

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

LAURA DE OLIVEIRA RIBEIRO

AVALIAÇÃO DA SOLDABILIDADE DO FERRO FUNDIDO NODULAR PELO
PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW MECANIZADO

BELO HORIZONTE

2019

LAURA DE OLIVEIRA RIBEIRO

**AVALIAÇÃO DA SOLDABILIDADE DO FERRO FUNDIDO NODULAR PELO
PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW MECANIZADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Ivan J. de Santana
Coorientadora: Prof.^a Dr.^a. Elaine C. S. Corrêa

BELO HORIZONTE

2019

LAURA DE OLIVEIRA RIBEIRO

**AVALIAÇÃO DA SOLDADIBILIDADE DO FERRO FUNDIDO NODULAR PELO
PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW MECANIZADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovada em ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ivan J. de Santana – Orientador

Prof.^a Dr.^a Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Prof. MSc Aderci de Freitas Filho

RESUMO

O uso de processos de elevada produtividade e de extrema importância para a indústria como o *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) para soldagem de ferros fundidos nodulares necessitam, ainda, de estudos para avaliar sua soldabilidade devido à tendência da formação de fases duras e frágeis na Zona Termicamente Afetada (ZTA). Para tal fim, foram realizados experimentos que simularam o processo à diferentes condições de trabalho, como por exemplo, aplicação de pré-aquecimento, pós-aquecimento e mudança de parâmetros, como a variação da tensão e velocidade de alimentação do arame, para entender a influência destes no comportamento do material. Para cada condição realizada, observou-se alterações na microestrutura com a formação de fases e constituintes, no coeficiente de diluição e no perfil de dureza da junta soldada. A análise de todas as condições em conjunto, permitiu a escolha do melhor procedimento dentre os realizados na formação de fases e/ou constituintes que facilitem o processamento e aplicação do ferro fundido nodular.

Palavras-chave: soldagem GMAW, ferro fundido nodular, soldabilidade

ABSTRACT

The use of high productivity and extremely important processes for industry such as Gas Metal Arc Welding (GMAW) for welding nodular cast irons also needs studies to evaluate their weldability due to the tendency of formation of hard and brittle phases in the Heat Affected Zone (HAZ). For this purpose, experiments were performed that simulated the process to different working conditions, such as preheating, postheating and parameter changes, such as the variation of the voltage and wire feed speed, to understand the influence on material behavior. For each condition performed, there were changes in the microstructure with the formation of phases and constituents, the dilution coefficient and the hardness profile of the welded joint. The analysis of all conditions together allowed the choice of the best procedure among those performed in the formation of phases and/or constituents that facilitate the processing and application of nodular cast iron.

Keywords: GMAW welding, nodular cast iron, weldability

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Formação teórica de uma solda pela aproximação das superfícies das peças.....	14
Figura 2 – Esquemática de estrutura de camadas de uma superfície metálica	14
Figura 3 – Esquema de soldagem por deformação.....	15
Figura 4 – Esquema de soldagem por fusão	15
Figura 5 – Distribuição esquemática de potencial em um arco e suas regiões.....	16
Figura 6 – Esquema da formação do jato de plasma	17
Figura 7 – Esquema Efeito Pinch	18
Figura 8 – Junta soldada e suas regiões	19
Figura 9 – Determinação Experimental do Coeficiente de Diluição.....	19
Figura 10 – Regiões da solda de um aço carbono	21
Figura 11 – Esquemática do processo GMAW	22
Figura 12 – Modo de transferência metálica por curto-circuito: Oscilogramas de corrente e tensão	24
Figura 13 – Modo de transferência metálica globular: Oscilogramas de corrente e tensão	25
Figura 14 – Modo de transferência metálica por spray: Oscilograma de corrente e tensão.....	26
Figura 15 – Modo de transferência metálica por corrente pulsada: Oscilogramas de corrente e tensão	26
Figura 16 – Esquemático do Processo GTAW	27
Figura 17 – Diagrama Fe-C para Ferros Fundidos	28
Figura 18 – Exemplo de fotomicrografias para Ferro Fundido Cinzento	29
Figura 19 – Exemplo de fotomicrografias para Ferro Fundido Branco	30
Figura 20 – Exemplo de fotomicrografias para Ferro Fundido Maleáveis	30
Figura 21 – Exemplo de fotomicrografias para Ferro Fundido Nodulares	31
Figura 22 – Fluxograma do processo	36
Figura 23 – Desenho técnico das dimensões dos corpos de prova.....	37
Figura 24 – Dispositivo de fixação de corpo de prova	38
Figura 25 – Representação esquemática do processo GMAW Mecanizado.....	39
Figura 26 – Esquemático para corte de corpos de prova soldados	40
Figura 27 – Esquemático para obtenção de perfil de dureza.....	41
Figura 28 – Esquemático para cálculo e obtenção do coeficiente de diluição	42
Figura 29 – Fotomicrografias dos corpos de prova soldados sem pré-aquecimento	43

Figura 30 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados sem pré aquecimento.....	44
Figura 31 – Fotomicrografias do ferro fundido nodular soldado sem pré-aquecimento – corpos de prova soldados em um passe.....	45
Figura 32 – Fotomicrografias dos corpos de prova soldados sem pré-aquecimento	46
Figura 33 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados sem pré-aquecimento – dois passes.....	47
Figura 34 – Fotomicrografias do ferro fundido nodular soldado sem pré-aquecimento – corpos de prova soldados em dois passes.....	48
Figura 35 – Fotomicrografias dos corpos de prova soldados sem pré-aquecimento	49
Figura 36 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados sem pré-aquecimento com aumento da tensão e velocidade de alimentação	50
Figura 37 – Fotomicrografias do ferro fundido nodular soldado sem pré-aquecimento e com aumento da tensão e velocidade de alimentação	50
Figura 38 – Fotomicrografias dos corpos de prova soldados com pré-aquecimento a 300°C .	52
Figura 39 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com pré-aquecimento 300°C.....	53
Figura 40 – Fotomicrografias do ferro fundido nodular soldado com pré-aquecimento a 300°C	54
Figura 41 – Fotomicrografias dos corpos de prova soldados com pós-aquecimento GTAW .	55
Figura 42 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com pós-aquecimento TIG.....	56
Figura 43 – Fotomicrografias do ferro fundido nodular soldado com pós aquecimento GTAW	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química (% em peso) fornecida pelo fabricante do material utilizado	35
Tabela 2 – Especificações do arame utilizado	35
Tabela 3 - Procedimentos e parâmetros utilizados	38
Tabela 4 – Coeficiente de diluição para corpos de prova sem pré-aquecimento – um passe...43	
Tabela 5 – Coeficiente de diluição para corpos de prova sem pré-aquecimento – dois passes46	
Tabela 6 – Coeficiente de diluição para corpos de prova sem pré-aquecimento com aumento da tensão e velocidade de alimentação	49
Tabela 7 – Coeficiente de diluição para corpos de prova com pré-aquecimento a 300°C	52
Tabela 8 – Coeficiente de diluição para corpos de prova com pós-aquecimento GTAW.....	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	12
2.1	Objetivos Gerais.....	12
2.2	Objetivos Específicos	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1	Soldagem.....	13
3.1.1	Definição	13
3.1.2	Formação da junta	14
3.2	Arco Elétrico	15
3.2.1	Definição	15
3.2.2	Variáveis do arco elétrico	18
3.3	Metalurgia da soldagem	18
3.3.1	Macroestrutura da junta soldada.....	19
3.4	Processo GMAW	21
3.4.1	Visão geral do processo	21
3.4.2	Equipamentos envolvidos e consumíveis	22
3.4.3	Variáveis.....	23
3.4.4	Modos de transferência metálica	23
3.4.4.1	<i>Transferência por curto circuito.....</i>	<i>24</i>
3.4.4.2	<i>Transferência globular</i>	<i>24</i>
3.4.4.3	<i>Transferência por spray.....</i>	<i>25</i>
3.4.4.4	<i>Transferência pulsada</i>	<i>26</i>
3.5	Processo TIG	26
3.6	Ferro fundido	27
3.6.1	Definições	27
3.6.2	Tipos de ferros fundidos e suas características.....	28
3.6.2.1	<i>Ferros fundidos cinzentos</i>	<i>29</i>
3.6.2.2	<i>Ferros fundidos brancos</i>	<i>29</i>
3.6.2.3	<i>Ferros fundidos maleáveis.....</i>	<i>30</i>
3.6.2.4	<i>Ferros fundidos nodulares.....</i>	<i>31</i>
3.7	Soldabilidade (pré-aquecimento e pós-aquecimento).....	31
4	ESTADO DA ARTE.....	34
5	MATERIAIS E MÉTODOS	35
5.1	MATERIAIS	35

5.2	EQUIPAMENTOS.....	35
5.3	MÉTODOS.....	36
5.3.1	Preparação dos corpos de prova	37
5.3.2	Procedimento de soldagem.....	37
5.3.2.1	<i>Pré Aquecimento e Pós aquecimento.....</i>	<i>39</i>
5.3.3	Caracterização dos corpos de prova	40
5.3.3.1	<i>Análise Metalográfica.....</i>	<i>40</i>
5.3.3.2	<i>Microdureza Vickers.....</i>	<i>41</i>
5.3.3.3	<i>Cálculo do coeficiente de diluição.....</i>	<i>42</i>
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
6.1	Condição 1 – Inicial sem pré-aquecimento.....	43
6.1.1	Cordão de solda – 1 passe.....	43
6.1.2	Cordão de solda – 2 passes	46
6.2	Condição 2 – Mudança de variáveis.....	48
6.3	Condição 3 – Pré-aquecimento 300°C.....	51
6.4	Condição 4 – Pós aquecimento GTAW.....	54
7	CONCLUSÕES.....	59
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, a necessidade de alinhar baixo custo com processos de excelente qualidade são prioridade primária para os setores industriais. Diferentes processos utilizados na fabricação e recuperação de materiais são possibilitados pelo processo de fabricação de soldagem, que é considerado como um método deposição de material sobre uma superfície, visando união de duas ou mais peças, assegurando no cordão soldado, a continuidade de propriedades físicas, químicas e metalúrgicas podendo ser aplicado, também, na restauração de peças desgastadas ou danificadas.

O ferro fundido, liga metálica formada essencialmente por ferro e carbono, é amplamente empregado na fabricação e reparação de componentes, devido ao um conjunto de propriedades como, por exemplo, baixo ponto de fusão, alta fluidez, menor contração quando comparado ao aço e, sobretudo, de baixo custo.

Entretanto, a soldagem do ferro fundido quando comparado à soldagem de aços carbono é de elevada complexidade sendo esse fenômeno associado ao elevado teor de carbono encontrado em sua composição aumentando a sua tendência de formar microestruturas duras e frágeis na Zona Termicamente Afetada (ZTA).

Este trabalho visa avaliar utilizando o processo de fabricação de soldagem GMAW mecanizado, o comportamento do ferro fundido nodular submetido a diferentes condições de trabalho como, por exemplo, aplicação de pré-aquecimento, pós-aquecimento e mudança de variáveis como a variação da tensão e velocidade de alimentação do arame. Esperava-se, após a realização dos procedimentos, verificar quais condições poderiam levar o cordão a ter uma boa qualidade, presença de poucos respingos e com fusão suficiente do metal base e metal de adição. Além disso, esperava-se verificar o tipo de influência na microestrutura e dureza da ZTA ao variar a tensão, pré-aquecimento e/ou pós aquecimento do material, de forma a tentar contornar e encontrar caminhos alternativos para melhoria dos processos de soldagem no setor industrial.

Os testes apresentaram diferentes resultados para cada um dos procedimentos realizados e o que pôde ser observado é que tanto a realização de pré-aquecimento a 300°C, pós aquecimento utilizando processo GTAW e mudança de variáveis como tensão e velocidade de alimentação do arame desencadearam diferentes comportamentos tanto na microestrutura, diluição e dureza

do material. Isso permitiu a avaliação da escolha do melhor procedimento dentre os realizados que irão facilitar o processamento de um material de difícil soldabilidade como os ferros fundidos nodulares.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Análise dos efeitos macroestruturais e microestruturais mediante a realização do processo de fabricação de soldagem GMAW ao submeter o material de base à variados parâmetros de soldagem.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar da variação das condições de soldagem na formação de microconstituintes;
- Conhecer os efeitos de pré-aquecimento e pós-aquecimento no comportamento da ZTA;
- Analisar comparativamente o perfil de dureza entre os procedimentos sem e com o uso de pré-aquecimento ou pós-aquecimento;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Soldagem

3.1.1 Definição

Entre todos os processos de fabricação existentes, a soldagem pode ser considerada como um tipo de processamento importante para indústrias e que possui vantagens, pois através de formas padronizadas, diferentes tipos de juntas e chanfros pré-determinados, é possível obter diferentes combinações que poderão ter como produto a confecção ou recuperação de peças de porte reduzido até peças de dimensões de grande porte (MACHADO, 1996).

Entretanto, mesmo sendo um processo versátil, a operação de soldagem pode acarretar modificações indesejadas no material, como alterações microestruturais, que por consequência, afetarão as propriedades mecânicas do material.

O termo soldagem se correlaciona a uma grande quantidade de processos de união e recuperação de peças, entretanto sua definição muitas vezes é exposta de maneira incompleta, associado geralmente à fusão de peças metálicas. Existem diversas tentativas na literatura de definir este termo, dentre elas:

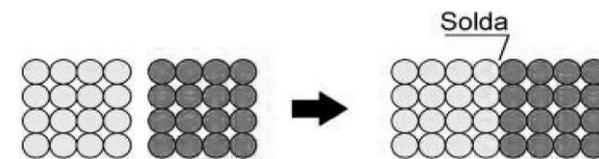
- “Operação que visa obter a coalescência localizada, produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição” AWS (*American Welding Society*).
- “Processo de união de materiais baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos. ”

Estas últimas definições englobam outros processos de união de materiais como, por exemplo, a brasagem (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

3.1.2 Formação da junta

A junção entre dois materiais a nível atômico é baseada na condição de energia dos átomos e depende do espaçamento interatômico. Considerando os átomos da superfície de um sólido, estes se encontram com um maior nível de energia do que os átomos no interior dos átomos da estrutura cristalina, pois as interações dos átomos superficiais com seus vizinhos são quantitativamente reduzidas, logo aproximando-se duas peças metálicas a uma distância significativamente reduzida para diminuir a energia do sistema e promover a formação de uma ligação permanente, uma solda entre as peças seria formada, como mostrado na Figura 1.

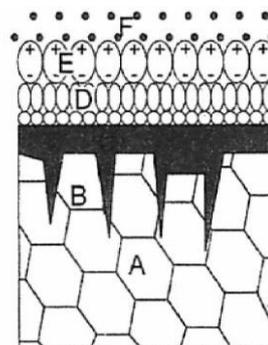
Figura 1 – Formação teórica de uma solda pela aproximação das superfícies das peças



Fonte: MODENESI (2012).

Entretanto, sabe-se que esse tipo de ligação só ocorre em condições muito especiais, devido aos obstáculos que impedem uma aproximação efetiva entre duas superfícies (Figura 2). Esses obstáculos podem ser a rugosidade da superfície em escala microscópica e submicroscópica ou até mesmo a presença de camadas de óxido, umidade, gordura e poeira que impossibilitam contato real entre as superfícies, impedindo a formação da solda por aproximação.

Figura 2 – Esquematização de estrutura de camadas de uma superfície metálica

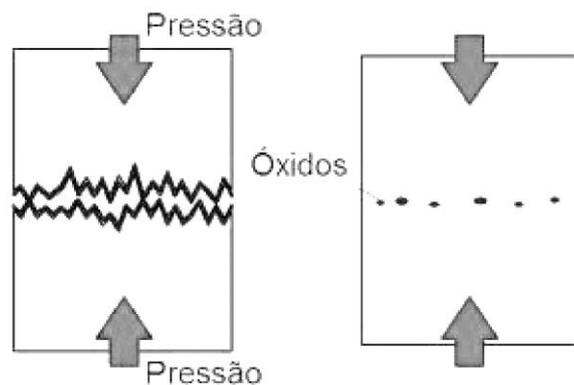


- A- Metal Base
- B- Metal afetado
- C- Camada de Óxido
- D- H₂O e O₂ adsorvidos
- E- Gorduras
- F- Poeira

Fonte: Própria Autora

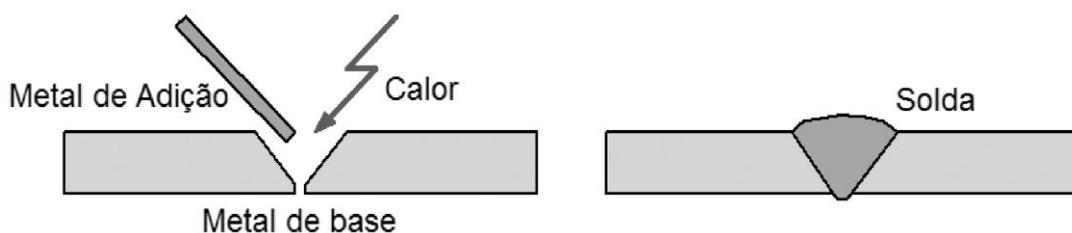
Desta forma, existem dois principais métodos, os quais originam dois grandes grupos de processos de soldagem: Soldagem por Deformação e Soldagem por fusão. O processo de soldagem por deformação consiste na aplicação de forças que possibilitem a deformação das superfícies de contato permitindo a aproximação das superfícies a níveis atômicos e formando pontos de solda (Fig. 3). Já a soldagem por fusão se caracteriza na aplicação localizada de calor na região da junta até a fusão do metal de base e metal de adição (quando aplicável). As fronteiras entre peças são eliminadas e a solidificação do material a solda é formada, conforme é mostrado na Figura 4 (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Figura 3 – Esquema de soldagem por deformação



Fonte: MODENESI (2012)

Figura 4 – Esquema de soldagem por fusão



Fonte: MODENESI (2012)

3.2 Arco Elétrico

3.2.1 Definição

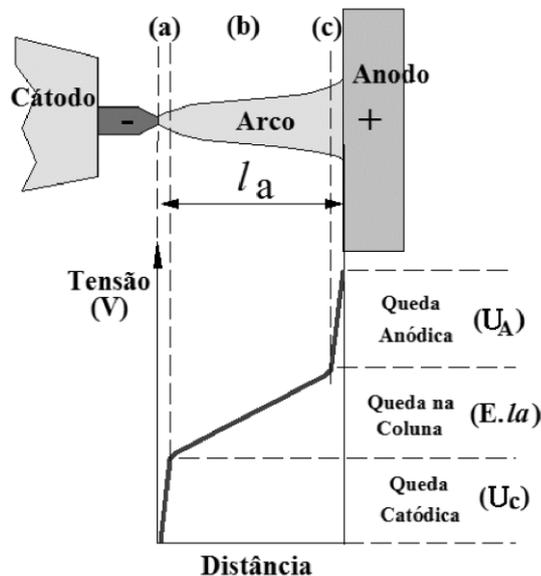
A fonte de calor mais utilizada na soldagem por fusão de materiais metálicos é o arco elétrico, devido a diversos fatores como a geração de quantidade necessária de energia para viabilizar a união de materiais, baixo custo relativo do equipamento, facilidade de manejo e um nível

aceitável de riscos à saúde dos operadores (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). As temperaturas atingidas no arco elétrico são elevadas, de forma que podem variar de 5000 K a 30000 K, como consequência a matéria passa a existir no quarto estado, denominado plasma; estado este composto por um gás ionizado. A combinação de altas temperaturas e forças eletromagnéticas associadas ao arco elétrico, resultam em intensas reações químicas e homogeneização da poça de fusão (MACHADO, 1996).

O arco elétrico é descrito por ter uma geometria aproximadamente cônica, com o diâmetro junto da peça maior do que o diâmetro próximo do eletrodo (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). A queda de tensão no arco elétrico pode ser caracterizada pela diferença de potencial entre suas extremidades pela corrente elétrica que circula por este. A queda de potencial não é uniforme ao longo do arco, podendo ser dividida em três regiões distintas (Fig. 5):

- Região de queda de tensão catódica (U_c);
- Região da coluna do arco ($E \cdot l_a$);
- Região de queda de tensão anódica (U_a).

Figura 5 – Distribuição esquemática de potencial em um arco e suas regiões



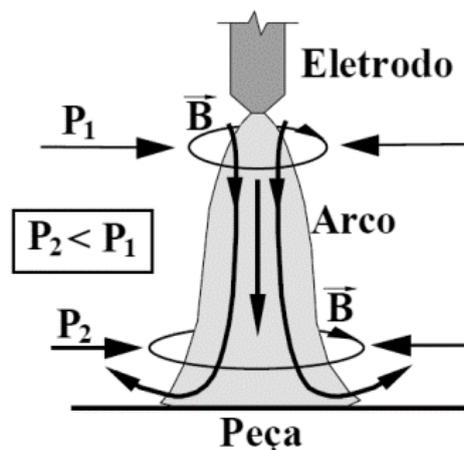
- (a) Região de queda de tensão catódica
 (b) Região da coluna do arco
 (c) Região de queda de tensão anódica

Fonte: MODENESI (2012)

Os fenômenos térmicos relacionados ao arco elétrico apresentam elevada eficiência para transformação da energia elétrica para energia térmica transferida para a peça com o intuito de fundir o metal de base. A ionização do plasma e sua capacidade de condução de corrente são dependentes da presença de altas temperaturas no arco elétrico e o perfil térmico de um arco de soldagem é variável de acordo com o processo e as condições de soldagem. A corrente elétrica induz a formação de um campo magnético em torno de qualquer condutor elétrico e, é de extrema importância, a força de compressão que um campo magnético que passa pelo condutor, exerce sobre si mesmo. Considerando a diferença entre raios na geometria cônica de um arco elétrico, há uma variação de pressão nos extremos que irá direcionar o fluxo de gás do eletrodo para a peça, independentemente das polaridades estabelecidas e do tipo de corrente utilizada.

Este fenômeno conhecido por “jato de plasma”, que pode ser visto na Figura 6, ocorre quando “direciona os gases quentes do arco contra a peça, sendo assim, um dos mecanismos responsáveis pela penetração da solda” (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

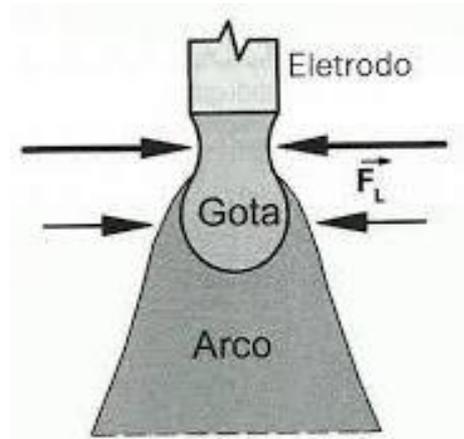
Figura 6 – Esquema da formação do jato de plasma



Fonte: MODENESI (2012)

Além disso, as mesmas forças magnéticas promovem um estrangulamento na extremidade fundida de eletrodos consumíveis, de forma restringir o metal líquido na região em que seu diâmetro é menor. Este fenômeno magnético é também responsável pelo Efeito *Pinch* (Fig.7) e contribui para a sua separação da gota do fio sólido do eletrodo, favorecendo a transferência do metal do eletrodo para a peça (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Figura 7 – Esquema Efeito Pinch



Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE (2009)

3.2.2 Variáveis do arco elétrico

A soldagem por arco elétrico apresenta variáveis, que são fatores que podem influenciar no resultado e no cordão de solda. A velocidade, o comprimento do arco e o ângulo do eletrodo com a peça de metal, irão afetar diretamente a poça de fusão e conseqüentemente a sua penetração no metal de base e a estabilidade do processo. Outros fatores, como o tipo do eletrodo, seu diâmetro, o tipo e o nível da corrente, também precisam ser definidos de acordo com as condições e necessidades do projeto (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

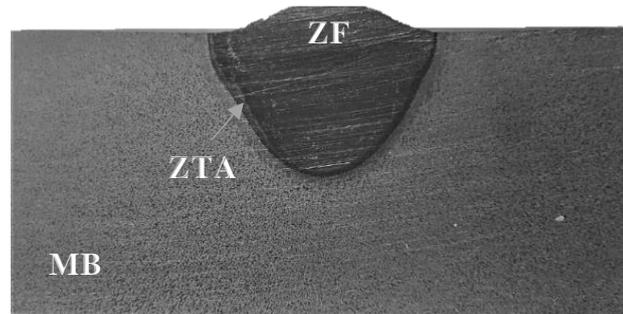
3.3 Metalurgia da soldagem

O principal objetivo do estudo da Metalurgia da Soldagem é a compreensão dos fenômenos físicos e metalúrgicos do material decorrentes do efeito da operação de soldagem. Uma vez que os processos de soldagem utilizam, em sua maioria, o calor como fonte de energia para viabilizar a fusão dos metais envolvidos, o aumento de temperatura localizado e brusco do material soldado, influenciará diretamente em mudanças na microestrutura do material, resultando assim em mudanças nas propriedades metalúrgicas e mecânicas da peça. As alterações promovidas na microestrutura, no geral, estarão relacionadas a integridade do material soldado e sua aplicação, sendo necessário o desenvolvimento de materiais com melhor soldabilidade e o maior controle de operações de soldagem com execução de operações complementares, de forma a reduzir ou remover a degradação de propriedades da peça (MODENESI, 2012).

3.3.1 Macroestrutura da junta soldada

A macroestrutura de uma junta soldada é composta por três zonas de interesse, que podem ser identificadas na Figura 8.

Figura 8 – Junta soldada e suas regiões



ZF – Zona Fundida
 ZTA – Zona Termicamente Afetada
 MB – Metal Base

Fonte: Própria autora

A zona fundida (ZF) é composta pela fusão e solidificação do metal de base e metal de adição. Nesta região, as temperaturas são maiores que a temperatura de fusão do metal de base. A composição química final da zona fundida pós fusão e solidificação do material depende da intensidade entre interações (como, por exemplo, absorção de gases, redução de óxidos, transferência de oxigênio para o metal, etc.), das composições químicas do metal de base e do metal de adição, e da participação destes na formação da Zona Fundida (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Esta participação é definida como coeficiente de diluição (δ) e é determinada pela razão entre a massa do metal de base fundida e a massa total da solda (Fig. 9).

Figura 9 – Determinação Experimental do Coeficiente de Diluição



$$\delta = \frac{B}{A+B} \times 100$$

Fonte: MODENESI (2012)

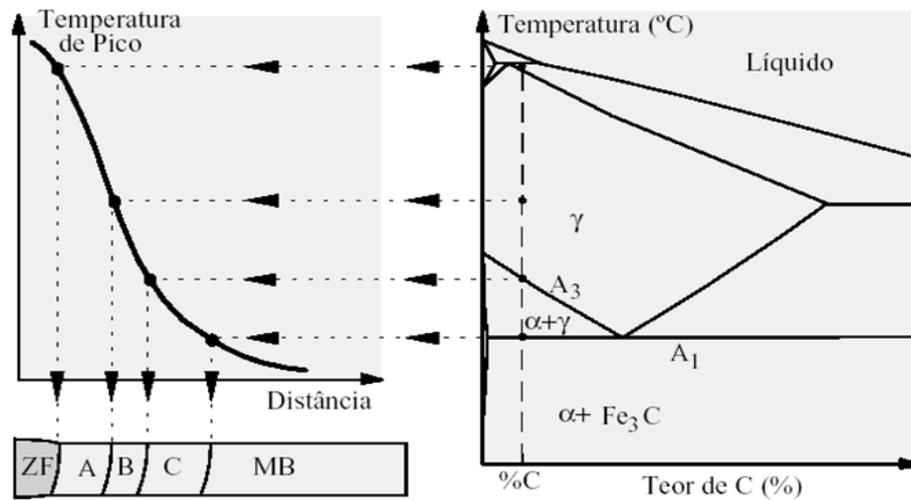
Uma das formas de se avaliar a diluição é realizada pela análise da seção transversal da junta soldada. O controle da diluição é importante na soldagem de metais dissimilares, na deposição de revestimentos especiais sobre uma superfície metálica, na soldagem de metais de composição química desconhecida e no controle de impurezas e/ou elementos prejudiciais à solda (MODENESI, 2012).

A Zona Termicamente Afetada (ZTA) é correspondente à região do metal de base não fundida, adjacente à zona de fusão, que teve sua microestrutura e/ou propriedades modificadas pelo ciclo térmico da soldagem. As temperaturas nessa faixa são sempre superiores à temperatura de transformação do material. Para metais transformáveis, a ZTA é consideravelmente mais complexa do que para metais não transformáveis, como, por exemplo, o alumínio. Para o caso de aços-carbono, a estrutura da zona termicamente afetada apresentará diferentes regiões características representadas na Figura 10 (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

- Região de crescimento de grão (A): abrange a região do metal de base próximo da solda que foi submetido a temperaturas próximas a temperatura de fusão. Nesta região, ocorre o crescimento de grão da estrutura austenítica, sendo este crescimento condicionado pelo tipo de aço utilizado e a energia de soldagem. Esta região é a mais propensa a ser problemática, podendo ser um local possível para formação de trincas e baixa tenacidade, devido a fatores como o tipo de microestrutura ali presente e condições diversas de soldagem;
- Região de refino do grão (B): compreende a região da junta aquecida a temperaturas geralmente utilizadas na normalização de aços ou um pouco acima destas variando entre 900 °C e 1200 °C. Após o processo de soldagem, essa região tem resistência e ductilidade elevadas;
- Região Intercrítica (C): a temperatura de pico nesta região varia entre 727 °C e a linha A3, sendo caracterizada pela transformação parcial do metal de base. Regiões a partir da região intercrítica, afastadas cada vez mais do cordão de solda, apresentam mudanças

microestruturais cada vez menos perceptíveis (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Figura 10 – Regiões da solda de um aço carbono



Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE (2009)

3.4 Processo GMAW

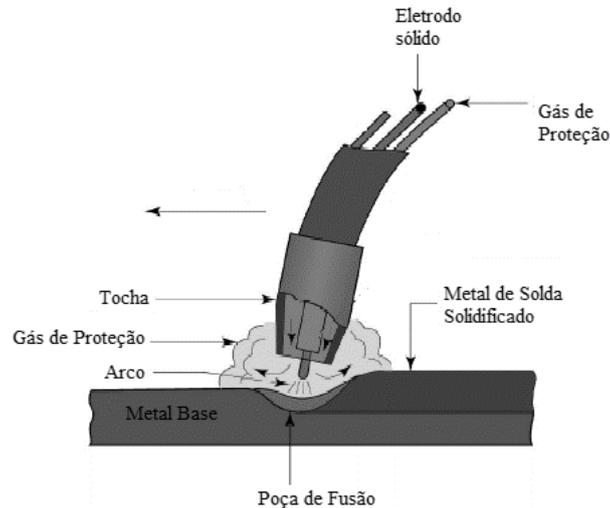
3.4.1 Visão geral do processo

A soldagem a arco com proteção gasosa, do inglês *Gas Metal Arc Welding*, “é um processo que se baseia na fonte de calor de um arco elétrico mantido entre a extremidade de um arame nu consumível que funciona como metal de adição, alimentado continuamente, e a peça a se soldar.” (SCOTTI & PONOMAREV, 2008). Esse processo também é conhecido como Soldagem MIG/MAG, sendo esta nomenclatura relacionada à capacidade de reação do gás de proteção utilizado, onde MIG representa *Metal Inert Gas* (proteção por gás ou mistura, inerte) e MAG representa *Metal Active Gas* (proteção por gás ou mistura de gases ativos com gases inertes).

A soldagem a arco com proteção gasosa é um processo que pode ser considerado de aplicação automatizada, quando o movimento da tocha é realizado por uma máquina, ou semiautomática, quando o operador é responsável por realizar o movimento de deposição de material. A alimentação do arame, em ambos os casos, é realizada de forma mecânica utilizando-se um alimentador motorizado, com o intuito de manter constante a velocidade de alimentação e o

comprimento do arco, otimizando assim o processo de união entre materiais (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009; SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

Figura 11 – Esquemática do processo GMAW



Fonte: Group – GMAW Process (Adaptado pela autora)

3.4.2 Equipamentos envolvidos e consumíveis

Os equipamentos básicos para realização do processo de soldagem GMAW são:

- Fonte de energia;
- Alimentador de arame;
- Tocha de soldagem;
- Fonte de gás de proteção;
- Cabos e mangueiras.

As fontes de energia (ou fontes de soldagem) tem como função fornecer corrente de soldagem para o processo GMAW. Geralmente possui curva característica de saída de tensão constante, podendo ser fabricada com diversos tipos de tecnologia para controle da tensão. As fontes de energia para o processo GMAW podem ser definidas de duas maneiras: fonte de corrente constante e fonte de tensão constante.

O alimentador de arame funciona como o sistema impulsionador do arame para a tocha, sendo responsável pela alimentação automática do material de consumo. Ele pode existir de duas

formas: (1) compactas com bobina embutida com a fonte, que atuam protegendo o arame contra poeira e umidade ou (2) com bobina separada promovendo maior flexibilidade e mobilidade para execução do processo.

As tochas de soldagem são parte integrantes do sistema de alimentação do arame, contam com gatilho que é acionado para liberação mecanizada do eletrodo formando as componentes essenciais do conjunto para soldagem GMAW (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

3.4.3 Variáveis

O processo de GMAW é um processo amplamente utilizado no cenário industrial atual devido a diversos fatores, inclusive a menor necessidade de habilidade do soldador para controle do comprimento do arco elétrico, uma vez que a alimentação do arame é mecanizada, dispensando assim o movimento de mergulho da tocha em direção a poça de fusão. Todavia, a definição de variáveis nesse processo é complexa, devido à quantidade de parâmetros que devem ser ajustados. Com isto, é de extrema importância a determinação e conhecimento das variáveis para garantir a qualidade e sucesso do processo de soldagem por GMAW.

As variáveis do processo, definidas por Wainer (1992) em acordo com a norma ASME, são:

- Qualificação do procedimento: metal-base; metal de adição; tratamento térmico após soldagem; pré-aquecimento; tipo de gás de proteção; tipo de junta adotada; posição de soldagem; características elétricas; e técnicas de soldagem.
- Qualificação do soldador: tipo de junta; metal-base; metal de adição; posição de soldagem; tipo de gás de proteção e características elétricas.

3.4.4 Modos de transferência metálica

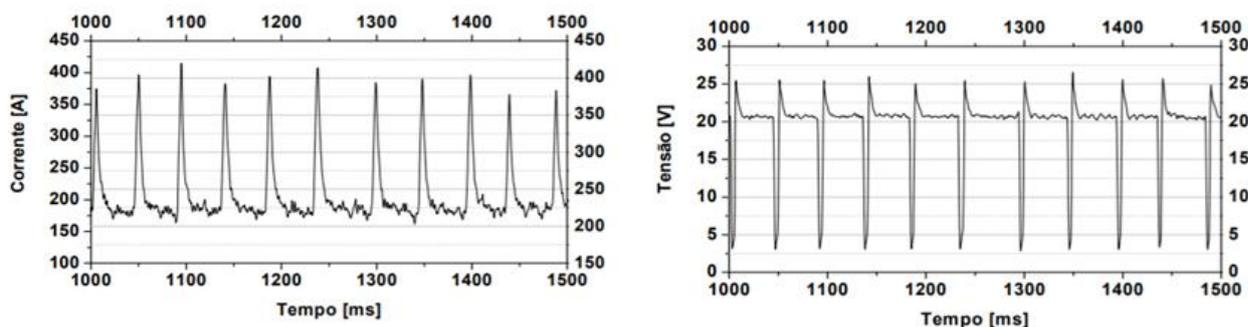
Para compreensão dos modos de transferência metálica no processo GMAW, é necessário ter conhecimento sobre as forças que governam a transferência metálica da gota do metal fundido para a poça de fusão. Desde o início do seu crescimento na ponta do eletrodo, a gota é submetida à uma série de forças que podem atuar de forma favorável ou não ao seu desprendimento. Essas forças podem ser de natureza eletromagnética, gravitacional, tensão superficial, de arraste ou vaporização e irão influenciar, juntamente com parâmetros de regulagem do processo e gases

de proteção, nos modos de deposição do eletrodo fundido na junta a ser soldada. (SCOTTI & PONOMAREV, 2008). Os quatro principais modos de transferência metálica são: transferência por curto circuito, transferência globular, transferência por *spray* e transferência controlada.

3.4.4.1 *Transferência por curto circuito*

A transferência por curto circuito ocorre quando há baixos valores de tensão e corrente envolvidos, baixa energia de soldagem necessária e/ou a soldagem é fora da posição plana. O mecanismo de transferência ocorre devido a formação da gota na ponta do eletrodo que se aproxima da poça de fusão, pois a velocidade de fusão neste intervalo é menor que a de alimentação, o que possibilita a ocorrência de um curto circuito. Devido a tensões superficiais, a gota será rapidamente atraída para a poça de fusão, depositando material na junta a ser soldada ocorrendo a estabilização do arco para formação de novo curto-circuito. A principal característica deste tipo de transferência é a intensa formação de respingos, causadas pela instabilidade do arco elétrico, que eventualmente podem ser suavizadas mediante a alteração nos parâmetros de soldagem (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009; SANTANA, 2010).

Figura 12 – Modo de transferência metálica por curto-circuito: Oscilogramas de corrente e tensão



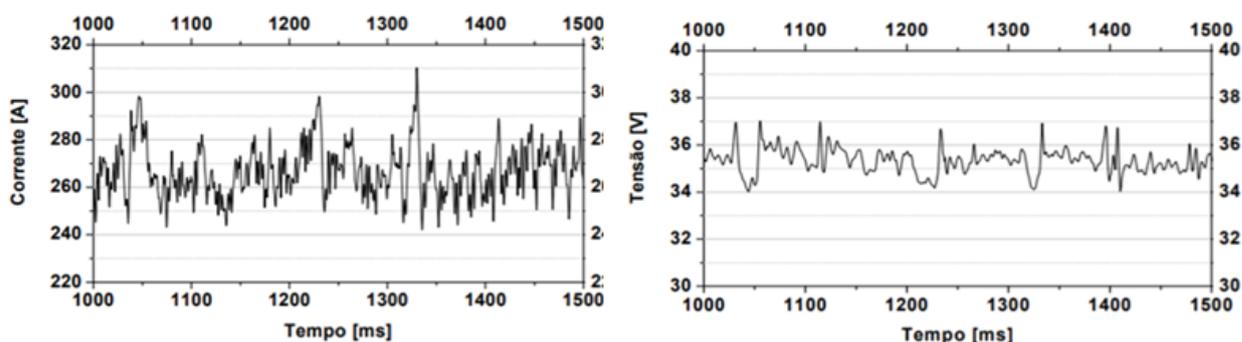
Fonte: SANTANA (2010)

3.4.4.2 *Transferência globular*

A transferência globular acontece quando há valores intermediários de tensão e corrente caracterizando arco elétrico mais estável que a transferência por curto circuito. Entretanto, a obtenção de um arco mais estável não garante diminuição da quantidade de respingos, pois

valores intermediários de corrente impedem a formação de uma gota de diâmetro considerável, que por ação da gravidade é depositada aleatoriamente na superfície do material. Com isso, a posição de soldagem se limitaria à posição plana, mas ainda assim é evitada devido ao seu caráter desordenado de respingos do material no processo de transferência (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Figura 13 – Modo de transferência metálica globular: Oscilogramas de corrente e tensão



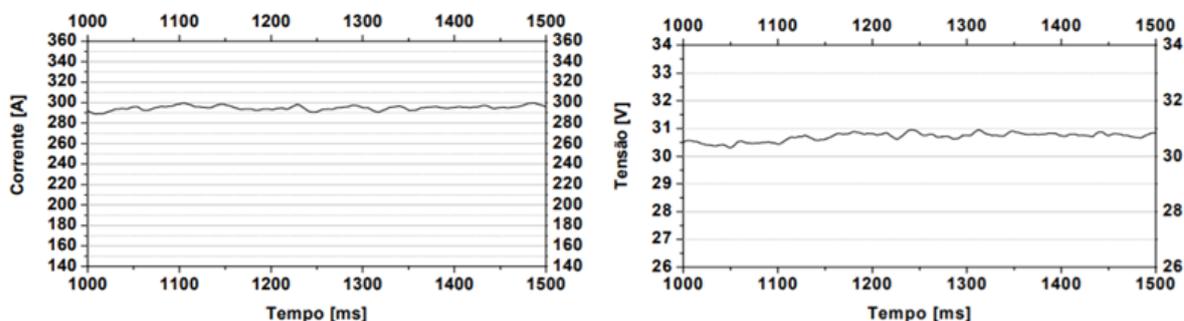
Fonte: SANTANA (2010)

3.4.4.3 *Transferência por spray*

A transferência por *spray* é caracterizada pelo aumento da corrente de soldagem até uma faixa estreita de valores, também chamada de “corrente de transição”, no qual o diâmetro médio das gotas será menor que o diâmetro do eletrodo, fator esse que caracteriza a formação de cordão de solda suave e regular sem respingos durante o processo.

Entretanto, como os valores de corrente de soldagem são relativamente elevados para esse método de transferência, a soldagem de chapas finas seria impossível, uma vez que a energia concentrada fundiria o material provocando buracos na chapa e a soldagem fora de posição plana, na prática, poderia ser problemática devido ao tamanho da poça de fusão formada (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Figura 14 – Modo de transferência metálica por spray: Oscilograma de corrente e tensão

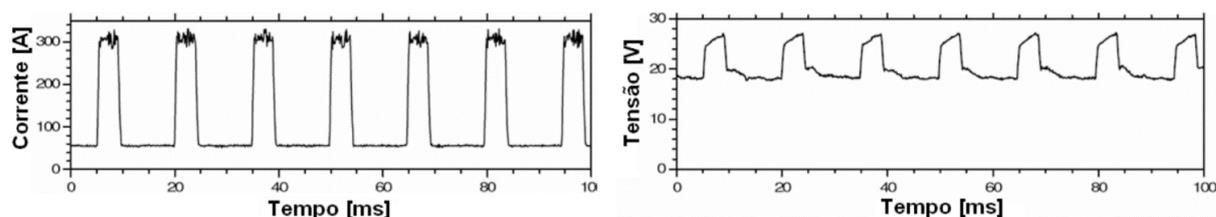


Fonte: SANTANA (2010)

3.4.4.4 *Transferência pulsada*

A transferência pulsada se caracteriza por ser uma transferência mais estável e uniforme sendo semelhante à transferência globular, porém a diferença está na pulsação de corrente elétrica em dois patamares: um abaixo da corrente de transição, já previamente definida, e o outro patamar superior ao valor de corrente de transição. O mecanismo consiste na formação da gota na ponta do eletrodo quando o valor de corrente é baixo de modo que quando houver o salto para o patamar elevado de corrente, a gota seja transferida para a junta do material (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Figura 15 – Modo de transferência metálica por corrente pulsada: Oscilogramas de corrente e tensão



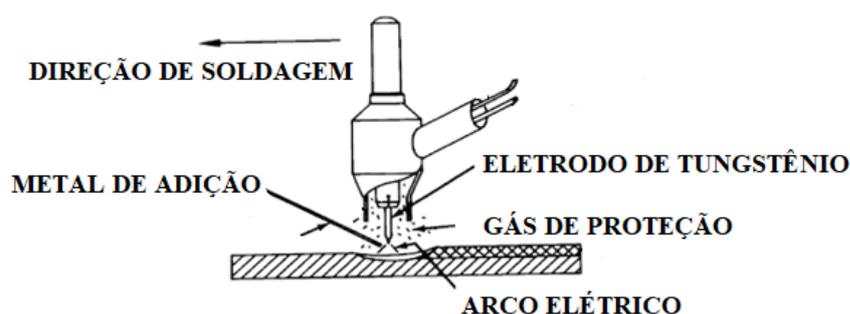
Fonte: SANTANA (2010)

3.5 Processo TIG

Soldagem TIG (Tungsten Inert Gas) ou GTAW (Gas-Shielded Tungsten Arc Welding) é um processo que utiliza um eletrodo sólido e não consumível de tungstênio. O eletrodo, o arco e a área em volta da poça de fusão da solda são protegidos por uma atmosfera protetora de gás inerte conforme apresentado na Figura 16. O arco elétrico na soldagem TIG é estável, suave e gera cordões soldados com bom acabamento, exigindo pouca ou praticamente nenhuma

limpeza após a operação. Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2009), a soldagem TIG possui excelente e direcionado controle da energia transferida para a peça. Esse fator torna o processo adequado para processos onde há a necessidade de contaminação mínima pois possui proteção eficiente contra contaminação, além de ser útil para a soldagem de materiais de difícil soldabilidade.

Figura 16 – Esquemático do Processo GTAW



Fonte: NEMJET (Adaptado pela autora)

3.6 Ferro fundido

3.6.1 Definições

Os ferros fundidos são ligas contendo, em sua maioria, Fe-C-Si com variações percentuais de elementos de liga como manganês, enxofre e fósforo. São ligas que se caracterizam por apresentarem reação eutética ($L_{4,3\%C} \leftarrow 1147\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow \gamma_{0,17\%C} + \text{Fe}_3\text{C}$) durante sua solidificação (GUESSER, 2009).

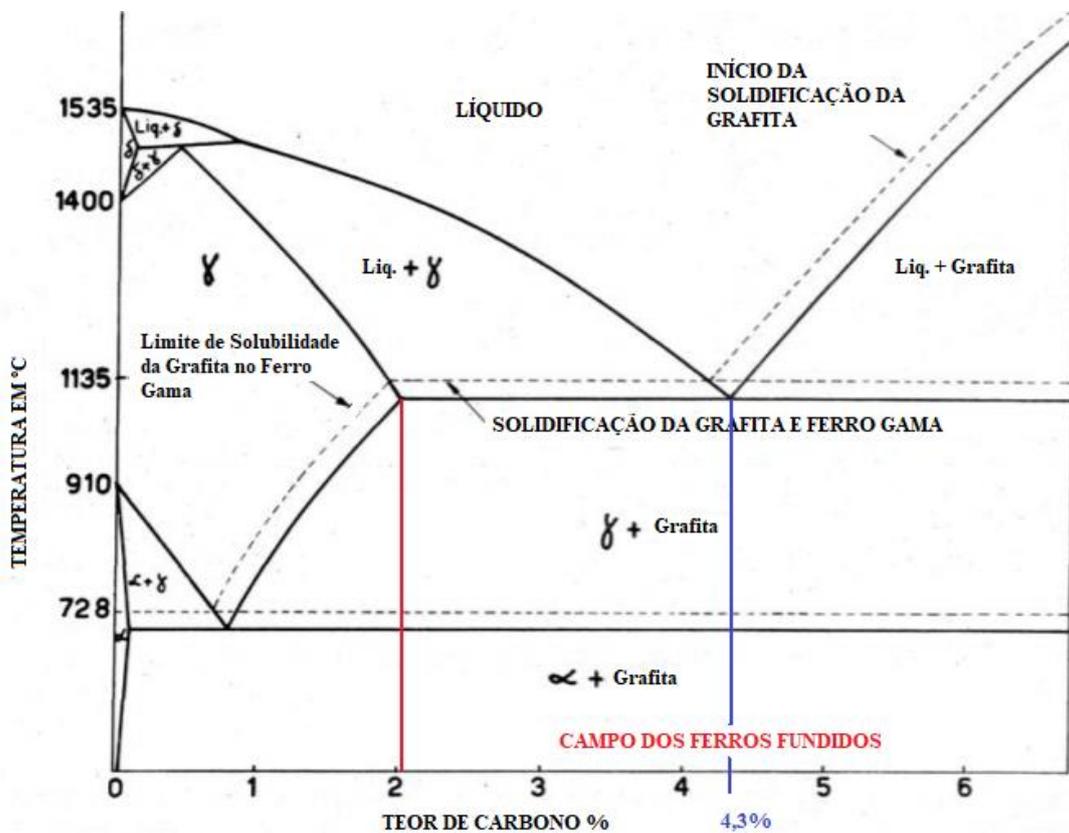
As principais características que tornam o Ferro Fundido tão aplicados industrialmente são o baixo ponto de fusão, alta fluidez e menor contração volumétrica quando comparado aos aços. Esse conjunto de propriedades aliados a seu baixo valor agregado facilitam na escolha destes, mesmo que as propriedades mecânicas sejam inferiores, em uma análise de custo vs benefício (DE PARIS, 2003).

As propriedades mecânicas dos ferros fundidos estão relacionadas à sua variação de microestrutura e à distribuição de elementos constituintes, principalmente a grafita livre, pois

esta possui baixa resistência mecânica podendo atuar como uma descontinuidade da matriz, exercendo efeitos de concentrador de tensões (GUESSER, 2009).

A Figura 17 exhibe o diagrama de fases da liga Fe-C. Acima de 2,11 %C encontra-se o campo dos ferros fundidos. Com 4,3 %C, na temperatura de 1148 °C, encontra-se o ponto eutético, correspondendo a temperatura de solidificação mais baixa da liga. Entre os percentuais de 2,11 %C a 4,3 %C os ferros fundidos são chamados de ferros fundidos hipoeutéticos, correspondendo a maioria dos ferros fundidos aplicados industrialmente. Analogamente, entre os percentuais de 4,3 %C a 6,7 %C temos os ferros fundidos hipereutéticos (DE PARIS, 2003).

Figura 17 – Diagrama Fe-C para Ferros Fundidos



Fonte: Adaptado de Waldek Wladimir Bose Filho, 1983 (Adaptado pela Autora)

3.6.2 Tipos de ferros fundidos e suas características

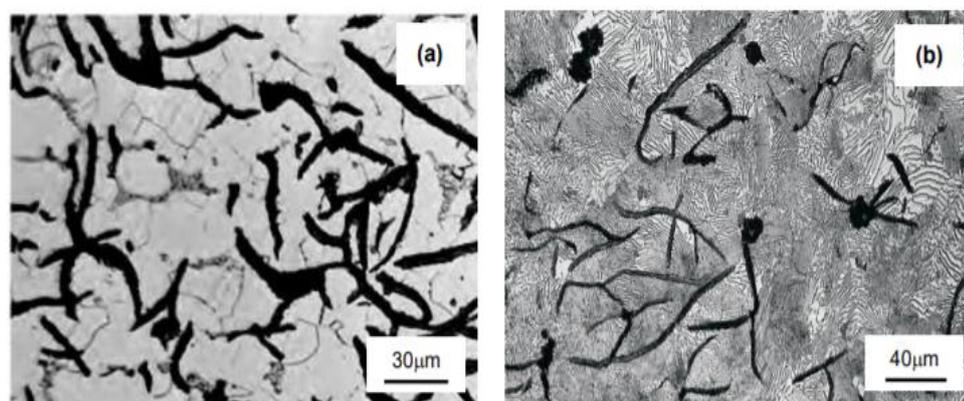
Segundo Guessser (2009), os ferros fundidos são classificados em diferentes famílias principalmente de acordo com a forma da grafita. O nome de cada família, por vezes, está relacionado a forma da grafita (nodular), em outras tem relação com o aspecto da fratura

(cinzento, branco) ou com alguma propriedade mecânica importante (maleável). Assim sendo, serão abordadas as principais características de cada tipo de ferro fundido.

3.6.2.1 *Ferros fundidos cinzentos*

Os ferros fundidos cinzentos, apresentados na Figura 18, apresentam microestrutura com veios de grafita dispersos na matriz ferrítica-perlítica. A grafita fornece cor cinzenta na superfície fraturada e atua formando pequenas trincas internas, tornando este material frágil. Ao mesmo tempo, a morfologia da grafita, o elevado teor de carbono, silício e as impurezas presentes, podem limitar a ductilidade e a capacidade de deformar sem se fraturar, resultando em um material frágil. Em contrapartida, os ferros fundidos cinzentos são facilmente usináveis, apresentam boa resistência ao desgaste e absorvem bem vibrações sendo aplicados em componentes que precisam de estabilidade, como por exemplo blocos de motor e discos de freios (DE PARIS, 2003; GUESSER, 2009)

Figura 18 – Exemplo de fotomicrografias para Ferro Fundido Cinzento



(a) Matriz ferrítica

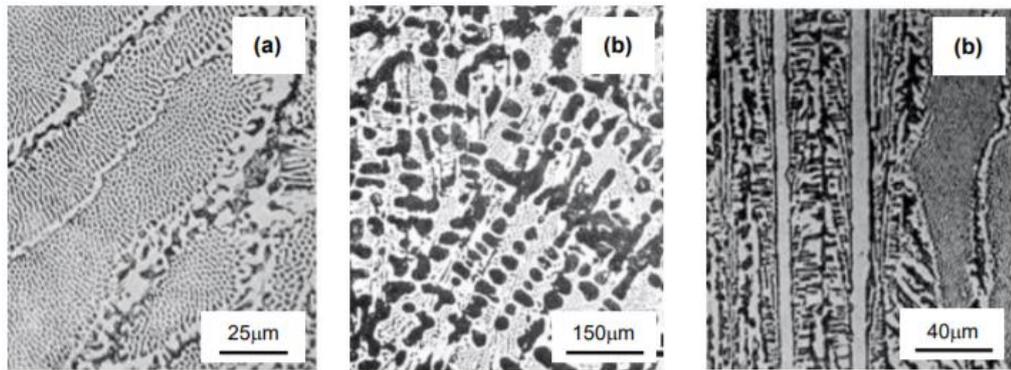
(b) Matriz perlítica

Fonte: ALMEIDA (2014)

3.6.2.2 *Ferros fundidos brancos*

Os ferros fundidos brancos apresentam microestrutura onde praticamente todo o carbono se apresenta na forma de cementita ou de carbonetos metálicos, não havendo formação de grafita, conforme exibido na Figura 19, caracterizando assim materiais de elevada dureza, elevada resistência ao desgaste e baixa ductilidade. Além disso, os ferros fundidos brancos são dificilmente soldáveis (COLPAERT, 2008; DE PARIS, 2003; CHIAVERINI, 2008).

Figura 19 – Exemplo de fotomicrografias para Ferro Fundido Branco



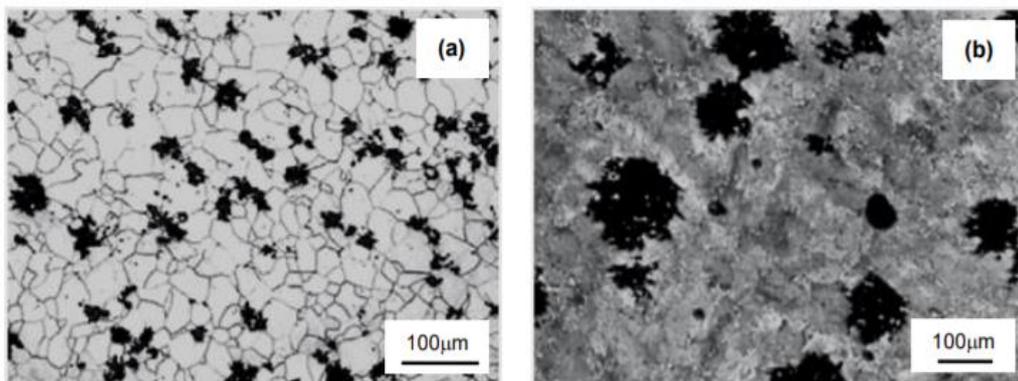
- (a) Eutético
- (b) Hipoeutético
- (c) Hipereutético

Fonte: ALMEIDA (2014)

3.6.2.3 Ferros fundidos maleáveis

Os ferros fundidos maleáveis (Fig. 20) são originados a partir do ferro fundido branco submetido transformando todo o ferro combina a tratamentos térmicos de grafitização (ferro maleável preto) ou de descarbonetação (ferro maleável branco) resultando na formação de grafita na forma de rosetas/nódulos dispersas em matriz ferrítica, perlítica e até mesmo martensítica revenida, aumentando sua resistência mecânica e ductilidade. Esse tipo de ferro fundido pode ser dobrado e conformado, além de ter excelente usinabilidade (DE PARIS, 2003; GUESSER, 2009).

Figura 20 – Exemplo de fotomicrografias para Ferro Fundido Maleáveis



- (a) Matriz Ferrítica
- (b) Matriz Perlítica

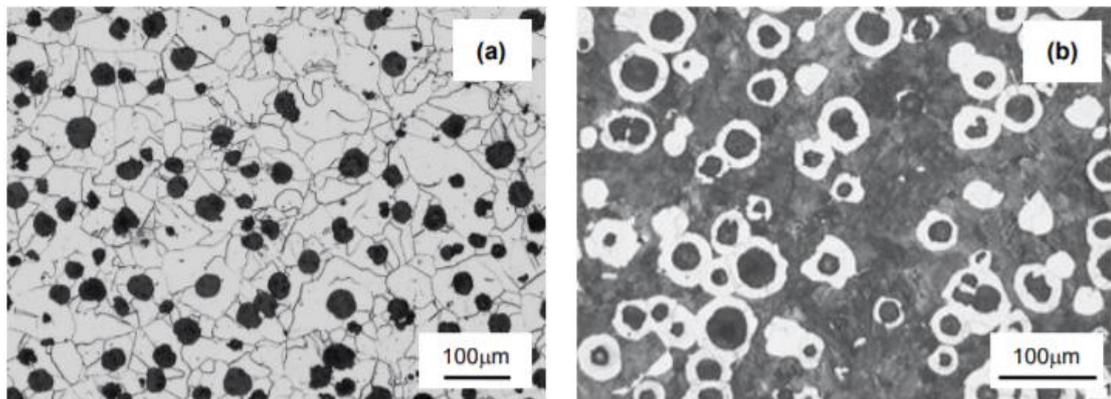
Fonte: ALMEIDA (2014)

3.6.2.4 Ferros fundidos nodulares

Objeto de estudo principal deste trabalho, os ferros fundidos nodulares possuem composição semelhante à dos ferros fundidos cinzentos com o adicional de elementos de liga (Mg) que esfeirotizam a grafita livre, evidenciada na Figura 22.

Devido à sua excelente combinação de propriedades, como elevada ductilidade e resistência à tenacidade, boa usinabilidade e baixo custo, os ferros fundidos nodular têm ocupado aplicação crescente na engenharia, substituindo componentes de ferros fundidos cinzentos, aços forjados, etc (DE PARIS, 2003; GUESSER, 2009).

Figura 21 – Exemplo de fotomicrografias para Ferro Fundido Nodulares



(a) Matriz Ferrítica
(b) Matriz Perlítica Ferrítica

Fonte: ALMEIDA (2014)

3.7 Soldabilidade (pré-aquecimento e pós-aquecimento)

A soldabilidade do ferro fundidos é classificada pela norma DIN 17245 da seguinte forma:

- “Soldagem de produção, que é a soldagem empreendida pelo produtor de fundidos no curso de fabricação, com o objetivo de garantir as propriedades e assegurar as qualidades necessárias das peças fundidas.”;
- “Soldagem de construção, para unir ferros fundidos mutuamente ou com outros materiais estruturais.”;

- “Soldagem de manutenção ou reparo, para ferros fundidos avariados durante sua aplicação. Neste caso, as peças são restauradas para obter as propriedades desejáveis para utilização”.

Para melhor compreensão dos efeitos corretivos para favorecer a soldabilidade dos ferros fundidos nodulares, deve-se entender as dificuldades da soldagem deste material. Uma das principais dificuldades na soldagem de ferros fundidos está na tendência que este material tem de formar microestruturas duras e frágeis na ZTA mediante ao rápido aquecimento e resfriamento do metal de base nas proximidades da solda. O mecanismo pelo qual as estruturas frágeis são formadas é derivado da influência do calor do arco e do metal fundido do cordão (DE PARIS, 2003).

A necessidade de pré-aquecimento e pós-aquecimento do ferro fundido depende de vários fatores como:

- Forma geométrica;
- Tamanho;
- Grau de distorção aceitável;
- Tipo de Ferro Fundido e;
- Metal de deposição.

A utilização da técnica de pré-aquecimento e pós aquecimento reduz as variações bruscas de temperatura entre o metal de solda e as regiões adjacentes à ZF e ZTA. O pré-aquecimento pode prevenir formação de trincas, reduzir as tensões residuais e distorções na peça, dentre outros. No caso dos ferros fundidos nodulares, nem sempre o pré-aquecimento é benéfico ou necessário (DE PARIS, 2003). Entretanto, é desejável pré-aquecer a peça entre 280°C e 400°C. O pós-aquecimento é indicado em forma de tratamento térmico para que as estruturas duras obtenham melhor ductilidade e usinabilidade da ZTA.

Nos ferros fundidos nodulares, para melhorar a ductilidade, deve-se realizar recozimento ferritizante em forno, mantendo o durante três horas à uma temperatura de 850-900°C e resfriá-lo dentro do forno até 690°C, por cinco horas, para somente após resfriá-lo lentamente até a temperatura ambiente. No caso do alívio de tensões, indica-se a técnica de aquecimento entre

510-680°C durante 1,5 horas com particularidade para o tamanho da seção transversal mediante presença de elementos de liga (DE PARIS, 2003).

4 ESTADO DA ARTE

Um estudo realizado por El-Banna (1999), determinou que as propriedades de soldas de ferros fundidos são alteradas após tratamento térmico de recozimento para diferentes temperaturas de pré-aquecimento do material. O tipo de processamento feito foi utilizando eletrodos revestidos (processo SMAW) e resultou em zonas com diferentes microestruturas formadas. O principal ponto abordado era a formação de martensita próximo a zona termicamente afetada, que tem influência negativa nas propriedades da solda. Constatou-se que a formação da martensita na zona termicamente afetada (ZTA) é associada não apenas a escolha ruim das temperaturas de pré-aquecimento, mas também pelo motivo de negligência ao não estabelecer uma temperatura de pós aquecimento por um tempo suficiente para que a taxa de resfriamento seja uniforme impedindo a formação de martensita na estrutura. Portanto, concluiu-se, pós solda, que os corpos de prova devem ser mantidos em forno elétrico a uma determinada temperatura para que haja o resfriamento dentro do forno até a temperatura ambiente e que o pré-aquecimento é benéfico para prevenir trincas. Temperaturas baixas de pré-aquecimento são aceitáveis quando a temperatura de solda for muito alta ou quando a soldagem for realizada em pequenas espessuras. Já o pré-aquecimento a elevadas temperaturas deve ser evitado para evitar a formação contínua de carbeto na zona parcial de fusão. O autor concluiu, portanto, que o pré-aquecimento a uma temperatura de 300°C ou 200°C, será útil para prevenção da formação da martensita na ZTA e melhoria das propriedades mecânicas.

Devido à quantidade elevada de carbono presente nos ferros fundidos, a soldabilidade deste material é um fator importante a ser avaliado. Para tal fim, a utilização de materiais deve ser criteriosa. A qualidade da solda utilizando eletrodos de Fe-Ni e Ni puro foi avaliada para estabelecer os melhores parâmetros para o uso no ferro fundido com nódulos de grafita. Realizou-se a comparação entre três tipos de solda: sem pré-aquecimento, a um aquecimento de 350° e revenimento a 850°. Foram realizados testes de microdureza em diferentes regiões da zona fundida, da zona termicamente afetada e do metal base. Analisando as propriedades foi possível inferir que eletrodos puros de NI são melhor do que eletrodos Fe-Ni pelo fato de que uma concentração maior de níquel melhora a dissolução da grafita e retém austenita impedindo a formação de cementita dura, portanto se não há formação de cementita, o material tende a possuir uma boa ductilidade minimizando formação de trincas/fratura no material (M. PASCUAL, C. FERRER, E. RAYÓN, 2009).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para o desenvolvimento deste trabalho foram:

- Barra de seção retangular de ferro fundido nodular com matriz ferrítica perlítica;
- Arame de deposição;
- Gás de proteção;

A composição química da barra de ferro fundido é fornecida na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Composição química (% em peso) fornecida pelo fabricante do material utilizado

Elemento	C	Si	Mg	Mn	S	P	Cu	Cr
% em peso	3,90	2,96	0,05	0,20	0,014	0,063	0,015	0,038

Fonte: Fundição Tupy

A mistura gasosa utilizada no processo GMAW foi Ar 75% e CO₂ 25%. Para o processo GTAW, o gás de proteção utilizado foi argônio puro.

O arame utilizado como material de deposição no processo GMAW foi o arame 2 da marca com especificações conforme a Tabela:

Tabela 2 – Especificações do arame utilizado

Arame	Concentração (%)	
	Fe	Ni
EC 1823	60	40

Fonte: Eutectic Castolin

5.2 EQUIPAMENTOS

Os equipamentos utilizados desde a etapa de confecção de corpos de prova até a análise metalográfica foram:

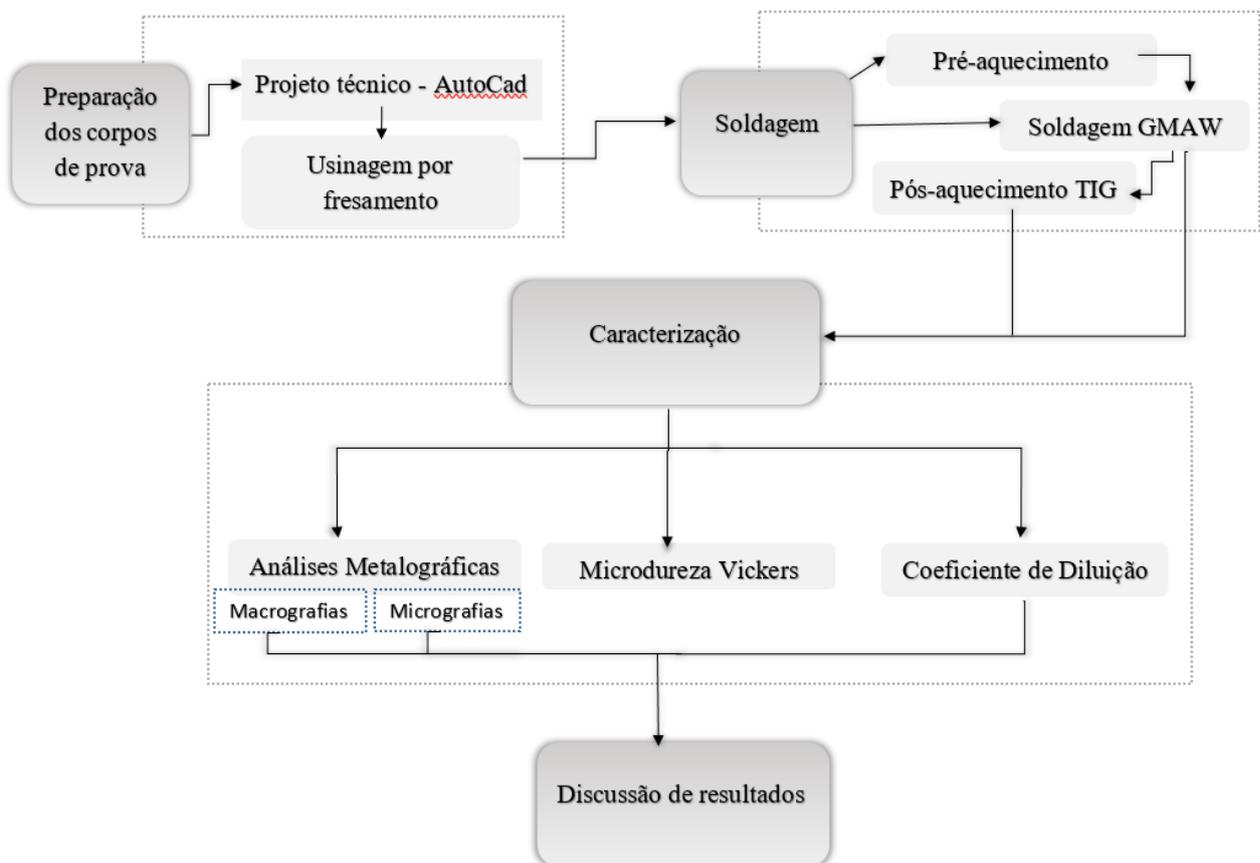
1. Fresadora Universal Clever FH-4;
2. Fonte de soldagem GMAW Lincoln Electric CF45;

3. Fonte de alimentação Lincoln Electric S350 Power Saver;
4. Fonte de soldagem GTAW Miller Electric Syncrowave 250 DX;
5. Dispositivo de Fixação;
6. Tartflope adaptado;
7. Cortadeira metalográfica AROTEC Modelo Arocor – 80;
8. Lixadeiras Arotec Modelo Aropol-VV;
9. Politriz Fortel Modelo PLF;
10. Microscópio Óptico Fortel com sistema de digitalização Kontrol;
11. Estereomicroscópio Metrimpex;
12. Máquina de dureza Shimadzu Modelo HVM – 2T.

5.3 MÉTODOS

A metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho pode observada de acordo com o fluxograma esquemático abaixo:

Figura 22 – Fluxograma do processo

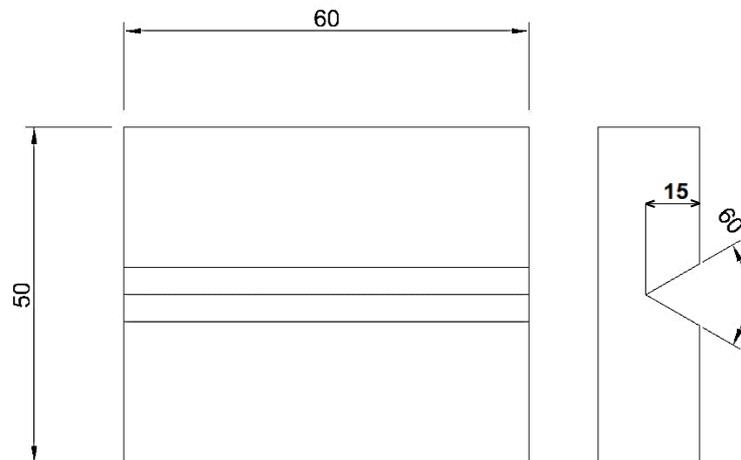


Fonte: Própria autora

5.3.1 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram cortados com serra e posteriormente usinados utilizando fresa de topo para adequação das dimensões do projeto evidenciado na Figura 24.

Figura 23 – Desenho técnico das dimensões dos corpos de prova



Fonte: Própria autora

Para confecção do chanfro, optou-se pelo uso de fresa angular 60°.

5.3.2 Procedimento de soldagem

O estabelecimento das condições ótimas de soldagem GMAW nem sempre são diretas, sendo essencial a determinação empírica das variáveis de soldagem anterior à realização do procedimento. Assim, foram realizados testes mecanizados de deposição em superfícies planas utilizando o modo pré-programado 05 (GMAW) da fonte de soldagem. Os parâmetros levados em consideração para realização do procedimento foram:

- Velocidade de alimentação (V_a);
- Velocidade de deslocamento do carrinho de soldagem (V_d);
- Vazão do gás;
- Indutância;
- *Stick-out* (distância entre bocal e a peça);
- Tensão (comprimento do arco);

A escolha da melhor condição inicial foi feita após avaliação visual da uniformidade da deposição, altura do reforço do cordão e da quantidade de respingos na chapa.

Os procedimentos que foram definidos estão apresentados na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Procedimentos e parâmetros utilizados

Condição		Velocidade de deslocamento – V_a (m/min)	Velocidade de alimentação - V_a (m/min)	Tensão (V)	Vazão do Gás (L/min)	Stick out (mm)	Nº de passes
1	Inicial 1 passe	130	3,86	23,5	18	10	01
	Inicial 2 passes	245	3,86	23,5			02
2	Mudança de variáveis	130	4,29	24,5			01
		245	4,29	24,5			02
3	Pré aquecimento a 300°C	130	3,86	23,5			01
		245	3,86	23,5			02
4	Pós aquecimento GTAW	130	3,86	23,5			01
		130	3,86	23,5			01
		130	3,86	23,5			01

Obs: * CP = Corpo de Prova; LD = Lado Direito; AL = Ambos os Lados

Fonte: Própria autora

Considerando que as condições padrões de soldagem para união ou reparo de peças muitas vezes envolvem elementos de dimensões de grande escala, o procedimento de soldagem GMAW foi realizado com o auxílio de um dispositivo desenvolvido em “Avaliação da aplicação de pré-aquecimento e multipasses na junta soldada de um aço SAE 1070”.

Figura 24 – Dispositivo de fixação de corpo de prova

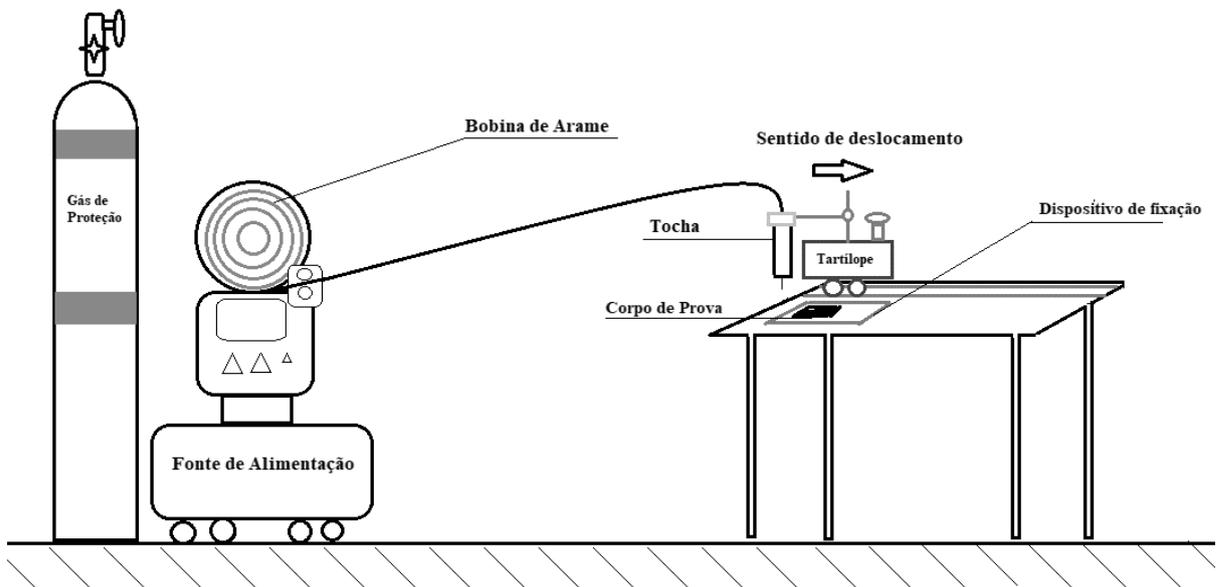


Fonte: Própria autora

O dispositivo tem como objetivo posicionar corretamente o corpo de prova e também possibilitar troca de calor, aumentando a taxa de resfriamento do processo, que poderá influenciar na composição da ZTA (CANESSO, 2017).

A deposição dos cordões em cada corpo de prova foi feita com o auxílio de um tartilope, responsável pela mecanização do processo, com velocidades de 130 mm/min para preenchimento único do cordão e de 245 mm/min para preenchimento do cordão em duas etapas. A tocha foi posicionada de forma centralizada e perpendicular aos corpos de prova durante o processo com uma distância entre o bico de contato e a peça (DBCP) de 10 mm. O desenho esquemático do procedimento pode ser visualizado abaixo.

Figura 25 – Representação esquemática do processo GMAW Mecanizado



Fonte: Própria Autora

5.3.2.1 Pré Aquecimento e Pós aquecimento

Para os corpos de prova 'Pré aquecidos a 300°C', utilizou-se forno convencional sem controle atmosférico onde os corpos de prova foram, um a um, deixados no forno durante o período de 30 minutos e o transporte de cada peça foi feito até o local de soldagem utilizando uma caixa metálica com revestimento refratário, minimizando as eventuais perdas de calor por convecção da peça.

A condição de pós aquecimento foi realizada utilizando a soldagem GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) sem uso de metal de adição. O eletrodo de tungstênio foi posicionado adjacente ao

cordão depositado e a velocidade de deslocamento utilizada foi de 130 mm/min com *stick out* de 10 mm seguindo as seguintes condições:

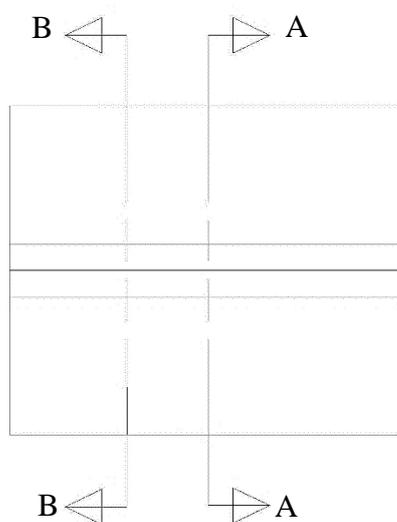
- Aquecimento TIG no lado direito do cordão e corrente $I = 50$ A;
- Aquecimento TIG no lado direito do cordão e corrente $I = 70$ A;
- Aquecimento TIG em ambos os lados e corrente $I = 50$ A.

5.3.3 Caracterização dos corpos de prova

5.3.3.1 Análise Metalográfica

Os corpos de prova foram cortados transversalmente sob refrigeração constante com fluido de corte na cortadora metalográfica. Foram cortados corpos com 12 mm de comprimento, conforme a Figura 27 abaixo.

Figura 26 – Esquemático para corte de corpos de prova soldados



A – Primeiro corte – 30 mm
B – Segundo corte – 12 mm

Fonte: Própria autora

As amostras A foram lixadas com lixas de granulometria #120 e #240. Após a lavagem e secagem das amostras, realizou-se ataque químico por imersão com NITAL 10% durante 10 segundos para evidenciar a Zona Termicamente Afetada (ZTA) da amostra. As macrografias

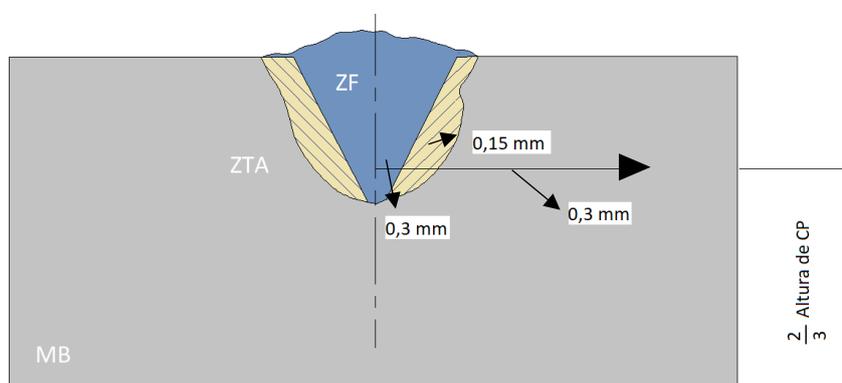
foram realizadas utilizando estereomicroscópio. As amostras B foram lixadas com lixas de granulometria #120, #240, #320, #400 e #600 e polidas com pano de polimento metalográfico e pastas de diamante de 9 μm e 3 μm , para obtenção das micrografias. O ataque químico foi feito por imersão utilizando NITAL 3%. O tempo de imersão foi variável, tendo como critério a observação do momento onde as amostras se tornavam opacas. As capturas das micrografias foram feitas utilizando microscópio óptico e priorizou-se a observação da ZTA.

5.3.3.2 Microdureza Vickers

A análise do perfil de microdureza Vickers. A carga utilizada foi de 0,3 Kgf. As medidas foram feitas utilizando os seguintes critérios:

- Medição feita a partir do centro da ZF passando pela ZTA e finalmente chegando ao MB;
- A linha de referência para as endentações foi de $\frac{2}{3}$ da altura do corpo de prova $LF = 10 \text{ mm}$ para todos os casos;
- A distância definida para finalização das medições foi de 9 mm a partir do centro da ZF;
- O passe entre cada endentação foi de 0,3 mm até atingir a ZTA onde o passe foi reduzido para 0,15 mm;
- À medida que houve convergência nos valores de dureza, o passe foi novamente aumentado para 0,3 mm no MB.

Figura 27 – Esquemático para obtenção de perfil de dureza

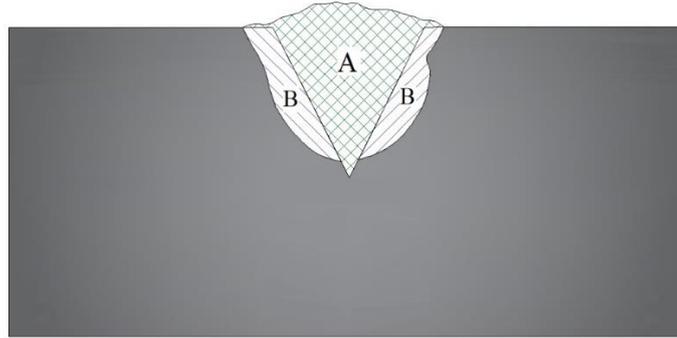


Fonte: Própria autora

5.3.3.3 Cálculo do coeficiente de diluição

Utilizando um software de imagem, as regiões correspondentes à Figura 29 foram delimitadas para o cálculo de área das regiões A e B.

Figura 28 – Esquemático para cálculo e obtenção do coeficiente de diluição



Fonte: Própria autora

Com os valores estimados de cada região, utilizou-se a Equação (1) para aquisição dos percentuais de diluição.

$$\delta = \frac{B}{A + B} \times 100 \quad (1)$$

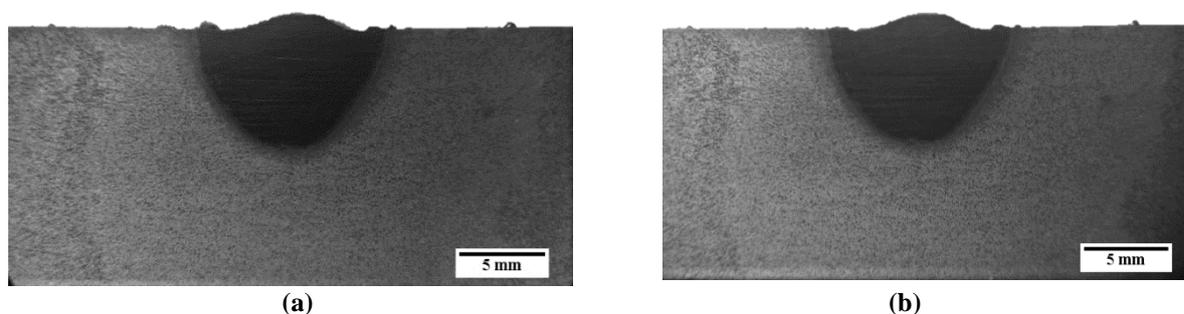
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Condição 1 – Inicial sem pré-aquecimento

6.1.1 Cordão de solda – 1 passe

Após realização dos testes de soldagem como descrito na metodologia (Item 5.3.2), os corpos de prova foram avaliados qualitativa e quantitativamente. A Figura 30 exibe dois corpos de prova soldados com um passe e sem pré-aquecimento.

Figura 29 – Fotomicrografias dos corpos de prova soldados sem pré-aquecimento



- (a) Corpo de prova 01 com 01 passe
 (b) Corpo de prova 02 com 01 passes

Fonte: Própria autora

Em ambos os testes, pôde-se observar pela análise visual dos cordões depositados e pelas fotomicrografias que eles apresentaram boas condições de preenchimento do chanfro, nenhum tipo aparente de distorções estruturais, poucos respingos nas peças e boa fusão lateral dos cordões.

Com a análise semiquantitativa da diluição de ambos os cordões depositados, os respectivos valores do coeficiente de diluição para um passe de solda são listados na Tabela 4.

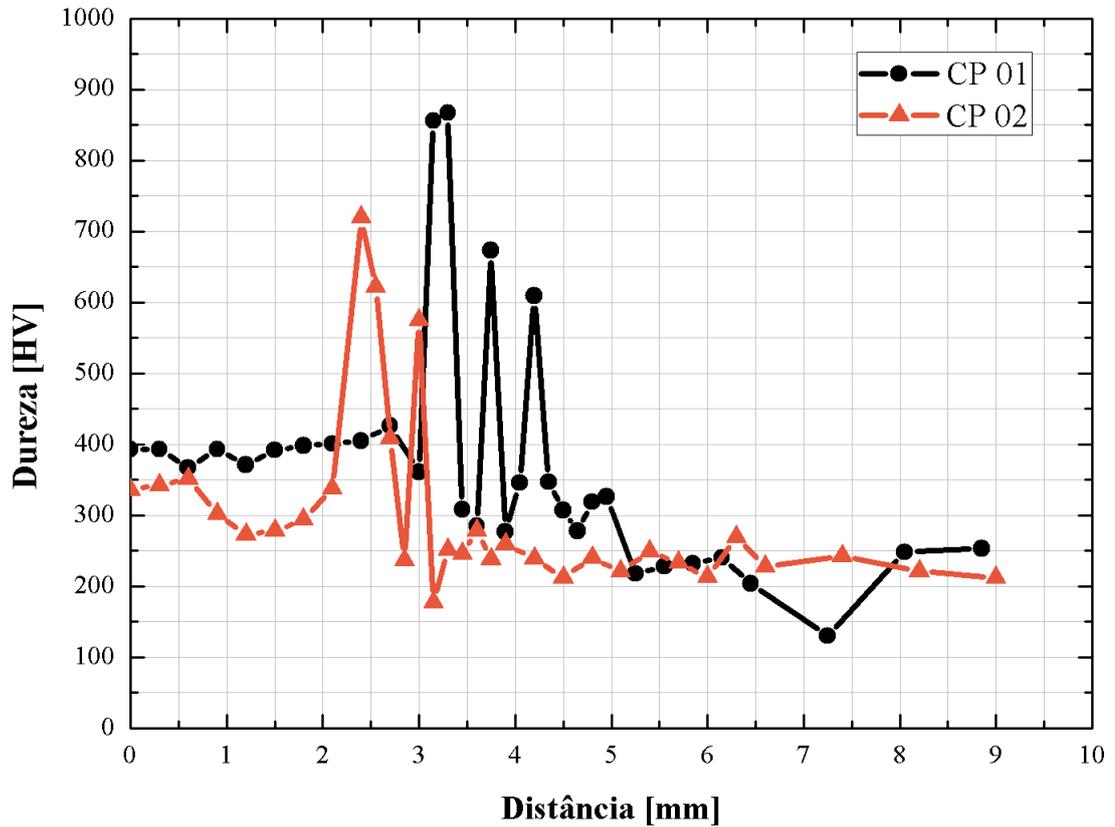
Tabela 4 – Coeficiente de diluição para corpos de prova sem pré-aquecimento – um passe

Condição		Classificação	Nº de passes	Coeficiente de diluição (δ)
1	Inicial - 01 passe	CP 01	01	35,31%
		CP 02	01	48,15%

Fonte: Própria autora

De acordo com a metodologia descrita no Item 5.3.3.2, o perfil de dureza para os cordões com apenas um passe é mostrado a seguir.

Figura 30 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados sem pré aquecimento



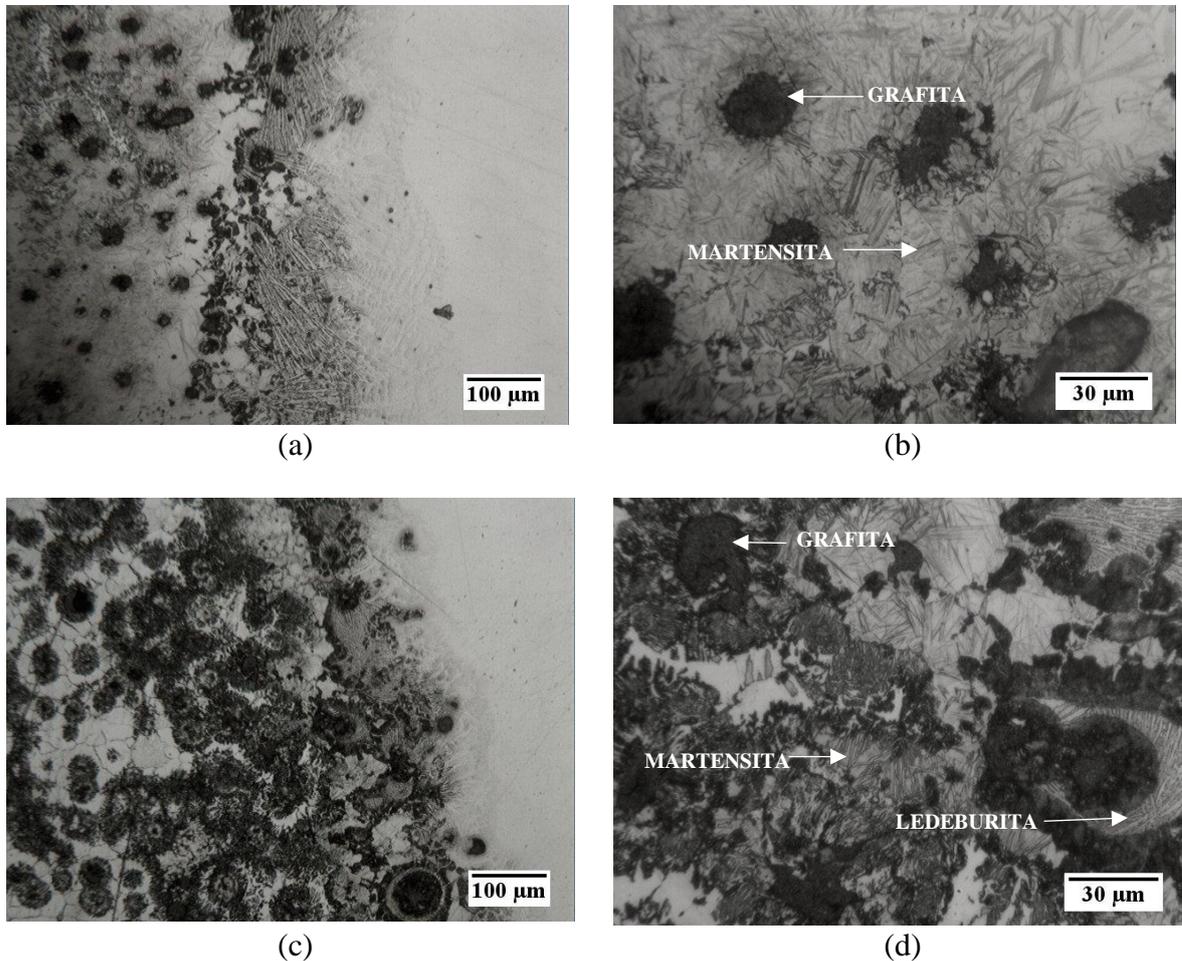
CP 01 – 1 passe

CP 02 – 1 passe

Fonte: Própria autora

Para CP 01, estima-se que a extensão da ZTA foi de, aproximadamente, de 1,35 mm enquanto para CP 02 foi de 1,05 mm, apresentando variação percentual de 11,11%. Os valores máximos de dureza Vickers medidos foram de 867 HV e 720 HV para CP 01 e CP 02, respectivamente. As micrografias dos cordões soldados com um passe e sem pré-aquecimento podem ser observados Figura 32.

Figura 31 – Fotomicrografias do ferro fundido nodular soldado sem pré-aquecimento – corpos de prova soldados em um passe



- (a) CP 01 – Região da ZF e ZTA
 (b) CP 01 – Região correspondente ao início da ZTA
 (c) CP 02 – Região da ZF e ZTA
 (d) CP 02 – Região correspondente ao início da ZTA

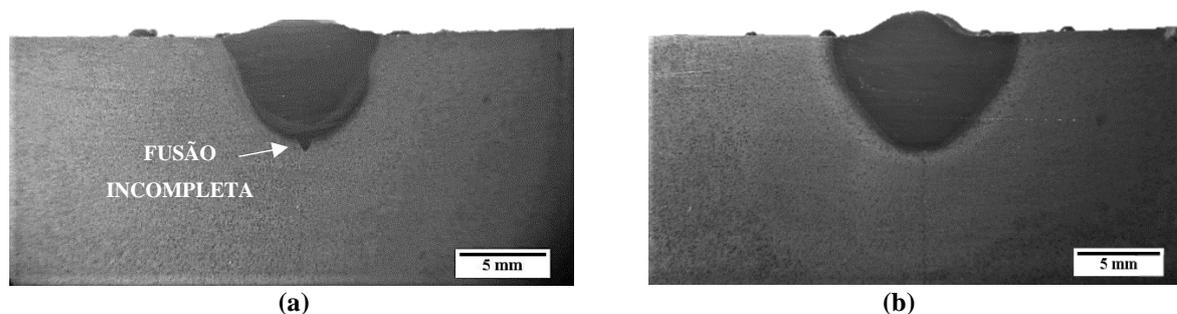
Fonte: Própria autora

Para CP 01, observou-se matriz predominantemente martensítica com nódulos de grafita na região correspondente ao início da ZTA. Já para CP 02, a região da ZTA apresentou uma maior variedade de constituintes, como ledeburita, grafita e possível martensita. A irregularidade entre as medidas de dureza, que se encontram na faixa correspondente à ZTA, pode ser justificada devido à impressão realizada sobre um constituinte de baixa/média dureza localizado nessa região, como por exemplo, um nódulo de grafita ou colônias de perlita, etc.

6.1.2 Cordão de solda – 2 passes

A segunda condição corresponde aos dois corpos de prova sem pré-aquecimento com dois passes e é exibida na Figura 33 abaixo.

Figura 32 – Fotomicrografias dos corpos de prova soldados sem pré-aquecimento



- (a) Corpo de prova 01 com 02 passe
 (b) Corpo de prova 02 com 02 passes

Fonte: Própria autora

A partir da análise visual das fotomicrografias e dos cordões depositados, constata-se presença de poucos respingos na peça, nenhuma distorção aparente nas dimensões dos corpos de teste. Entretanto, conforme indicado na Figura 33 a), não houve fusão completa do metal base no primeiro teste realizado.

Feita a análise semiquantitativa da diluição de ambos os cordões depositados, os valores do coeficiente para dois passes de solda são indicados na Tabela 5.

Tabela 5 – Coeficiente de diluição para corpos de prova sem pré-aquecimento – dois passes

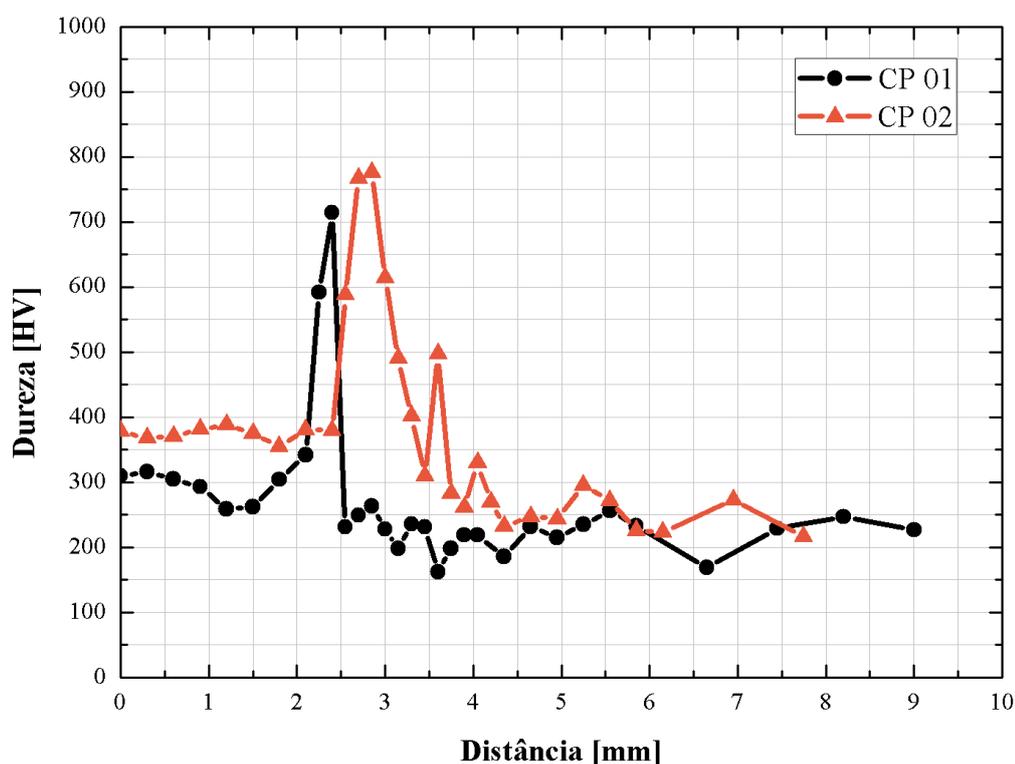
Condição		Classificação	Nº de passes	Coeficiente de diluição (δ)
1	Inicial - 02 passes	CP 01	02	39,47%
		CP 02	02	47,03%

Fonte: Própria autora

A aquisição do perfil de durezas para os cordões de solda com dois passes é mostrada na Figura 34.

Para CP 01, a extensão da ZTA foi estimada em, aproximadamente, 0,75 mm enquanto para CP 02 foi de 1,05 mm, apresentando variação percentual de 40%. Os valores máximos de dureza Vickers medidos foram de 714 HV e 776 HV para CP 01 e CP 02, respectivamente.

Figura 33 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados sem pré-aquecimento – dois passes



CP 01 – 2 passes

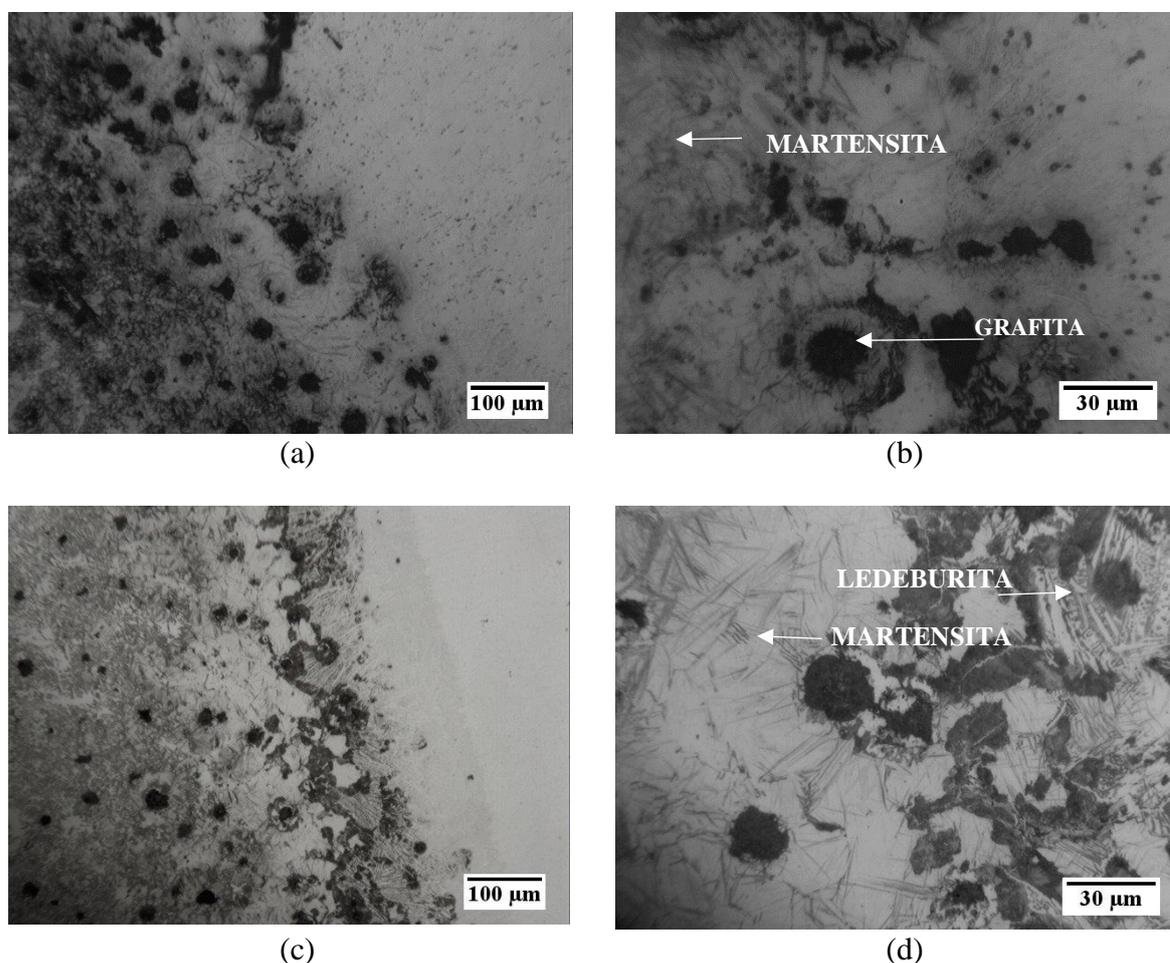
CP 02 – 2 passes

Fonte: Própria autora

Para efeitos de comparação, as micrografias de ambos os corpos de prova podem ser observadas na Figura 35.

Na Figura 35 (b) observou-se matriz com formação de martensita com nódulos de grafita e grafita diluída na região correspondente ao início da ZTA. Já para CP 02, mostrado na Figura 35 (d), a região ZTA apresentou uma maior variedade de constituintes como ledeburita, grafita e possível martensita acicular. As fases mostram concordância com o perfil de dureza apontando as possíveis fases formadas após resfriamento do material.

Figura 34 – Fotomicrografias do ferro fundido nodular soldado sem pré-aquecimento – corpos de prova soldados em dois passes



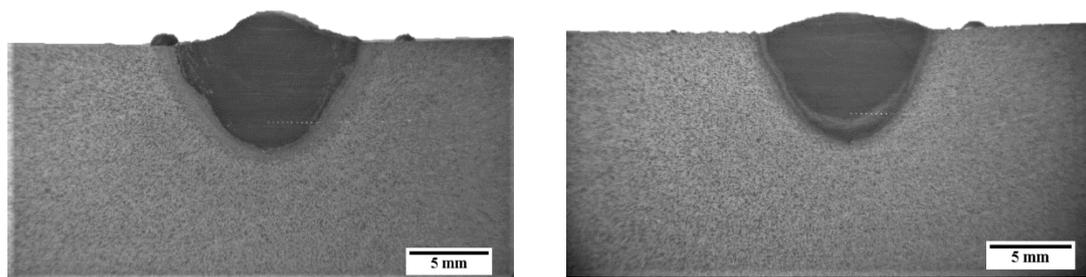
- (a) CP 01 – Região da ZF e ZTA
 (b) CP 01 – Região correspondente ao início da ZTA
 (c) CP 02 – Região da ZF e ZTA
 (d) CP 02 – Região correspondente ao início da ZTA

Fonte: Autoria Própria

6.2 Condição 2 – Mudança de variáveis

A Figura 36 exibe dois corpos de prova que foram soldados alterando parâmetros da fonte de soldagem e variando a quantidade de passes realizados. Para ambos os testes, aumentou-se o valor da tensão e velocidade de alimentação em 4% e 10%, respectivamente, em relação à condição inicial. A realização de um passe para CP 01, permitiu boas condições de preenchimento de cordão, presença de respingos na peça, fusão lateral completa e reforço de cordão excessivo. Observou-se que o preenchimento do cordão CP 02 obteve fusão lateral completa, sem alterações estruturais da peça e presença quase nula de respingos.

Figura 35 – Fotomicrografias dos corpos de prova soldados sem pré-aquecimento



(a)

(b)

(a) Corpo de prova 01 com 01 passe

(b) Corpo de prova 02 com 02 passes

Fonte: Própria autora

O coeficiente de diluição de ambos os testes é exibido na Tabela 6 a seguir.

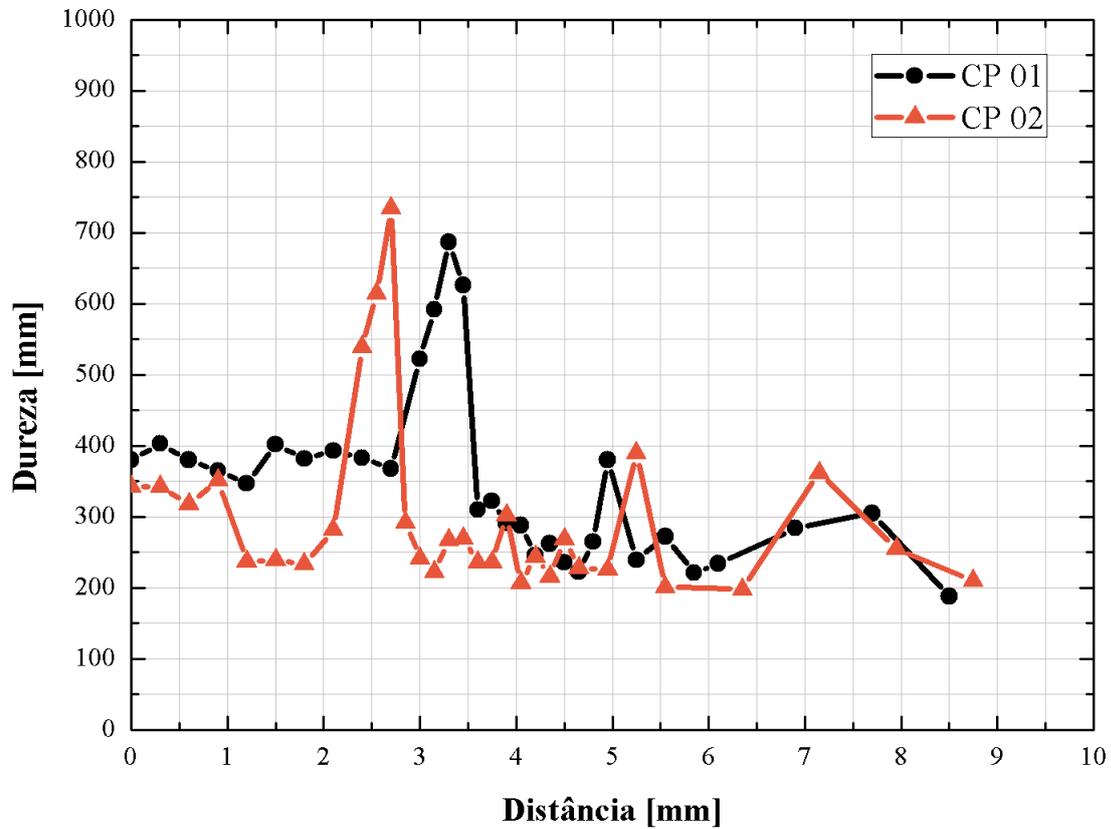
Tabela 6 – Coeficiente de diluição para corpos de prova sem pré-aquecimento com aumento da tensão e velocidade de alimentação

Condição		Classificação	Nº de passes	Coeficiente de diluição (δ)
2	Mudança de variáveis	CP 01	01	36,94%
		CP 02	02	35,49%

Fonte: Própria autora

O perfil de dureza para os cordões submetidos a mudança de variáveis é mostrado na Figura 37. Para CP 01 e CP 02, estimou-se que a extensão da ZTA foi de, aproximadamente, de 0,9 mm sem variação da extensão da ZTA. Os valores máximos de dureza Vickers medidos foram de 687 HV e 735 HV para CP 01 e CP 02, respectivamente.

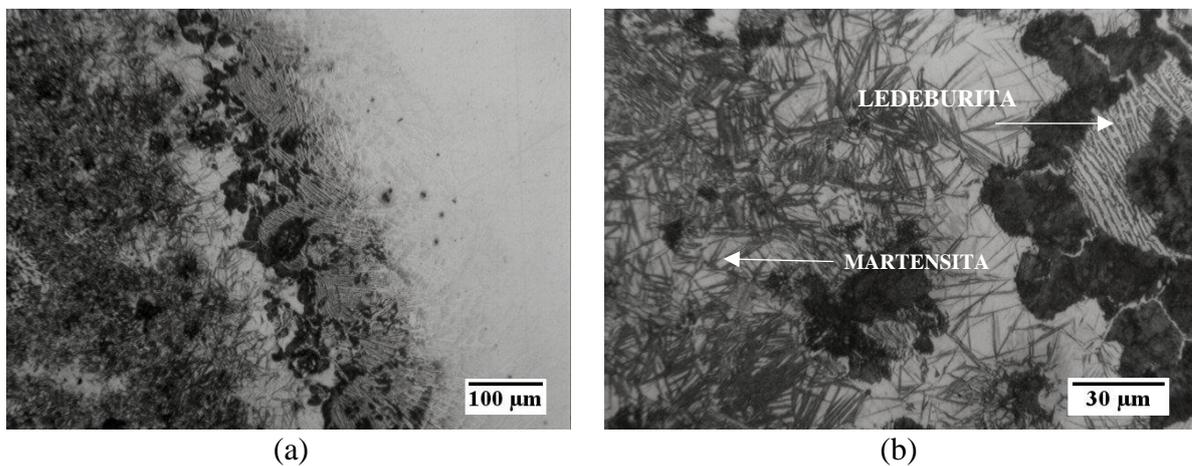
Figura 36 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados sem pré-aquecimento com aumento da tensão e velocidade de alimentação

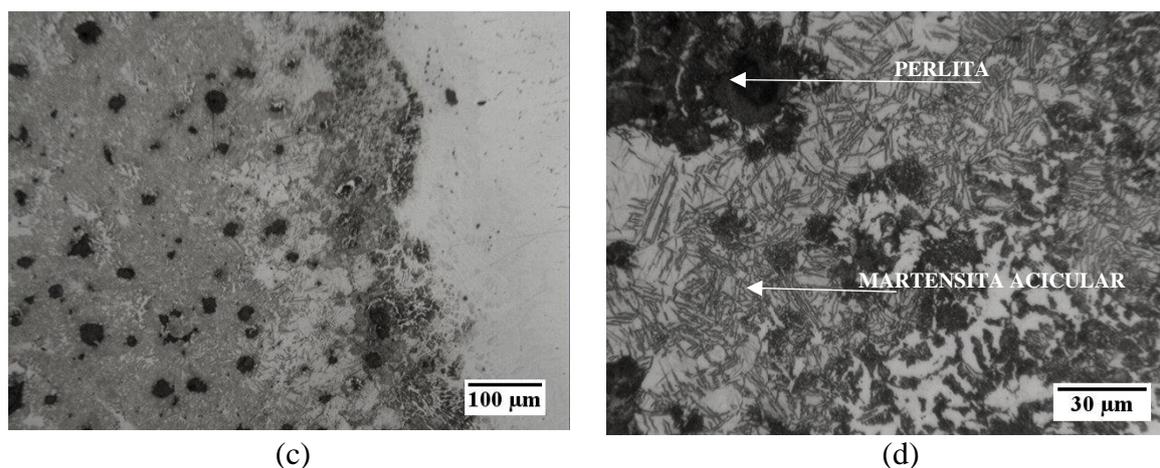


CP 01 – 1 passe
 CP 02 – 2 passes
 Fonte: Própria autora

As micrografias dos cordões soldados com um e dois passes podem ser observados Figura 38.

Figura 37 – Fotomicrografias do ferro fundido nodular soldado sem pré-aquecimento e com aumento da tensão e velocidade de alimentação





- (a) CP 01 – Região da ZF e ZTA
 (b) CP 01 – Região correspondente ao início da ZTA
 (c) CP 02 – Região da ZF e ZTA
 (d) CP 02 – Região correspondente ao início da ZTA

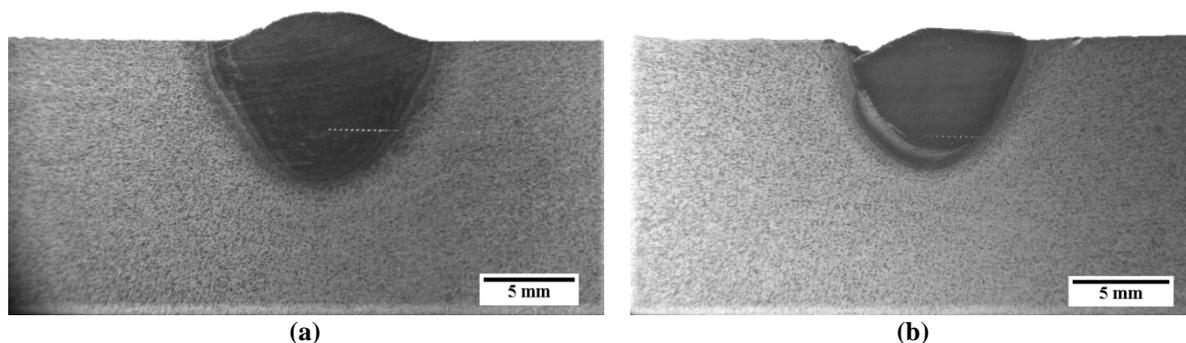
Na região correspondente ao início da ZTA, observou-se a em CP 01 a presença de martensita e ledeburita que são constituintes de elevada dureza. Para CP 02, pode-se estimar a presença de martensita acicular, colônias de perlita e nódulos de grafita.

Em relação ao procedimento de soldagem sem pré-aquecimento observou-se que o coeficiente de diluição teve um decréscimo de 4,79% para o procedimento realizado com um passe e decréscimo de 7,76% para o procedimento realizado com dois passes de soldagem. Além disso, os valores máximos de dureza evidenciaram decréscimo de 13,42% em relação ao valor médio do cordão soldado com um passe sem pré-aquecimento e decréscimo de 1,34% em relação ao valor médio de dureza do cordão soldado com dois passes sem pré-aquecimento. Em ambos os procedimentos sem pré-aquecimento e mudança de variáveis, foi possível observar a presença de fases metaestáveis, sendo a martensita e ledeburita os microconstituintes predominantes nas análises.

6.3 Condição 3 – Pré-aquecimento 300°C

A Figura 39 exibe os cordões submetidos à etapa de pré-aquecimento conforme descrito no Item 5.3.2.1. Utilizando análise visual e observando as fotomicrografias dos cordões depositados foi possível identificar que eles apresentaram boas condições de preenchimento do chanfro, nenhum respingo na superfície e boa fusão lateral. Entretanto, o cordão depositado com dois passes apresentou defeito no reforço, que se assemelha a uma mordedura.

Figura 38 – Fotomicrografias dos corpos de prova soldados com pré-aquecimento a 300°C



Fonte: Própria autora

- (a) Corpo de prova 01 com 01 passe
- (b) Corpo de prova 02 com 02 passes

O coeficiente de diluição é apresentado na Tabela 7 abaixo.

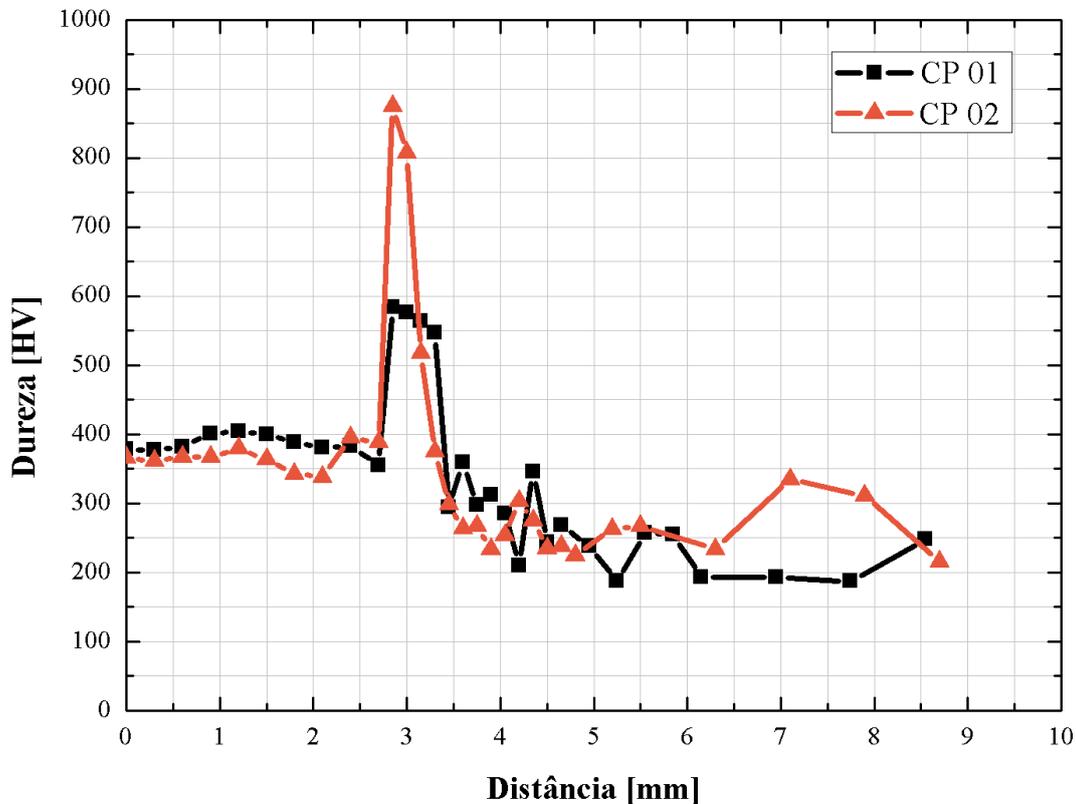
Tabela 7 – Coeficiente de diluição para corpos de prova com pré-aquecimento a 300°C

Condição		Classificação	Nº de passes	Coeficiente de diluição (δ)
3	Pré aquecimento a 300°C	CP 01	01	50,42%
		CP 02	02	41,31%

Fonte: Própria autora

Na Figura 40 pôde-se observar o efeito do pré-aquecimento em ambos os corpos de prova com um e dois passes. Os valores máximos de dureza na região da ZTA foram, respectivamente, de 584 HV e 875 HV para CP 01 (um passe) e CP 02 (dois passes). A extensão da ZTA para o cordão com um passe foi de 0,9 mm e para o cordão com dois passes foi de 0,6 mm. A variação percentual da extensão da ZTA foi de, aproximadamente, 33%.

Figura 39 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com pré-aquecimento 300°C



CP 01 – 1 passe

CP 02 – 2 passes

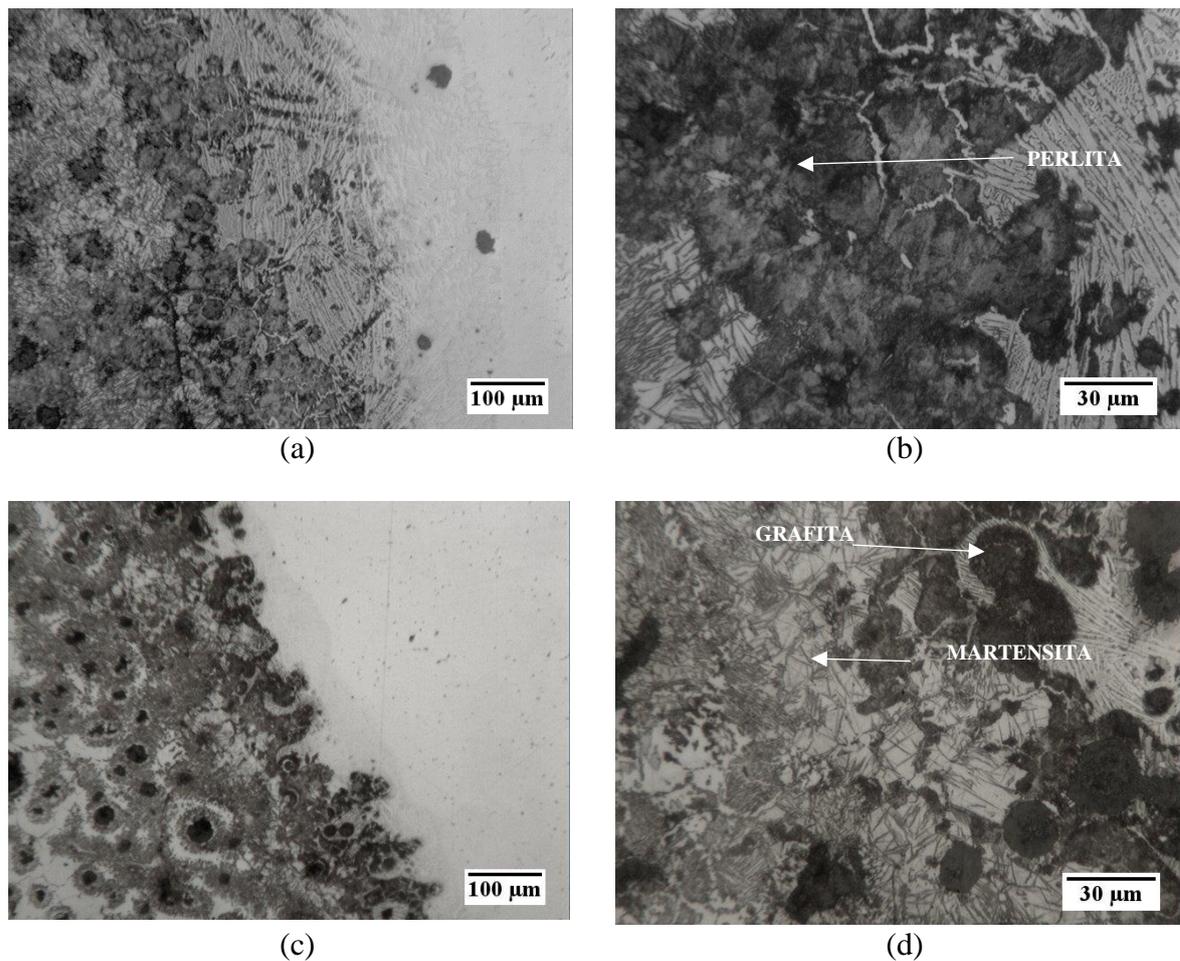
Fonte: Própria autora

As fotomicrografias são apresentadas na Figura 41 a seguir. Para CP 01, observou-se ledeburita e predominância de colônias de perlita na região correspondente ao início da ZTA. Já para CP 02, a região da ZTA apresentou uma maior variedade de constituintes como ledeburita, grafita e martensita.

Pôde-se observar ao comparar os procedimentos sem e com pré-aquecimento a 300°C realizado com um passe, que o coeficiente de diluição teve um aumento de 8,69%. Entretanto, para o mesmo procedimento realizado com dois passes, houve um decréscimo de 1,94%. Esse decréscimo pode ser justificado devido a presença de defeito no CP 02 com dois passes. O defeito, que indica falta de preenchimento do cordão. A variação na dureza foi observada principalmente para o procedimento realizado com um passe. O valor de dureza máximo apresentado foi de 584 HV quando comparado com o valor médio de 793 HV na ZTA do

procedimento sem nenhum tipo de pré-aquecimento. Segundo El-Banna (1999), o pré-aquecimento a uma temperatura de 300°C ou 200°C pode ser útil na prevenção da formação da martensita na ZTA e melhoria das propriedades mecânicas. Observou-se, neste caso, a presença predominante de colônias de perlita, que apresenta, segundo a bibliografia, dureza intermediária entre a ferrita e cementita.

Figura 40 – Fotomicrografias do ferro fundido nodular soldado com pré-aquecimento a 300°C



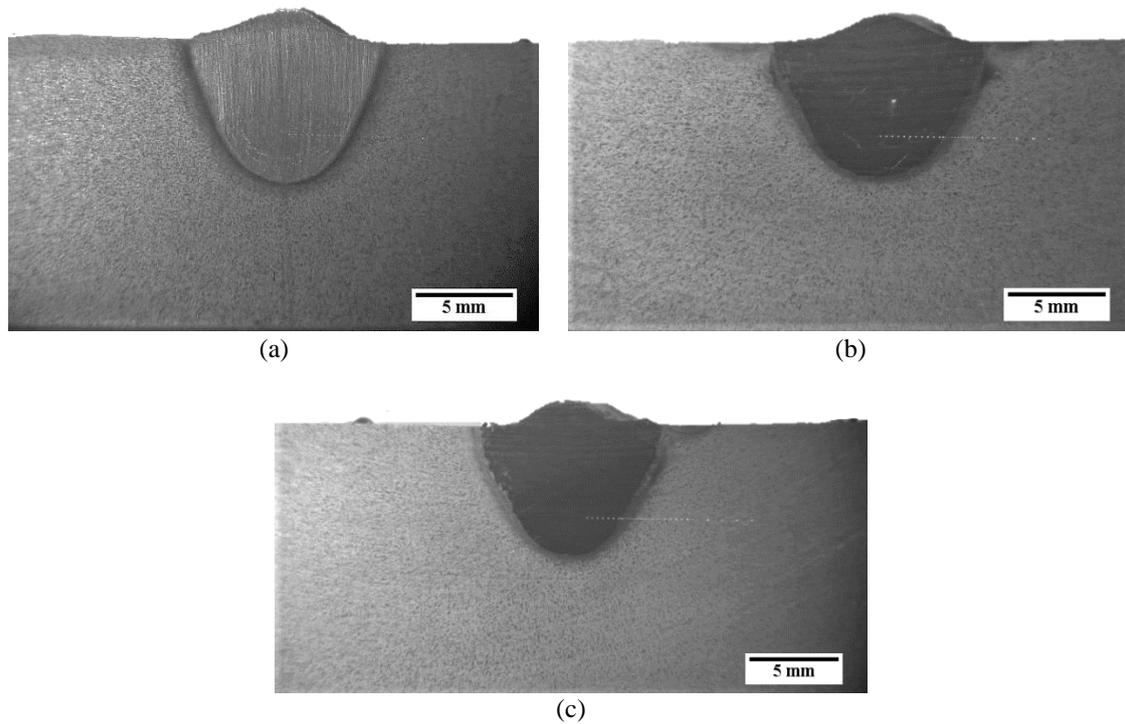
Fonte: Própria autora

- (a) CP 01 – Região da ZF e ZTA
- (b) CP 01 – Região correspondente ao início da ZTA
- (c) CP 02 – Região da ZF e ZTA
- (d) CP 02 – Região correspondente ao início da ZTA

6.4 Condição 4 – Pós aquecimento GTAW

A Figura 42 exibe três corpos de prova soldados com um passe e com pós-aquecimento utilizando o processo GTAW.

Figura 41 – Fotomacrografias dos corpos de prova soldados com pós-aquecimento GTAW



- (a) Corpo de prova 01 – 01 passe
 (b) Corpo de prova 02 – 01 passe
 (c) Corpo de prova 03 – 01 passe

A uniformidade dos cordões depositados foi evidenciada através da análise visual e das fotomacrografias. Todas as três condições apresentaram boa fusão lateral, nenhuma distorção estrutural, quase nenhum respingo e sem defeitos aparentes de soldagem.

O coeficiente de diluição estimado é exibido na Tabela 8 abaixo.

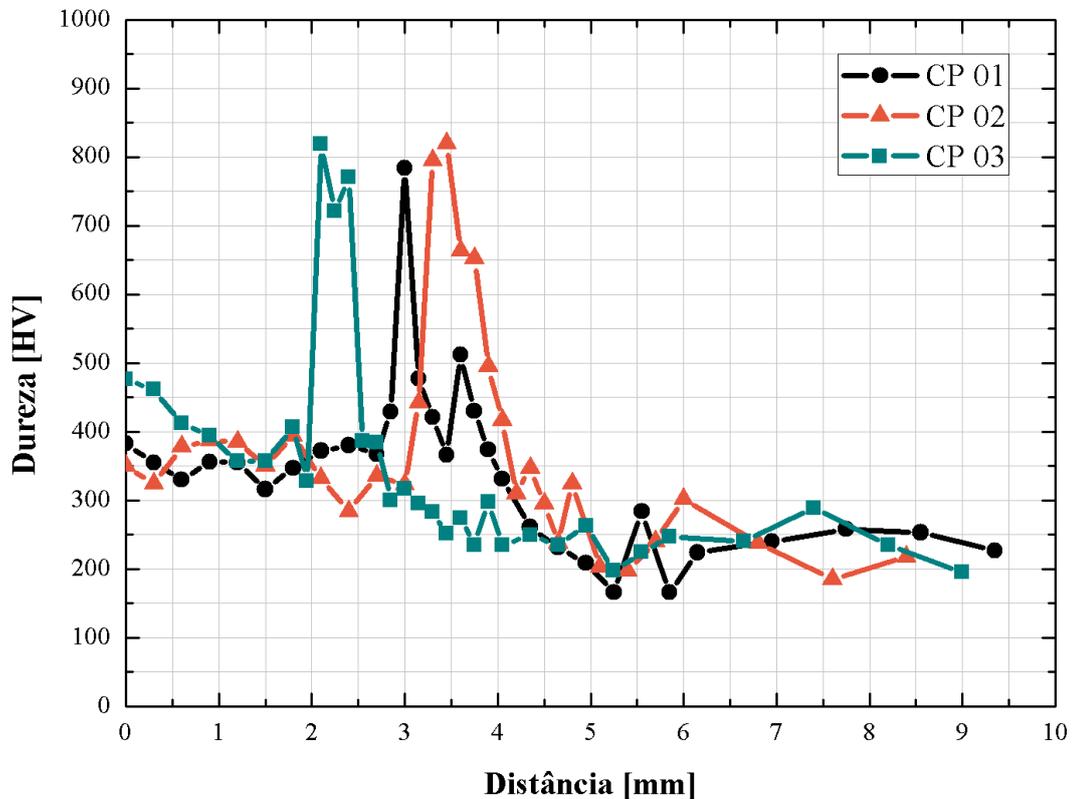
Tabela 8 – Coeficiente de diluição para corpos de prova com pós-aquecimento GTAW

Condição		Classificação	Nº de passes	Coeficiente de diluição (δ)
4	Pós aquecimento GTAW	CP 01 LD 50A	01	42,18%
		CP 02 AL 50A	01	46,31%
		CP 03 LD 70A	01	43,53%

Fonte: Própria autora

A Figura 43 apresenta o perfil de dureza de cada uma das condições aplicadas.

Figura 42 – Distribuição de microdureza Vickers nos corpos de prova soldados com pós-aquecimento TIG



CP 01 – Um passe, lado direito do cordão, I = 50 A;

CP 02 – Um passe, ambos os lados do cordão, I = 50 A;

CP 03 – Um passe, lado direito, I = 70 A;

Fonte: Própria autora

Os valores máximos de dureza na região da ZTA para cada corpo de prova foram de 784 HV (CP 01), 820 HV (CP 02) e 875 HV (CP 03).

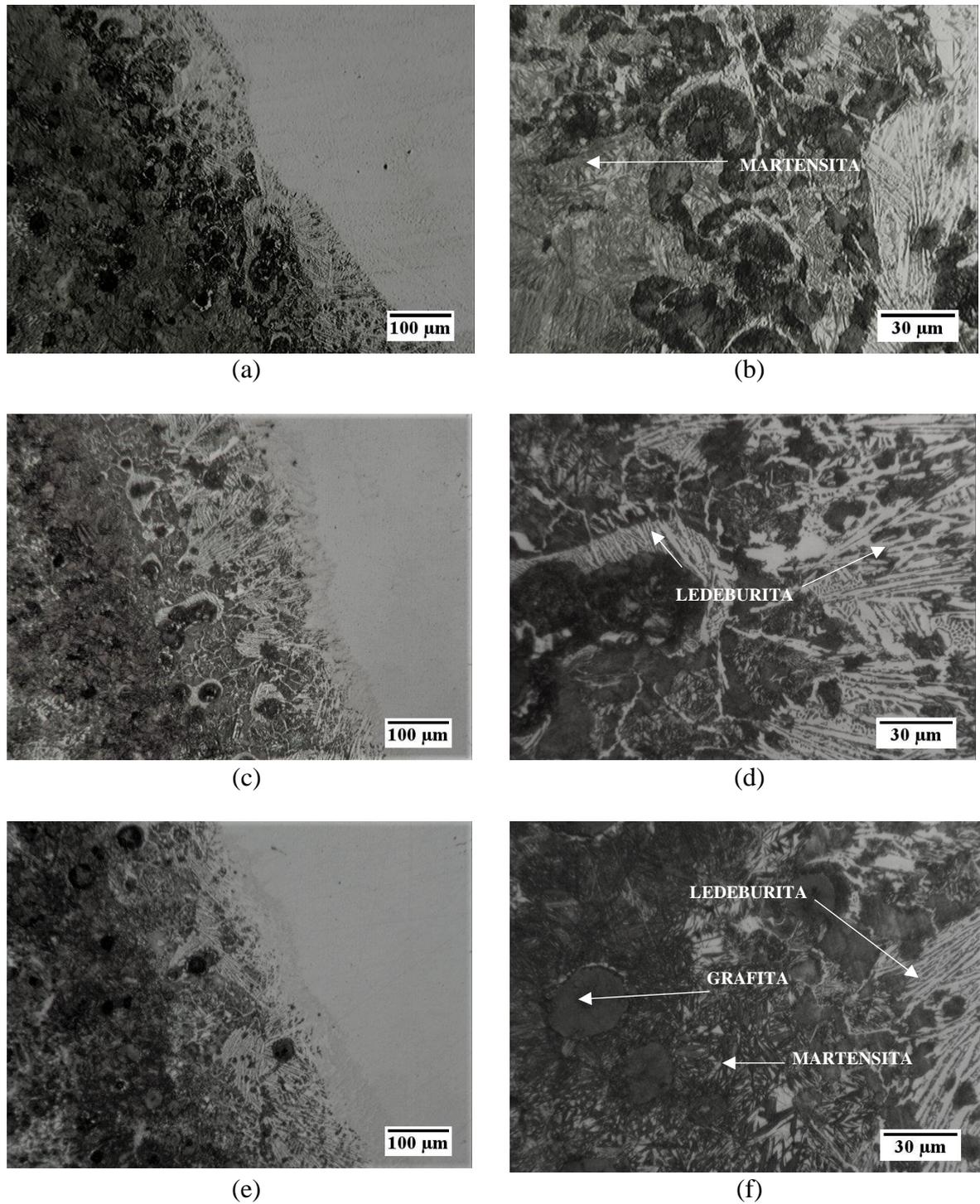
A extensão da ZTA para os cordões que foram submetidos a uma corrente de $I = 50$ A no processamento foi de 1,35 mm, aproximadamente. Já o cordão soldado submetido a corrente de $I = 70$ A, obteve 0,9 mm. A redução percentual de 33% na extensão da ZTA.

As fotomicrografias de cada condição são exibidas na Figura 44.

Observa-se para a Figura 44 (b), que no início da ZTA foi detectado martensita, ledeburita e o possível formação de algumas colônias de perlita. Na Figura 44 (d), observa-se predominância

de ledeburita e alguns nódulos de grafita. Para a Figura 44 (f), nota-se a presença de nódulos de grafita, martensita e presença de ledeburita.

Figura 43 – Fotomicrografias do ferro fundido nodular soldado com pós aquecimento GTAW



- (a) CP 01 – Região da ZF e ZTA
- (b) CP 01 – Região correspondente ao início da ZTA
- (c) CP 02 – Região da ZF e ZTA
- (d) CP 02 – Região correspondente ao início da ZTA

- (e) CP 03 – Região da ZF e ZTA
- (f) CP 03 – Região correspondente ao início da ZTA

Fonte: Própria autora

Comparativamente ao teste realizado sem pré-aquecimento, pôde-se observar equivalência das medidas realizadas de coeficiente de diluição, sendo que para todos os três casos, a variação foi inferior a 5%. Além disso, observou-se que o pós-aquecimento pouco influenciou na mudança dos valores de dureza. Realizou-se, para efeito de comparação, o cálculo da média entre os testes de pós aquecimento e comparou-se com os valores sem nenhum tipo de tratamento térmico. A variação da dureza foi de, aproximadamente, 4,21%. Em ambos os casos sem pré-aquecimento e com pós-aquecimento, as fases predominantes foram de martensita e ledeburita, que possuem valores médios de dureza elevados.

7 CONCLUSÕES

Após a realização dos procedimentos de soldagem para o ferro fundido nodular e análise de todos os resultados foi possível concluir que:

- Os cordões, de forma geral, tiveram bom preenchimento, poucos respingos e boa fusão lateral. A etapa de planejamento e testes antes da realização do procedimento contribuíram para que os erros do processo fossem minimizados.
- A formação de fases duras e frágeis na ZTA não é benéfica para o cordão de solda, pois pode dificultar a usinabilidade do material ou levar a formação de trincas. Observou-se que a condição que possibilitou a formação de fases de média/baixa dureza foi a condição 3 de pré-aquecimento a 300°C com preenchimento de chanfro com apenas um passe.
- A irregularidade entre as medidas de dureza, que se encontram na faixa correspondente à ZTA, pode ser justificada devido à impressão realizada sobre um constituinte de baixa/média dureza localizado nessa região.
- O aumento da diluição do material, indicando fusão do metal base e metal de adição, pode ser benéfico ou não, dependendo da necessidade do projeto. Embora razoável para todas as condições aplicadas, o maior coeficiente de diluição pertence à condição 3 com um passe e o menor coeficiente de diluição pertence à condição 1 com um passe apenas.
- A utilização do procedimento de soldagem GTAW como pós-aquecimento deve ser melhor estudada devido à possibilidade de aplicação em processos robotizados em plantas industriais otimizando processos de tratamentos térmicos em peças de grandes dimensões, por exemplo.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Wilson Luiz de. **Análise do Comportamento Mecânico e dos Aspectos Macro e Microestruturais do Ferro Fundido Nodular Submetido a Ciclos Térmicos de Soldagem**. 2014. Tese (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, CEFET-MG, Belo Horizonte, 2014. *E-book* (116 p.). Disponível em: http://www.posmat.cefetmg.br/wpcontent/uploads/sites/120/2017/08/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Wilson_Almeida.pdf. Acesso em: set. 2018.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 815p. ISBN: 9788521621249.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos e principais tipos**. 7 ed. ampl. rev. 5 reimpr.. São Paulo: ABM, 2008. 599 p. ISBN 8586778486.

COLPAERT, Humbertus; SILVA, André Luiz V. da Costa e. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4 ed. rev. São Paulo: Blücher, 2008. 652 p. ISBN 9788521204497.

EL-BANNA, E.M. **Effect of preheat on welding of ductile cast iron**. Materials Letters, Giza, 1999.

GONÇALVES, Vitor Canesso. **Avaliação da Aplicação de Pré-aquecimento e Multipasses na Junta Soldada de um Aço SAE 1070**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Departamento de Engenharia de Materiais, CEFET-MG, Belo Horizonte, 2017. *E-book*. Disponível em: http://www.demat.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/25/2018/06/TCCII_Vitor_Canesso_Gon%C3%A7alves_201122070438.pdf. Acesso em: set. 2018.

GUESSER, W. L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**. São Paulo: Blücher, 2009. 344p. ISBN 9788521205012.

MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem & Técnicas conexas: processos**. Porto Alegre: UFRGS, 1996. 478 p.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo J.; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2009. 363 p. ISBN 978-8570417480.

MODENESI, Paulo J. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte, 2012. (Apostila). Disponível em: <https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>. Acesso em: set. 2018.

PARIS, A. A. F. **Tecnologia da soldagem de ferros fundidos**. Santa Maria: UFSM, 2003. 140p. ISBN 8573910380

PASCUAL, M; FERRER, C; RAYÓN, E. Weldability of spheroidal graphite ductile cast iron using Ni/NiFe electrodes. **Revista de Metalurgia**. Madrid, v. 45, n. 5, p. 334-338, 2009. Disponível em: <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/174/172>. Acesso em nov. 2018.

SANTANA, Ivan José de. **Modelamento Matemático do Processo de Soldagem GMAW**. 2010. Tese (Doutorado em Metalurgia da Transformação) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG, Belo Horizonte, 2010. *E-book*. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUDB-8DRHR9/1/ivan_jos_de_santana.pdf. Acesso em: out. 2018.

SCOTTI, Américo; PONOMAREV, Vladimir. **Soldagem MIG/MAG**. São Paulo: Artliber 2008. 284 p. ISBN 9788588098428.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. 1. ed. São Paulo: Blücher, 1992. 504 p. ISBN 9788521202387.