, MIG/MAG, TIG, entre outros (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).



Figura 4 Tipos de soldagem: (a) por pressão; (b) por fusão.



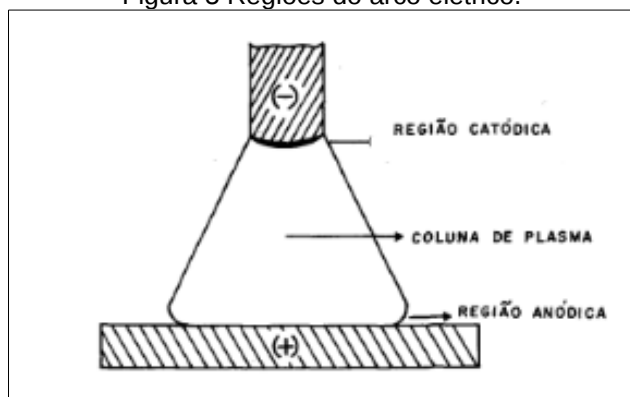
Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARANSE, 2011.

### 2.2.1 Arco elétrico

A soldagem a arco elétrico possui atualmente uma grande importância industrial, apresentando boas características como baixo custo do equipamento, facilidade de controle e concentração adequada de energia. É a fonte de calor mais utilizada na soldagem por fusão (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

Segundo Wainer, Brandi e Mello (2004) o arco elétrico consiste em uma descarga elétrica mantida através de um gás ionizado (plasma). Em processos de soldagem, este gás é ionizado entre um eletrodo (conectado em um dos pólos de uma fonte de tensão) e a superfície da peça a ser soldada (conectada ao outro pólo). O arco elétrico é constituído por três regiões: região anódica, coluna de plasma e região catódica (conforme ilustrado na figura 5). A coluna é formada por elétrons livres, íons positivos e átomos neutros. Os elétrons são emitidos durante a ionização do gás e acelerados pela corrente elétrica da região catódica (pólo negativo) para a região anódica (pólo positivo). A movimentação destas cargas elétricas e a ocorrência de choques entre elas é responsável pela intensa geração do calor, suficiente para fundir qualquer metal.

Figura 5 Regiões do arco elétrico.

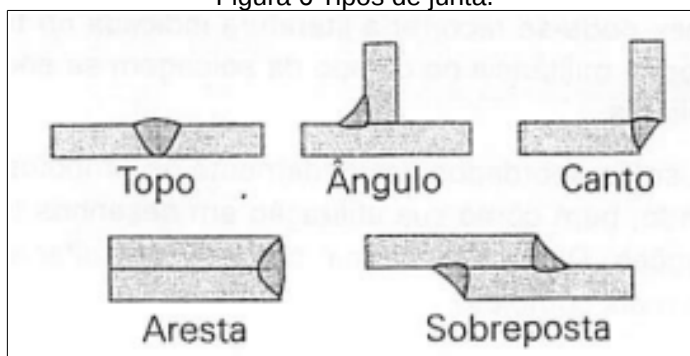


Fonte: WAINER; BRANDI; MELLO, 2004.

## 2.2.2 Junta para soldagem

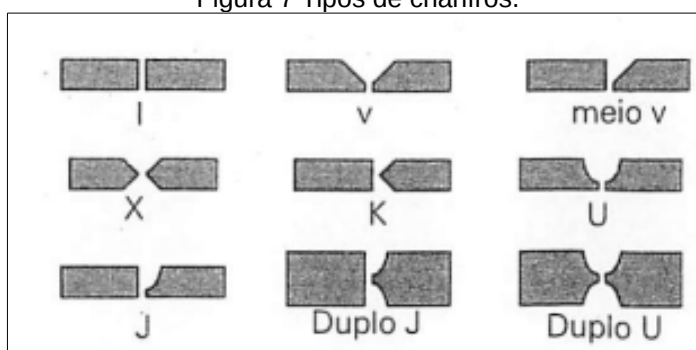
Para Marques, Modenesi e Bracarense (2011) a região que será unida por soldagem é denominada junta. Os tipos de juntas são classificados de acordo com o posicionamento das peças. Os tipos mais utilizados de junta são apresentados na figura 6. Normalmente devido as dimensões da peça ou necessidade do projeto é preciso realizar uma preparação nas peças, em especial na junta, tais como limpeza para remoção de óxidos e óleos e confecção de chanfros. Os chanfros mais comuns são mostrados na figura.7.

Figura 6 Tipos de junta.



Fonte: MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011.

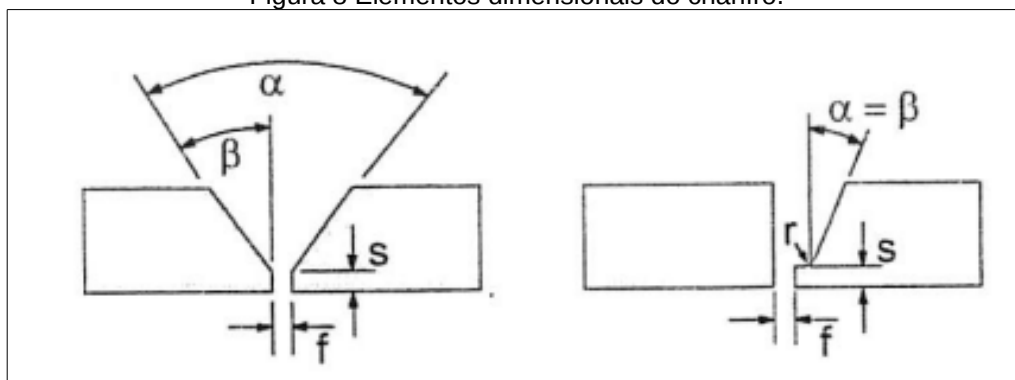
Figura 7 Tipos de chanfros.



Fonte: MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011.

O chanfro é definido de modo a atender especificações de projeto, porém seu principal objetivo é permitir o acesso até o fundo da junta, buscando reduzir a quantidade de metal de adição usada para o preenchimento da junta. Afim de atender esses requisitos o chanfro possui elementos dimensionais, ilustrados na figura 8, para auxiliar em sua fabricação (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

Figura 8 Elementos dimensionais do chanfro.



Fonte: MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011.

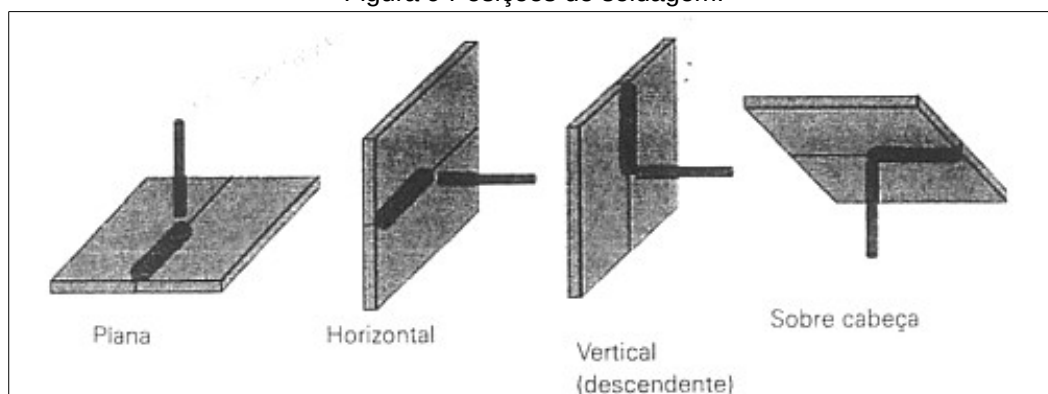
Conforme Marques, Modenesi e Bracarense (2011) a abertura da raiz, folga ou fresta ( $f$ ), é a menor distância entre as peças. A face da raiz ou nariz ( $s$ ), é a parte não chanfrada da junta. O ângulo de abertura da junta ou ângulo do beisel ( $\beta$ ) é o ângulo da parte chanfrada. E o ângulo de chanfro ( $\alpha$ ) é a soma dos ângulos do beisel.

### 2.2.3 Posição de soldagem

A posição de soldagem tem grande influência no grau de dificuldade da execução e na produtividade da solda. Determina-se a posição de soldagem conforme a posição da peça e do eixo da solda, que pode ser plana, horizontal, vertical e sobrecabeça. A figura 9 mostra as posições de soldagem para juntas de topo (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2011) dentre as posições de soldagem a plana é a posição de mais operação e resulta em uma maior produtividade. As posições, segundo a *American Society of Mechanical Engineers* (ASME), são representadas por um dígito e um número. Em juntas de topo, por exemplo, as posições plana, horizontal, vertical e sobrecabeça são representadas respectivamente por 1G, 2G, 3G e 4G.

Figura 9 Posições de soldagem.



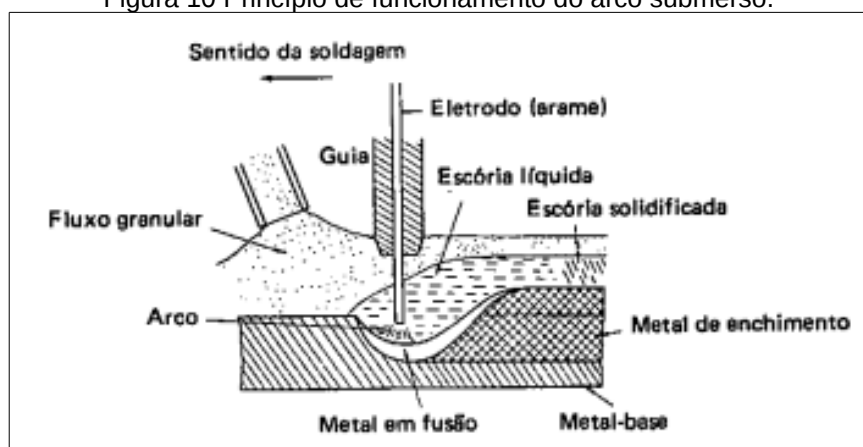
Fonte: MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011.

Em alguns processos de soldagem a realização do procedimento nas posições vertical ou sobre cabeça são inviáveis. Um exemplo é o caso do processo de soldagem com arco submerso, que por utilizar material granulado como proteção da poça de fusão, apresenta problemas quando sujeitos a ação da gravidade.

#### 2.2.4 Processo de soldagem por arco submerso

De acordo com Wainer, Brandi e Mello (2004) a soldagem por arco submerso é um processo de união a arco elétrico entre um eletrodo nu e a peça. O arco permanece constantemente sob uma camada de material granular fundente, chamado fluxo, conforme apresentado na figura 10. Caracteriza-se por ser um processo estável e suave.

Figura 10 Princípio de funcionamento do arco submerso.



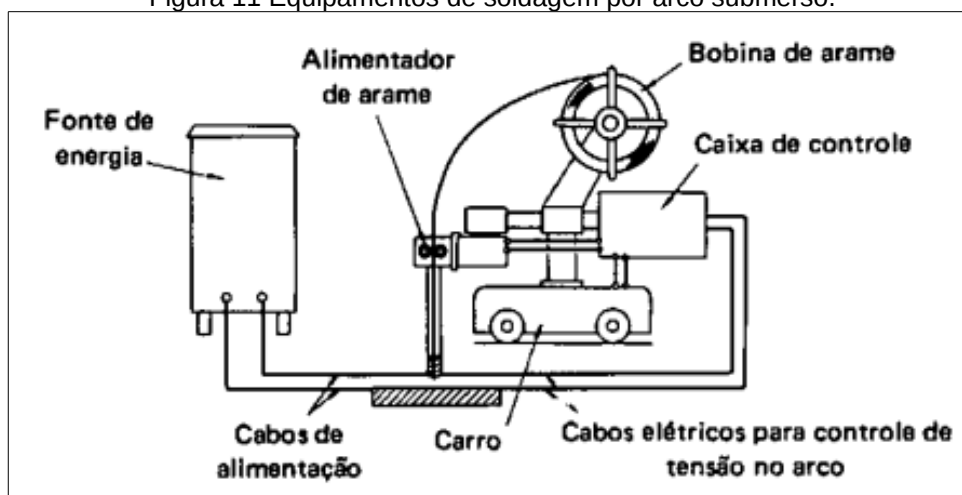
Fonte: OKUMURA; TANIGUCHI, 1992.

Para Okumura e Taniguchi (1992) a principal vantagem da utilização do arco

submerso está em sua alta eficiência. Nele o uso de arames de grandes diâmetros aliada as altas correntes de soldagem proporcionam uma penetração bastante profunda. Ainda devido ao arco e a poça de fusão estarem protegidas da atmosfera pelo fluxo, tem-se um alto rendimento térmico no processo permitindo que os chanfros da junta sejam pequenos, resultando em economia de material consumível.

A maior limitação deste processo, conforme Marques, Modenesi e Bracarense (2011), está relacionada a posição de soldagem, não sendo possível a soldagem fora da posição plana ou horizontal. A força da gravidade que mantém a camada de fluxo sobre a peça e a poça de fusão, além de que o metal líquido da poça tende a escorrer. Dentre os diversos tipos de equipamentos para soldagem por arco submerso, o mais utilizado na prática está mostrado na figura 11.

Figura 11 Equipamentos de soldagem por arco submerso.

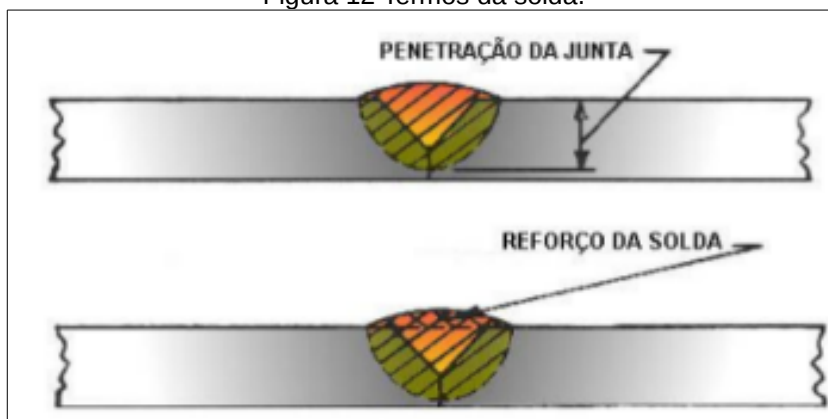


Fonte: OKUMURA; TANIGUCHI, 1992.

O cabeçote de soldagem, o reservatório do fluxo e o carretel de arame estão montados sobre um carro, esse se desloca sobre trilhos apropriados que é o sistema móvel. Na caixa de controle são selecionados os parâmetros de trabalho. As principais variáveis durante a soldagem são a corrente de soldagem, tensão do arco e velocidade de soldagem (OKUMURA; TANIGUCHI, 1992).

A correta relação dos parâmetros de soldagem garante à solda um excelente aspecto visual, proporcionando boa penetração (profundidade de fusão a partir da superfície da peça) e reforço adequado (quantidade de material acima da superfície da peça). Estes elementos do perfil de um cordão de solda estão mostrados na figura 12 (ESAB, 2004).

Figura 12 Termos da solda.



Fonte: ADAPTADO DE ESAB, 2004.

A corrente de soldagem é o parâmetro mais influente no processo. Quanto mais alta a corrente utilizada maior será o calor gerado durante a soldagem, podendo-se controlar a taxa de fusão do arrame e a profundidade de fusão da solda. Utilizar alta intensidade de corrente resultará em uma fusão excessivamente profunda e o metal de solda fundido poderá vaziar. Porém, se a corrente usada for baixa ocasionará falta de penetração do metal de solda fundido e reforço insuficiente.

A tensão do arco é o diferencial de potencial elétrico entre a ponta do eletrodo e a superfície do metal de solda fundido. A tensão varia conforme o comprimento do arco e distância entre o eletrodo e a poça de fusão. Se o comprimento do arco aumenta, a tensão aumenta, influenciando principalmente na geometria da zona de fusão e no reforço gerado. Altas tensões do arco produzem cordões mais largos, mais planos e menos profundos.

Os efeitos na mudança de velocidade de soldagem seguem um modelo geral quando há uma boa combinação entre as variáveis do processo. Então se a velocidade de soldagem aumentar, diminui a quantidade de calor transferido pelo arco, diminui a quantidade de arrame de solda por unidade de comprimento de solda e diminui o reforço de solda. Inversamente se a velocidade diminuir, aumenta a quantidade de calor transferido pelo arco, aumenta a quantidade de arrame de solda por unidade de comprimento de solda e aumenta o reforço de solda (ESAB, 2004).

### 2.3 Metalurgia da soldagem

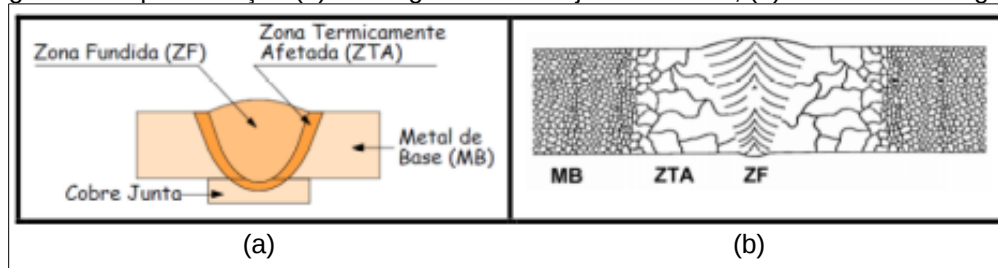
A soldagem por fusão, conforme já mencionado, realiza a aplicação de uma

alta densidade de energia em um pequeno volume de material. Isso pode ocasionar modificações microestruturais e alterações nas propriedades dentro e próximo da região da solda (MODENESI, 2006).

As alterações ocorridas na soldagem são chamadas de transformações metalúrgicas. Tais transformações provocam o surgimento de tensões residuais, podendo gerar defeitos como trincas, corrosão sob tensão e fadiga em juntas soldadas.

A junta soldada é dividida basicamente em três regiões principais, sendo elas: i) o metal de base; ii) a zona fundida e; iii) a zona afetada pelo calor (ZAC) ou zona termicamente afetada (ZTA). A figura 13(a) ilustra estas três regiões em uma junta soldada e a figura 13(b) ilustra esquematicamente a variação microestrutural comum em cada região (MODENESI, 2004).

Figura 13 Representação (a) das regiões de uma junta soldada; (b) do tamanho do grão.



Fonte: MODENESI, 2004.

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2011) a região do metal de base é a região mais afastada do cordão de solda e não foi afetada pelo calor. Esta região não sofreu alterações em sua microestrutura e propriedades mecânicas após o processo de soldagem, devido a temperatura atingida nesta região ser inferior as temperaturas que promovam transformações metalúrgicas no material.

A zona fundida é a região na qual o metal de adição fundiu-se e solidificou-se durante a soldagem. A temperatura atingida nesta região foi superior à temperatura de fusão do material. Durante a soldagem o metal líquido solidifica-se formando o cordão de solda.

A solidificação da poça de fusão ocorre principalmente pelo crescimento dos grãos do metal de base. Deste modo a zona fundida apresenta uma estrutura metalográfica colunar, também chamada de estrutura dendrítica, apresentando características de metal fundido (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

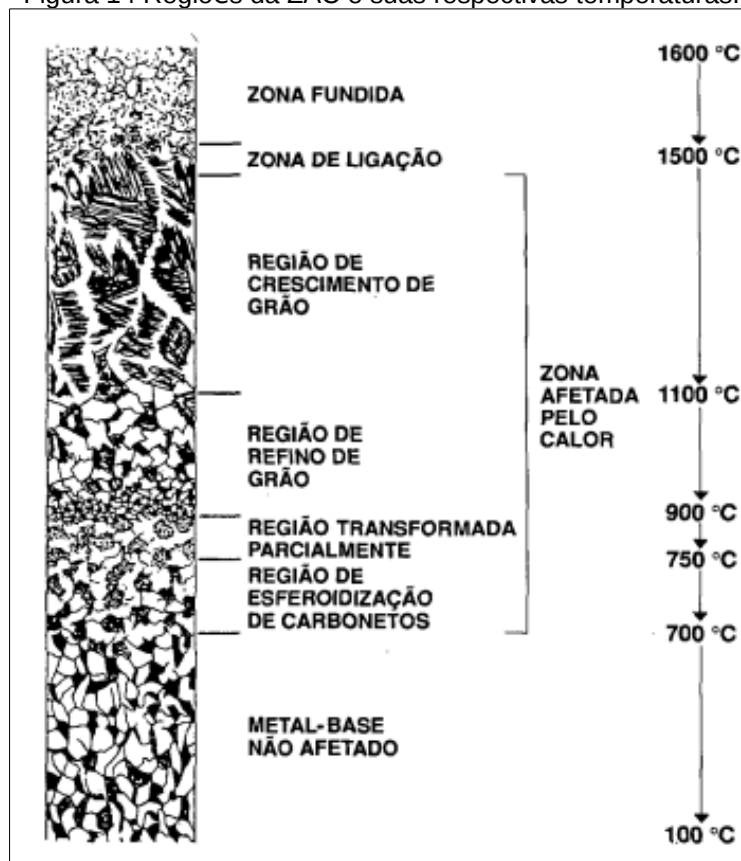
A terceira região de uma junta soldada, e que apresenta a maior

complexidade relacionada a mudanças microestruturais após soldagem, é a ZAC (zona afetada pelo calor)

### 2.3.1 Zona afetada pelo calor

A ZAC é uma região que se estende ao longo de uma faixa entre a zona fundida e o metal de base. Esta região da solda é submetida a temperaturas capazes de modificar a estrutura do metal. Tem como característica marcante o crescimento de grãos, surgimento de morfologias distintas para as fases do metal base e modificação das propriedades mecânicas devido ao surgimento de tensões residuais. A figura 14 ilustra as regiões da ZAC e suas respectivas temperaturas (WAINER; BRANDI; MELLO, 2004).

Figura 14 Regiões da ZAC e suas respectivas temperaturas.



Fonte: WAINER; BRANDI; MELLO, 2004.

A região de crescimento de grão é atingida pelas maiores temperaturas sofrendo um ciclo de rápido aquecimento e resfriamento, ocasionando nesta região a mudança microestrutural, tornando-a de granulação grosseira. As propriedades



mecânicas desta região dependem do tamanho do grão e da composição química do metal de base.

Na região de refino de grãos ocorre o aquecimento até uma faixa menor de temperatura, produzindo uma microestrutura refinada composta por ferrita e ou perlita, correspondendo a microestrutura típica do aço normalizado e com boa tenacidade (WAINER; BRANDI; MELLO, 2004).

Na região parcialmente transformada ocorre um aumento na concentração dos elementos de liga em relação ao metal base, podendo apresentar microestrutura similar à de um aço temperado, porém com propriedades mecânicas inferiores ao metal base.

A região de esferoidização de carbonetos ocorre nas menores temperaturas de transformações do aço, onde as lamelas de cementita da perlita podem adquirir um formato de esferas, ocasionando uma perda na resistência mecânica (WAINER; BRANDI; MELLO, 2004).

Além da alteração no tamanho, os grãos sofrem mudanças em sua morfologia, podendo ser encontradas fases distintas das presentes no metal de base. O *International Institute of Welding* (IIW), baseado na observação com microscópio ótico, desenvolveu um sistema de classificação para esses constituintes que se tornou o mais aceito. Segundo este sistema as fases são classificadas em: Martensita (M), Ferrita acicular (FA), Ferrita de contorno de grão (FP(G)), Ferrita poligonal intragranular (FP(I)), Ferrita com segunda fase alinhada (FS(A)), Ferrita com segunda fase não alinhada (FS(NA)) e agregado ferrita-carboneto (FC). Algumas destas morfologias podem ser observadas na figura 15 (MIYAHARA, 2008).

A martensita é encontrada em materiais soldados com maior teor de carbono ou outros elementos de liga e em soldagens com maior velocidade de resfriamento. Apresenta microestrutura em forma de agulhas, possui alta resistência mecânica e dureza, porém baixa tenacidade.

A ferrita acicular é uma estrutura resultante do crescimento de agulhas de ferrita em diferentes direções. Esta estrutura de ferrita possui granulação muito fina, onde os grãos aciculares têm espessura na ordem de 2 $\mu$ m e a relação comprimento/largura deve ser menor que 4:1. É considerada desejável por apresentar boas propriedades mecânicas.

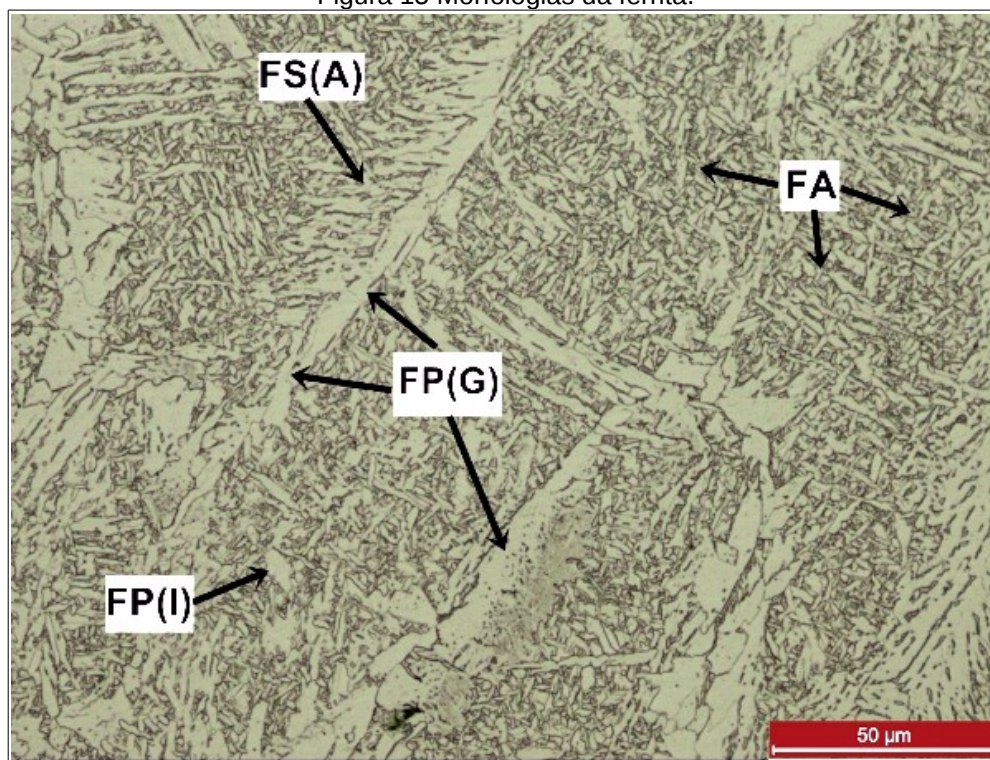
A ferrita de contorno de grão está associada aos contornos de grão. É de fácil identificação, devido ao seu aspecto claro e liso e possui formato de veios ou grãos

poligonais. Forma-se a taxas de resfriamento muito lento. A ferrita poligonal intragranular encontra-se geralmente no formato poligonal com tamanho maior que o triplo da largura média da ferrita acicular.

A ferrita com segunda fase alinhada é formada por grãos relativamente grosseiros e paralelos, com relação de comprimento-largura maior que 4:1. Este tipo de microestrutura associado a constituintes ricos em carbono presentes em seus contornos a tornam de características pouco desejáveis. A ferrita de segunda fase não alinhada circunda ripas de FA ou outros microconstituintes e não apresenta forma paralela.

Os agregados de ferrita-carboneto são constituintes ricos em carbono rejeitado pela ferrita transformada em elevadas temperaturas. Aparecem em pequenas quantidades e observado por microscopia ótica formam áreas escurecidas na microestrutura (MIYAHARA, 2008).

Figura 15 Morfologias da ferrita.



Fonte: TRINDADE et al., 2017.

Devido a grande variação microestrutural, a inconveniência da ZAC em juntas soldadas é uma realidade, porém seus efeitos no aço podem ser minimizados com a utilização de técnicas apropriadas.

## 2.4 Técnicas para reduzir o efeito da ZAC

Como visto, a soldagem é um excelente processo industrial pois possui como vantagens a redução no tempo de fabricação de peças além de custos mais competitivos. Entretanto, sua grande desvantagem é geração da ZAC. Essa região da junta soldada não possui as mesmas propriedades mecânicas do metal de base e também não permite que se acrescente elementos de liga para minimizar este efeito (como na zona fundida por exemplo). Para reduzir os efeitos da ZAC e melhorar a qualidade da junta soldada, indica-se a utilização de métodos auxiliares envolvendo o controle do ciclo térmico a que o material é submetido. Entre elas estão o pré-aquecimento da peça antes da soldagem, o uso de tratamentos térmicos após o processo ou o a aplicação de uma segunda camada de solda.

### 2.4.1 Pré-aquecimento

O aquecimento de uma junta soldada antes da execução da soldagem é utilizado para se obter um melhor controle das taxas de resfriamento. Esse método busca promover uma alteração no ciclo térmico do metal fundido, reduzindo a taxa de resfriamento. Uma variedade de efeitos são alcançados, os quais incluem a redução da quantidade de microconstituintes duros e frágeis, redução das tensões residuais e favorecimento da remoção do hidrogênio (MARTINS et al, 2011).

A temperatura de pré-aquecimento recomendada está relacionada com a soldabilidade da peça, a qual leva em consideração o teor de carbono e outros elementos de liga, denominado carbono equivalente. O IIW sugere uma equação (1) para determinar o valor do carbono equivalente baseada na composição química do aço (ESAB, 2004).

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} \quad \text{Equação (1)}$$

Para Silva e Kobayashi (2007) apesar da aparente simplicidade, para se obter bons resultados com o pré-aquecimento é necessário que a temperatura seja alcançada em toda a espessura do material e em ambos os lados da junta antes de efetuar a soldagem. A tabela 3 fornece alguns valores sugeridos de temperaturas de

pré-aquecimento para diferentes valores de carbono equivalente.

Tabela 3 Temperatura de pré-aquecimento x Carbono equivalente

<b>Carbono equivalente (%)</b>	<b>Pré-aquecimento recomendado</b>
até 0,30	opcional
0,30 - 0,45	100 - 200°C
acima de 0,45	200 - 375°C

Fonte: ESAB, 2004.

A utilização deste método em campo fica restringido, devido a dificuldade de aplicação de calor nas juntas a serem soldadas e no controle das temperaturas de pré-aquecimento. Além disso, peças de grande porte tornam-se trabalhosas pelo fato de seu manuseio e movimentação serem difíceis após aquecidas.

#### **2.4.2 Tratamentos térmicos**

Tratamento térmico consiste em um ciclo de operações de aquecimento e resfriamento, sob condições controladas, buscando modificar as propriedades mecânicas de acordo com as características desejadas (CHIAVERINI, 2002).

Para Chiaverini (2002) os tratamentos térmicos têm como principais objetivos remover tensões internas decorrentes de processos de fabricação, controlar o tamanho de grão, aumentar a resistência ao desgaste e ao calor e melhorar a usinabilidade. Conforme Oliveira (2015) os tratamentos térmicos pós-soldagem mais importantes na recuperação dos aços são o recozimento e a normalização.

O recozimento busca recuperar as propriedades de um material que foram modificadas por um tratamento térmico ou um trabalho mecânico, homogeneizar ou refinar estruturas brutas e aliviar tensões internas oriundas de processos anteriores. O material é aquecido até temperaturas específicas, variando segundo a composição química e seguido de resfriamento lento e controlado, dentro do próprio forno (OLIVEIRA, 2015).

A normalização se assemelha ao recozimento, diferenciado pelo resfriamento, que ocorre ao ar livre. Como resultado obtêm-se uma estrutura de grãos mais refinada e homogênea, apresentando melhoras na dureza e na resistência mecânica se comparado ao recozimento. Aplica-se principalmente em peças forjadas e

fundidas de grandes dimensões (CHIAVERINI, 2002).

De modo geral os tratamentos térmicos pós-soldagem são caros e demorados, decorrentes do longo tempo de permanência na temperatura de tratamento e agravados pela dificuldade na aplicação em estruturas de grande porte.

### 2.4.3 Técnica de soldagem com dupla camada

Buscando flexibilidade e agilidade na execução de projetos soldados e menores custos, métodos alternativos são desenvolvidos contribuindo positivamente para a indústria. Entre outras podemos citar a técnica da dupla camada.

A técnica da dupla camada consiste na adequada sobreposição dos ciclos térmicos de modo que a energia térmica gerada pela segunda camada de solda promova o refino e o revenimento dos grãos da região de crescimento de grão da ZAC da primeira camada (ASSUMPÇÃO, 2006).

Segundo Assumpção (2006), para promover o refino na ZAC da primeira camada a energia utilizada na segunda camada deve ser maior que a energia da primeira camada. A energia empregada no processo durante a soldagem é determinada pela taxa de transferência de calor, ou aporte térmico, expresso pela equação (2), determinada em função dos parâmetros de soldagem (ESAB, 2004).

$$E = \frac{U \times I \times 60}{V_s \times 1000} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

E é o aporte térmico (kJ/mm)

U é a tensão de soldagem (V);

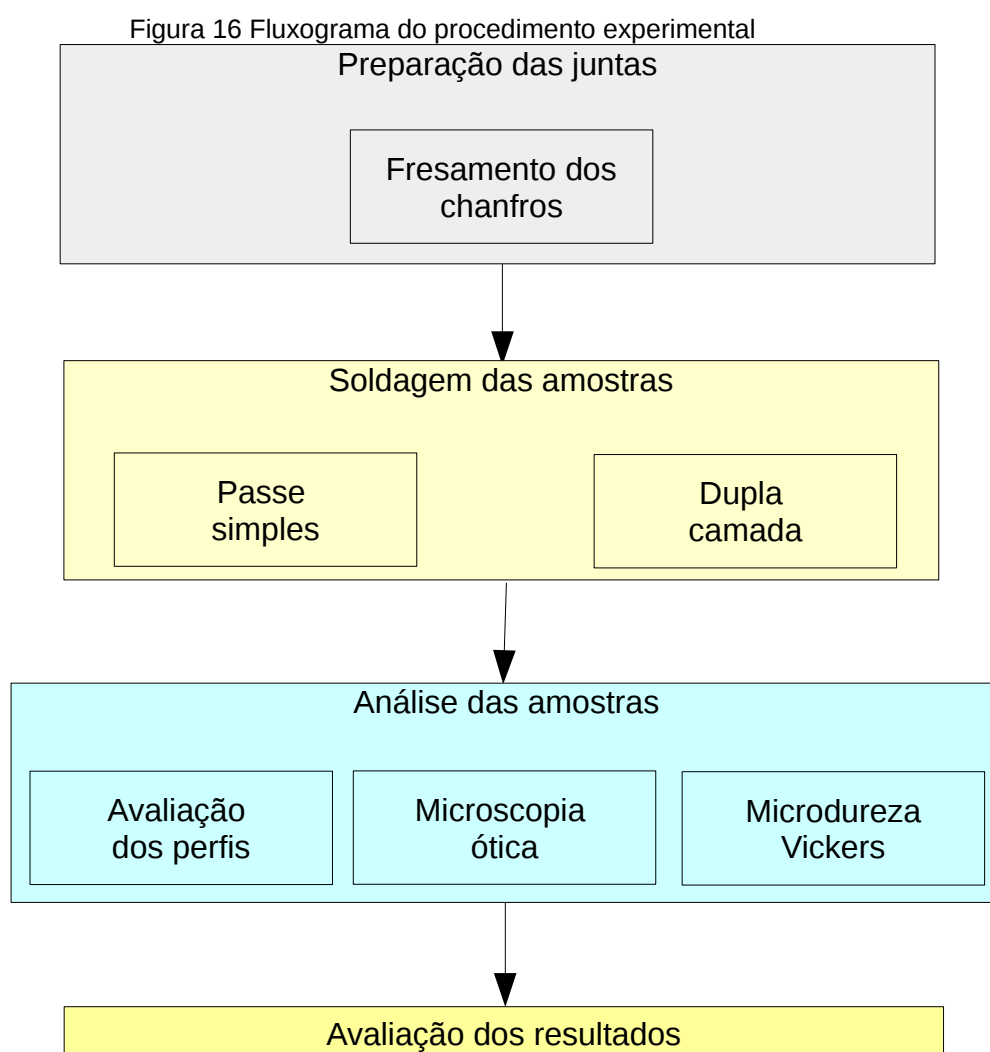
I é a corrente de soldagem (A);

V<sub>s</sub> é a velocidade de soldagem (mm/min).

Esse método não somente serve de suporte para a soldagem de reparo, executada em peças de difícil acesso, manutenção e aplicação de tratamento térmico, mas também é utilizado na soldagem de fabricação de peças, componentes ou estruturas atendendo as exigências de projeto, otimizando o processo e minimizando os custos (ANDRADE, 2011).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho de pesquisa desenvolvido foi essencialmente experimental, utilizando a técnica de dupla camada durante processo de soldagem por arco submerso em peças de aço ABNT 1020 para avaliação microestrutural da ZAC. A parte experimental seguiu a sequência representada na figura 16. Todos os procedimentos foram realizados nos laboratórios do IFSC/ Campus Jaraguá do Sul-Rau.



Fonte: O AUTOR, 2019.

#### 3.1 Materiais

O metal base utilizado neste trabalho foi o aço ABNT 1020, que possui vasta aplicação na indústria. Entre suas principais aplicações estão: i) fabricação de

componentes como, eixos, tubos, virabrequins e engrenagens para cementação (tratamento para endurecer a superfície); ii) construção de estruturas de máquinas; e iii) construção civil. Este aço possui baixo teor de carbono e apresenta excelentes características como soldabilidade, usinabilidade e ductilidade.

A composição química do aço ABNT 1020 é estabelecido pela norma NBR 87/2000 e deve atender aos padrões exigidos, conforme descrito na tabela 4.

Tabela 4 Composição química do aço ABNT 1020( % em massa).

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

Fonte: ABNT, 2000.

Os corpos de prova (CP's) para soldagem foram retirados de uma barra chata com perfil retangular de 15,9 mm de espessura e 75 mm de largura. Para isso foram realizados cortes, com equipamento de corte a plasma (Marca Sumig – Mod. Cutmaster 82), em comprimentos de 160 mm. Foram cortados 6 pares de CP's para posterior soldagem em 6 condições distintas.

## 3.2 Métodos

A execução da pesquisa iniciou com a seleção e obtenção do material seguindo para fabricação e preparação dos CP's. Definidos os parâmetros para soldagem foram realizadas as sequências de soldagem. Diferentes níveis energéticos foram utilizados em cada condição de soldagem com o intuito de gerar ciclos térmicos diferentes no material buscando melhorias na microestrutura e nas propriedades mecânicas. Após soldados foram retiradas amostras de todos os CP's que seguiram para análise por microscopia óptica e microdureza Vickers para avaliação da microestrutura e dureza da ZAC.

### 3.2.1 Preparação das Juntas

Para aumento da penetração de soldagem, já que as barras utilizadas apresentam grande espessura, foram confeccionados chanfros nas amostras. Para isto foi utilizada uma fresadora universal da marca Diplomat (mod. 3001). Primeiramente foram retiradas as imperfeições das extremidades (rebarbas),

oriundas do processo de corte, seguida de faceamento até um comprimento total de 150 mm. Posteriormente, com o auxílio de um esquadro magnético, os CP's foram fixados com ângulo de  $45^\circ$  para usinagem do chanfro, conforme figura 17.

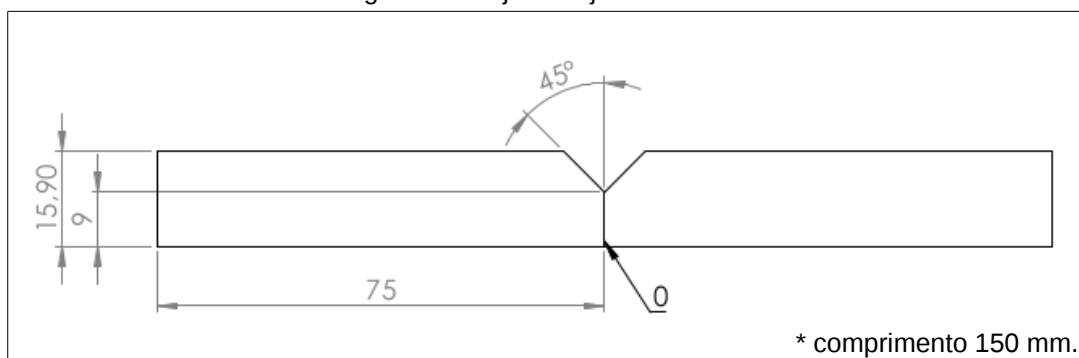
O fresamento das faces e dos chanfros foi realizado para a obtenção das seguintes dimensões: ângulo do bisel ( $\beta$ ) =  $45^\circ$ , face da raiz ( $s$ ) = 9mm e para realização da soldagem a abertura da raiz ( $f$ ) = 0mm. O projeto da junta soldada está ilustrado na figura 18.

Figura 17 Fresamento do chanfro.



Fonte: O AUTOR, 2019.

Figura 18 Projeto da junta soldada.



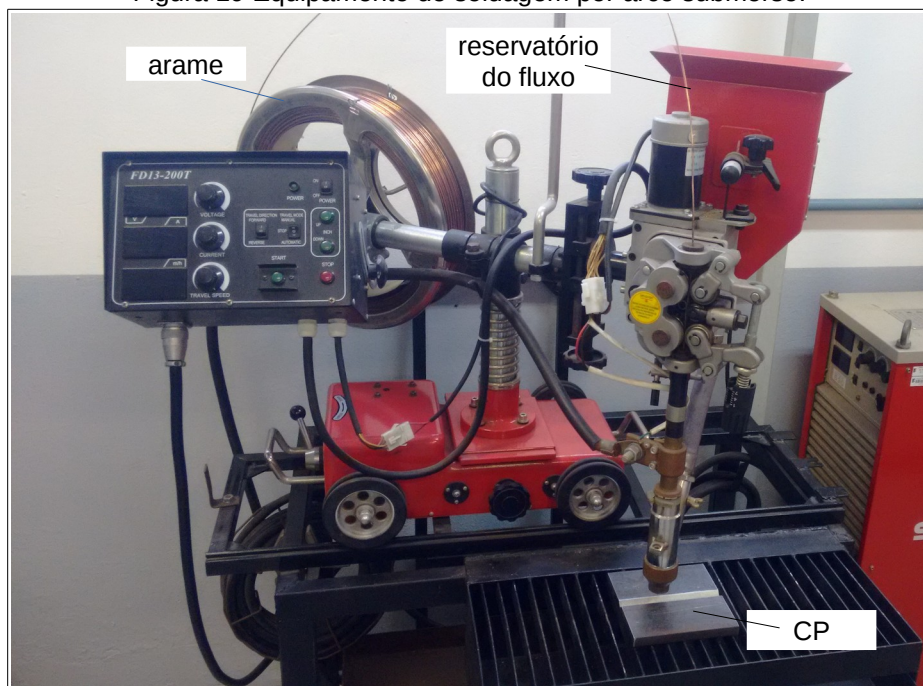
Fonte: O AUTOR, 2019.



### 3.2.2 Soldagem das Amostras

Para realização da soldagem foi utilizado um equipamento para soldagem a arco submerso da marca Sumig, modelo AUTOARC 630 (figura 19).

Figura 19 Equipamento de soldagem por arco submerso.



Fonte: O AUTOR, 2019.

O arame usado durante o processo de soldagem, em conformidade com a AWS, foi o arame para aços carbono de código A5.17 EL12 e diâmetro de 2,38 mm. Este consumível possui um revestimento de cobre para melhor funcionamento e proteção adicional contra corrosão.

O fluxo utilizado foi da marca Sumig código A5.17 F7A2-EL12, indicado para soldagem com o arame acima citado, com base nas especificações da AWS.

Os parâmetros de soldagem para a primeira camada foram selecionados dentro da faixa de trabalho indicada no equipamento para espessuras semelhantes a face da raiz. Segundo esta indicação padronizou-se a tensão em 34 V, a corrente em 550 A e a velocidade de soldagem em 25 m/h (ou 416,67 mm/min) para as primeiras camadas de as todas as amostras.

Conforme Andrade (2011) e Assumpção (2006), para a confecção do segundo passe (segunda camada de solda) recomenda-se a utilização de energias de

soldagem iguais ou superiores as aplicadas na primeira camada. Para isso as condições de soldagem das segundas camadas foram definidas através da diminuição da velocidade de soldagem, aumentando-se assim a energia de soldagem (conforme equação 2 apresentada no capítulo 2). Os valores de tensão e corrente mantiveram-se fixos (34 V e 550 A, respectivamente).

A velocidade de soldagem utilizada em todas as condições e a energia de soldagem resultante são apresentados na tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros de soldagem.

CP	Camada	Velocidade de soldagem (mm/min)	Energia de soldagem (kJ/mm)
1	1°	416,67	2,69
2	2°	416,67	2,69
3	2°	366,67	3,06
4	2°	316,67	3,54
5	2°	266,67	4,21
6	2°	216,67	5,18

Fonte: O AUTOR, 2019

### 3.2.3 Avaliação dos perfis das juntas soldadas

Após soldagem, amostras da seção dos cordões de solda para cada condição de soldagem foram coletadas. Esta remoção foi realizada via corte por eletroerosão a fio utilizando-se uma máquina de corte da marca AgieCharmilles modelo FW 1U (figura 20) localizada no laboratório de eletroerosão do IFSC/ Campus Rau.

Figura 20 Máquina de eletroerosão.



Fonte: O AUTOR, 2019.

As amostras foram cortadas de modo a se obter um perfil da junta, conforme mostrado na figura 21 a seguir. O CP 1 possui apenas uma camada de solda, servindo como base para análises posteriores. Os CP's de 2 à 6 possuem aplicação da dupla camada, as quais foram expostas a um aumento gradual na energia de soldagem.

Figura 21 Amostras após corte da seção da solda.



Fonte: O AUTOR, 2019.

Em seguida os perfis foram analisados e medidos os valores de largura e profundidade de penetração dos cordões. Estas dimensões foram medidas com auxílio do software *IMAGEJ*.

### 3.2.4 Microscopia Óptica

Para permitir a análise através de microscópio óptico, fez-se necessária a preparação metalográfica das amostras. Esta preparação incluiu a etapa de lixamento, com lixas de granulometria decrescente (#80, #180, #320, #600, #800 e #1200) em uma politriz. A cada mudança de lixa a amostra foi girada 90° na direção do lixamento. Este procedimento garantiu que se observasse na superfície da peça se todos os riscos da lixa anterior haviam sido removidos.

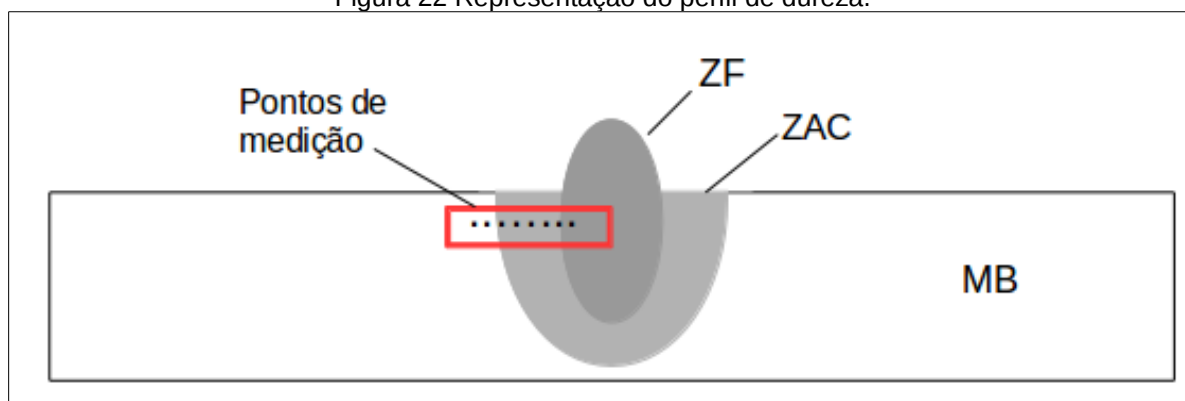
Na sequência, fez-se o polimento das amostras utilizando alumina com granulometria média de 1 $\mu$ m. Por fim, foi realizado o ataque químico, com solução de ácido nítrico (Nital 3%), a fim de revelar a microestrutura da ZAC nas amostras. As amostras foram mergulhadas na solução por cerca de 15 segundos.

Após o ataque químico as amostras foram analisadas em microscópio óptico com câmera digital acoplada.

### 3.2.5 Microdureza Vickers

A medição da microdureza foi realizada em pontos estratégicos das amostras de modo a fazer um perfil da microdureza, conforme representação na figura 22. Foram realizadas 8 medições, sendo 2 no metal base, 5 na ZAC e 1 na zona fundida.

Figura 22 Representação do perfil de dureza.



Fonte: O AUTOR, 2019.

Para a medição da microdureza Vickers utilizou-se um durômetro da marca Future Tech, modelo FM800, com penetrador de diamante. As condições adotadas foram a aplicação de uma carga de 500 gf e tempo de aplicação da carga de 10 segundos.

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

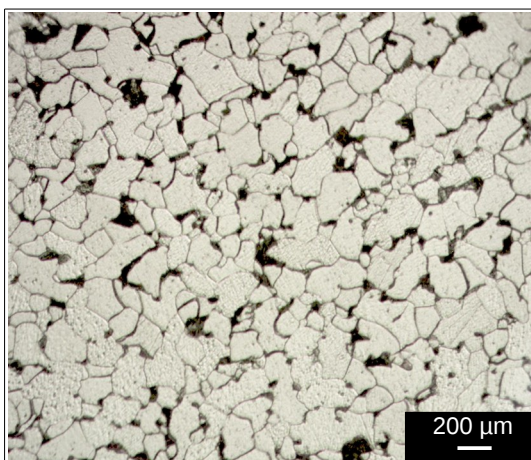
### 4.1 Caracterização do metal base

O metal base utilizado na realização dos experimentos foi o aço ABNT 1020, conforme descrito no item 3.1 deste trabalho. A fim de analisar comparativamente as alterações ocorridas na ZAC após procedimentos de soldagem, foi retirada uma amostra da barra original para caracterização da microestrutura e dureza.

#### 4.1.1 Microestrutura

A amostra do metal base foi submetida ao mesmo procedimento de lixamento e polimento descrito no item 3.2.4 (microscopia óptica), sendo possível a visualização de sua microestrutura (figura 23).

Figura 23 Microestrutura do metal de base. Aumento 400x. Ataque: Nital 3%.



Fonte: O AUTOR, 2019.

A microestrutura do metal base é típica do aço ABNT 1020, resultante da fabricação padrão por processo termomecânico. É formada por grãos equiaxiais, constituída principalmente por ferrita (grãos claros) e perlita (grãos escuros).

#### 4.1.2 Microdureza

Para medição da dureza do metal base foram realizadas medições em 5 pontos aleatórios da amostra. Os resultados mensurados e a dureza média estão

expostos na tabela 6.

Tabela 6 Dureza do metal base.

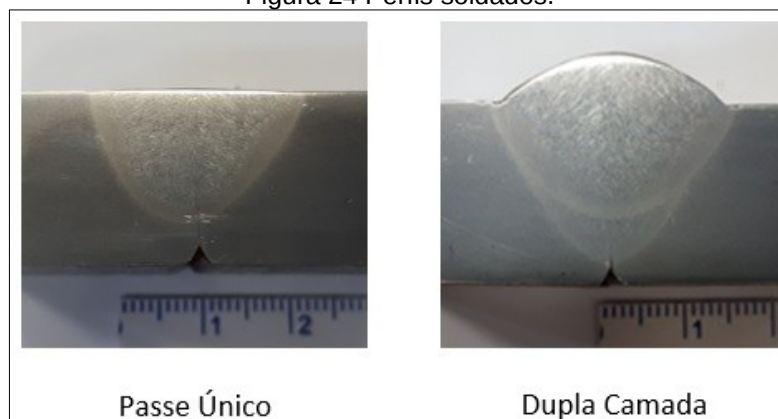
Amostra	Microdureza (HV)					Média	Desvio Padrão
MB	144,6	148,7	152,4	148,0	148,6	148,5	2,8

Fonte: O AUTOR, 2019.

## 4.2 Avaliação dos perfis das juntas soldadas

A figura 24 apresenta o perfil da amostra com passe único e com aplicação da segunda camada. É possível perceber a sobreposição das ZAC's na amostra com duas camadas. Isto ocorreu em todas as condições com o uso desta técnica (amostra de 2 à 6).

Figura 24 Perfis soldados.



Fonte: O AUTOR, 2019.

A primeira camada preencheu de modo satisfatório o chanfro da junta em todas as amostras. Com a aplicação da segunda camada verificou-se que o aumento gradual de energia empregado no processo de soldagem mudou os aspectos do cordão de solda, adquirindo um perfil mais robusto. Isto pode ser verificado através dos valores mensurados da penetração e da largura dos cordões que estão mostrados na tabela 7.

Tabela 7 Aspectos do perfil do cordão de soldagem.

Amostra	Penetração (mm)	Largura do cordão (mm)
1	10,6	18,3
2	9,5	19,3
3	11,9	19,3
4	10,5	18,3
5	11,4	20,4
6	13,3	22,3

Fonte: O AUTOR, 2019.

Os valores de penetração até a condição 5 de soldagem permaneceram semelhantes, por se tratar da penetração da primeira camada. Na amostra 6 o nível energético utilizado na segunda camada foi suficiente para refundir a zona fundida da primeira camada e atingir uma maior penetração.

Quanto a largura dos cordões, observou-se um aumento somente a partir da condição 5 ( que utilizou um aporte térmico de 4,21 kJ/mm). O maior aumento na largura ocorreu na condição 6 ( com 5,18 kJ/mm).

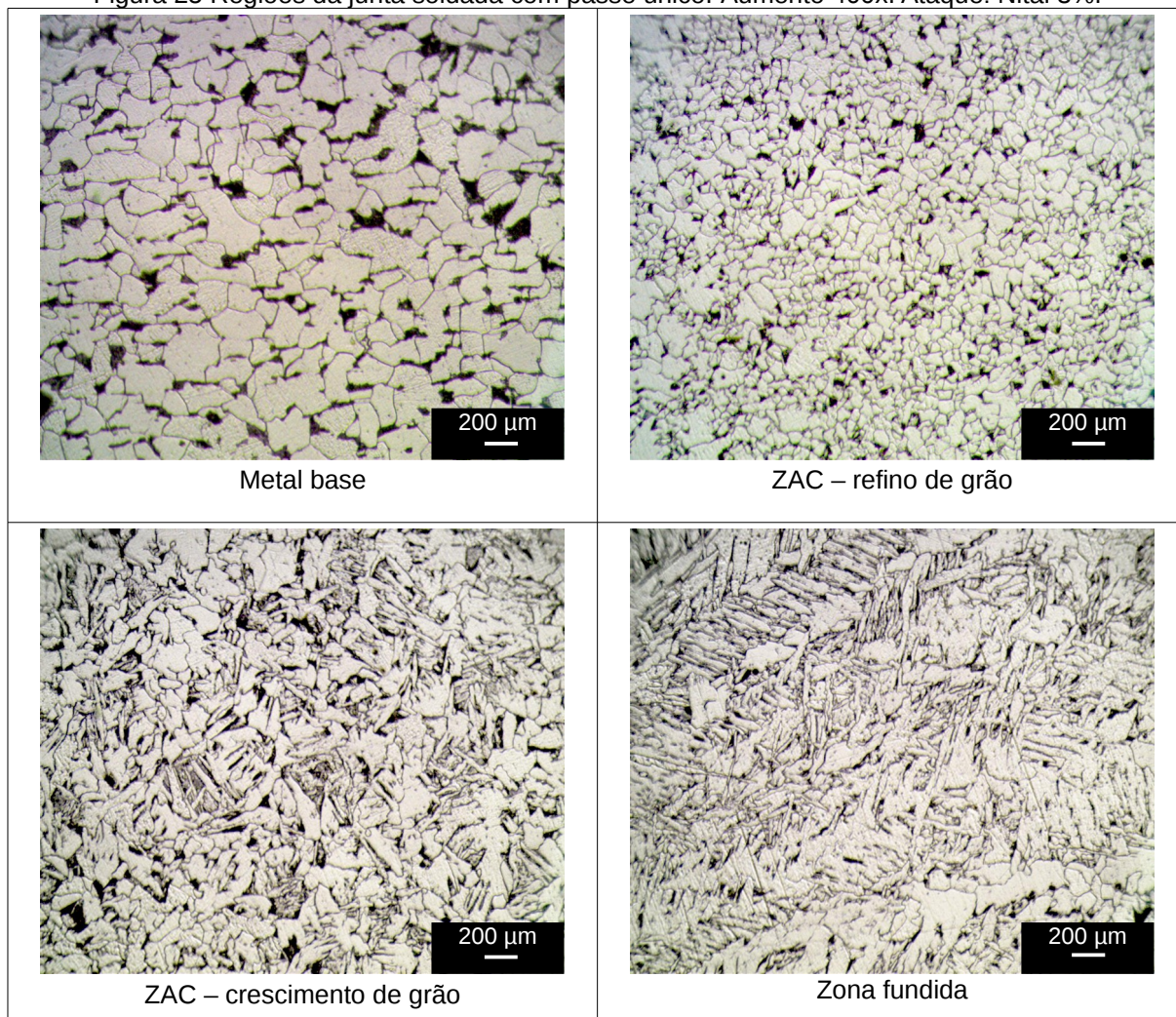
### 4.3 Análise microestrutural das juntas soldadas

As amostras foram analisadas em microscópio óptico a fim de se visualizar a microestrutura das regiões da junta soldada. Com o auxílio de uma câmera acoplada foram registradas imagens das seguintes regiões das juntas soldadas: i) metal base; ii) ZAC com refino de grão; iii) ZAC de crescimento de grãos; e iv) zona fundida.

#### 4.3.1 Regiões da junta com passe único

A amostra 1 (passe único) apresentou as regiões da junta bem definidas e de fácil identificação e estão expostas na figura 25.

Figura 25 Regiões da junta soldada com passe único. Aumento 400x. Ataque: Nital 3%.



Fonte: O AUTOR, 2019.

O metal base apresentou morfologia e tamanho de grãos semelhante a caracterização realizada na barra antes da soldagem, típica de aço 1020. Na região da zona fundida observa-se a presença de grãos dendríticos colunares, típicos de material fundido.

Na ZAC, região de maior complexidade em uma junta soldada, foram observadas duas regiões bem distintas. A primeira sofreu alterações promovendo um refino de grão com relação ao metal base original, mantendo a sua morfologia equiaxial. Já a segunda região, mais próxima da zona fundida, apresentou uma granulação mais grosseira que a primeira e uma morfologia acicular para a fase ferrita.



### 4.3.2 Regiões das juntas com dupla camada

A microestrutura encontrada na região do metal base das amostras 1 até 6 são equivalentes entre si e semelhantes a amostra retirada para caracterização do material, sendo formada por grãos equiaxiais, típica de um aço ABNT 1020. Micrografias da região do metal de base para cada condição de soldagem estão apresentadas no apêndice A (figura 29).

A zona fundida de cada amostra também manteve-se equivalente para todas as condições de soldagem (1 até 6), formada por uma microestrutura dendrítica, originada de um resfriamento lento, típica de materiais fundidos (Apêndice B - figura 30).

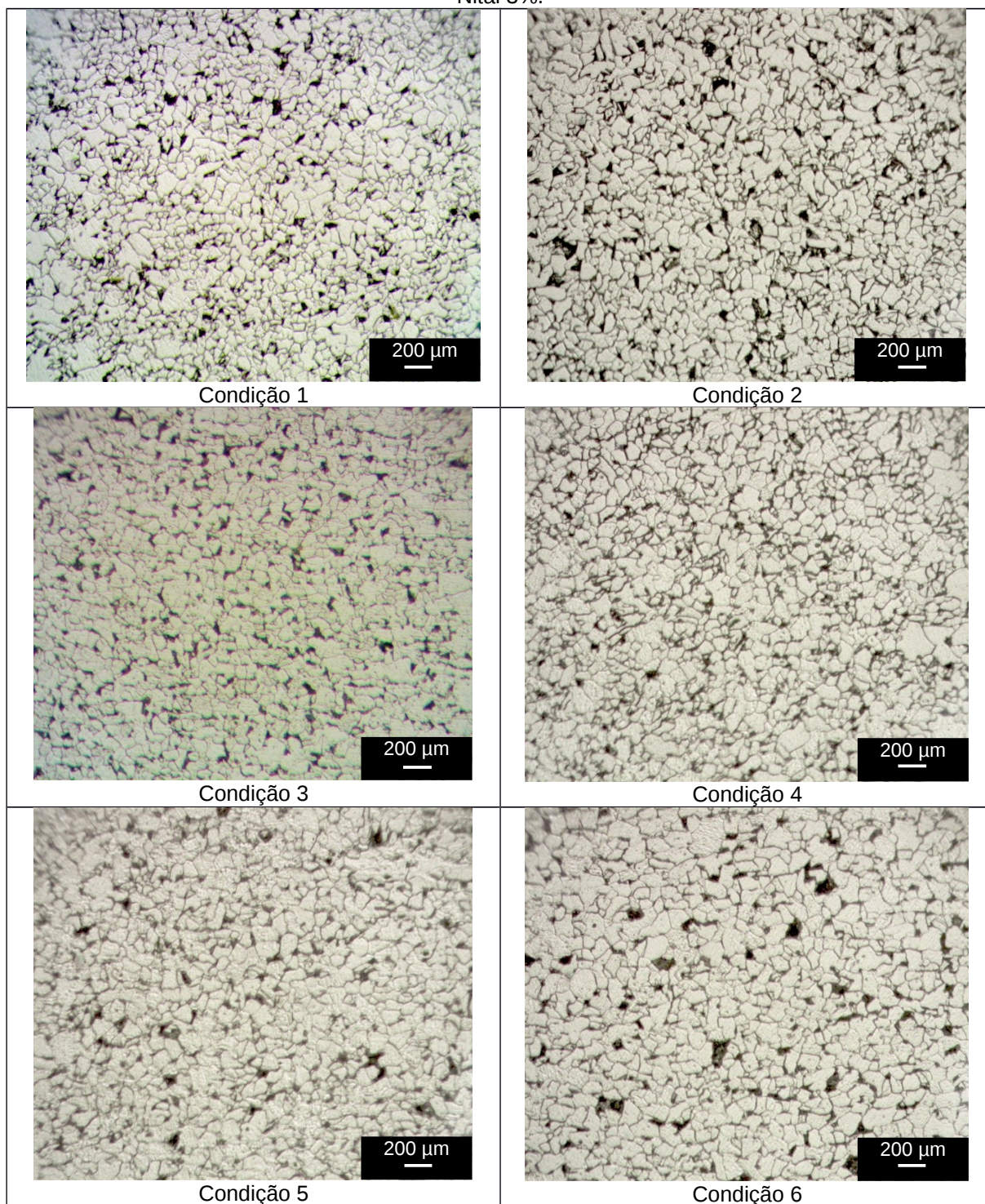
As regiões da ZAC de refino e crescimento de grãos são apresentadas nas figuras 26 e 27 respectivamente. As amostras de todas as condições, 1 à 6, estão expostas para melhor visualização dos efeitos do ciclo térmico gerado pela aplicação da dupla camada.

Observando-se a região de refino de grão para cada uma das 6 condições de soldagem (figura 26) percebe-se que com a aplicação da dupla camada na amostra 2, que utilizou a mesma quantidade de energia da primeira camada (2,69 kJ/mm), não houve mudança significativa no tamanho e na forma dos grãos. Este fato indica que o ciclo térmico foi o mesmo, gerando o mesmo resultado na variação microestrutural.

Nas amostras 3 e 4, onde foram utilizados níveis energéticos para a segunda camada maiores que o da primeira camada (3,06 e 3,54 kJ/mm, respectivamente), pode-se observar que houve um pequeno aumento do tamanho médio de grão, ou seja, os ciclos térmicos gerados causaram maior efeito no crescimento dos grãos.

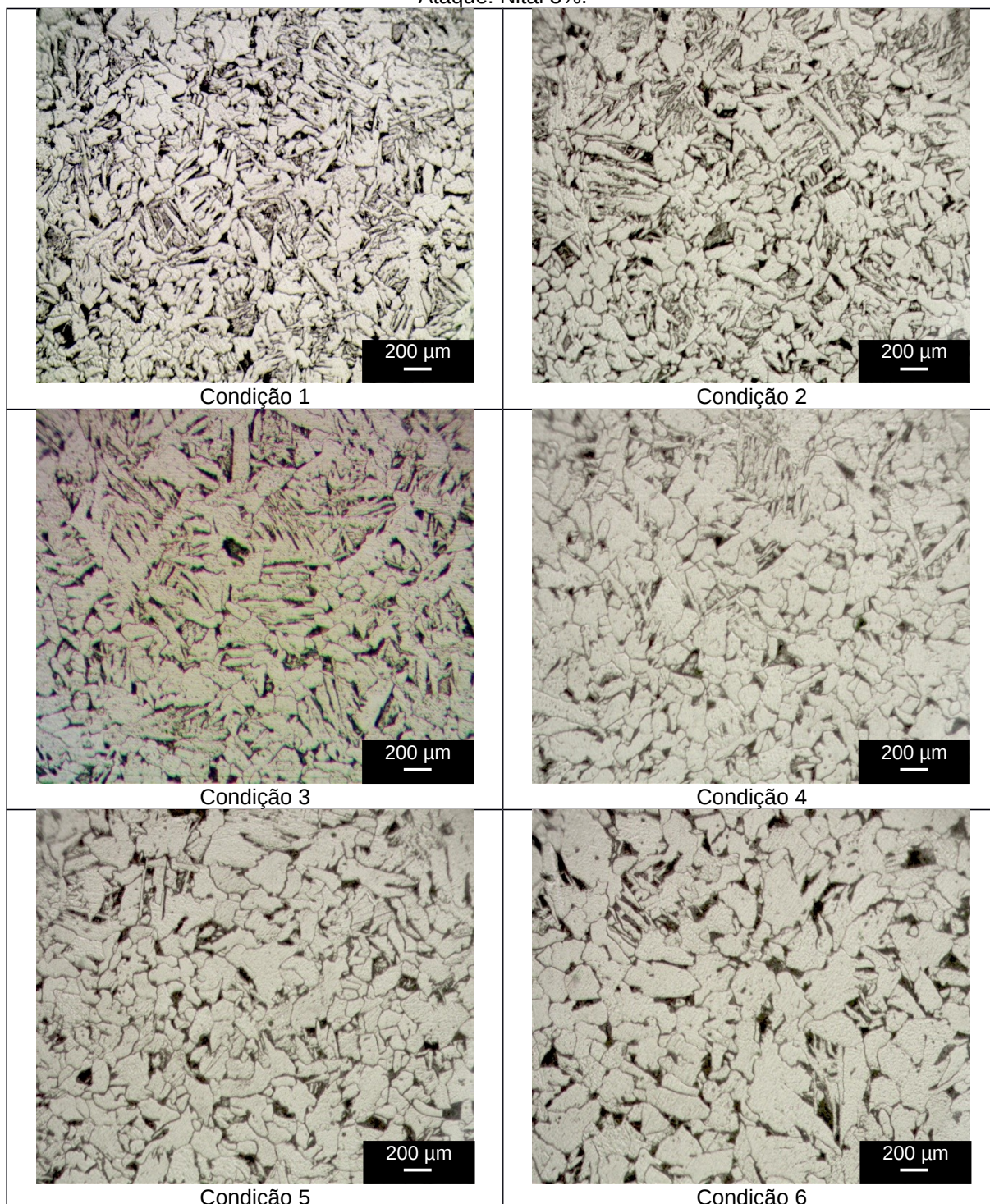
Com um aumento energético ainda maior, como o gerado nas amostras 5 e 6 (4,21 e 5,18 kJ/mm, respectivamente), obtiveram-se as microestruturas mais grosseiras indicando que os ciclos térmicos com nível de energia superiores tendem a reestabelecer o tamanho de grão original do material nesta região da ZAC.

Figura 26 ZAC – Região de refino de grão para cada condição de soldagem. Aumento 400x. Ataque: Nital 3%.



Fonte : O AUTOR, 2019.

Figura 27 ZAC – Região de crescimento de grão para cada condição de soldagem. Aumento 400x.  
Ataque: Nital 3%.



Fonte: O AUTOR, 2019.

Observa-se que a região da ZAC de crescimento de grãos também sofreu alterações em sua microestrutura, em função do aumento da energia térmica utilizado em cada condição de soldagem.

Na amostra 2 (segunda camada com mesmo valor de energia da primeira camada) a energia térmica dissipada na junta não provocou mudanças significativas na microestrutura. Observa-se a presença predominante de morfologia distinta de ferrita (ferrita acicular).

As amostras 3, 4, 5 e 6 apresentam uma mudança gradativa em sua microestrutura. Observa-se que com o aumento do nível energético, houve o reestabelecimento da forma dos grãos ferríticos (grãos equiaxiais). Os parâmetros de soldagem empregados resultaram em um maior aporte térmico, promovendo um resfriamento lento da junta soldada, proporcionando o efeito de um tratamento térmico na peça. A microestrutura da amostra da condição 6, na região da ZAC de crescimento de grãos, apresentou-se muito próxima a microestrutura do metal base original, tanto no tamanho dos grãos como na forma dos mesmos.

#### 4.4 Análise da microdureza das juntas soldadas

Os resultados do ensaio de microdureza estão mostrados na tabela 8 (média e desvio padrão do metal base e de cada região da ZAC) e na figura 28 (perfil de dureza ao longo de todas as regiões da junta).

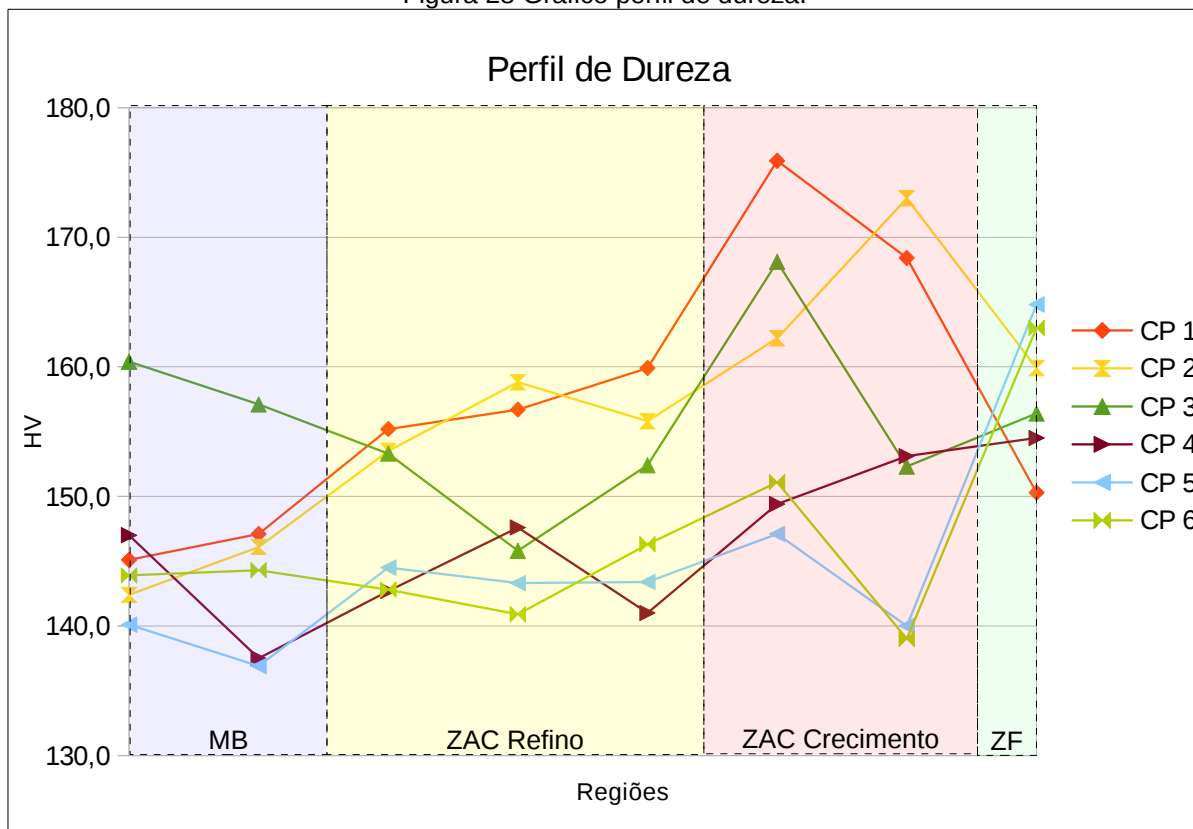
Tabela 8 Resultados de microdureza (HV)

Amostra	Regiões					
	MB		ZAC Refino de grão		ZAC Crescimento de grão	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
CP 1	146,1	1,4	157,3	2,4	172,2	5,3
CP 2	144,3	2,6	156,0	2,7	167,6	7,6
CP 3	158,8	2,3	150,5	4,1	160,2	11,2
CP 4	142,3	6,7	143,8	3,4	151,3	2,6
CP 5	138,5	2,3	143,7	0,7	143,6	5,0
CP 6	144,1	0,3	143,3	2,7	145,1	8,6

Fonte: O AUTOR, 2019.

Na zona fundida foi realizada apenas uma medição (não possibilitando o cálculo de média) por se tratar de uma região formada pela solidificação de material de adição e metal base. Esta região possui propriedades e características próprias por possuir uma composição química diferente e não foi alvo de análises no presente estudo. Porém no perfil de dureza do gráfico da figura 28 estes valores estão apresentados para referência.

Figura 28 Gráfico perfil de dureza.



Fonte: O AUTOR, 2019.

A amostra 1, com passe simples de solda, atingiu valores de dureza mais elevados na ZAC de crescimento de grão, possivelmente por apresentar uma microestrutura formada por morfologias distintas de ferrita. A ZAC de refino de grão obteve um aumento sutil na dureza, em relação ao metal base, promovido pelo seu menor tamanho de grão.

A amostra 2, que utilizou o mesmo valor de aporte térmico na aplicação da primeira e da segunda camada apresentou valores de dureza semelhantes a amostra 1. A energia de soldagem da segunda camada não foi suficiente para promover mudanças na ZAC da primeira camada.

A amostra 3 apresentou uma diminuição na dureza do metal base até a ZAC de refino de grão, o que já era previsto devido o aumento do tamanho de grãos em relação a condição 1. Porém a ZAC de crescimento de grão não obteve melhoras, apresentando, ainda, valores elevados de dureza nesta região, devido a sua microestrutura ser formada ferrita acicular.

As amostras 4, 5 e 6 mantiveram razoável linearidade em seus resultados de dureza na ZAC. A energia de soldagem empregada destas condições foi suficiente

para reestabelecer as características do metal base. Este efeito pode ser explicado pelas mudanças geradas na microestrutura da ZAC de crescimento de grão, constituída novamente por grãos equiaxiais, além do aumento no tamanho de grãos na região de refino.

## 5 CONCLUSÃO

A soldagem por arco submerso com passe único causa mudanças microestruturais indesejáveis na ZAC. Na região de crescimento de grãos observou-se a presença de ferrita acicular, diferente da morfologia equiaxial original. e na região de refino de grãos houve grande diminuição no tamanho médio de grãos, ocasionando aumento de dureza nesta regiões.

Nas amostras 2 e 3 os aportes térmicos (2,69 e 3,06 kJ/mm, respectivamente) utilizados na segunda camada não foram suficientes para promover alterações significativas.

A energia de soldagem utilizada na condição 4 (3,54 kJ/mm) iniciou o reestabelecimento da microestrutura na ZAC de crescimento de grãos constituída novamente por grãos ferríticos equiaxiais, porém de menor tamanho que o original. Na ZAC de refino de grãos houve um pequeno aumento do tamanho médio de grão. A dureza foi reestabelecida mantendo razoável lineariedade em todas as regiões da ZAC.

As amostras 5 e 6 obtiveram os maiores níveis energéticos (4,21 e 5,18 kJ/mm, respectivamente), nos quais o ciclo térmico promoveu a maior similaridade da ZAC com a microestrutura original. Nestas condições a região de crescimento de grãos é novamente formada por grãos equiaxiais e a de refino de grãos apresentou aumento no tamanho médio de grão. Observa-se que o perfil de dureza destas amostras permaneceu estável ao longo de toda a ZAC, ou seja, mantendo as características do material original.

Os parâmetros utilizados na condição 6 proporcionaram os melhores efeitos na recuperação microestrutural e de duraza da ZAC.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar ensaio mecânico de impacto, para avaliar a influência da dupla camada na tenacidade de juntas soldadas por arco submerso do aço 1020.
- Aplicar a técnica de dupla camada em soldagem por arco submerso em outros materiais, utilizando técnicas para medição do tamanho médio de grãos.
- Aplicar técnica de dupla camada mantendo o aporte térmico fixo e avaliando o efeito da variação da tensão e da corrente na ZAC.



## REFERÊNCIAS

ANDRADE, Wallace Silva. **Estudo da técnica de dupla camada na soldagem do aço AISI 1045**. 2011. 45 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Sergipe, São Cristovão, 2011.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Standard welding terms and definitions**. A 3.0. ed. Miami: American Welding Society, 1997. 119 p. Disponível em: <<http://www.esfahanfoolad.com/userimages/file/standards/701111.pdf>>. Acesso em: 04 dez. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Aços Carbono e Ligados para Construção Mecânica** - Designação e Composição Química, NBR NM 87/2000. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Critério de Classificação dos Aços**, NBR NM 172/2000. Rio de Janeiro, 2000.

ASSUMPÇÃO, G. A., **Estudo da Técnica Dupla Camada na Soldagem do Aço ABNT 1045**. 2006. 45 f. TCC Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G.. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. São Paulo: ABM, 2002.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica: processos de fabricação e tratamento**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

ESAB. **Arco Submerso**. 24 maio 2004. (Apostila). Disponível em: <[http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901100rev1\\_apostilaarco\\_submerso.pdf](http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901100rev1_apostilaarco_submerso.pdf)>. Acesso em: 8 abr. 2019.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo Jose; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2011. 363 p.

MARTINS, W. P.; NASCIMENTO, C.C.F; MENESES, V.A.; PAIVA, A.E.M.; LEAL, V.S.. **Influencia dos Parâmetros de Soldagem no Comportamento Microestrutural e nas Propriedades Mecânicas de Juntas Soldadas em Aços ARBL**. 6o COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação: Caxias do Sul, RS, 2011

MIYAHARA, Vinicius T. P.. **Avaliação das propriedades mecânicas e da microestrutura de aços dissimilares ABNT 8620 e ABNT 6655 LN 28 soldados com arco pulsado com diferentes temperaturas de pré-aquecimento e tipos de tectimento**. 2008. 99 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da UNESP, Bauru, 2008.

MODENESI, P., **Soldabilidade dos Aços Transformáveis**. Belo Horizonte: UFMG, 2006. 128p.

MODENESI, P. J. **Transferência de metal na soldagem GMAW**: Manual aula prática, UFMG. Belo Horizonte, 2004.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas**: uma abordagem integrada. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OLIVEIRA, Fabiano Farias de. **ESTUDO DAS TRANSFORMAÇÕES MACRO E MICROESTRUTURAIS DAS JUNTAS SOLDADAS DO AÇO SAE - 4340 PELO PROCESSO FCAW** . 2015. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

OKUMURA, Toshie; TANIGUCHI, Célio. **Engenharia de soldagem e aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.a., 1992. 462 p.

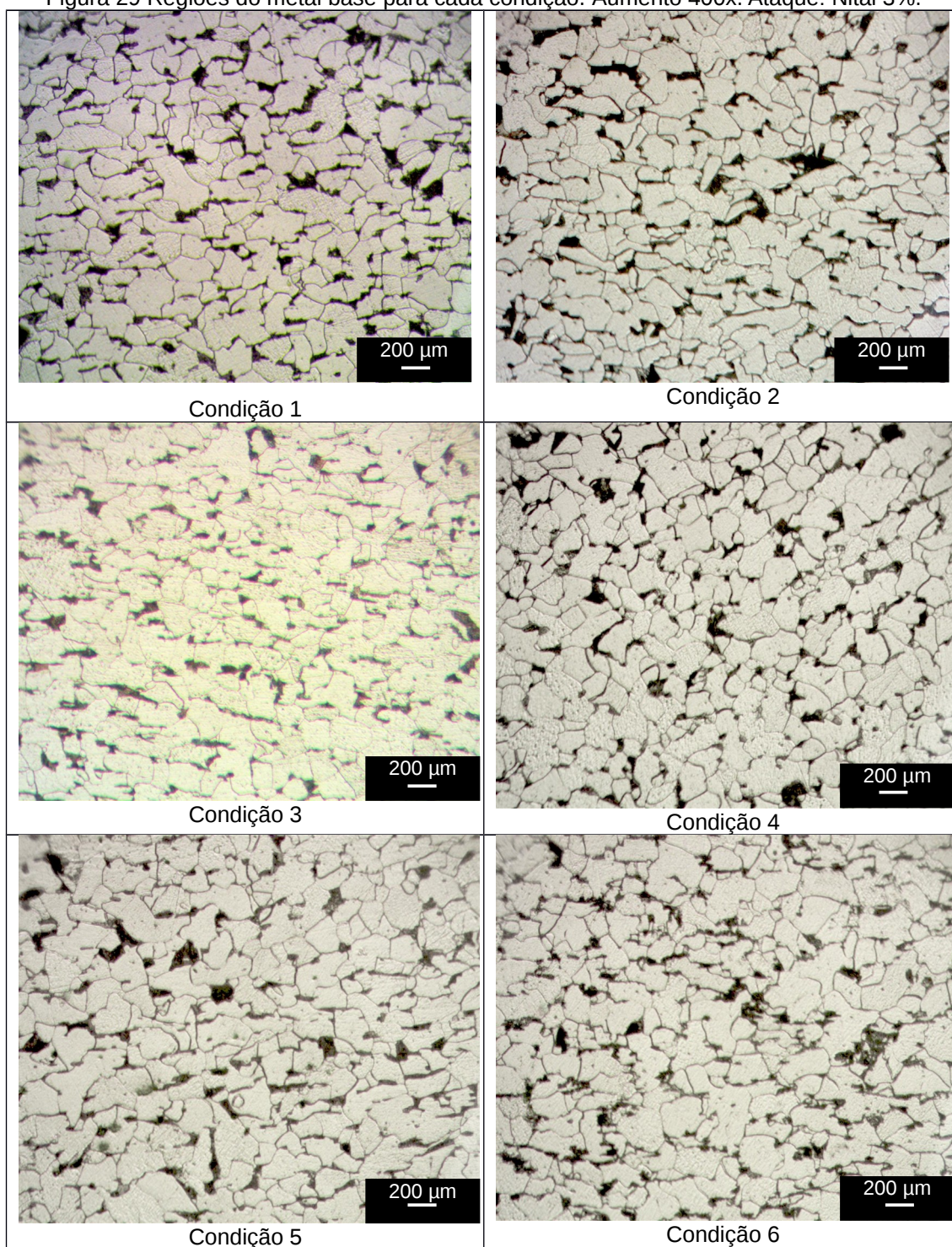
SILVA, G.G.; KOBAYASHI, Y.. **Análise da Influência da Temperatura de Preaquecimento na Formação de Microfases em Cordão de Solda obtido pelo Processo de Soldagem à Arco Elétrico com Proteção Gasosa e Arame Consumível**. 40 COBEF – Congresso Brasileiro de Fabricação; Estância de São Pedro, Campinas/SP; 2007

TRINDADE, Vicente Braz et al. Características Microestruturais e Mecânicas ao Longo da Seção Transversal de Juntas Soldadas em Multipasses pelo Processo GMAW de um Aço API 5L X65Q. **Soldagem & Inspeção**, [s.l.], v. 22, n. 2, p.217-227, jun. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si2202.10>.

WAINER, Emilio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décout Homem de. **Soldagem**: processos e metalurgia. 4. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2004. 494 p.

## APÊNDICE A – Micrografias do metal base.

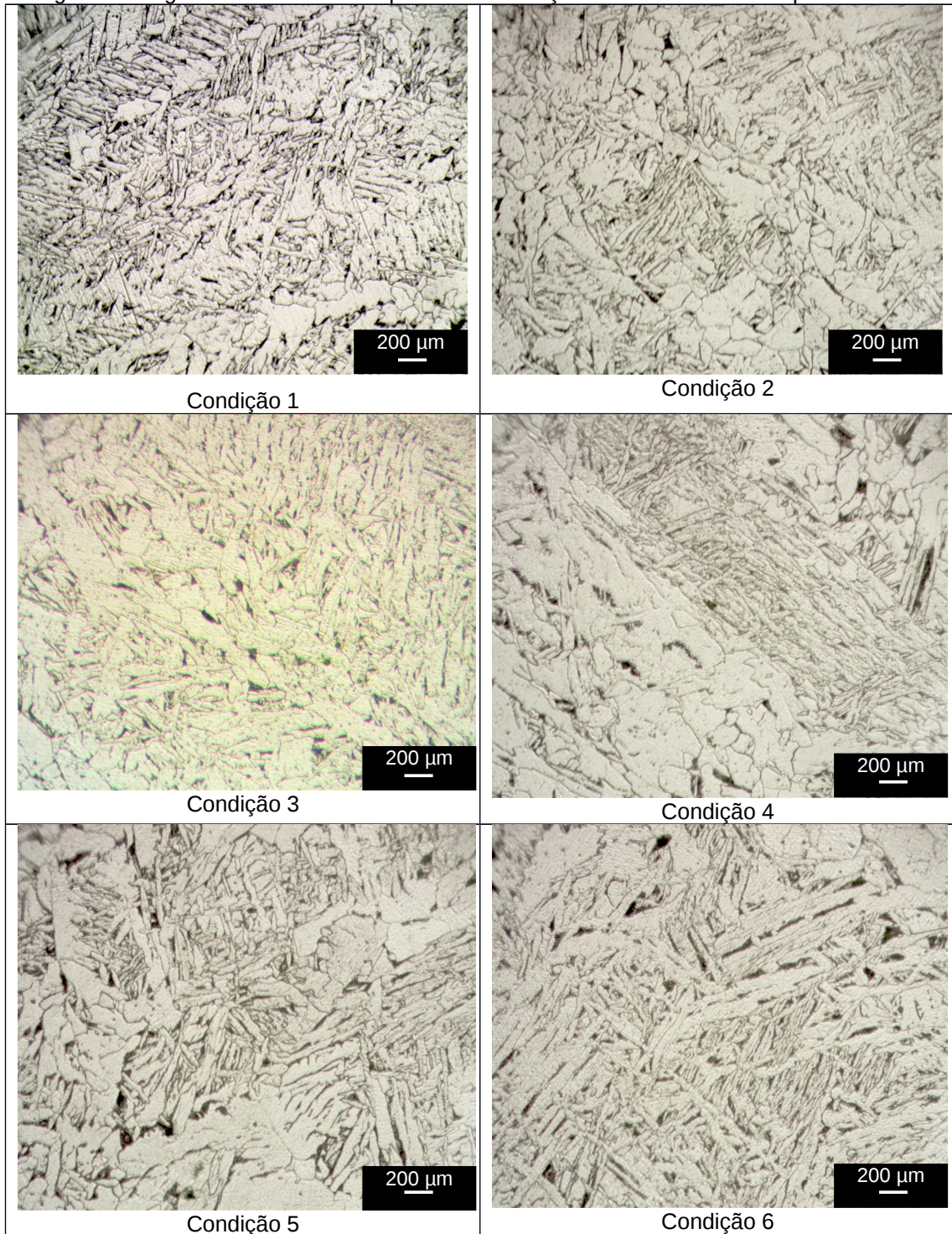
Figura 29 Regiões do metal base para cada condição. Aumento 400x. Ataque: Nital 3%.



Fonte: O AUTOR, 2019.

## APÊNDICE B – Micrografias da zona fundida.

Figura 30 Regiões da zona fundida para cada condição. Aumento 400x. Ataque: Nital 3%.



Fonte: O AUTOR, 2019.