



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO, DE CIÊNCIAS EXATAS E EDUCAÇÃO  
COORDENADORIA ESPECIAL DE ENGENHARIA DE MATERIAIS  
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Martin Lieskow

**Estudo preliminar da soldabilidade de ferros fundidos cinzento e nodular por soldagem  
a arco com eletrodos revestidos**

Blumenau, 2023.

Martin Lieskow

**Estudo preliminar da soldabilidade de ferros fundidos cinzento e nodular por soldagem  
a arco com eletrodos revestidos**

Trabalho de Conclusão de Curso  
submetido ao curso de Engenharia de  
Materiais do Campus Blumenau da  
Universidade Federal de Santa  
Catarina como requisito parcial para a  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Wanderson  
Santana da Silva

Blumenau, 2023.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Lieskow, Martin

Estudo preliminar da soldabilidade de ferros fundidos  
cinzento e nodular por soldagem a arco com eletrodos  
revestidos / Martin Lieskow ; orientador, Wanderson  
Santana da Silva, 2023.

100 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau,  
Graduação em Engenharia de Materiais, Blumenau, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia de Materiais. 2. Ferros Fundidos. 3.  
Soldagem. 4. Microestrutura. I. Silva, Wanderson Santana  
da. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação  
em Engenharia de Materiais. III. Título.

Martin Lieskow

**Estudo preliminar da soldabilidade de ferros fundidos cinzento e nodular por soldagem a arco com eletrodos revestidos**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro de Materiais e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina.

Blumenau, 24 de novembro de 2023.

---

Martin Lieskow

Acadêmico

**Banca examinadora**

---

Prof. Dr. Wanderson Santana da Silva

Orientador

Instituição: Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Márcio Roberto da Rocha

Avaliador

Instituição: Universidade Federal de Santa Catarina

---

Me. Athos Araújo

Avaliador

Instituição: Universidade Federal de Santa Catarina

---

Eng<sup>a</sup> Beatriz Stüpp Mendes

Avaliadora

Instituição: Fundação Santa Terezinha

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus familiares com os quais convivo diariamente, por me incentivarem constantemente a seguir em frente com o desenvolvimento deste trabalho, o que foi fundamental para que eu não desistisse diante dos múltiplos desafios enfrentados.

Quero expressar minha sincera gratidão àquele que me orientou durante todo este trabalho, Professor Dr. Wanderson Santana da Silva. Ficaram evidentes seu grande esforço e dedicação para me prestar auxílio em cada etapa.

Agradeço aos colegas Daniel da Cunha e Athos Araújo, por todo o apoio na execução das atividades práticas realizadas nos laboratórios da UFSC Blumenau durante este trabalho, desde preparação metalográfica até ensaios mecânicos.

Minha gratidão à empresa Fundação Santa Terezinha, Gaspar/SC, por ter acreditado em meu potencial para desenvolver este importante estudo sobre soldagem de ferros fundidos, tendo contribuído com a doação dos materiais utilizados neste trabalho.

À empresa JP Usinagem, Pomerode/SC, por ceder espaço para a realização das múltiplas etapas de usinagem envolvidas neste trabalho. Além disso, disponibilizou funcionários altamente capacitados para a execução das etapas de soldagem.

Agradeço a todos os colegas de curso com os quais pude conviver e compartilhar experiências ao longo do período de graduação. Cada amizade desenvolvida e cultivada foi para mim um enorme privilégio, e certamente as muitas conversas e momentos de descontração com os amigos foram fonte de inspiração para seguir confiante em cada fase da jornada acadêmica.

## RESUMO

Os ferros fundidos, ligas ferro-carbono-silício com percentual de carbono superior a 2,14%, são em algumas situações preferíveis do que outros metais como aços, por exemplo, devido a importantes características mecânicas que se consegue obter com estes materiais, ou em muitos casos em função de questões econômicas. Um dos grandes desafios relacionados a ferros fundidos está na baixa soldabilidade desses materiais, causada principalmente por seu teor de carbono muito superior ao dos aços, o que facilita a formação de fases duras e frágeis mediante as elevadas taxas de resfriamento produzidas durante a soldagem. Existem eletrodos revestidos especiais para soldagem de ferros fundidos, como o E-NiCi à base de níquel que podem trazer resultados bastante promissores na soldagem de ferros fundidos, no entanto há o impasse de seu elevado custo comparado a outros tipos de eletrodo. Neste trabalho buscou-se avaliar o comportamento na soldagem dos ferros fundidos cinzento FC200 e nodular FE42012, com ênfase nas diferentes microestruturas formadas, onde foram realizados testes com os eletrodos E – NiCi e E7018. As juntas de solda foram produzidas a partir de blocos em forma de Y, os quais necessitaram passar por processos de usinagem para produção dos chanfros e redução da espessura. Foram aplicados dois métodos de soldagem a cada ferro fundido, sendo que todos envolveram o pré-aquecimento a temperaturas próximas de 400°C e aquecimento interpassos. Concluída a etapa de soldagens, produziram-se corpos de prova para ensaios de flexão, análise microestrutural e ensaios de dureza, sendo os cortes realizados pelo processo de eletroerosão a fio. A preparação metalográfica envolveu o lixamento, polimento com suspensão de alumina e ataque químico com nital. A partir da análise microestrutural, foram visualizadas microestruturas típicas de soldagem de materiais com alto teor de carbono submetidos a resfriamentos rápidos, como martensita. Foram identificadas as Zonas Fundida e Termicamente Afetada, além da Zona Parcialmente Fundida, na qual se observou a formação de carbonetos.

**Palavras-chave:** Ferros fundidos; Soldabilidade; Eletrodos Revestidos.

## ABSTRACT

Cast irons, Iron-Carbon-Silicon alloys with carbon percent upper than 2,14%, are in some cases preferable than some steels, for example, due to some important mechanical characteristics that can be found in these materials, or a lot of times due to economical terms. One of the big challenges related to cast irons is on their low weldability, that comes mainly by the carbon percent which is much greater than for steels, which makes easier the formation of hard and brittle phases through the high cooling rates involved in the welding process. There are coated electrodes special for welding cast irons, like E-NiCi nickel based that can give promising results in cast iron weldings, however there is the issue of their high price compared to other electrode types. The aim in this work was to evaluate the welding behavior of gray cast iron FC200 and nodular cast iron FE42012, with an emphasis on the different microstructures, where was tested the use of E - NiCi and E7018 electrodes. The welding joints were produced from Y - shaped blocks, which needed to go through machining processes to make the bevels and reduce the thickness. Two welding methods were applied to each cast iron, where all of them involved preheating at temperatures close to 400°C and interpass heating. Once finished the weldings, samples were produced for flexion tests, microstructural analysis and hardness tests, where the cuts were performed by electroerosion process. The metallographic preparation involved sanding, alumina suspension polishing and nital chemical attack. In the microstructural analysis, typical microstructures of welding of high carbon materials subjected to rapid coolings such as martensite were viewed. It was possible to distinguish the molten and thermally affected zones, besides the partially melted zone, in which carbide formation was observed.

**Keywords:** Cast irons; Weldability; Coated Electrodes.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Micrografias dos principais tipos de ferro fundido.....	22
Figura 2- Isopleta esquemática mostrando equilíbrio estável (grafita) e metaestável (Fe <sub>3</sub> C) em ligas Fe-C-Si. À direita, observam-se curvas de resfriamento para uma liga com CE= 4,0%. 23	23
Figura 3- Tipos de grafita segundo a classificação ASTM e AFS. (A) Irregular desorientada; (B) Em roseta; (C) Desigual e irregular; (D) Interdendrítica desorientada; (E) Interdendrítica orientada. ....	24
Figura 4- Classificação da grafita segundo a norma ISO 945-1975.....	25
Figura 5 - Influência do super-resfriamento sobre a formação da grafita. ....	26
Figura 6 - Efeito da taxa de resfriamento e composição na microestrutura de ligas Ni – C. (a) Liga hipoeutética resfriada em atmosfera de argônio (22 °C/s). (b) Liga hipereutética resfriada com gás hélio (34 °C/s). (c) Liga hipereutética resfriada em óleo.....	27
Figura 7 - Esquema do crescimento da grafita: (a) - Estrutura hexagonal da grafita e os planos; (b) Plano basal, prismático e índices de Miller; (c) Grafita nodular e lamelar.....	34
Figura 8- Ferros fundidos nodulares com diferentes tipos de matriz. ....	35
Figura 9- Regiões formadas no processo de soldagem.....	37
Figura 10 - Ilustração do processo de soldagem por eletrodo revestido. ....	38
Figura 11 - Tipos de porosidade: (a) – distribuída; (b) – agrupada; (c) – alinhada.....	41
Figura 12 - Esquema mostrando o defeito de falta de fusão. ....	42
Figura 13- Ilustração do problema de falta de penetração na solda. ....	42
Figura 14 - Ilustração do defeito de inclusão de escória. ....	43
Figura 15 - Ilustração de mordedura em soldagem. ....	43
Figura 16- Trinca gerada durante a solidificação do cordão de solda. ....	44
Figura 17- Fases e microestruturas na soldagem de ferros fundidos.....	46
Figura 18 - Microestruturas formadas na soldagem de ferro fundido nodular de matriz ferrítica, mostrando o metal de solda (MS), a zona de ligação (ZL) e a zona termicamente afetada (ZTA). .....	48
Figura 19- Micrografias dos cordões de solda: (a) teste “01SP”, sem pré aquecimento; (b) teste 01CP, com pré-aquecimento; (c) teste 02 SP, sem pré aquecimento; (d) teste 02CP, com pré aquecimento. Ataque Nital 2%.....	50
Figura 20 - Micrografias dos cordões de solda: (a) teste 03SP, sem pré -aquecimento; (b) teste 02CP, com pré-aquecimento; (c) teste 04SP, sem pré aquecimento; (d) teste 04CP, com pré-aquecimento. Ataque Nital 2%.....	51

Figura 21- Valores de dureza observados no metal base, metal de adição e ZTA para diferentes materiais de adição. ....	52
Figura 22- Exemplo de aplicação da técnica de amanteigamento. (a) metal base com chanfro. (b) Superfície amanteigada com liga de níquel. (c) Superfície amanteigada usinada – preparada para soldagem. (d) Componentes amanteigados posicionados para soldagem da junta. (e) Junta preenchida com metal de enchimento com composição diferente em relação ao material de amanteigamento.....	53
Figura 23- Desenho técnico do bloco Y, utilizado para as soldagens deste trabalho.....	56
Figura 24- Fresamento do bloco Y para obtenção dos chanfros em 45°.....	58
Figura 25- Pré-aquecimento da junta de solda com maçarico.....	59
Figura 26- Regiões da amostra de ferro fundido FE 42012 soldado com eletrodo E - NiCi. ..	64
Figura 27 - Região A da amostra de ferro fundido nodular com eletrodo E - NiCi. Aumento de 100x. ....	65
Figura 28 - Região B da amostra de ferro fundido nodular com eletrodo E - NiCi. Aumento de 100x. ....	65
Figura 29 - Região C da amostra de ferro fundido nodular com eletrodo E - NiCi. ....	66
Figura 30 - Região D da amostra de ferro fundido nodular com eletrodo E - NiCi. Aumento de 200x. ....	67
Figura 31- Região E da amostra de ferro fundido nodular com eletrodo E - NiCi. Aumento de 400x. ....	67
Figura 32- Pontos de medição de dureza para amostra de nodular com E - NiCi.....	68
Figura 33 - Perfil de dureza para amostra de nodular com E - NiCi. ....	68
Figura 34- Medições de dureza transversal para amostra de nodular com E – NiCi. ....	69
Figura 35- Perfil de dureza transversal para amostra de nodular com E - NiCi.....	69
Figura 36- Regiões da amostra de ferro fundido FE42012 soldado com eletrodos E - NiCi + E 7018.....	70
Figura 37 - Região A da amostra de ferro fundido nodular com eletrodo E - NiCi + E 7018. 70	
Figura 38 - Região B da amostra de ferro fundido nodular com eletrodo E - NiCi + E 7018..	71
Figura 39 - Região C da amostra de ferro fundido nodular com eletrodo E - NiCi + E 7018. Aumento de 50x.....	72
Figura 40 - Região D da amostra de ferro fundido nodular com eletrodo E - NiCi + E 7018. Aumento de 100x.....	72
Figura 41 - Região E da amostra de ferro fundido nodular com eletrodo E - NiCi + E 7018..	73

Figura 42 - Região F da amostra de ferro fundido nodular com eletrodo E - NiCi + E 7018. Aumento de 100x.....	74
Figura 43 - Região G da amostra de ferro fundido nodular com eletrodo E - NiCi + E 7018. Aumento de 100x.....	75
Figura 44 - Pontos de medição de dureza para amostra de nodular com E-NiCi + E7018. ....	75
Figura 45 - Perfil de dureza para amostra de nodular com E - NiCi + E 7018. ....	76
Figura 46 - Medições de dureza transversal para amostra de nodular com E - NiCi + E 7018. .....	77
Figura 47 - Perfil de dureza transversal para amostra de nodular com E - NiCi + E 7018. ....	77
Figura 48 - Regiões da amostra de ferro fundido FC 200 soldado com eletrodo E - NiCi. ....	78
Figura 49 - Região A da amostra de ferro fundido cinzento com eletrodo E - NiCi. Aumento de 200x. ....	79
Figura 50 - Região B da amostra de ferro fundido cinzento com eletrodo E - NiCi.....	79
Figura 51 – Região C da amostra de ferro fundido cinzento com eletrodo E – NiCi. Aumento de 200x. ....	80
Figura 52 - Região D da amostra de ferro fundido cinzento com eletrodo E - NiCi.....	81
Figura 53 - Região E da amostra de ferro fundido cinzento com eletrodo E - NiCi. Aumento de 100x. ....	81
Figura 54 - Pontos de medição de dureza para amostra de ferro fundido cinzento com eletrodo E - NiCi.....	82
Figura 55 - Perfil de dureza para amostra de cinzento com eletrodo de E – NiCi. ....	82
Figura 56 - Medições de dureza transversal para amostra de cinzento com E - NiCi.....	83
Figura 57 - Perfil de dureza transversal para amostra de cinzento com E - NiCi. ....	83
Figura 58 - Regiões da amostra de ferro fundido FC 200 soldado com eletrodos E - NiCi + E 7018. ....	84
Figura 59 - Região A da amostra de ferro fundido cinzento com eletrodos E - NiCi + E 7018. Aumento de 50x.....	85
Figura 60 - Região B da amostra de ferro fundido cinzento com eletrodos E - NiCi + E 7018. Aumento de 50x.....	85
Figura 61 - Região C da amostra de ferro fundido cinzento com eletrodos E - NiCi + E 7018. Aumento de 200x.....	86
Figura 62 - Região D da amostra de ferro fundido cinzento com eletrodos E - NiCi + E 7018. Aumento de 200x.....	87

Figura 63 - Região E da amostra de ferro fundido cinzento com eletrodos E - NiCi + E 7018. Aumento de 200x.....	88
Figura 64 - Região F da amostra de ferro fundido cinzento com eletrodos E - NiCi + E 7018. Aumento de 50x.....	88
Figura 65 - Pontos de medição de dureza para amostra de cinzento com E - NiCi + E 7018..	89
Figura 66 - Perfil de dureza para amostra de ferro fundido cinzento com eletrodos E - NiCi + E 7018. ....	89
Figura 67 - Medições de dureza transversal para amostra de ferro fundido cinzento com eletrodos E - NiCi + E 7018. ....	90
Figura 68 – Perfil de dureza transversal para amostra de cinzento com eletrodos E – NiCi + E 7018. ....	90
Figura 69 - Medições de microdureza para ferro fundido FE 42012 soldado com E - NiCi. ..	91
Figura 70 - Medições de microdureza para ferro fundido FE 42012 soldado com E - NiCi + E 7018. ....	91
Figura 71 - Medições de microdureza para ferro fundido cinzento soldado com E - NiCi.....	92
Figura 72 - Medições de microdureza para ferro fundido cinzento soldado com E - NiCi + E 7018. ....	92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação geral de ferros fundidos por designação comercial, microestrutural e aspecto da fratura. (P) – Perlita; (F) – Ferrita; (M) – Martensita; (A) – Austenita; (Af) – Ausferrita. ....	29
Tabela 2- Faixa de composição química típica de ferros fundidos cinzentos. ....	31
Tabela 3- Propriedades mecânicas de ferros fundidos cinzentos. ....	32
Tabela 4- Composições típicas de determinadas classes de ferros fundidos nodulares. ....	33
Tabela 5- Propriedades de ferros fundidos nodulares segundo a Norma Técnica ABNT (NBR 6919/1981). ....	36
Tabela 6 - Composição dos ferros fundidos FC200 e FE42012. ....	56
Tabela 7 - Composição química (percentual) do eletrodo E - NiCi. ....	57
Tabela 8 - Composição química (percentual) do eletrodo E 7018. ....	57
Tabela 9 - Parâmetros utilizados nas soldagens realizadas neste trabalho. ....	59
Tabela 10 - Resultados do ensaio de flexão para as soldagens realizadas. ....	94

## LISTA DE EQUAÇÕES

(1)  $A = \eta VI / v_s$

(2)  $v_s = L / t$

(3)  $\sigma_{\text{máx}} = 3/2 (F_{\text{máx}}) / (b \times d^2)$

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ZTA – Zona Termicamente Afetada  
MB – Metal Base  
HC – Hexagonal Compacta  
CE – Carbono Equivalente  
TL – Temperatura Líquida  
TG – Temperatura de Grafita Eutética  
ASTM – *American Society for Testing Materials*  
AFS – American Foundrymen’s Society  
P – Perlita  
F – Ferrita  
M – Martensita  
A – Austenita  
Af – Ausferrita  
CCC – Cúbica de Corpo Centrado  
CFC – Cúbica de Face Centrada  
LR – Limite de Resistência  
LE – Limite de Escoamento  
HB – Dureza Brinell  
LF – Linha de fusão  
MS – Metal de Solda  
AT – Aporte Térmico  
V – Tensão  
I – Corrente elétrica  
Vs – Velocidade de Soldagem  
ZFM – Zona Fundida Misturada  
ZFNM – Zona Fundida Não-misturada  
ZPF – Zona Parcialmente Fundida  
GMAW – *Gas Metal Arc Welding*  
RPM – Rotações por minuto  
TEE – Temperatura Eutética Estável  
TEM – Temperatura Eutética Metaestável  
CP – Corpo de prova

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>20</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>21</b>
3.1 FERROS FUNDIDOS .....	21
3.1.1 Solidificação e desenvolvimento da microestrutura em ferros fundidos .....	22
3.1.2 Formação e tipos de grafita .....	24
3.1.3 Formação da grafita no sistema Ni – C .....	26
3.1.4 Classes de ferros fundidos .....	28
3.1.5 Microconstituintes dos ferros fundidos .....	29
3.1.6 Ferro fundido cinzento .....	31
3.1.7 Ferro fundido nodular .....	33
3.2 O PROCESSO DE SOLDAGEM .....	36
3.2.1 Soldagem com eletrodo revestido .....	37
3.2.2 Parâmetros envolvidos no processo de soldagem .....	39
3.2.3 Pré-aquecimento na soldagem .....	40
3.2.4 Defeitos na soldagem .....	41
3.3 SOLDAGEM DE FERROS FUNDIDOS .....	44
3.3.1 Fatores que reduzem a soldabilidade dos ferros fundidos .....	46
3.3.2 Zonas formadas na soldagem de ferros fundidos .....	47
3.3.3 Modificações microestruturais na soldagem de ferros fundidos .....	48
3.3.4 Materiais de adição para soldar ferro fundido .....	51
3.3.5 Técnica de amanteigamento .....	52
3.3.6 Pré-aquecimento na soldagem de ferros fundidos .....	53
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>56</b>
4.1 METAL BASE .....	56
4.2 MATERIAIS DE ADIÇÃO (CONSUMÍVEIS) .....	57
4.3 PREPARAÇÃO DAS JUNTAS DE SOLDA .....	57
4.3.1 Pré-aquecimento .....	58
4.4 SOLDAGEM E PARÂMETROS UTILIZADOS .....	59
4.5 AQUECIMENTO INTERPASSES .....	60

4.6 RESFRIAMENTO PÓS-SOLDAGEM.....	61
4.7 FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	61
4.8 METALOGRAFIA.....	61
4.9 ENSAIO DE DUREZA .....	62
4.10 ENSAIO DE MICRODUREZA .....	62
4.11 ENSAIO DE FLEXÃO .....	63
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>64</b>
5.1 MICROESTRUTURA E DUREZA DAS SOLDAS .....	64
<b>5.1.1 Ferro fundido nodular soldado com eletrodo E – NiCi.....</b>	<b>64</b>
5.1.1.1 Ensaio de dureza .....	68
<b>5.1.2 Ferro fundido nodular soldado com E – NiCi + E7018.....</b>	<b>70</b>
5.1.2.1 Ensaio de dureza .....	75
<b>5.1.3 Ferro fundido cinzento soldado com eletrodo E – NiCi .....</b>	<b>78</b>
5.1.3.1 Ensaio de dureza .....	82
<b>5.1.4 Ferro fundido cinzento soldado com eletrodos E – NiCi + E 7018.....</b>	<b>84</b>
5.1.4.1 Ensaio de dureza .....	89
5.2 ENSAIOS DE MICRODUREZA.....	91
5.3 ENSAIOS DE FLEXÃO .....	94
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>95</b>
<b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>96</b>
<b>8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>97</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os ferros fundidos possuem uma ampla gama de aplicação devido às ótimas propriedades e preços relativamente baixos comparados com outros materiais. Apesar da falta de consenso, estima-se que sua descoberta se deu cerca de 600 a.C. e até o século 18 não foi amplamente utilizado pela humanidade. Mais tarde, na Inglaterra, foi descoberto um método de fundir o ferro com carvão de modo que o manganês conseguia retirar o enxofre que causava piora em suas propriedades, possibilitando assim uma maior qualidade na produção desses materiais (OLIVEIRA, 2021).

Atualmente, a importância maior do ferro fundido está na indústria de máquinas e equipamentos, automobilística, naval, ferroviária e construção civil. Exportado por países como China, Brasil, Índia, Alemanha, Rússia e Austrália, esse material é responsável por uma fatia do PIB desses países (OLIVEIRA, 2021).

Este trabalho aborda uma dificuldade associada aos ferros fundidos que consiste no seu processo de soldagem. A soldabilidade dos ferros fundidos em geral é considerada bastante limitada, o que se deve a fatores como seu elevado carbono equivalente, o qual facilita a formação de microestruturas frágeis como a martensita e carbonetos. Além disso, algumas classes de ferros fundidos apresentam ductilidade muito reduzida (em especial ferros fundidos cinzentos), possuindo pouca capacidade de aliviar tensões por deformação plástica, sendo assim suscetíveis a trincamentos provenientes das tensões geradas no resfriamento da junta soldada (ANDERSEN, 2019).

Com os processos de soldagem por fusão aplicados aos materiais metálicos pretende-se produzir a união de materiais, sendo desejável que a região em que os materiais se misturam apresentem a microestrutura, e conseqüentemente as propriedades mecânicas, adequadas à aplicação a que o material será destinado. O processo de solda, além de produzir a região fundida de mistura dos materiais, gera também a zona termicamente afetada (ZTA), a qual apesar de não sofrer fusão, tem suas características microestruturais alteradas. De acordo com Dias (2018), as características microestruturais das regiões de solda dependem basicamente da composição química do metal de adição e do metal base (MB) e das condições térmicas às quais a junta é submetida.

A despeito do vasto conhecimento já existente em relação aos processos de soldagem de materiais metálicos, alguns materiais e condições de soldagem possuem suas peculiaridades, e um desses casos é o referente aos ferros fundidos. É fundamental que se conheça as

características especiais desses materiais e se aplique as técnicas de soldagem existentes para os mesmos (ANDERSEN, 2019).

Dentre as diversas recomendações ao sucesso na soldagem de ferros fundidos, encontra-se o uso de eletrodos com percentuais consideráveis de níquel em sua composição e a aplicação de pré-aquecimento às peças antes de serem soldadas. Há também estudos sobre o efeito positivo do pós-aquecimento das peças após o processo de solda, dificultando a formação de trincas, uma vez que com uma menor taxa de resfriamento a microestrutura desenvolvida no material será diferente e sua dureza resultante será menor, assim como, por consequência, sua fragilidade.

Neste trabalho, buscou-se avaliar a soldabilidade dos ferros fundidos FC 200 e FE 42012 mediante soldagem a arco com eletrodos revestidos E - NiCi e E7018. Utilizou-se o eletrodo E - NiCi, que é indicado especialmente para soldagem de ferros fundidos, possuindo em sua composição 97,5% níquel, o que traz benefícios na soldagem desses materiais.

Há, no entanto, uma expressiva diferença entre o custo do eletrodo E - NiCi em relação a eletrodos convencionais. Assim, em algumas soldagens o preenchimento da junta foi realizado com o eletrodo 7018, realizando-se apenas o amateigamento com o E - NiCi. Nesses casos, avaliou-se a viabilidade do uso do eletrodo E7018 para os materiais base e parâmetros de soldagem utilizados no presente trabalho, analisando a eventual possibilidade de redução de custos por meio do uso de menores quantidades de eletrodos E - NiCi.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve por objetivo geral avaliar a soldabilidade dos ferros fundidos FC 200 e FE 42012 em processos a arco, usando eletrodo revestido E - NiCr com e sem passes de reforço com eletrodo revestido E7018.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Com a realização deste trabalho, buscou-se avaliar:

- A influência dos processos de soldagem sobre as características microestruturais das soldas obtidas;
- A influência dos processos de soldagem sobre a ocorrência de defeitos de soldagem;
- A influência dos processos de soldagem sobre os perfis de dureza e microdureza das diferentes zonas da solda;
- A influência dos processos de soldagem sobre a resistência à flexão da zona termicamente afetada pelo calor (ZTA).

## 3 REVISÃO DE LITERATURA

### 3.1 FERROS FUNDIDOS

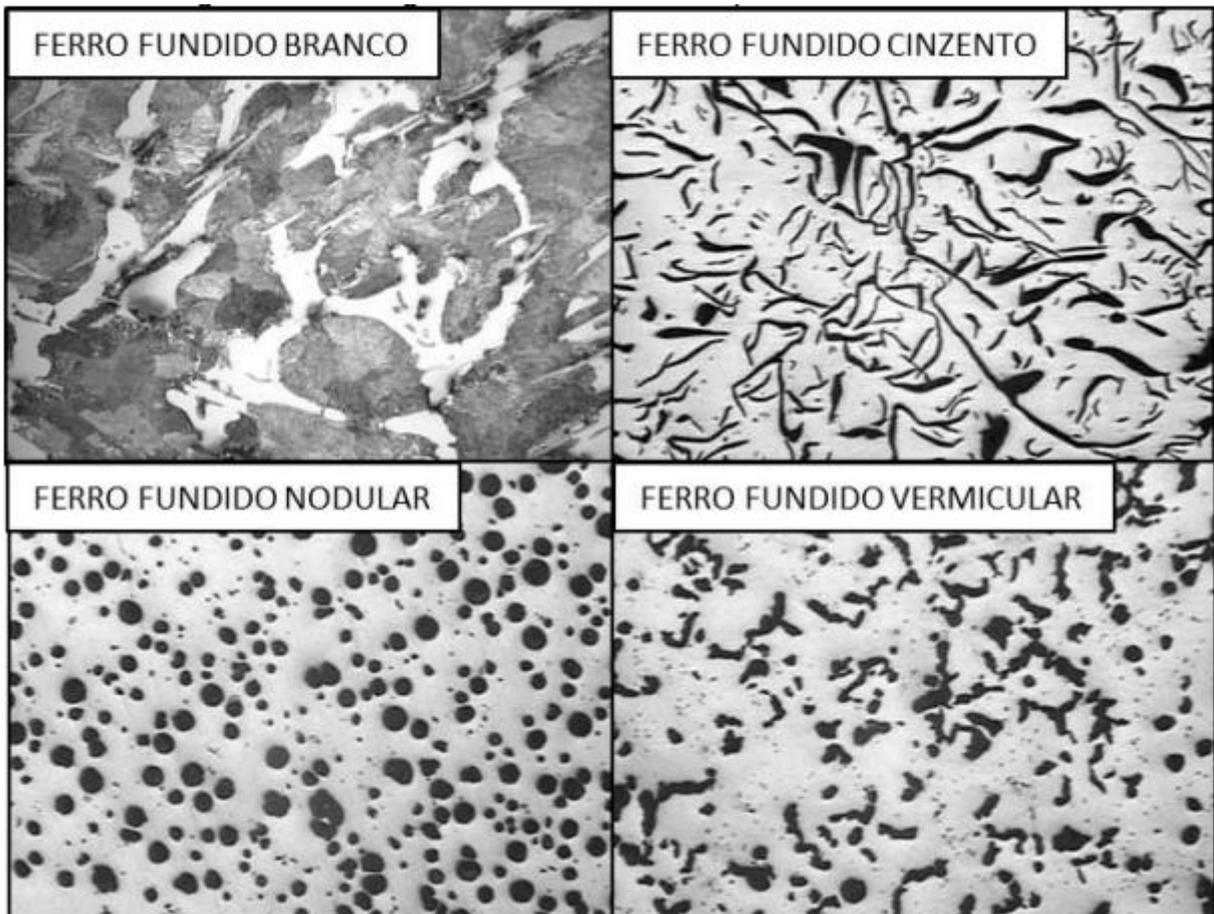
Segundo Almeida (2014), os ferros fundidos são ligas ternárias Fe-C-Si cujo teor de carbono se situa entre 2,11% e 6,67%, contendo também uma apreciável quantidade de silício.

O termo “ferro fundido” não descreve um único material, mas abrange um grupo de materiais que representa combinações de características que se destacam entre ligas fundidas, tais como: baixo custo e versatilidade de engenharia, boa usinabilidade e dureza, boa resistência ao desgaste e à corrosão, elevada condutividade térmica e capacidade de amortecimento, elevada rigidez e resistência à compressão (RIBEIRO, 2021).

Devido ao elevado teor de carbono presente na composição químicas dos ferros fundidos, este elemento se encontra parcialmente dissolvido (em solução sólida nas fases diversas), enquanto o restante se encontra sob forma de grafita (carbono livre). Esta pode se dispor em diferentes formatos, a depender da composição química da liga, bem como da taxa de resfriamento na fundição. Combinado ao ferro, o carbono forma a cementita, carboneto de fórmula química  $Fe_3C$ ; isolado, o carbono forma a grafita, com estrutura cristalina hexagonal compacta (HC). A ocorrência de cada uma das formas mencionadas leva a propriedades específicas dos ferros fundidos (ALMEIDA, 2014; BOCKOR, 2019).

A classificação dos ferros fundidos ocorre de acordo com a matriz, morfologia, quantidade e distribuição da grafita e tratamentos térmicos (BOCKOR, 2019). Na Figura 1 são apresentados exemplos de micrografias mostrando diferentes ferros fundidos.

Figura 1- Micrografias dos principais tipos de ferro fundido.



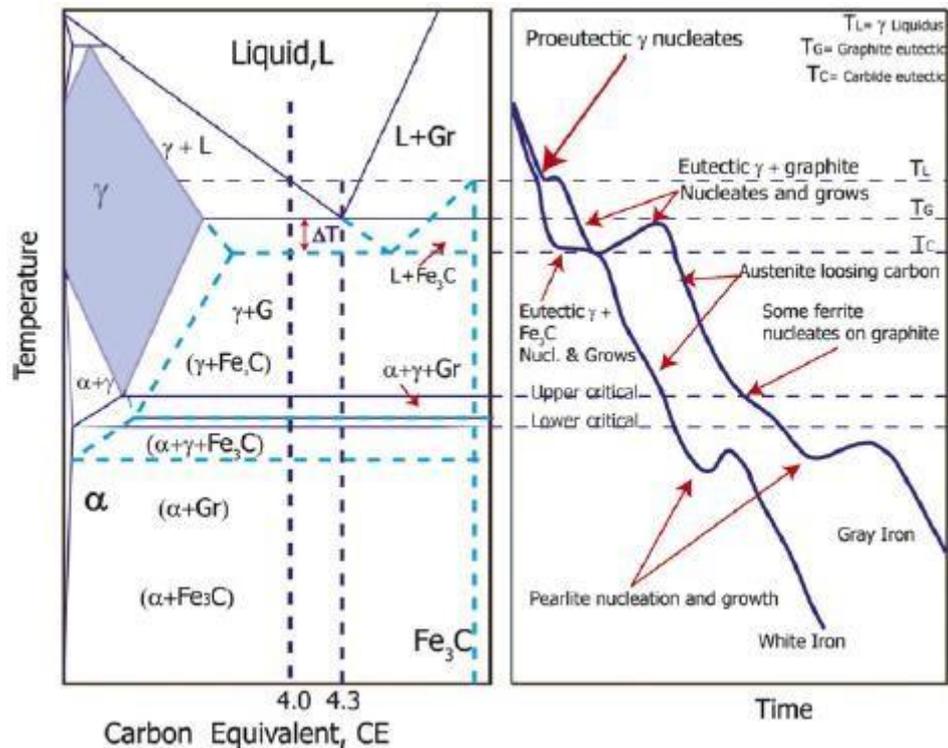
Fonte: (COMIN, 2013)

### 3.1.1 Solidificação e desenvolvimento da microestrutura em ferros fundidos

Em relação à influência dos principais elementos químicos dos ferros fundidos, o carbono determina a quantidade de grafita que pode ser formada e o silício é responsável pela decomposição dos carbonetos de ferro, atuando como elemento grafitizante.

A composição química dos ferros fundidos é definida pelo valor de carbono equivalente (CE), expresso por  $CE = \%C + 1/3\%Si$ , onde  $CE = 4,3\%$  representa a composição eutética (RUNDMAN & IACOVIELLO, 2016). Na figura 2, observam-se as diferentes fases presentes nos ferros fundidos de acordo com o carbono equivalente e a temperatura, sendo mostrados também os efeitos da velocidade de resfriamento durante a solidificação.

Figura 2- Isopleta esquemática mostrando equilíbrio estável (grafita) e metaestável ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) em ligas Fe-C-Si. À direita, observam-se curvas de resfriamento para uma liga com  $\text{CE} = 4,0\%$ .



Fonte: (RUNDMAN & IACOVIELLO, 2016)

Além de ser influenciada pela composição química, a estrutura do ferro fundido depende da velocidade de resfriamento na solidificação. Para velocidades elevadas, geralmente em seções finas e nas paredes do molde, há pouco tempo para decomposição da cementita, havendo pouca ou nenhuma grafitização e tendendo à formação de carbonetos (COMIN, 2013).

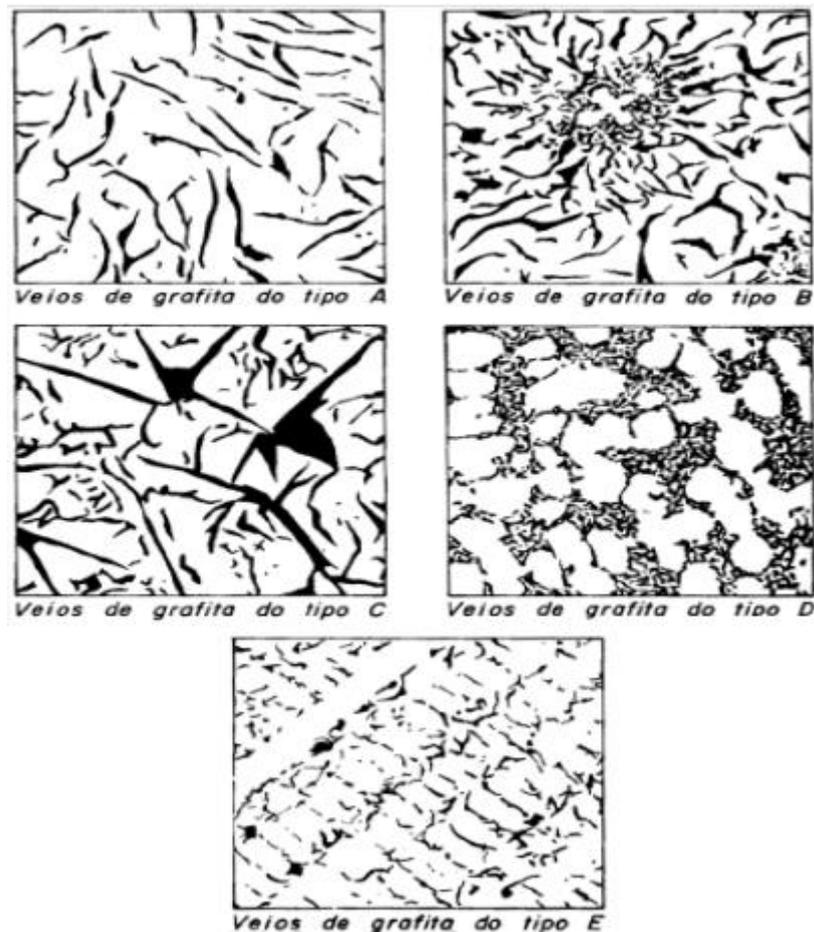
A solidificação da liga hipoeutética esquematizada na figura 2 inicia-se na temperatura líquida ( $T_L$ ) com o crescimento de dendritas de austenita proeutética crescendo ao interior do líquido, aumentando seu percentual de carbono até atingir a temperatura de reação eutética estável ( $T_G$ ). Para o resfriamento abaixo de  $T_G$ , ocorre a reação eutética de equilíbrio em que o líquido se transforma em austenita e grafita, formando uma microestrutura de dendritas de austenita rodeadas por células de austenita e grafita. Nesse caso, a figura 2 representaria um ferro fundido cinzento (curva da direita). Para taxas de resfriamento maiores (curva da esquerda), a liga pode ser super-resfriada abaixo de  $T_G$  e satisfazer o equilíbrio metaestável entre as fases ferrita, austenita, líquido e cementita, resultando em uma estrutura de austenita em dendritas envoltas pelo eutético austenita + cementita, ou seja, a estrutura do ferro fundido branco (RUNDMAN & IACOVIELLO, 2016).

### 3.1.2 Formação e tipos de grafita

Para que a grafita se forme, além do controle da composição química e da velocidade de resfriamento, também é realizado o tratamento de inoculação, que consiste na adição de uma liga metálica ao metal ainda líquido. Essa prática provoca o surgimento de núcleos no metal líquido, nos quais a formação da grafita pode iniciar (COMIN, 2013).

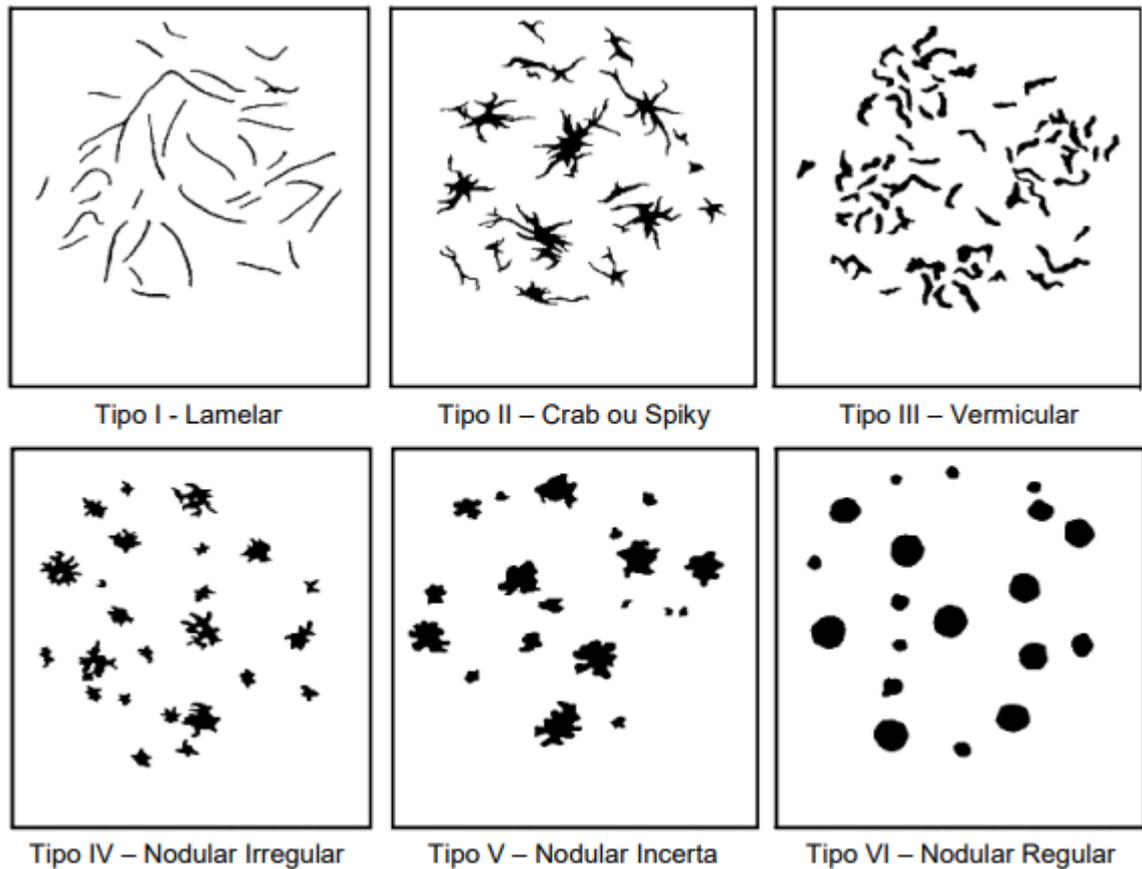
Segundo Vidal (2013), a ASTM (American Society for Testing Materials) e a AFS (American Foundrymen's Society) classificam o aspecto e a forma de apresentação da grafita em cinco tipos, conforme mostrado na figura 3. Outra forma de classificação da grafita é de acordo com a norma ISO 945-1975, que considera grafitas dos tipos I a VI, conforme mostrado na figura 4 (VIDAL, 2013).

Figura 3- Tipos de grafita segundo a classificação ASTM e AFS. (A) Irregular desorientada; (B) Em roseta; (C) Desigual e irregular; (D) Interdendrítica desorientada; (E) Interdendrítica orientada.



Fonte: (VIDAL, 2013).

Figura 4- Classificação da grafita segundo a norma ISO 945-1975.



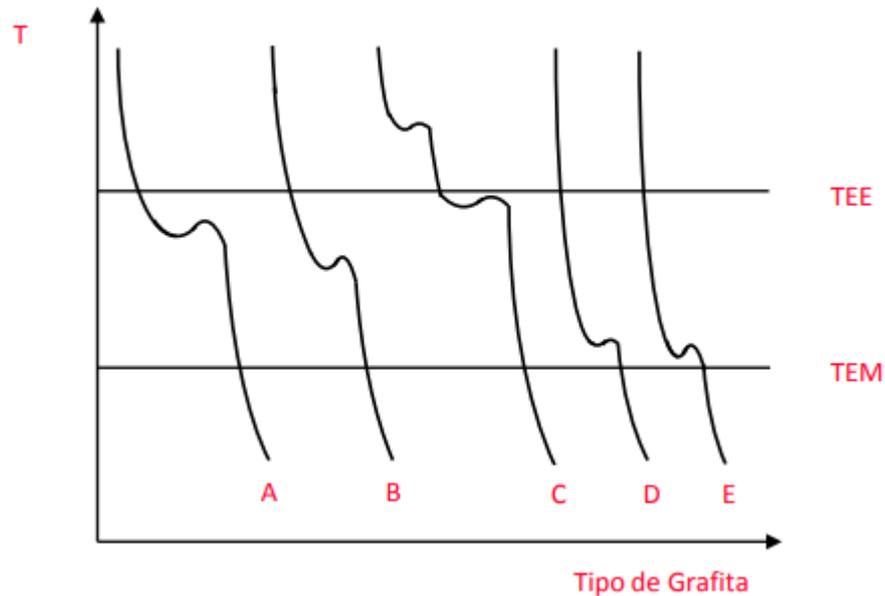
Fonte: (VIDAL, 2013).

A formação dos diferentes tipos de grafita tem forte relação com a composição química e processamento do ferro fundido, sendo que a presença de elementos de liga e parâmetros de processo como velocidade de resfriamento são determinantes para a forma final da grafita. No caso de ferros fundidos cinzentos, o evento de super-resfriamento é especialmente crítico, visto que este é um dos fatores mais determinantes para a formação da grafita. Este fenômeno ocorre quando a liga fundida ultrapassa a temperatura de solidificação, sendo consequência de um resfriamento mais rápido, o qual não permite que condições de equilíbrio sejam plenamente atingidas no material (JIMENES, 2021).

Segundo Chimendes (2019), com o aumento do super-resfriamento obtém-se uma maior quantidade de núcleos e, conseqüentemente, um maior número de células eutéticas. Essa variação no super-resfriamento tem como consequência a formação de uma grafita mais fina, uma vez que a velocidade de difusão dos elementos irá reduzir devido ao aumento na velocidade de crescimento.

Variações no super-resfriamento exercem influência direta na morfologia da grafita: forma, tamanho e distribuição (SCHEID, 2010). A figura 5 mostra a relação entre o super-resfriamento e o tipo de grafita formado.

Figura 5 - Influência do super-resfriamento sobre a formação da grafita.



Fonte: (SCHEID, 2010).

### 3.1.3 Formação da grafita no sistema Ni – C

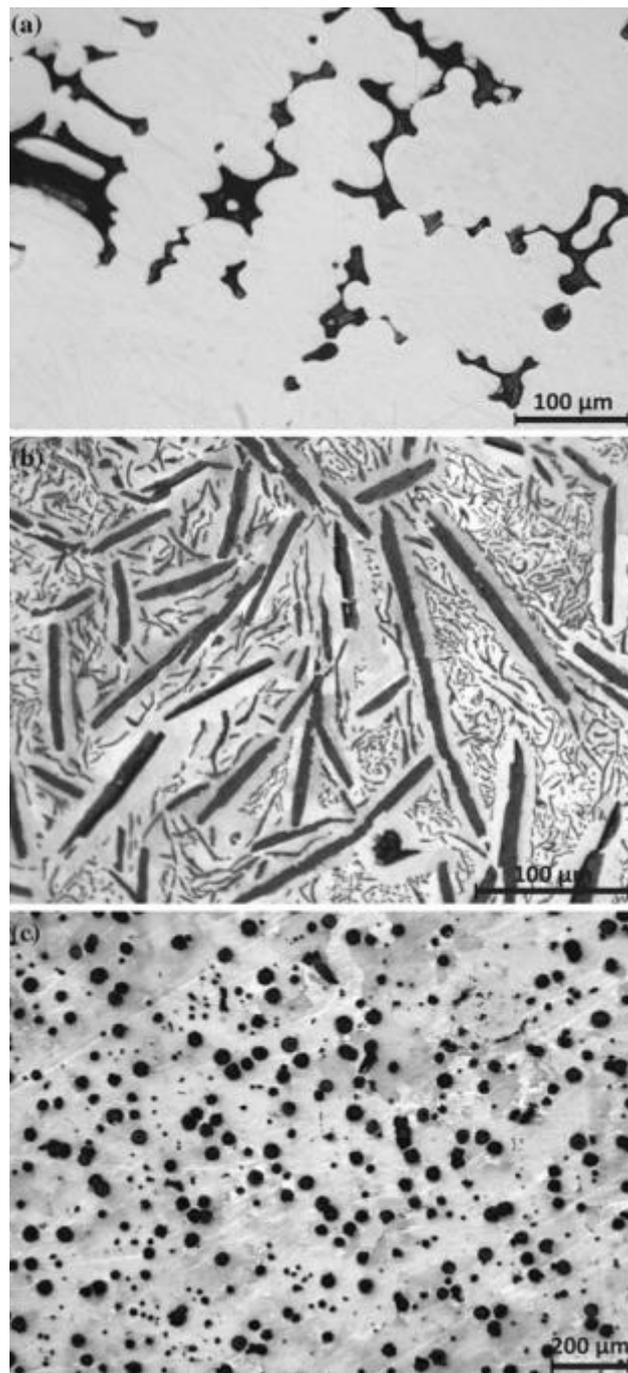
A figura 6 (a) mostra a microestrutura para uma liga Ni – C de composição hipoeutética (Ni + 1,35 %C) fundida por indução e resfriada em atmosfera de argônio a uma taxa de 22 °C/s. A microestrutura é formada por dendritas de níquel (fase clara) com um eutético totalmente divorciado (fase escura) nos contornos. O eutético divorciado é característico de ligas hipoeutéticas com composição de soluto relativamente baixa (AMINI Et al., 2011).

Na figura 6 (b), é mostrada a microestrutura próximo da superfície de uma liga hipereutética (Ni + 3,05 %C) resfriada com gás hélio à taxa de 34 °C/s. A microestrutura é formada por flocos primários do tipo Kish e eutético acoplado fino (AMINI Et al., 2011).

Na figura 6 (c), mostra-se a microestrutura formada para uma liga hipereutética (Ni + 3,05 %C) resfriada em óleo. Neste caso, não se observa o crescimento de forma acoplada, havendo formação somente de matriz de níquel com grafital esferoidal. Conforme já citado por outros autores, com o aumento da taxa de resfriamento ocorre a transição da grafita lamelar

para a esferoidal. No entanto, o mecanismo preciso de nucleação e crescimento não são totalmente compreendidos (AMINI Et al., 2011).

Figura 6 - Efeito da taxa de resfriamento e composição na microestrutura de ligas Ni – C. (a) Liga hipoeutética resfriada em atmosfera de argônio (22 °C/s). (b) Liga hipereutética resfriada com gás hélio (34 °C/s). (c) Liga hipereutética resfriada em óleo.



Fonte: (AMINI Et al., 2011).

### 3.1.4 Classes de ferros fundidos

Atualmente, os ferros fundidos são divididos em cinco classes principais, tendo por base principalmente a forma da grafita. Em alguns casos o nome das classes reflete a forma da grafita (vermicular, nodular); outras vezes tem relação com o aspecto da fratura (cinzento e branco) ou com alguma propriedade mecânica relevante (dúctil). Assim, as principais classes de ferros fundidos são (FERRARESI, 2018):

- Ferro Fundido Cinzento: Apresenta grafita em forma de veios, o que fornece bons valores de condutividade térmica, tornando-se um material muito empregado para componentes sujeitos a fadiga térmica e possui boa capacidade de amortecimento de vibrações/choques. A matriz pode ser ferrítica ou perlítica, sendo esta última mais comumente encontrada;
- Ferro Fundido Nodular: Apresenta a grafita em forma de nódulos, de modo que a ductilidade é uma propriedade importante deste material. Devido a sua excelente combinação de propriedades, a classe dos ferros fundidos nodulares tem ocupado aplicações crescentes na engenharia, substituindo componentes de ferro fundido cinzento e maleável, aço fundido e forjado. Devido às características de boa ductilidade, esse material é também denominado ferro fundido dúctil;
- Ferro Fundido Branco: Os ferros fundidos brancos não contêm grafita, estando todo o carbono sob forma de carbonetos. Sua denominação deve-se ao fato de apresentar fratura de coloração clara;
- Ferro Fundido maleável: Representa historicamente a primeira família de ferros fundidos com ductilidade apreciável. São sempre obtidos por tratamentos térmicos, que podem ser grafitização (ferro maleável preto) ou descarbonetação (ferro maleável branco);
- Ferro Fundido vermiculares: A grafita apresenta-se na forma de vermes (ou compacta), podendo a matriz ser ferrítica, perlítica ou combinação destes microconstituintes. É considerado um material intermediário entre o ferro fundido cinzento e o ferro nodular.

A tabela 1 associa as principais classes de ferro fundido às possíveis microestruturas que podem compor sua matriz, ao tipo de fratura e ao processo utilizado para sua fabricação. Além disso, observa-se a forma sob a qual se encontra o carbono em cada um dos materiais apresentados.

Tabela 1- Classificação geral de ferros fundidos por designação comercial, microestrutural e aspecto da fratura. (P) – Perlita; (F) – Ferrita; (M) – Martensita; (A) – Austenita; (Af) – Ausferrita.

Nome Comercial: Ferro Fundido	Fase Rica em Carbono	Matriz	Tipo de Fratura	Estrutura Final obtida por
Cinzento	Grafita Lamelar	P	Cinza	Solidificação
Dúctil ou Nodular	Grafita Esferoidal	F, P, A	Cinza Prateado	Solidificação ou tratamento térmico
Grafita Compactada	Grafite Vermicular Compactada	F, P	Cinza	Solidificação
Branco	Fe <sub>3</sub> C	P, M	Branca	Solidificação ou tratamento térmico
Mesclado	Grafita Lamelar + Fe <sub>3</sub> C	P	Mesclado	Solidificação
Maleável	Grafita Temperada	F, P	Cinza Prateado	Tratamento Térmico
ADI - Nodular Austemperado	Grafita Esferoidal	Af	Cinza Prateado	Tratamento Térmico

Fonte: (FERRARESI, 2018)

### 3.1.5 Microconstituintes dos ferros fundidos

Os ferros fundidos possuem como elementos estruturais a ferrita, perlita, cementita, ledeburita transformada e a grafita. Podem também apresentar a steadita, considerado um componente indesejável. O mais importante é a grafita, por ser o componente fundamentalmente determinante das características mecânicas dos ferros fundidos cinzentos (VIDAL, 2013).

A seguir, são descritos os diversos microconstituintes passíveis de serem encontrados na microestrutura de ferros fundidos (SCHEGOSCHESKI, 2017; BOCKOR, 2019; DOS SANTOS, 2019):

- FERRITA: morfologia do ferro puro, contém frações de carbono em solução. Essa fase é estável em temperaturas inferiores a 910 °C e se cristaliza na estrutura cúbica de

corpo centrado (CCC). Ferros fundidos apresentam ferrita na fase  $\alpha$ , responsável na diminuição da resistência mecânica e dureza.

- CEMENTITA: Trata-se do carbeto de ferro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), um composto intermetálico com elevada dureza e fragilidade.
- PERLITA: Estrutura composta por placas de ferrita e cementita dispostas alternadamente, formando as assim denominadas colônias de perlita. Uma das características desse constituinte é sua alta resistência com uma leve redução na ductilidade do material. Suas propriedades mecânicas resultam da combinação das propriedades das duas fases presentes.
- GRAFITA: fase constituída puramente por carbono, possui baixo limite de resistência: na ordem de  $1 \text{ N/mm}^2$ . Este constituinte se apresenta como a forma mais estável do carbono puro em ferro fundido, com características de baixa densidade, baixa dureza e com alta condução térmica. Sua forma é de veios lamelares, esferoidal, nodular ou vermicular. Uma maior quantidade de grafita por unidade de volume nos ferros fundidos diminui seu limite de resistência à tração e dureza, porém aumenta a usinabilidade e a dissipação de calor do material.
- MARTENSITA: Forma-se quando altas taxas de resfriamento são aplicadas ao material, destacando-se por ser uma fase dura e frágil. Seu revenimento tem a finalidade de obtenção de uma estrutura com alta resistência mecânica e ao desgaste.
- AUSTENITA: Forma-se em elevadas temperaturas, sendo estável a temperaturas superiores a  $910^\circ\text{C}$  em ligas ferro-carbono, consistindo no carbono dissolvido em ferro com estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC).
- BAINITA: composta por ferrita e carbonetos. Tem sua formação com a mistura de elementos de liga e também em tratamento térmico.
- AUSFERRITA: obtém-se misturando a ferrita acicular e austenita com carbono estabilizado.
- STEADITA: a formação do carboneto de ferro e fosfeto de ferro se devem a mistura do fósforo com o ferro e o carbono. Sua estrutura apresenta a cor branca com furos em sua extensão. Quanto às propriedades mecânicas, sua microestrutura apresenta-se dura e frágil nos contornos celulares. Possui como característica a diminuição da ductilidade e quando em grande quantidade e distribuição, pode diminuir o limite de resistência à tração e a usinabilidade do material. Sua formação é observada para teores de fósforo superiores a 0,15%.

### 3.1.6 Ferro fundido cinzento

Os ferros fundidos cinzentos, apontados como os ferros fundidos mais aplicados industrialmente, apresentam teor de carbono entre 2,5% e 4% e teor de silício entre 1% e 3%. Apresentam até cerca de 0,8% de carbono na forma combinada (cementita) e o restante como grafita, constituinte que aparece em forma de veios. As lamelas de grafita podem ser grossas ou finas, diferenciando-se também quanto à forma e tamanho. Estas alterações originam-se do processo de solidificação do eutético e ocorrem quando as variáveis do processo são modificadas. A tabela 2 apresenta a faixa de composição típica dos ferros fundidos cinzentos.

Tabela 2- Faixa de composição química típica de ferros fundidos cinzentos.

C <sub>t</sub>	Si	Mn	P	S
2,5 a 4,0%	1,0 a 3,0%	0,20 a 1,0%	0,02 a 1,0%	0,02 a 0,25%

Fonte: (VIDAL, 2013).

Segundo Vidal (2013), a velocidade de crescimento da grafita depende do super-resfriamento envolvido. De maneira geral, se o super-resfriamento for aumentado, obtém-se maior número de núcleos e conseqüentemente de células eutéticas que crescem. Assim, a formação de grafita mais fina é uma conseqüência do aumento da velocidade de crescimento, decorrente do maior super-resfriamento. Com o aumento da velocidade de crescimento, a velocidade de difusão dos elementos químicos do líquido para a grafita e austenita é prejudicada, sofrendo uma redução (VIDAL, 2013).

Mecanicamente, o ferro cinzento é comparativamente pouco resistente e frágil em tração, como conseqüência da sua microestrutura; as extremidades das lamelas de grafita são afiladas e pontiagudas, podendo atuar como pontos de concentração de tensões quando uma tensão externa de tração é aplicada. A resistência e a ductilidade são muito maiores sob cargas de compressão, tal qual se observa em materiais cerâmicos (CALLISTER & RETHWISCH, 2016).

Uma característica de grande interesse do ferro fundido cinzento é sua excelente capacidade de amortecer vibrações, tornando-o ideal para uso industrial, como para bases de maquinários, por exemplo (OLIVEIRA, 2021).

Algumas propriedades mecânicas para ferros fundidos cinzentos são apresentadas na tabela 3.

Tabela 3- Propriedades mecânicas de ferros fundidos cinzentos.

<b>Classe</b>	<b>Limite de resistência à tração mín. (MPa)</b>	<b>Dureza Brinell (valores máximos) (HB)</b>	<b>Resistência à flexão estática (valores médios) (MPa)</b>
FC10	100	201	-
FC15	230 180 150 110	241 223 212 201	300 310 290 260
FC20	270 230 200 160	255 235 223 217	400 380 350 320
FC25	320 270 250 210	269 248 241 229	- 450 410 380
FC30	320 290 260	269 262 248	- 470 440
FC35	370 340 300	- 227 269	- 530 500
FC40	390 350	- -	590 560

Fonte: Adaptado de (LUCIO, 2014)

### 3.1.7 Ferro fundido nodular

Ferros fundidos nodulares (dúcteis) são ligas compostas principalmente por carbono e silício, com o carbono livre (grafita) na matriz metálica em formato esferoidal. Outros elementos químicos como o magnésio, por exemplo, são adicionados com fins de tratamento da liga para que ocorra o processo de nodularização da grafita (FRANCKLIN, 2009). Composições típicas de classes de ferros fundidos nodulares são mostradas na tabela 4.

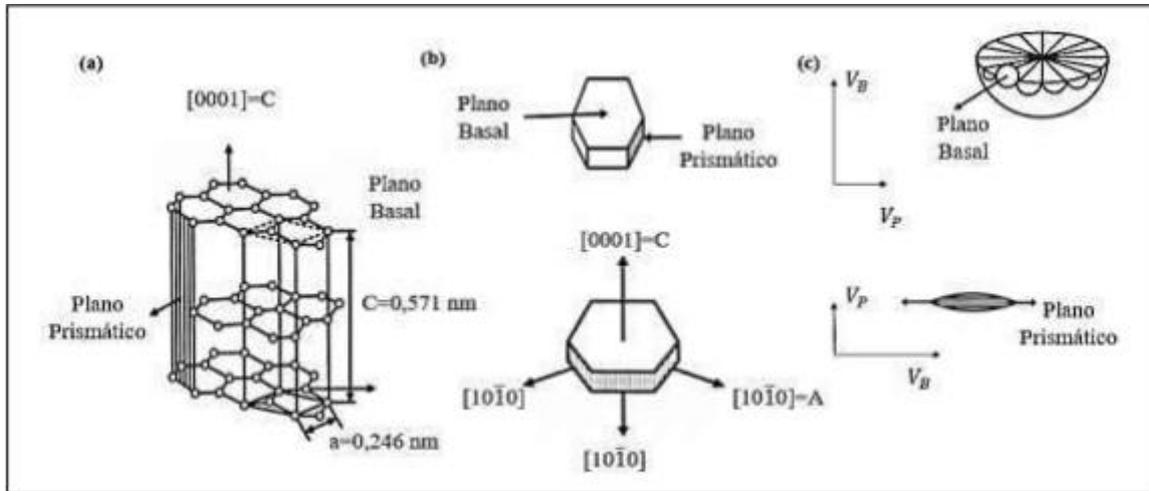
Tabela 4- Composições típicas de determinadas classes de ferros fundidos nodulares.

Elemento	Classes de ferro fundido nodulares					
	FE 38017	FE 42012	FE 50007	FE 60003	FE 70002	FE 80002
C	3,4 a 3,8	3,4 a 3,8	3,4 a 3,8	3,4 a 3,8	3,4 a 3,8	3,4 a 3,8
Si	2,1 a 2,8	2,1 a 2,5	2,8 a 2,8	3,4 a 3,8	2,3 a 2,8	2,1 a 2,8
Mn (máx)	0,3	0,3	0,5	0,5	1,0	1,0
P (max)	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
S (máx)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Cu	-	-	0,2 a 0,7	0,5 a 1,0	0,5 a 1,0	0,5 a 1,0
Mg	0,04 a 0,06	0,04 a 0,06	0,04 a 0,06	0,04 a 0,06	0,04 a 0,06	0,04 a 0,06

Fonte: (FRANCKLIN, 2009).

A grafita nodular é formada quando a velocidade de crescimento durante a solidificação na direção do plano basal (Figura 7) é dominante. Por outro lado, se a maior velocidade de crescimento ocorre no plano prismático (Figura 7a), a grafita lamelar é formada. Em ligas Fe-C-Si puras, o plano basal tem menor energia interfacial com o líquido e, portanto, é a direção preferencial de crescimento (Figura 7b). Quando as ligas apresentam elementos tensoativos como enxofre e oxigênio em sua composição, estes tendem a ser adsorvidos no plano prismático, reduzindo a energia interfacial para valores inferiores ao do plano basal, desse modo favorecendo a formação de grafita lamelar (REIS, 2021).

Figura 7 - Esquema do crescimento da grafita: (a) - Estrutura hexagonal da grafita e os planos; (b) Plano basal, prismático e índices de Miller; (c) Grafita nodular e lamelar.



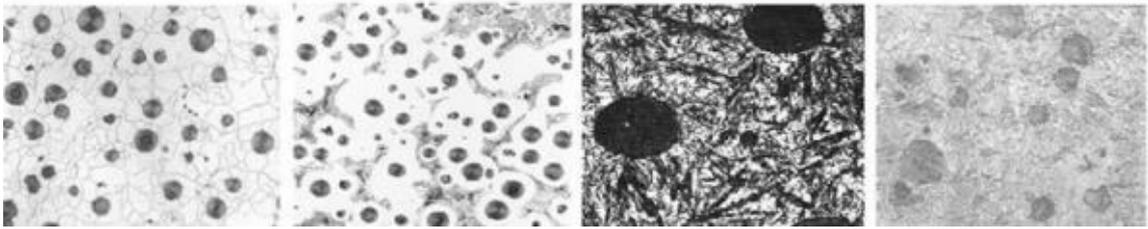
Fonte: (MEDANHA, 2021).

O processo mais comum e mais econômico usado na fabricação do ferro fundido nodular é o tratamento com magnésio, tendo como método mais usual o processo “sandwich”. Neste, a liga de magnésio é instalada em uma cavidade no fundo da panela de tratamento e coberta com limalhas de ferro fundido, que tem a finalidade de retardar a reação do magnésio com o metal líquido. O metal é vazado de modo a atingir o fundo da panela no lado oposto da colocação da liga, evitando um ataque direto do metal líquido com a liga (FRANCKLIN, 2009; VIDAL, 2013).

Quando a liga nodularizante entra em contato com o ferro fundido, ocorre uma reação, transformando o material em ferro fundido nodular, podendo então ser vazado nos moldes da linha de produção da empresa. A referida reação de nodularização possui um intervalo de tempo efetivo, e caso haja uma extrapolação do tempo de vazamento, a microestrutura pode apresentar vermicularizações durante a solidificação das peças, fato este que torna o controle do tempo de vazamento muito importante no processo de fabricação (FERREIRA et al., 2017).

Segundo Schwanke (2014), em relação a sua estrutura os ferros fundidos nodulares apresentam normalmente matriz perlítica com grafita esferoidal. Mediante tratamento térmico, no entanto, diversas estruturas de matriz podem ser obtidas, como ferrítica, martensítica e austenítica, mostradas na Figura 8. Além desses, o ferro fundido nodular pode se apresentar com matriz ferrítico-perlítica, bainítica ou do tipo austemperada (SCHEGOSCHESKI, 2017).

Figura 8- Ferros fundidos nodulares com diferentes tipos de matriz.



Fonte: (SCHWANKE, 2014)

O tipo de matriz do ferro fundido nodular é um importante fator determinante de suas propriedades mecânicas. Nos ferros fundidos nodulares de matriz ferrítica, por exemplo, os limites de resistência variam de 380 a 450 MPa associados à alongamentos de 7 a 22%. Já para ferros fundidos nodulares de matriz perlítica, os valores de limite de resistência podem atingir até 900 MPa, porém com alongamentos não maiores que 2% (VIDAL, 2013). Na tabela 5 são mostradas as propriedades mecânicas e a microestrutura predominante para determinadas classes de ferro fundido nodular.

Em termos mecânicos, ferros fundidos nodulares oferecem uma combinação de propriedades como elevada tenacidade, resistência à tração, ductilidade, resistência ao desgaste e à fadiga. Entretanto, a característica que mais se destaca é seu elevado limite de escoamento (FRANCKLIN, 2009; SCHEGOSCHESKI, 2017).

A maior ductilidade do ferro fundido dúctil em relação ao cinzento é devida ao formato esferoidal da grafita, o qual gera uma concentração de tensões muito menor que aquela observada no caso das grafitas dispostas em lamelas nos ferros fundidos cinzentos. Quanto mais a forma da grafita se desvia da forma esférica ideal, mais baixa é a ductilidade e a resistência do material, isso devido ao surgimento de regiões tensionadas em torno dos nódulos (SCHWANKE, 2014).

Tabela 5- Propriedades de ferros fundidos nodulares segundo a Norma Técnica ABNT (NBR 6919/1981).

Classe	Limite de Resistência (LR) (Mpa)	Limite de Escoamento (LE) (Mpa)	Alongamento (A) (%)	Dureza Brinell (HB)	Microestrutura predominante
FE 38012	380	240	17,0	140 - 180	Ferrítica
FE 42012	420	280	12,0	150 - 200	Ferrítica - Perlítica
FE 50007	500	350	7,0	170 - 240	Ferrítica - Perlítica
FE 60003	600	400	3,0	210 - 280	Perlítica
FE 70002	700	450	2,0	230 - 300	Perlítica
FE 80002	800	550	2,0	240 - 312	Perlítica
FE 38017 - RI	380	240	17,0	140 - 180	Ferrítica

Fonte: (FRANCKLIN, 2009)

### 3.2 O PROCESSO DE SOLDAGEM

De acordo com Felizardo (2016), soldagem é um processo que consiste na união de materiais, mais especificamente, união de metais ou polímeros. Na soldagem, a união é obtida pela aproximação dos átomos a distâncias suficientemente pequenas para que ligações químicas sejam formadas: Ligações metálicas no caso de metais ou entre moléculas para os polímeros. Diferentemente dos demais processos de união, na soldagem ocorre uma mistura dos materiais base e de adição (quando utilizado). Essa mistura pode ocorrer na fase sólida (nos processos de soldagem por pressão) ou na fase líquida (nos processos de soldagem por fusão), e a capacidade de mistura entre os materiais envolvidos denomina-se solubilidade.

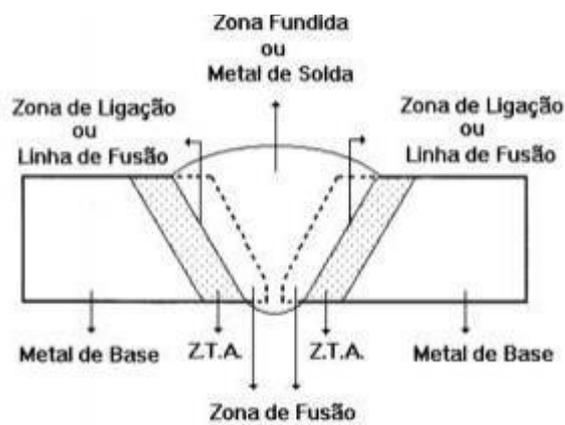
Quanto à aplicação, os processos de soldagem podem ser utilizados na fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas industriais. Outra aplicação está na deposição de materiais sobre uma superfície para recuperar partes desgastadas ou para a formação de um revestimento característico (FELIZARDO, 2016).

Procura-se no processo de soldagem que as forças das ligações químicas na junta soldada sejam de natureza similar às atuantes nos próprios materiais a serem soldados. Além disso, busca-se obter uma junta que preserve ao máximo as características físicas e químicas

dos materiais de base (FELIZARDO, 2016). Idealmente, uma junta soldada deveria apresentar as propriedades de resistência mecânica, ductilidade, tenacidade, resistências à fadiga e à corrosão uniformes ao longo da solda e similares às propriedades do material adjacente (MODENESI, 2011).

Segundo Dias (2018), em decorrência da elevada temperatura e da deposição do metal de adição, o processo de soldagem gera regiões bem definidas que são as principais áreas de interesses no estudo de uma junta de solda, sendo estas: zona termicamente afetada (ZTA), zona de ligação ou linha de fusão (LF), metal base (MB) e zona fundida ou metal de solda (MS), no qual se insere o metal de adição. As regiões envolvidas numa junta de solda são mostradas na figura 9.

Figura 9- Regiões formadas no processo de soldagem.



Fonte: (DIAS, 2018).

As características microestruturais das regiões de solda dependem da composição química do metal de adição e do MB e das condições térmicas às quais a junta foi submetida (DIAS, 2018).

### 3.2.1 Soldagem com eletrodo revestido

A soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido apresenta uma vasta gama de aplicações devido ao seu baixo custo e a sua simplicidade, podendo ser definida como um processo de soldagem a arco no qual a união é gerada pelo calor do arco criado entre um eletrodo revestido e a peça a ser soldada (DIAS, 2018).

A soldagem é iniciada tocando-se a ponta do eletrodo na peça, gerando assim um curto-circuito e um arco elétrico entre o material e a peça com temperatura aproximada de 3500°C.

Com essa temperatura, ocorre a fusão do metal-base e da ponta do eletrodo, e parte dessa extremidade fundida é depositada na cavidade formada pela fusão do metal-base. O eletrodo revestido é constituído por uma vareta do metal a ser depositado (alma), envolta por um revestimento que possui funções importantes para garantir uma soldagem eficaz, sendo as principais: a proteção do metal de solda através da obtenção de uma atmosfera inerte ao entorno da poça de fusão, a criação da escória e o melhor direcionamento e estabilização do arco elétrico, além da adição de elementos de liga à poça de fusão (DIAS, 2018; CARBOGRAFITE, 2021). Os elementos envolvidos nesse tipo de soldagem são mostrados na figura 10.

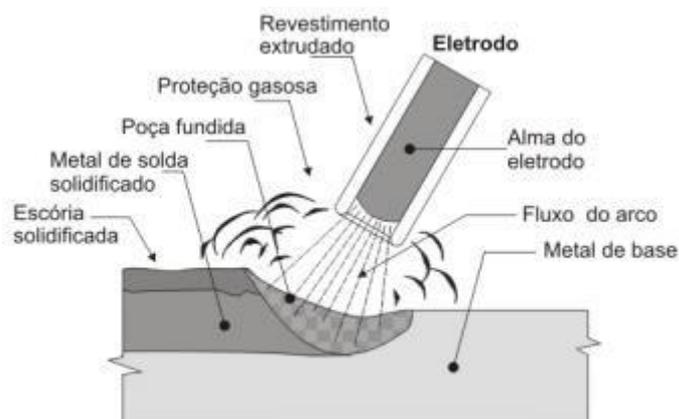
A utilização de eletrodos revestidos para soldar apresenta determinadas vantagens, a saber (ALUSOLDA, 2018):

- Processo de soldagem de baixo investimento;
- Não há necessidade de suprimento de gases;
- Flexibilidade de aplicação;
- Grande variedade de consumíveis;

Por outro lado, as desvantagens do processo são:

- Baixa produtividade;
- Necessidade de cuidados especiais com os eletrodos;
- Volume de gases e fumos gerados no processo.

Figura 10 - Ilustração do processo de soldagem por eletrodo revestido.



Fonte: (CARBOGRAFITE, 2021)

### 3.2.2 Parâmetros envolvidos no processo de soldagem

- Corrente de soldagem: é a variável que controla predominantemente a quantidade de fusão no MB e a penetração da solda, sendo essas o aspecto do cordão e as propriedades da junta. Influencia diretamente a magnitude e a distribuição espacial da energia térmica disponível no arco elétrico, bem como a maioria dos fenômenos que ocorrem nessa região (DIAS, 2018).
- Tensão do arco: A tensão do arco elétrico é o principal parâmetro para regulagem da largura do cordão, influenciando também no modo de transferência. A tensão do arco tem uma influência direta no comprimento do arco elétrico que controla o perfil do cordão, a profundidade da penetração e a quantidade de respingos. A tensão adequada para determinada soldagem é dependente de uma grande variedade de fatores incluindo a intensidade da corrente, a espessura do material, tipo de junta, posição de soldagem, tamanho do eletrodo, composição do gás de proteção. Um aumento excessivo da tensão faz com que o arco elétrico aumente proporcionalmente, tendendo a achatá-lo e aumentar a zona de fusão, causando problemas como porosidade, respingos, salpico, mordedura e trincas. À medida em que a tensão é reduzida, a penetração aumenta. Uma tensão muito baixa pode causar sobreposição, porosidade, e o cordão de solda pode ficar estreito, com coroa grande e penetração profunda (DALL'ACQUA, 2015).
- Velocidade de avanço: Apesar de seu controle ser impreciso em soldagens manuais, é um parâmetro que influencia consideravelmente o processo de soldagem, sendo inversamente proporcional à altura e largura do cordão. Assim, mesmo com elevadas correntes, a energia de soldagem (aporte térmico) é menor quando se aplica velocidades de avanço mais elevadas (DIAS, 2018).
- Aporte térmico (energia de soldagem): Para se obter o balanço de energia na soldagem, costuma-se trabalhar com uma grandeza denominada aporte de calor ou aporte de energia, que correlaciona a quantidade de energia disponível para soldagem com a velocidade de avanço da fonte de calor (eletrodo ou arame). O aporte térmico (AT) é calculado pela relação mostrada na Equação 1, sendo expresso na unidade J/mm (VIDEIRA, 2016).

$$A = \eta VI/vs \quad (1)$$

Sendo  $\eta$  a eficiência da soldagem (adimensional), ou seja, a proporção de calor que efetivamente é transmitida à peça;  $V$  é a tensão do arco (V),  $I$  é a corrente de soldagem (A) e  $v_s$  é a velocidade de soldagem (mm/s).

A característica mais importante ao se considerar o aporte térmico, é o fato de governar as taxas de resfriamento nas soldas, afetando assim a microestrutura do metal de solda e da zona afetada pelo calor. Uma mudança na microestrutura afeta diretamente as propriedades mecânicas das soldas, de modo que o controle do aporte de energia na soldagem é de grande importância no que tange o controle de qualidade (AVENTA, 2018).

A relação direta entre aporte de calor e microestrutura ocorre devido à taxa de resfriamento da solda ser reduzida conforme o aporte térmico é aumentado. Com uma taxa de resfriamento reduzida, a maioria dos materiais exibirá maior quantidade e tamanho de grãos, que resulta em propriedades mecânicas alterada (AVENTA, 2018).

Por outro lado, o baixo aporte térmico – causado por uma velocidade de deslocamento excessiva, por exemplo – também trará prejuízos. O cordão poderá se solidificar muito rapidamente, resultando em uma estrutura de grãos não refinada e falhas potenciais na penetração (AVENTA, 2018).

### **3.2.3 Pré-aquecimento na soldagem**

Conforme Azzolini (2017), os metais possuem boa condutividade térmica. O calor fornecido pelo arco elétrico para a poça de fusão durante o processo de soldagem é rapidamente transmitido para o metal base que compõem a junta a ser soldada. Devido à elevada diferença de temperatura entre o metal base e a poça de fusão, observa-se um rápido resfriamento da zona fundida e da ZTA. Este rápido resfriamento, pode ser prejudicial as propriedades mecânicas da junta soldada. No caso de aços ao carbono, a elevada taxa de resfriamento pode propiciar a formação de fases duras e de baixa tenacidade, como o caso da microestrutura martensítica, sendo esta suscetível ao surgimento de trincas durante o resfriamento. De acordo com Azzolini (2017), o pré-aquecimento da junta a ser soldada é uma maneira de reduzir a taxa de resfriamento do metal. As temperaturas mais usuais estão entre 150 °C a 200 °C, e a necessidade do uso de pré-aquecimento aumenta de acordo com as seguintes características dos materiais:

teor de carbono ou de elementos de liga existentes no material de base; tamanho da peça; temperatura inicial do metal; velocidade de soldagem; diâmetro do consumível.

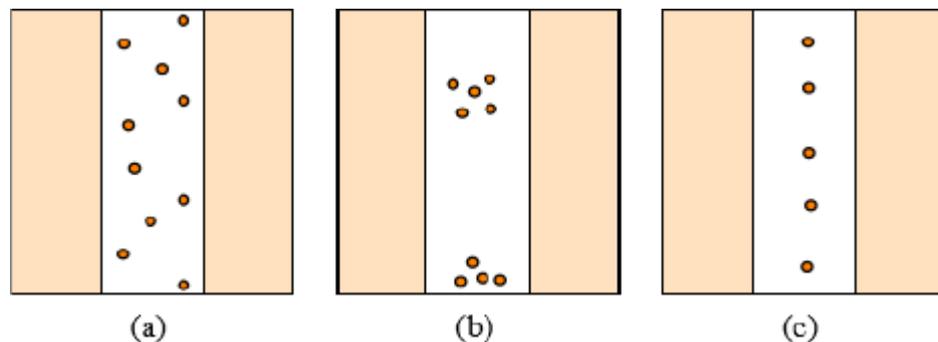
### 3.2.4 Defeitos na soldagem

De acordo com Bastos e Silva (2018), defeito ou descontinuidade é qualquer interrupção da estrutura típica de uma junta soldada. Pode-se considerar como descontinuidade a falta de homogeneidade de características físicas, mecânicas ou metalúrgicas do material soldado.

A seguir são mostrados os principais tipos de defeitos que podem ser gerados em processos de soldagem (BASTOS E SILVA, 2018):

- Porosidade: é um defeito volumétrico causado pela presença de gases na poça de fusão. À medida que a poça de fusão é deslocada durante a soldagem, as bolhas de gás podem ficar aprisionadas no metal solidificado. Os poros podem se encontrar dispostos de três maneiras: uniformemente distribuídos, agrupados ou alinhados, conforme mostrado na figura 11.

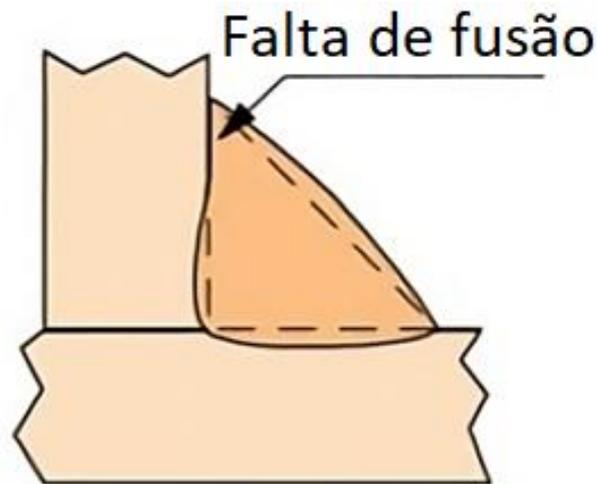
Figura 11 - Tipos de porosidade: (a) – distribuída; (b) – agrupada; (c) – alinhada.



Fonte: (BASTOS E SILVA, 2018)

- Falta de fusão: consiste em falta de continuidade metalúrgica entre o metal depositado e o metal base, ou entre os passes de solda adjacentes. É causada pela falta de aquecimento adequado no material, ou por falta de limpeza da junta, o que pode deixar uma camada de óxido espessa no metal base, a ponto de dificultar a sua fusão. O defeito de falta de fusão atua como forte concentrador de tensões, favorecendo o surgimento e a propagação de trincas. Este tipo de defeito está esquematizado na figura 12.

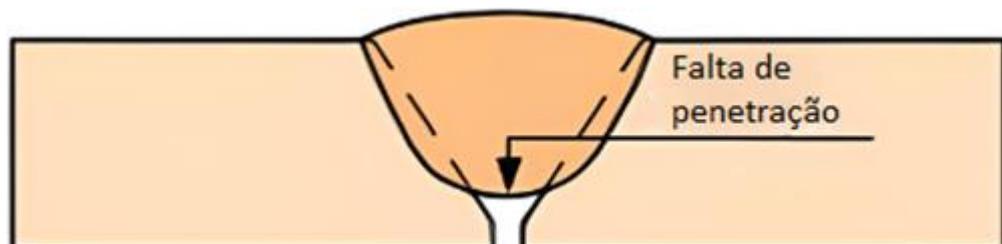
Figura 12 - Esquema mostrando o defeito de falta de fusão.



Fonte: (Adaptado de BASTOS E SILVA, 2018)

- Falta de penetração: ocorre quando a raiz da junta não se funde ou não preenche completamente a raiz da junta; tal descontinuidade pode ocorrer pela manipulação incorreta do eletrodo, juntas mal projetadas ou parâmetros de soldagem incorretos. A falta de penetração reduz a seção útil da solda, atuando como concentradora de tensões. A figura 13 mostra a falta de penetração em uma junta soldada.

Figura 13- Ilustração do problema de falta de penetração na solda.



Fonte: (Adaptado de BASTOS E SILVA, 2018)

- Inclusão de escória: Consiste na inclusão de partículas de óxido e outros sólidos não metálicos que ficam aprisionados entre os passes de solda, ou entre a solda e o metal base, conforme se observa na figura 14. Os fluxos que formam a escória tendem a se separar do metal líquido na poça de fusão. As inclusões com

formatos alongados são concentradores de tensão e podem favorecer o trincamento da peça.

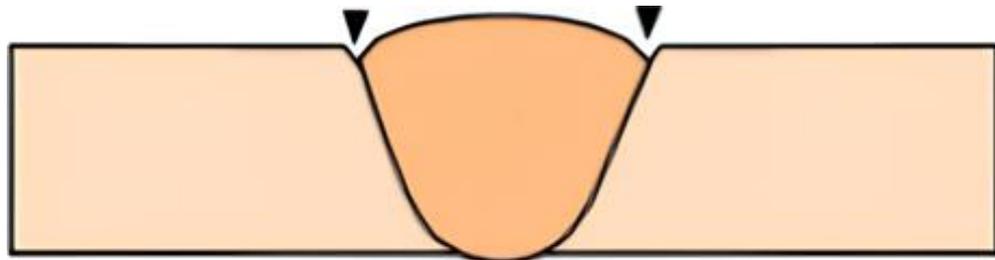
Figura 14 - Ilustração do defeito de inclusão de escória.



Fonte: (BASTOS E SILVA, 2018)

- **Mordeduras:** Consistem em descontinuidades que aparecem como entalhes no metal de base na margem do cordão de solda, formando reentrância nesta região, conforme mostrado na figura 15. Suas consequências são a redução da área útil e a concentração de tensões, além de redução na resistência à fadiga da junta.

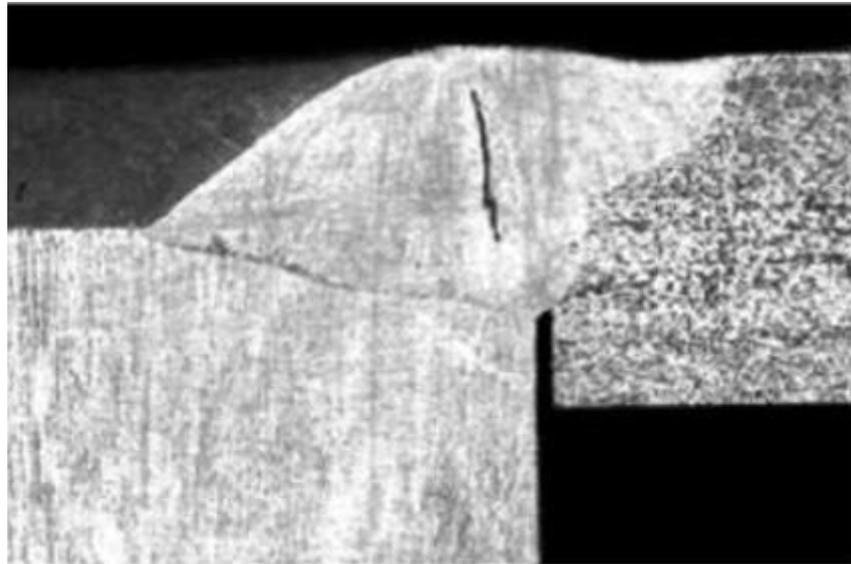
Figura 15 - Ilustração de mordedura em soldagem.



Fonte: Adaptado de: (BASTOS E SILVA, 2018)

- Trincas: Podem ser consideradas as descontinuidades mais graves em soldagem, devido a atuarem como fortes concentradores de tensão, podendo facilitar a ocorrência de fratura frágil. As trincas resultam da atuação de tensões de tração sobre um material, o qual é incapaz de responder às solicitações impostas. Essas tensões, juntamente com a fragilização associada a mudanças microestruturais durante a soldagem e à presença de certos elementos, podem causar o trincamento. Na figura 16, observa-se uma trinca localizada no cordão de solda, formada durante a solidificação da zona fundida.

Figura 16- Trinca gerada durante a solidificação do cordão de solda.



Fonte: (BASTOS E SILVA, 2018)

### 3.3 SOLDAGEM DE FERROS FUNDIDOS

Certamente a soldagem de ferros fundidos possui suas peculiaridades, de modo que é fundamental que se conheça as propriedades especiais desses materiais e se aplique as técnicas de soldagem existentes para os mesmos. Soldadores que buscam reparar ferro fundido com base no conhecimento de soldagem em aços, comumente obtêm resultados negativos (ANDERSEN, 2019).

Em comparação à soldagem dos aços em geral, a soldagem de ferros fundidos é de mais difícil execução. Todavia, mediante entendimento da natureza desses materiais e suas características, podem ser adotados procedimentos a fim de eliminar e/ou contornar essas dificuldades (CANALE, 2005).

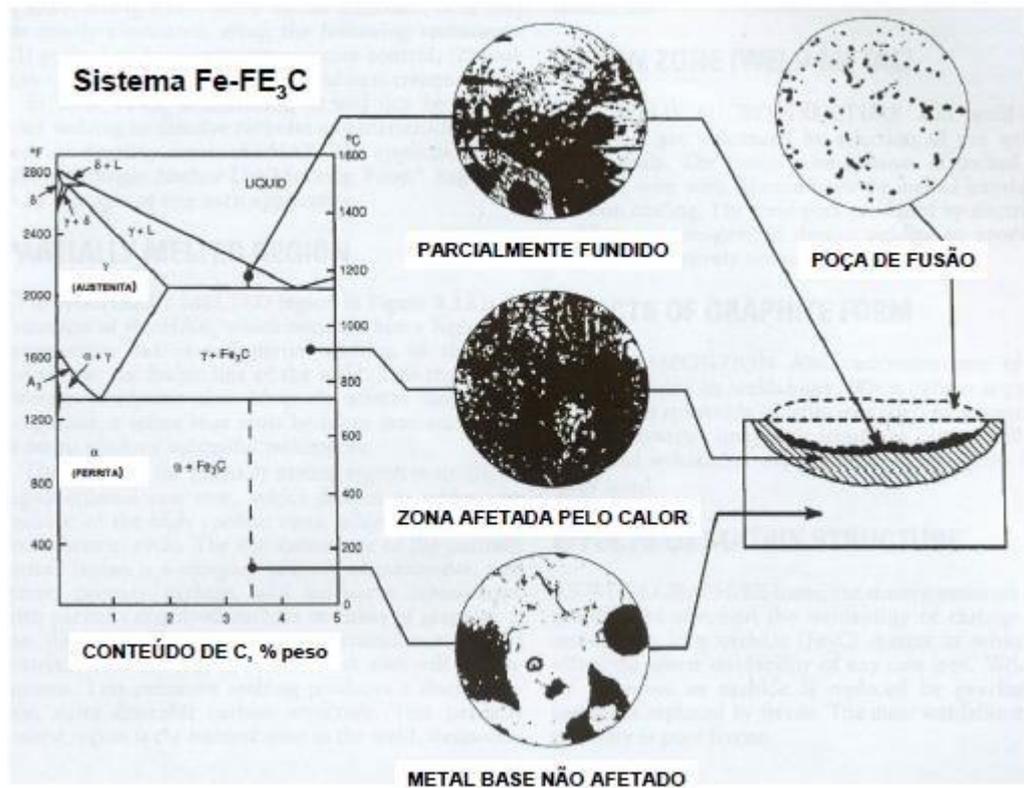
Quanto à aplicação, a soldagem de ferros fundidos se aplica em três diferentes níveis: solda de manutenção – se refere ao reparo de peças que romperam ou sofreram desgaste em serviço, e que necessitam ser recuperadas; solda de construção – é empregada para obter peças de grande complexidade, normalmente envolvendo peças de ferro fundido soldadas a partes de aço; solda de produção – empregada para recuperação de defeitos de fundição, porosidades, trincas e rechupes. No processo de fundição tende-se a evitar ao máximo a necessidade da execução de operações de soldagem, porém na produção de grandes séries de peças fundidas pode se fazer necessário recuperar peças que apresentem pequenos defeitos (rechupes, enchimento) em função de oscilações do processo (FERRARESI, 2018).

Na figura 17, relacionam-se as microestruturas formadas na soldagem de ferros fundidos ao diagrama de fases ferro-carbono, mostrando que o teor de carbono e a temperatura atingida em cada região da solda influenciam no desenvolvimento das microestruturas. A poça de fusão não possui correspondência no diagrama de fases devido a se estar considerando a soldagem com eletrodo de níquel, o que torna a poça livre das fases problemáticas (carbonetos, martensita) desenvolvidas em outras regiões da solda (SILVEIRA, 2004).

Diante das altas taxas de resfriamento, a ZTA tende a experimentar formação de carbonetos. Durante a aplicação das altas temperaturas geradas pela soldagem, o carbono difunde-se na austenita, a qual sob resfriamento rápido forma martensita de alto carbono. As microestruturas de cementita (carboneto) e martensita são de alta fragilidade e podem causar trincas (SILVEIRA, 2004).

A zona parcialmente fundida observada na figura forma-se quando um elevado pico de temperatura funde parcialmente as impurezas de baixo ponto de fusão contidas no metal base, próximo da linha de fusão do cordão. Sua microestrutura consiste em uma mistura complexa de martensita, austenita, carbonetos primários e ledeburita alternada com grafita em flocos ou nódulos parcialmente dissolvidos. Esta região de extrema fragilidade é bastante prejudicial às propriedades mecânicas da solda (SILVEIRA, 2004).

Figura 17- Fases e microestruturas na soldagem de ferros fundidos.



Fonte: (SILVEIRA, 2004).

### 3.3.1 Fatores que reduzem a soldabilidade dos ferros fundidos

Embora os altos teores de carbono contribuam para algumas propriedades desejáveis dos ferros fundidos, esta característica torna esses materiais quebradiços e confere a estes uma baixa capacidade de alongamento sob deformação. Desse modo, ferros fundidos apresentam facilidade para trincar quando submetidos a aquecimento e posterior resfriamento locais, devido à reduzida capacidade para aliviar tensões residuais de forma plástica (em especial o ferro fundido cinzento) e em função da formação de microestruturas indesejadas promovida pelos teores de carbono elevados (ANDERSEN, 2019).

A soldabilidade de ferros fundidos tem sido considerada bastante limitada devido à heterogeneidade da fase matriz e à não-molhabilidade da fase grafite. Tais fases sofrem uma série de alterações microestruturais na ZTA durante a soldagem (ANDERSEN, 2019).

Durante a soldagem de ferros fundidos, ocorrem transformações metalúrgicas que produzem mudanças de fases, as quais são identificáveis por meio da análise metalográfica do material soldado. A natureza e tamanho das zonas de solda são determinadas pela energia de

soldagem envolvida e pelas composições químicas do ferro fundido e do metal de preenchimento (FERRARESI, 2018).

A baixa soldabilidade do ferro fundido nodular pode ser atribuída a dois fatores: à formação de martensita nas zonas afetada pelo calor e de ligação e ao desenvolvimento de uma microestrutura idêntica ao ferro fundido branco na zona de ligação (FERRARESI, 2018).

### 3.3.2 Zonas formadas na soldagem de ferros fundidos

As diferentes zonas formadas na região de solda de um ferro fundido são a seguir definidas (FERRARESI, 2018; RIBEIRO, 2019):

- ZFM – Zona Fundida Misturada: Consiste na mistura entre o metal de base e o metal de adição, a qual resulta da movimentação da poça de fusão durante o processo de soldagem. A composição química da zona fundida misturada 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 de sua participação na formação da zona fundida;
- ZFNM – Zona Fundida Não Misturada: é a região do metal de base que sofreu fusão, porém não houve total mistura com o metal de adição. Para a maioria dos tipos de ferro fundido, nesta pequena região pode haver formação de ferro fundido branco;
- ZPF – Zona Parcialmente Fundida: também denominada zona de ligação (ZL), consiste numa região do metal de base em que ocorreu fusão parcial. Para a maioria dos ferros fundidos sua microestrutura é composta por ledeburita, martensita e grafita não dissolvida;
- ZTA – Zona Termicamente Afetada: é uma região do metal de base adjacente ao cordão de solda, a qual durante a soldagem atinge a temperatura de austenitização. No entanto, os tempos em que os materiais soldados permanecem em elevadas temperaturas são curtos de modo que os processos controlados por difusão não se produzem tão facilmente quanto nos tratamentos térmicos convencionais e homogêneos.

### 3.3.3 Modificações microestruturais na soldagem de ferros fundidos

Segundo Souza (2017), as preocupações básicas na soldagem do ferro fundido são: as alterações sofridas nas regiões aquecidas (ZTA – Zona Termicamente Afetada), visto que qualquer ferro fundido quando resfriado rapidamente pode se tornar um ferro fundido branco (extremamente frágil) ou um aço temperado; a quantidade adicional de carbono que se introduz na poça de fusão, cuja composição depende do tipo de consumível utilizado.

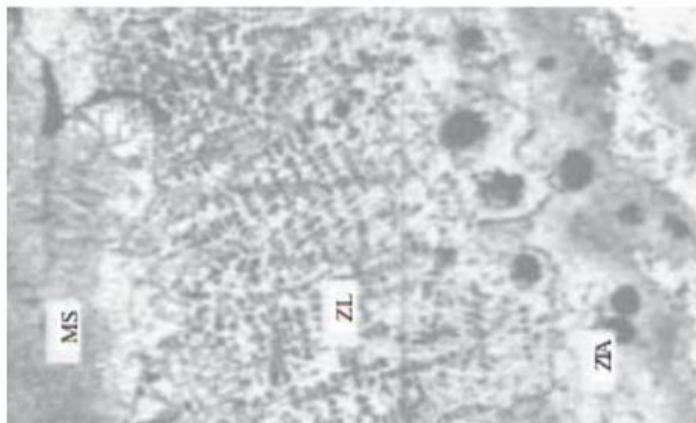
Na ZTA da soldagem de ferros fundidos pode ocorrer a formação de martensita e na ZF e zona parcialmente fundida (ZPF) o desenvolvimento de uma rede de carbonetos extremamente frágeis (SANTANA et al., 2012).

A figura 18 mostra as microestruturas encontradas em um cordão de solda em um ferro fundido nodular de matriz ferrítica soldado com eletrodo AWS E6013 com pré- aquecimento de 150°C. Observa-se que o metal de solda (MS) se apresenta totalmente martensítico e com trincas, apesar de não ter sido solicitado mecanicamente; isto ocorre devido ao tensionamento residual e àquele gerado pela transformação martensítica (SOUZA, 2017).

Existe uma larga região no metal de solda próxima a zona de ligação (ZL), que é uma região de alta diluição onde a estrutura é similar à de um ferro fundido branco, portanto apresenta-se frágil (SOUZA, 2017).

Existe uma região de zona termicamente afetada (ZTA) contendo uma faixa martensítica típica de um aço temperado e não revenido, muito frágil e suscetível ao trincamento a frio (SOUZA, 2017).

Figura 18 - Microestruturas formadas na soldagem de ferro fundido nodular de matriz ferrítica, mostrando o metal de solda (MS), a zona de ligação (ZL) e a zona termicamente afetada (ZTA).



Fonte: (SOUZA, 2017)

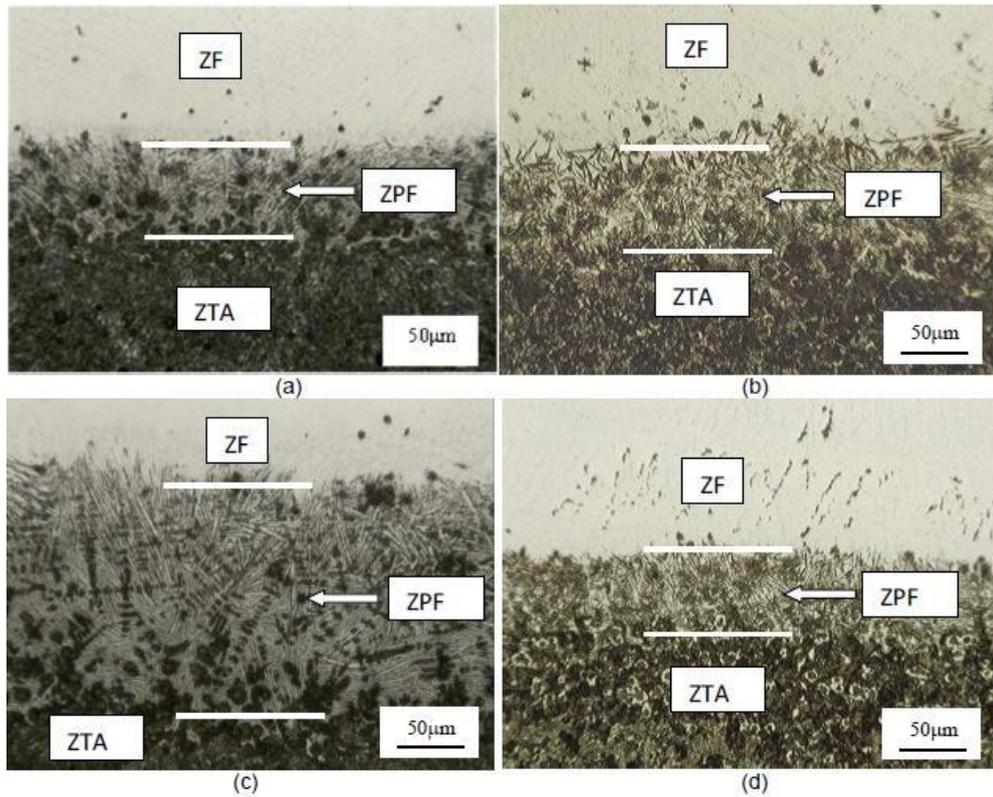
A formação de martensita na junta soldada de ferros fundidos é muito comum, mas pode ser parcialmente eliminada por: Pré-aquecimento, de modo a diminuir a velocidade de resfriamento; Tratamento de revenido pós-soldagem. Na ZTA podem aparecer agulhas isoladas de martensita, rodeadas por cementita, devido à diluição parcial do metal base que fundiu durante a soldadura, e solidificou sob a forma de ferro fundido branco, como consequência do seu alto teor de carbono e velocidade de resfriamento (MARQUES, 2018).

Apesar da zona de carbonetos ser dominada pela cementita, nela podem ser encontrados pequenos nódulos de grafita, constituídos da assim denominada grafita secundária. Esta fase ocorre devido à decomposição da martensita, geralmente quando o ferro é pós-aquecido a partir da gama de temperaturas de 690°C, ou quando sofre um pré-aquecimento insuficiente (MARQUES, 2018).

Santana et al. (2012) avaliaram as microestruturas formadas e a soldabilidade do ferro fundido nodular submetido ao processo de soldagem por arco elétrico com gás de proteção GMAW com aplicação de arame Fe-Ni e proteção de Ar-25% CO<sub>2</sub>. Foi investigado o comportamento na soldagem com e sem uso de pré-aquecimento.

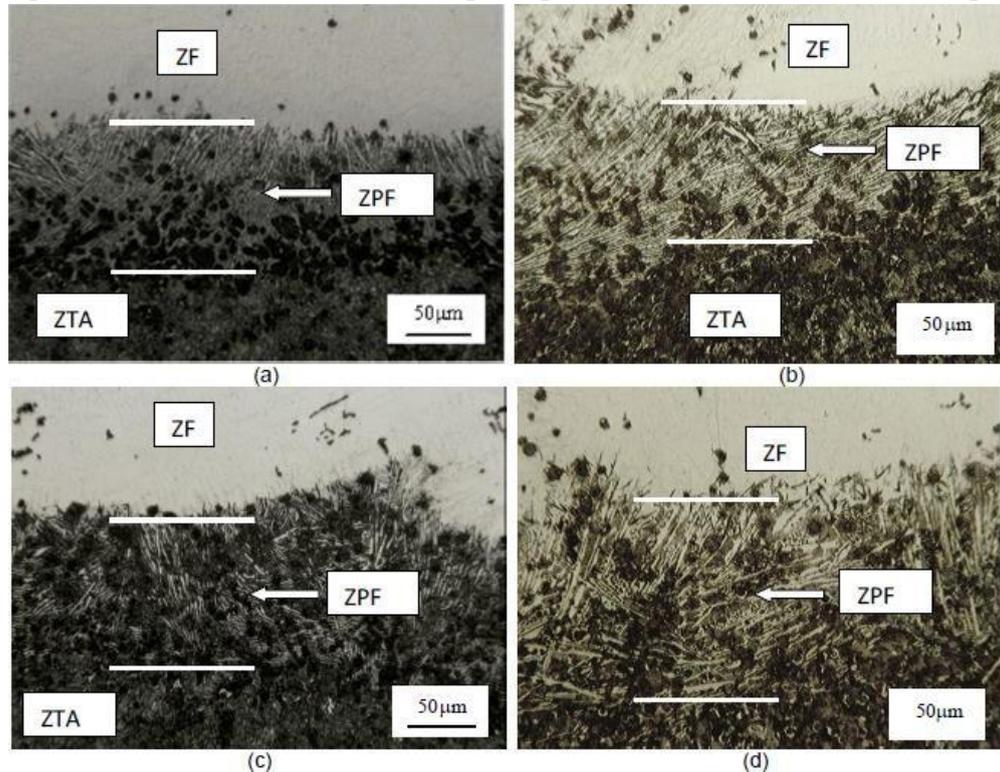
Conforme mostrado na figura 19, Santana et. al (2012) observaram que todos os cordões obtidos apresentaram predominantemente uma estrutura austenítica com uma pequena quantidade de grafita esferoidal na ZF. Os cordões obtidos sem pré-aquecimento (Figuras 19a e 19c e Figuras 20a e 20c), de maneira geral apresentaram uma pequena quantidade de ferro fundido branco na ZPF, com agulhas de cementita num fundo de ledeburita e grafita esferoidal, além de ferro fundido esferoidal em matriz martensítica no início da ZTA. Pode-se perceber no cordão referente a condição 02SP (Figura 19c), que a ZPF apresenta uma quantidade ainda maior de ferro fundido branco em relação às condições 01SP, 03SP e 04SP, e que este apresenta uma quantidade maior de dendritas circundadas de ledeburita.

Figura 19- Micrografias dos cordões de solda: (a) teste “01SP”, sem pré aquecimento; (b) teste 01CP, com pré-aquecimento; (c) teste 02 SP, sem pré aquecimento; (d) teste 02CP, com pré aquecimento. Ataque Nital 2%.



Fonte: (SANTANA ET AL., 2012).

Figura 20 - Micrografias dos cordões de solda: (a) teste 03SP, sem pré - aquecimento; (b) teste 02CP, com pré-aquecimento; (c) teste 04SP, sem pré



Fonte: (SANTANA ET AL., 2012).

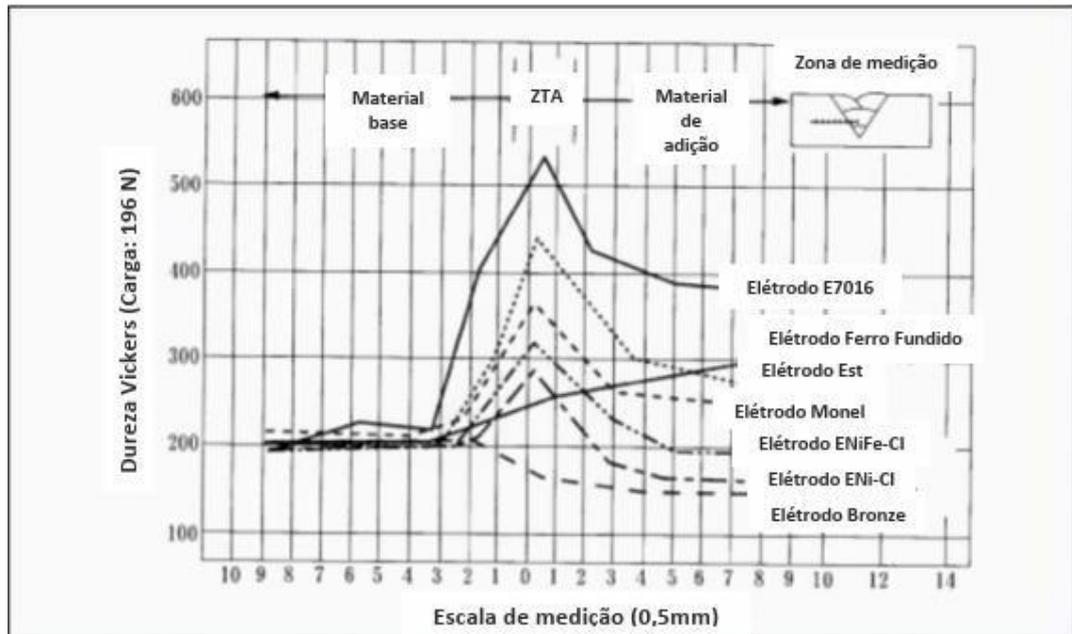
### 3.3.4 Materiais de adição para soldar ferro fundido

De acordo com Marques (2018), trabalhos de investigação com materiais de adição para soldagem têm mostrado que os eletrodos de níquel (E Ni-Ci), níquel-ferro (E NiFe-Ci) e aço macio (E St) são aqueles que proporcionam os melhores resultados em termos de resistência à fissuração, visto que são os mais capazes de absorver o carbono, o qual retêm sob formas não prejudiciais às propriedades da junta.

Os eletrodos ENi-Ci, devido a depositarem um cordão com alto teor de níquel, possibilitam que o carbono que migra do material de base para o cordão se precipite em forma de grafita fina nessa região, não havendo formação de carbonetos ou outras estruturas frágeis no cordão de solda (MARQUES, 2018).

Outra vantagem dos eletrodos de níquel está em seu baixo coeficiente de liberação de calor, o que favorece o resfriamento lento da junta soldada, diminuindo a tendência à formação de microestruturas frágeis e de elevada dureza. A figura 21 mostra a relação entre determinados materiais de adição e os respectivos valores de dureza na junta de solda (MARQUES, 2018).

Figura 21- Valores de dureza observados no metal base, metal de adição e ZTA para diferentes materiais de adição.



FONTE: (MARQUES, 2018)

Santana et al. (2012) citam que o níquel é um elemento gamagênico, tendendo a estabilizar a austenita na temperatura ambiente, o que de certa forma pode favorecer a soldabilidade do ferro fundido, visto que esta fase permite maior deformação plástica da zona fundida, assim permitindo uma melhor absorção de tensões e dificultando a propagação de trincas. O níquel também aumenta a tolerância ao enxofre e ao fósforo, o que aumenta a resistência a trinca a quente.

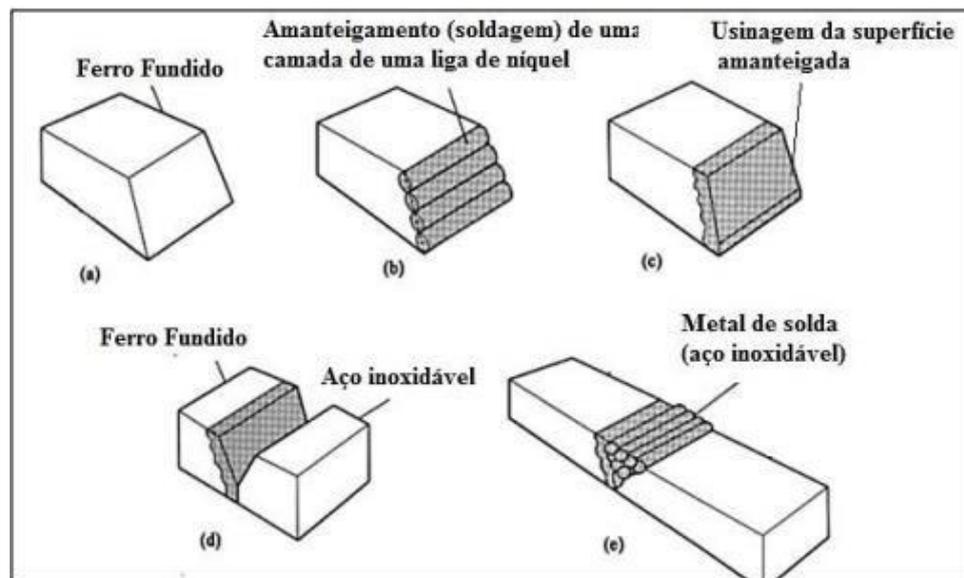
### 3.3.5 Técnica de amanteigamento

Uma forma de minimizar, no processo de soldagem, as tensões residuais e consequentemente a formação de discontinuidades, como trincas, consiste no processo de amanteigamento. Este se realiza por meio da deposição de uma camada de revestimento sobre a superfície da junta a ser soldada, a qual fará a transição entre o material da junta (ferro fundido) e o metal de enchimento (material do eletrodo) (FERRARESI, 2018).

No caso da soldagem de ferro fundido, geralmente se utiliza para este revestimento uma liga de níquel. A camada amanteigada deve reduzir o diferencial de temperatura de fusão entre os materiais a serem unidos, podendo também ser empregado para proporcionar uma transição entre materiais com diferentes coeficientes de expansão térmica, mas que têm de

suportar ciclos térmicos em operação. A camada de amanteigamento pode também cumprir a função de fornecer uma barreira que retarda a migração de elementos indesejáveis do metal de base para o metal de solda durante o tratamento térmico ou em serviço a temperaturas elevadas (FERRARESI, 2018). Um exemplo de técnica de amanteigamento é mostrado na figura 22.

Figura 22- Exemplo de aplicação da técnica de amanteigamento. (a) metal base com chanfro. (b) Superfície amanteigada com liga de níquel. (c) Superfície amanteigada usinada – preparada para soldagem. (d) Componentes amanteigados posicionados para soldagem da junta. (e) Junta preenchida com metal de enchimento com composição diferente em relação ao material de amanteigamento.



Fonte: (FERRARESI, 2018.)

### 3.3.6 Pré-aquecimento na soldagem de ferros fundidos

A utilização da técnica de pré-aquecimento em ferros fundidos reduz as variações bruscas de temperatura entre o metal de solda e as regiões adjacentes à ZF e ZTA, podendo prevenir a formação de trincas, reduzir as tensões residuais e distorções na peça, dentre outros benefícios. No caso dos ferros fundidos nodulares, nem sempre o pré-aquecimento é benéfico ou necessário. Entretanto, é desejável pré-aquecer a peça entre 280°C e 400°C (RIBEIRO, 2019).

O pré-aquecimento na soldagem de ferros fundidos apresenta as vantagens de evitar a fissuração a frio, reduzir a dureza na ZTA e melhorar a fluidez do material (MARQUES, 2018).

Práticas comuns na soldagem de ferros fundidos em relação ao pré-aquecimento são (SILVEIRA, 2004):

- Sem pré-aquecimento, a temperatura de interpasse não deve exercer 95°C;
- Com pré-aquecimento, a temperatura interpasse não deve exceder a temperatura de pré-aquecimento em mais que 40°C;
- No pré-aquecimento de ferros fundidos cinzentos, um mínimo de 315°C reduz a formação de martensita na zona afetada pelo calor para níveis aceitáveis;

Abaixo podem ser observadas algumas das temperaturas que podem ser adotadas para o pré-aquecimento e as suas principais modificações na microestrutura dos ferros fundidos:

- 250°C e 400°C - Temperaturas de pré-aquecimento adequadas para ferros fundidos cujo percentual de carbono é igual ou superior a 3%;
- 300°C – Pode haver transformação de austenita para perlita fina, e não para martensita. Em soldagem multipasses, aumenta a quantidade de perlita no passe de raiz após o segundo passe. A estrutura será quase exclusivamente perlítica;
- 425°C - Pode ser usada para prevenir a formação de martensita, mas não é aconselhável, visto que pode vir a originar cementita na ZTA;
- 500°C – Provoca formação de uma rede contínua de cementita nas linhas de fusão;
- 600°C e 650°C- temperatura adequada para quando ocorre muita dissipação de calor na peça;
- 760°C – É a temperatura máxima aconselhável para pré-aquecimento, visto que temperaturas superiores estão próximas da temperatura crítica do ferro fundido (790°C).

Em testes realizados na soldagem de ferro fundido nodular pelo processo *gas metal arc welding* (GMAW), Santana et.al (2012) observaram com relação à ZTA que o pré-aquecimento de 300°C fez com que os valores de dureza em todos os cordões obtidos (diferentes parâmetros de soldagem) fossem menores em relação situação sem pré-aquecimento, o que se deve principalmente ao fato deste impossibilitar o aparecimento de uma estrutura típica de ferro

fundido branco formando, ao invés disso, uma estrutura predominantemente de ferro fundido cinzento com formação de martensita.

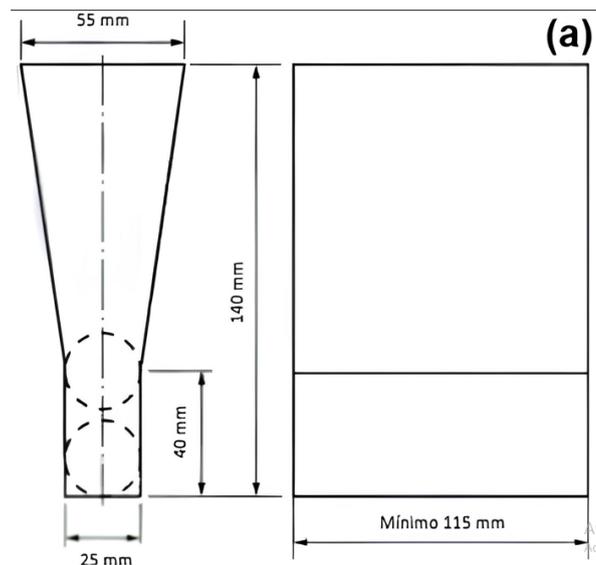
## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 METAL BASE

Para compor as juntas de solda utilizadas na execução das soldagens realizadas neste trabalho, foram utilizados blocos Y como metal base, cujo desenho técnico pode ser visto na figura 23. Estes materiais foram fornecidos pela empresa Fundição Santa Terezinha, sediada em Santa Catarina, para a realização de trabalhos de pesquisa em soldagem de ferros fundidos.

Foram utilizados blocos Y dos ferros fundidos FC200 e FE42012, cuja composição química é apresentada na tabela 6.

Figura 23- Desenho técnico do bloco Y, utilizado para as soldagens deste trabalho.



Fonte: (FUNDIÇÃO SANTA TEREZINHA, 2023)

Tabela 6 – Composição dos ferros fundidos FC200 e FE42012.

Elemento químico (%m)	Ferro fundido FC200	Ferro fundido FE42012
C	3,58	3,68
Si	2,20	2,38
Fe	93,10	93,30
Mn	0,479	0,428
P	0,046	0,024
S	0,088	0,010
Cr	0,222	0,06
Ni	0,03	0,01
Mg	<0,001	0,051

Fonte: (O AUTOR, 2023).

## 4.2 MATERIAIS DE ADIÇÃO (CONSUMÍVEIS)

Para a realização das soldagens, utilizaram-se como materiais de adição o eletrodo E - NiCi, especial para ferros fundidos, e o eletrodo E7018. Na empresa em que as soldagens foram realizadas, os eletrodos encontravam-se armazenados em estufa para controle de umidade. As composições dos consumíveis são mostradas nas tabelas 7 e 8.

Tabela 7 - Composição química (percentual) do eletrodo E - NiCi.

Eletrodo	C	Si	Mn	Ni
E – NiCi 99%	0,34	0,20	0,20	Balanço

Fonte: (MJV SOLDAS, 2016).

Tabela 8 - Composição química (percentual) do eletrodo E 7018.

AWS CONSUMÍVEL	C	Si	P	S	Mn	Mo	Ni	Cr	V
E 7018	0,052	0,406	0,016	0,009	1,75	0,38	2,27	0,104	0,029

Fonte: Adaptado de (CAROLINO, 2013).

## 4.3 PREPARAÇÃO DAS JUNTAS DE SOLDA

Os blocos Y foram usinados com auxílio de máquina fresadora, produzindo-se chanfros de 45°, conforme mostrado na figura 24. O tipo de chanfro utilizado foi o de formato em “X” ou “duplo V”. Utilizou-se cabeçote de fresamento de 50 mm com 5 pastilhas de metal duro; rotação de 500 RPM.

Após a realização de testes preliminares com soldagem de juntas formadas a partir dos blocos Y chanfrados a 45°, constatou-se a ocorrência de trincamentos. Diante da observação, considerou-se viável a redução da espessura dos blocos, que inicialmente apresentava valor de 25 mm, para valores de aproximadamente 12 mm. Tal operação de redução de espessura foi realizada com cabeçote de fresamento contendo 2 pastilhas de metal duro. Assim, para as soldagens relatadas neste trabalho foram utilizados os blocos Y com aproximadamente metade de sua espessura original.

Figura 24- Fresamento do bloco Y para obtenção dos chanfros em 45°.



Fonte: (AUTOR, 2023)

#### **4.3.1 Pré-aquecimento**

Os pré-aquecimentos das peças componentes da junta de solda foram realizados utilizando-se um maçarico de chama oxiacetilênica, mantendo-se a chama posicionada em direção à junta até o atingimento de temperaturas próximas de 400°C, conforme mostrado na figura 25. Para as medições de temperatura, utilizou-se um Termômetro Digital Infravermelho Mira Laser, marca B-max.

Figura 25- Pré-aquecimento da junta de solda com maçarico.



Fonte: (AUTOR, 2023)

#### 4.4 SOLDAGEM E PARÂMETROS UTILIZADOS

A tabela 9 mostra os materiais de base e adição utilizados para as soldagens realizadas, sendo apresentados também os valores dos parâmetros adotados para cada caso.

Tabela 9 - Parâmetros utilizados nas soldagens realizadas neste trabalho.

<b>Material</b>	<b>Eletrodo</b>	<b>Diâmetro do eletrodo (mm)</b>	<b>Temp. de pré-aquecimento (°C)</b>	<b>Velocidade de avanço (mm/s)</b>	<b>Corrente (A)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Aporte térmico (J/mm)</b>
FoFo Cinzento FC200	ENi-CI (92.18)	2,5	~400	2,41	100	18	0,672
FoFo Cinzento FC 200	ENi-CI (92.18); E7018	2,5; 3,2.	~400	2,78	100; 130	18; 22	0,583; 0,925
FoFo Nodular 42012	ENi-CI (92.18)	2,5	~400	2,96	100	18	0,547
FoFo Nodular 42012	ENi-CI (92.18); E7018	2,5; 3,2	~400	2,59	100; 130	18; 22	0,625; 0,994

Fonte: (O Autor, 2023)

Para a eficiência térmica na soldagem, adotou-se o valor de  $n = 0,90$  para todos os casos, dado que esse é o valor indicado pela literatura para a eficiência de soldagens a arco com eletrodo revestido.

A corrente de soldagem teve seu valor determinado a partir de uma regra segundo a qual se considera o uso de 40A para cada milímetro de diâmetro do eletrodo, ou seja, para o eletrodo ENi-Ci,  $2,5 \times 40 = 80A$ ; para o eletrodo E7018,  $3,2 \times 40 = 128A$ . A velocidade de soldagem possui valor incerto na soldagem por eletrodo revestido, devido a seu valor ser determinado pelo movimento da mão do soldador, sendo assim inconstante. No entanto, foi possível estimar os valores das velocidades para cada caso, com base no comprimento dos cordões e no tempo total de soldagem, utilizando a relação mostrada na equação 2.

$$V_s = L/t \quad (2)$$

Sendo:  $V_s$  – Velocidade de soldagem;  $L$  – Comprimento do cordão;  $t$  – Tempo de deposição o cordão.

A partir dos valores tabelados na tabela (9) e da eficiência térmica do processo, utilizou-se a equação (1) para cálculo do aporte térmico para cada soldagem realizada.

#### 4.5 AQUECIMENTO INTERPASSES

Além de pré-aquecer a peça a ser soldada, é importante o controle da temperatura de interpasse. Assim, na realização das soldagens, a temperatura foi medida após cada passe de solda executado.

Nos casos em que as temperaturas de interpasse se mostraram inferiores a  $300^{\circ}C$ , realizou-se o reaquecimento da junta até atingir valores de aproximadamente  $400^{\circ}C$ .

#### 4.6 RESFRIAMENTO PÓS-SOLDAGEM

Após a conclusão de cada soldagem, as juntas com temperaturas próximas de 400°C foram totalmente envolvidas em cal virgem, a fim de submetê-las a taxas de resfriamento muito inferiores comparativamente às que seriam observadas para o caso de resfriamento ao ar, por exemplo. Isto ocorre devido à cal virgem atuar como isolante térmico entre a peça soldada e a atmosfera. Não houve controle preciso do tempo total de resfriamento das peças, contudo, destaca-se que após um tempo de 12 horas, estas ainda se encontravam em temperaturas ligeiramente superiores à temperatura ambiente.

#### 4.7 FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

As etapas de usinagem das juntas soldadas para obtenção dos corpos de prova para flexão e metalografia foram realizadas com uma máquina de eletroerosão a fio High Speed Wirecut, modelo FW1P, fio de molibdênio, diâmetro = 0,18mm, velocidade = 3 mm/min. e rugosidade de 0,9 – 1,1 microns. Buscou-se cortar as amostras de flexão de modo a conterem em seu centro a ZTA de cada junta soldada, sendo produzidos 3 corpos de flexão para cada junta. No caso das amostras para metalografia, extraiu-se uma para cada junta, contendo o cordão de solda, a ZTA e o metal de base, com espessura de 7 mm.

#### 4.8 METALOGRAFIA

A preparação metalográfica das amostras envolveu as seguintes etapas:

- Lixamento em politriz lixadeira metalográfica, utilizando-se lixas d'água na seguinte sequência granulométrica: #80, #220, #320, #600, #1200;
- Polimento em politriz lixadeira metalográfica, utilizando-se pano com deposição de suspensão de alumina (tamanho de partícula – 0,3 micrômetros);
- Secagem das amostras com soprador térmico;
- Ataque químico com nital 2% por tempo aproximado de 05 segundos;

- Após a revelação da microestrutura das amostras, estas foram analisadas através de Microscópio Ótico de Luz Refletida marca Pentax, no laboratório (B020) da UFSC. Foram obtidas micrografias com aumentos de 50x, 100x, 200x e 400x. Para a o registro das imagens no computador, utilizou-se uma câmera e o software Hayear.

#### 4.9 ENSAIO DE DUREZA

A partir de cada junta soldada foi obtida uma amostra para os ensaios de dureza, sendo realizadas 11 medições de dureza ao longo do comprimento de cada amostra e cinco medições em uma linha orientada transversalmente ao seu comprimento (medições no cordão de solda). Para as medições, utilizou-se o Durômetro Universal Modelo HBRV – 187.5, marca SCTMC, com indentador de diamante com formato cônico. A distância entre os pontos de medição de dureza são mostradas na seção de resultados deste trabalho.

#### 4.10 ENSAIO DE MICRODUREZA

As medições da microdureza foram realizadas em 5 pontos por amostra com distância de 0,5 mm entre si, seguindo-se uma linha iniciando na ZTA em direção ao cordão de solda. Utilizou-se carga de 0,5 Kgf com tempo de endentação de 10s. As medições foram realizadas com um Microdurômetro Vickers modelo DHTMVS – 1000, marca DGD, indentador com formato de pirâmide.

#### 4.11 ENSAIO DE FLEXÃO

Os ensaios de flexão foram realizados em Máquina Universal de Ensaio marca Instron. Utilizaram-se corpos de prova com dimensões de 10 x 10 x 55 mm, conforme o padrão definido por norma. Realizou-se ensaio de flexão a três pontos com distância de 30 mm entre os apoios. A velocidade de carregamento utilizada foi de 1 mm/min.

A máquina de ensaios fornece os valores de força máxima, e a partir desses valores calculou-se a tensão máxima suportada pelas peças a partir da equação (3).

$$\sigma \text{ máx} = 3/2 (F_{\text{máx}} \times L)/(b \times d^2) \quad (3)$$

Sendo:  $\sigma_{\text{máx}}$  = Tensão máxima durante o ensaio;  $F_{\text{máx}}$  – Força máxima suportada durante o ensaio; L – Distância entre apoios; b – largura do CP; d – espessura do CP.

O valor de tensão máxima para cada material analisado foi adotado como aquele correspondente à média aritmética entre os valores de tensão máxima de seus respectivos corpos de prova. Para os ensaios de flexão referentes às soldas, foram ensaiados 3 CP para cada junta soldada. Para os metais de base, ensaiaram-se 2 CP para o FC 200 e 2 CP para o FE 42012.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

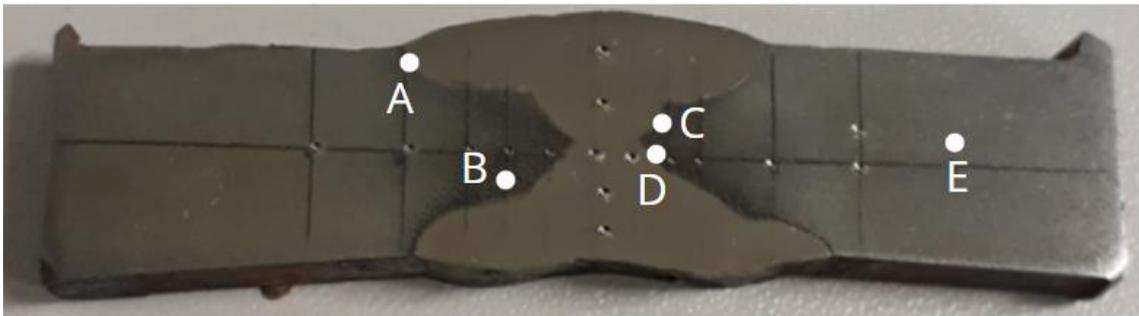
Neste capítulo, são apresentados os resultados das atividades experimentais envolvidas neste trabalho, sendo estes: 1) os resultados da análise microestrutural das amostras de solda, buscando compreender as causas para a presença das microestruturas observadas em cada amostra e as possíveis consequências para as propriedades mecânicas da junta soldada; 2) os valores dos testes de dureza e microdureza e a identificação das regiões de medição de dureza na amostras; 3) os valores de tensão máxima obtidos no ensaios de ensaios de flexão.

### 5.1 MICROESTRUTURA E DUREZA DAS SOLDAS

#### 5.1.1 Ferro fundido nodular soldado com eletrodo E – NiCi

A figura 26 mostra as diferentes regiões da amostra de ferro fundido FE 42012 soldado com eletrodo E – NiCi das quais foram obtidas micrografias.

Figura 26- Regiões da amostra de ferro fundido FE 42012 soldado com eletrodo E - NiCi.



Fonte: (AUTOR, 2023).

Na figura 27, observa-se que na região (A) houve formação de uma variedade de microestruturas, o que ocorre em função de essas regiões abrangerem tanto a zona fundida (cordão) quanto a zona afetada pelo calor, além da ZPF, transição entre estas duas.

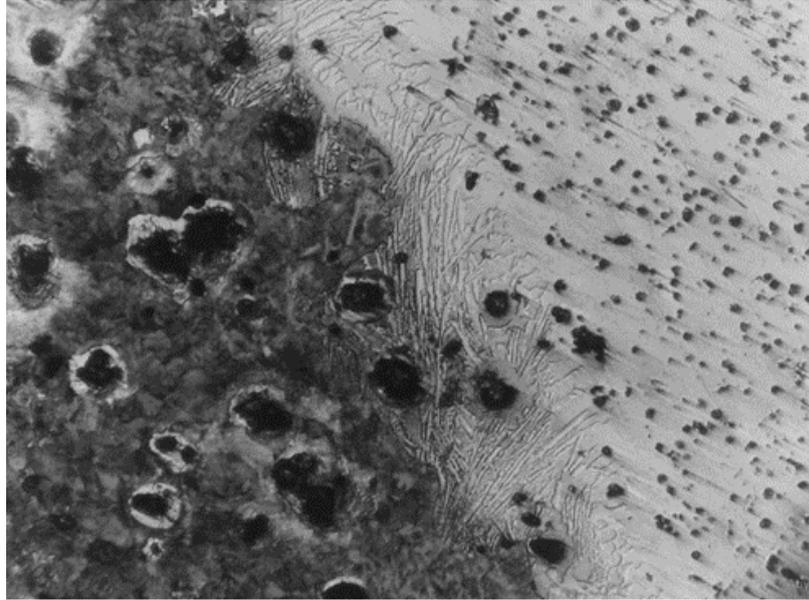
A zona parcialmente fundida caracteriza-se pela precipitação de carbonetos, sendo que tal estrutura certamente gera uma maior dureza nessa região e, simultaneamente, maior fragilidade.

A zona fundida é composta por matriz de níquel com pequenos nódulos de grafita. Fica evidente que os nódulos de grafita contidos na matriz de níquel (ZF) possuem diâmetro

menor que o dos nódulos presentes na matriz mais escura (ZTA), à esquerda. Na figura 28, mostra-se a ZTA, que consiste em grafita nodular distribuída na matriz de perlita e ferrita.

Figura 27 - Região A da amostra de ferro fundido nodular com eletrodo E - NiCi.

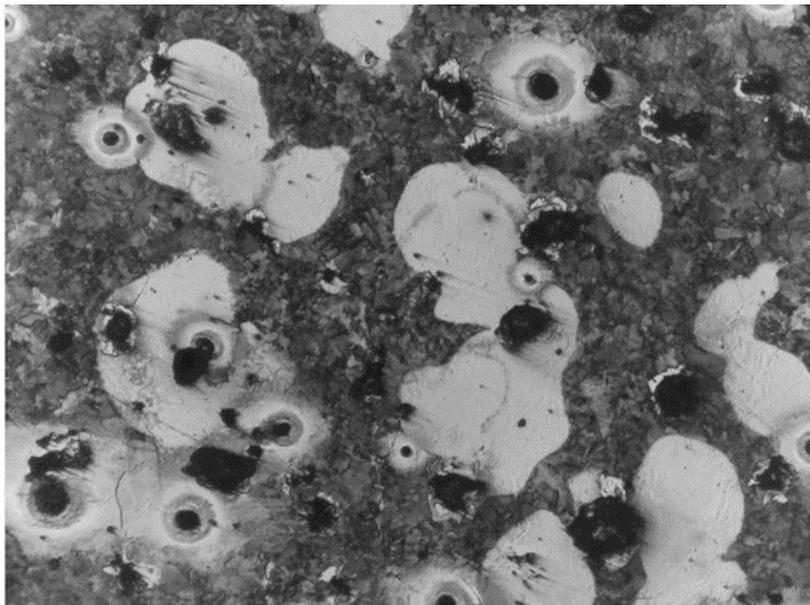
Aumento de 100x.



Fonte: (O Autor, 2023).

Figura 28 - Região B da amostra de ferro fundido nodular com eletrodo E - NiCi.

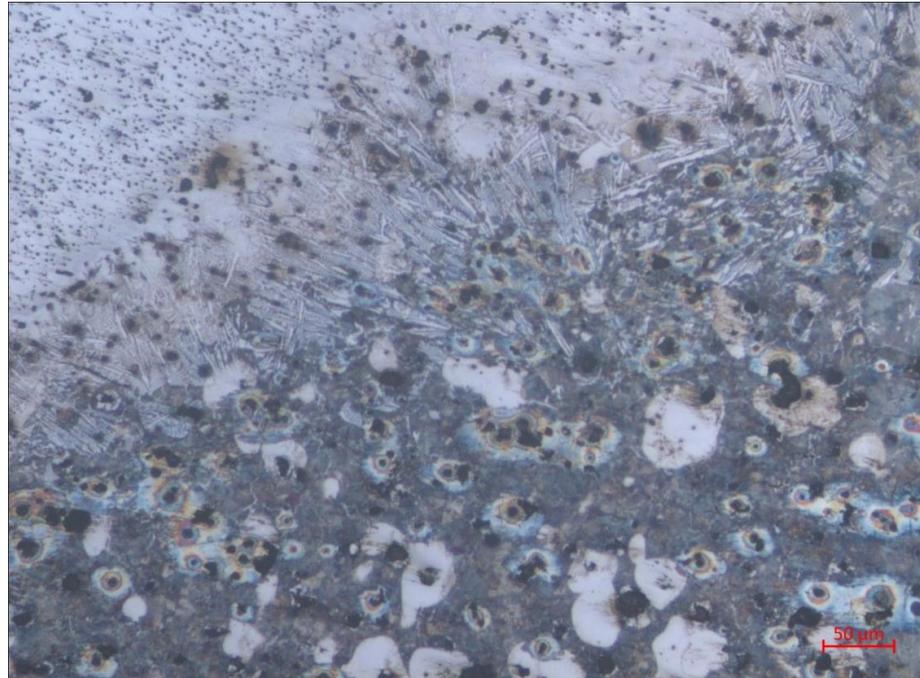
Aumento de 100x.



Fonte: (AUTOR, 2023).

Na figura 29, é possível visualizar a estrutura de carbonetos formada na ZPF, típica da soldagem de ferros fundidos, de acordo com a literatura. Abaixo da ZPF encontra-se a zona termicamente afetada.

Figura 29 - Região C da amostra de ferro fundido nodular com eletrodo E - NiCi.

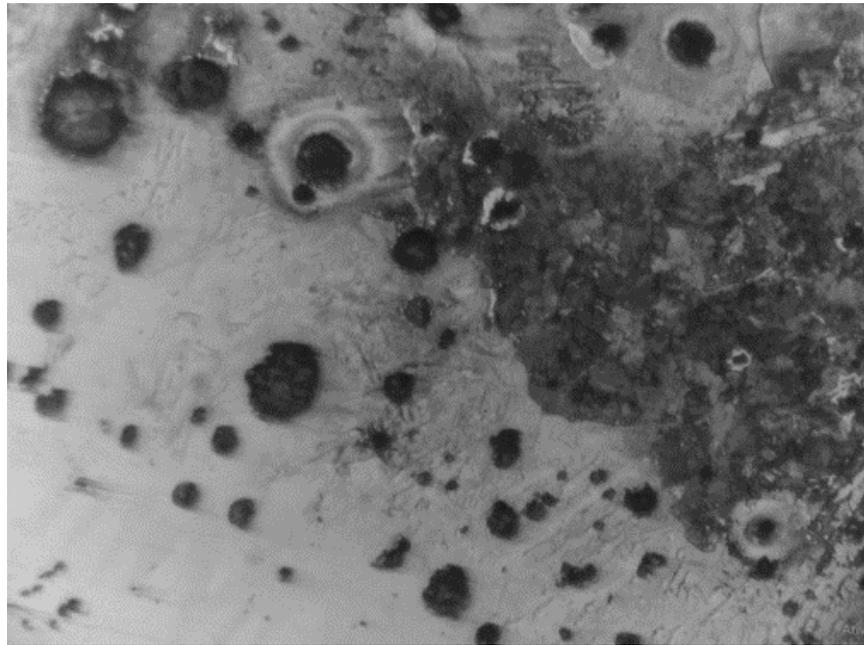


Fonte: (AUTOR, 2023).

Na figura 30, observa-se que na região (D) houve formação de martensita, o que certamente foi favorecido pelo relativamente elevado teor de carbono típico de ferros fundidos e pelas taxas de resfriamento suficientemente elevadas durante a soldagem. Tais resfriamentos rápidos podem ter ocorrido entre um passe de soldagem e outro, pois observou-se por diversas vezes que a temperatura da junta apresentava valor inferior à do pré-aquecimento (300°C, por exemplo). Tal comportamento foi observado principalmente nos primeiros passes aplicados sobre cada junta. Sabe-se que um fator que contribui para o rápido resfriamento de ferros fundidos é sua elevada condutividade térmica, e tal efeito de extração de calor da junta aumenta para maiores espessuras do metal base.

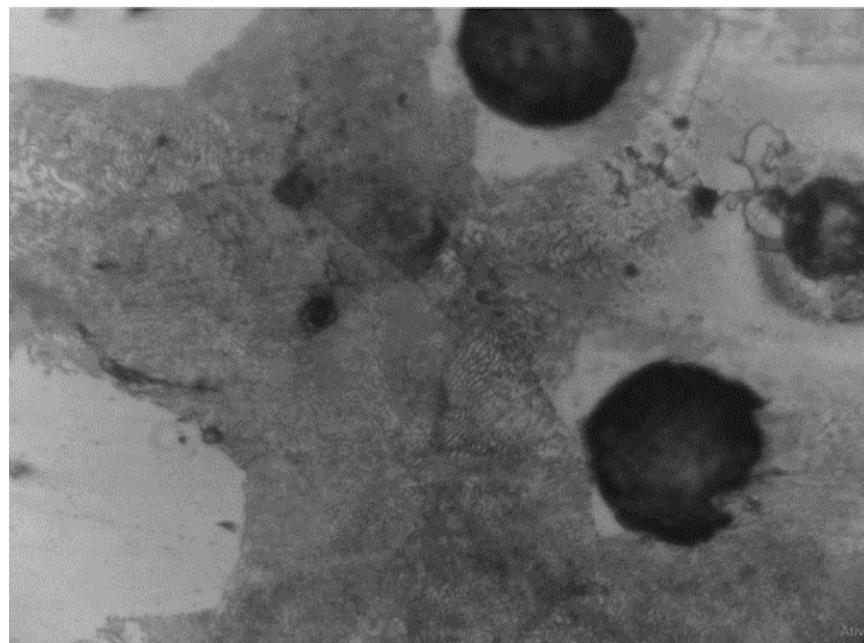
Na região (E), figura 31, é mostrado o metal base FE 42012. A microestrutura presente nesta região não sofreu nenhuma alteração, devido à distância em relação à zona fundida em que ocorrem elevadas temperaturas durante a soldagem.

Figura 30 - Região D da amostra de ferro fundido nodular com eletrodo E - NiCi.  
Aumento de 200x.



Fonte: (Autor, 2023).

Figura 31- Região E da amostra de ferro fundido nodular com eletrodo E - NiCi.  
Aumento de 400x.



Fonte: (AUTOR, 2023).

### 5.1.1.1 Ensaio de dureza

Na figura 32 são mostrados os pontos de medição de dureza para a amostra de ferro fundido nodular soldado com E - NiCi. O perfil de dureza é mostrado na figura 33.

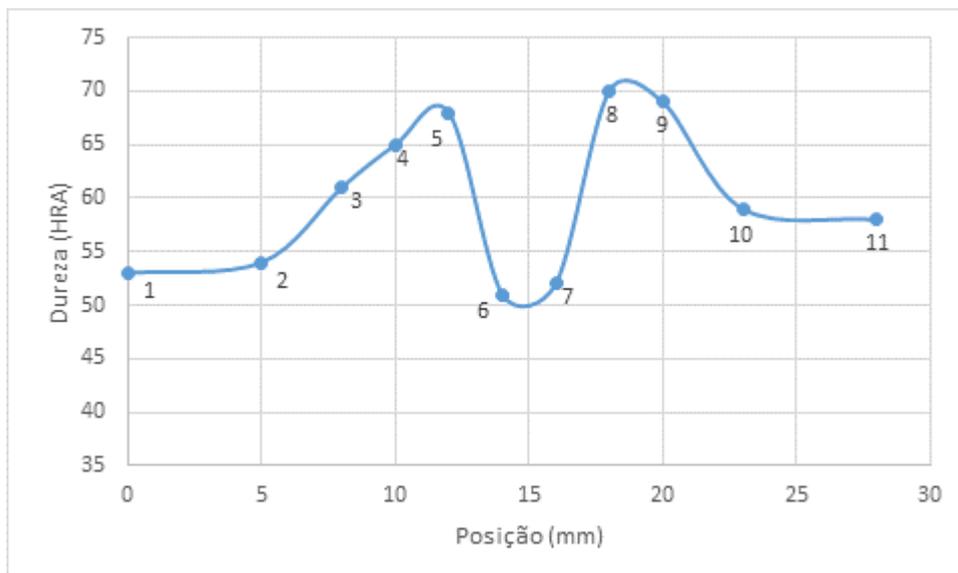
O perfil de dureza da figura 33 condiz com a variação de valores esperada com base nos pontos em que as medições foram feitas (figura 32). Para os pontos (1) e (11), tem-se a dureza do metal base, e conforme se considera pontos mais próximos do cordão, as durezas aumentam, o que se deve à aproximação em relação às zonas em que ocorreram alterações microestruturais causadas pelo calor da soldagem e posterior resfriamento. Os pontos (4) e (9) localizam-se na ZTA, enquanto (5) e (8) possivelmente tem sua dureza influenciada pelas microestruturas duras formadas na ZPF, apresentando assim os maiores valores observados para esta amostra de solda.

Figura 32- Pontos de medição de dureza para amostra de nodular com E - NiCi.



Fonte: (O Autor, 2023).

Figura 33 - Perfil de dureza para amostra de nodular com E - NiCi.



Fonte: (O Autor, 2023).

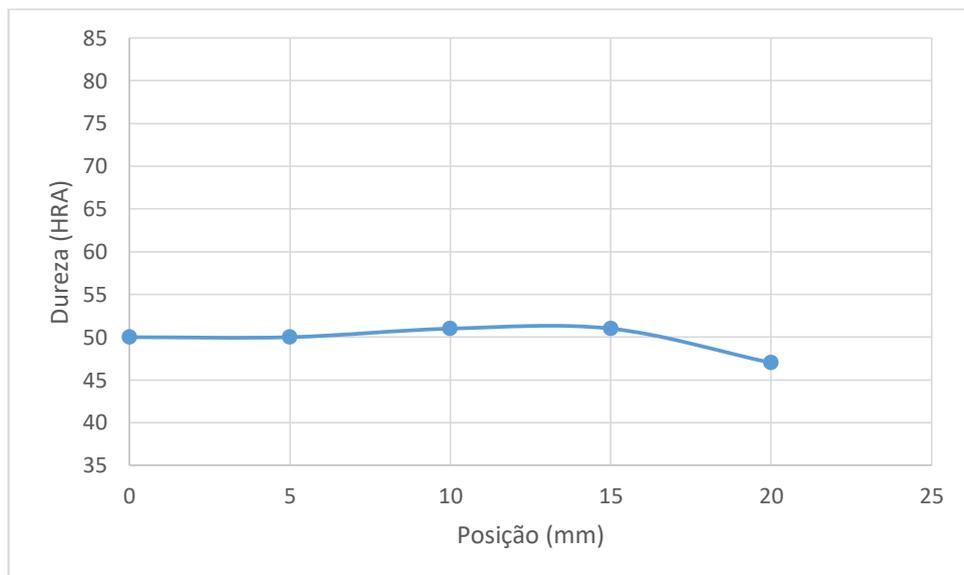
Na figura 34 são mostrados os pontos de medição de dureza transversal para a amostra de ferro fundido nodular soldado com E - NiCi. O perfil é apresentado na figura 35.

Figura 34- Medições de dureza transversal para amostra de nodular com E – NiCi.



Fonte: (O Autor, 2023).

Figura 35- Perfil de dureza transversal para amostra de nodular com E - NiCi.



Fonte: (O Autor, 2023).

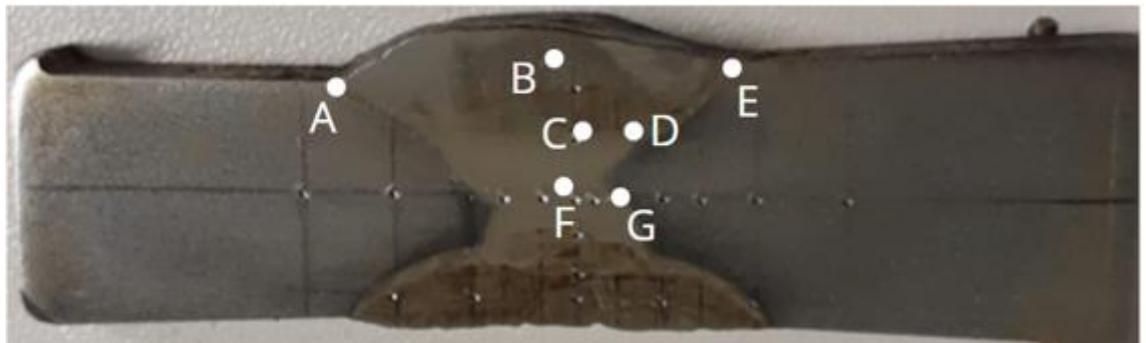
Foram encontrados valores de dureza que variam de 47 – 51 HRA, ou seja, valores relativamente próximos entre si. Tal constatação é esperada, uma vez que todos os pontos de medição se localizam numa mesma estrutura de matriz de níquel com grafita nodular.

Variações na dureza no cordão contendo apenas eletrodo E – NiCi e grafita podem se dever a fatores como a distribuição e o formato da grafita, por exemplo, o que por sua vez está relacionado à difusão de carbono a partir do metal base e às taxas de resfriamento às quais o cordão é submetido.

### 5.1.2 Ferro fundido nodular soldado com E – NiCi + E7018

A figura 36 mostra as diferentes regiões da amostra de ferro fundido FE42012 soldado com os eletrodos E – NiCi e E 7018 das quais foram obtidas micrografias.

Figura 36- Regiões da amostra de ferro fundido FE42012 soldado com eletrodos E - NiCi + E 7018.



Fonte: (O Autor, 2010).

Na figura 37, destaca-se o trincamento observado na região de transição entre o cordão e a ZTA (esquerda), apontando para a formação de fases duras e frágeis nessa região.

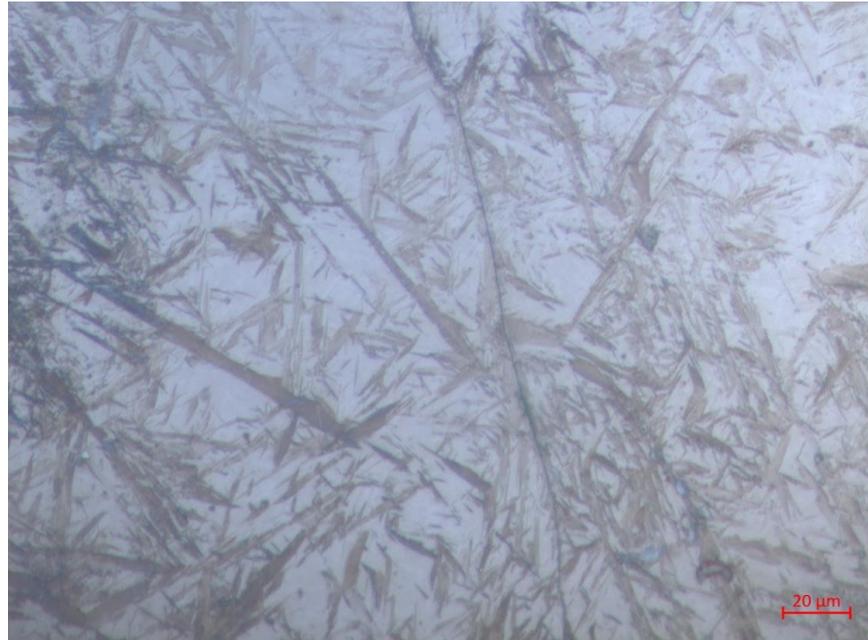
Figura 37 - Região A da amostra de ferro fundido nodular com eletrodo E - NiCi + E 7018.



Fonte: (O Autor, 2023).

Na região (B) houve formação de martensita, conforme mostrado na figura 38, sendo que a formação de tal estrutura frágil certamente favoreceu o surgimento da trinca visualizada na imagem. Nota-se que a martensita se formou na região de depósito do eletrodo E 7018.

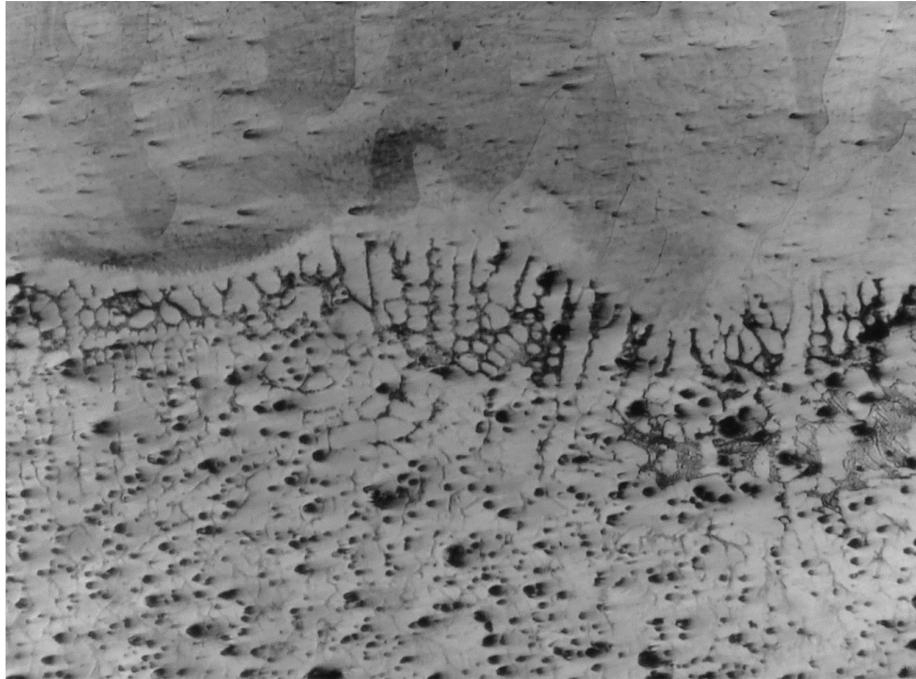
Figura 38 - Região B da amostra de ferro fundido nodular com eletrodo E - NiCi + E 7018.



Fonte: (O Autor, 2023).

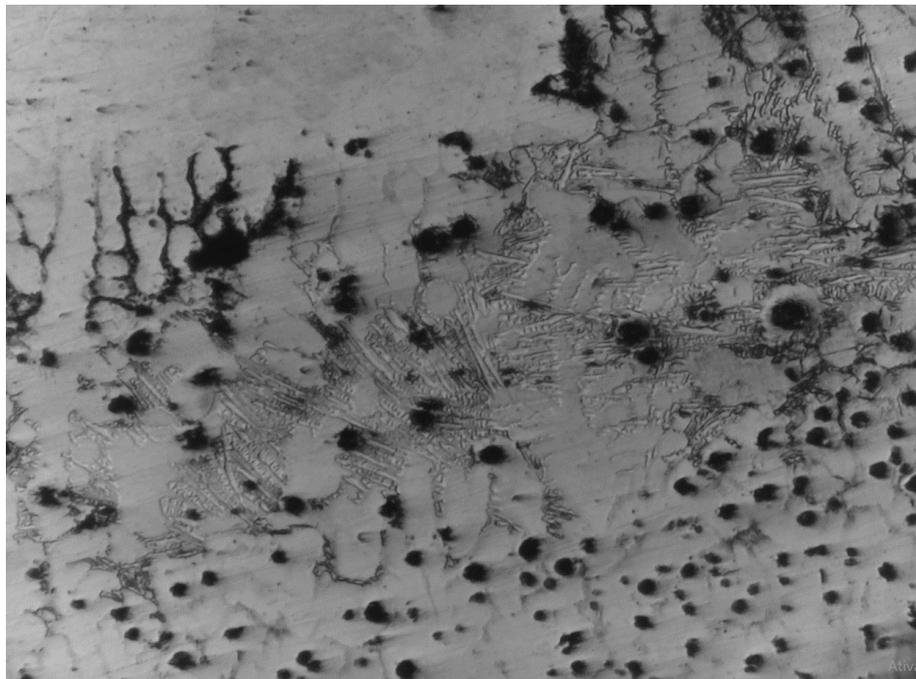
Nas regiões (C) e (D), mostradas nas figuras 39 e 40, destaca-se a zona de transição entre os dois eletrodos depositados na soldagem, estando o eletrodo E 7018 na região superior e o E - NiCi na região inferior. Entre estas, observa-se a zona de transição, na qual destaca-se a formação de uma estrutura de carbonetos, vista mais facilmente na figura 40, devido à maior ampliação.

Figura 39 - Região C da amostra de ferro fundido nodular com eletrodo E - NiCi + E 7018. Aumento de 50x.



Fonte: (O autor, 2023).

Figura 40 - Região D da amostra de ferro fundido nodular com eletrodo E - NiCi + E 7018. Aumento de 100x.

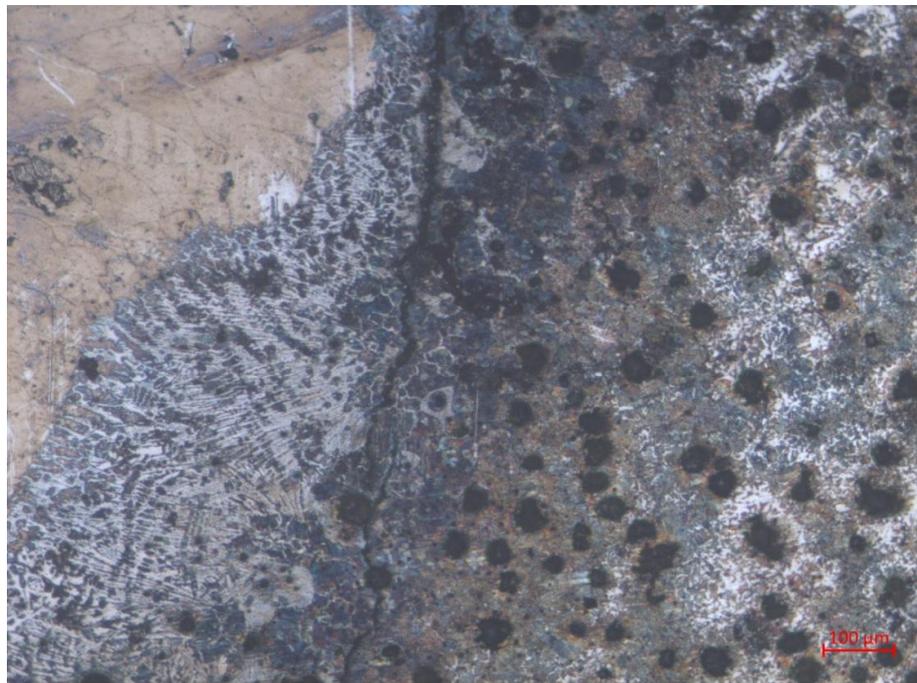


Fonte: (O Autor, 2023).

Na região (E), mostrada na figura 41, nota-se a ocorrência de trincamento na transição entre a ZPF e a ZTA. Tal observação condiz com o fato de estruturas de carbonetos apresentarem elevada fragilidade, assim facilitando o surgimento de trincas.

A ZPF apresenta-se como uma faixa relativamente larga (até 385  $\mu\text{m}$ ), e nota-se que esta se encontra adjacente à região do cordão formada pelo eletrodo E 7018.

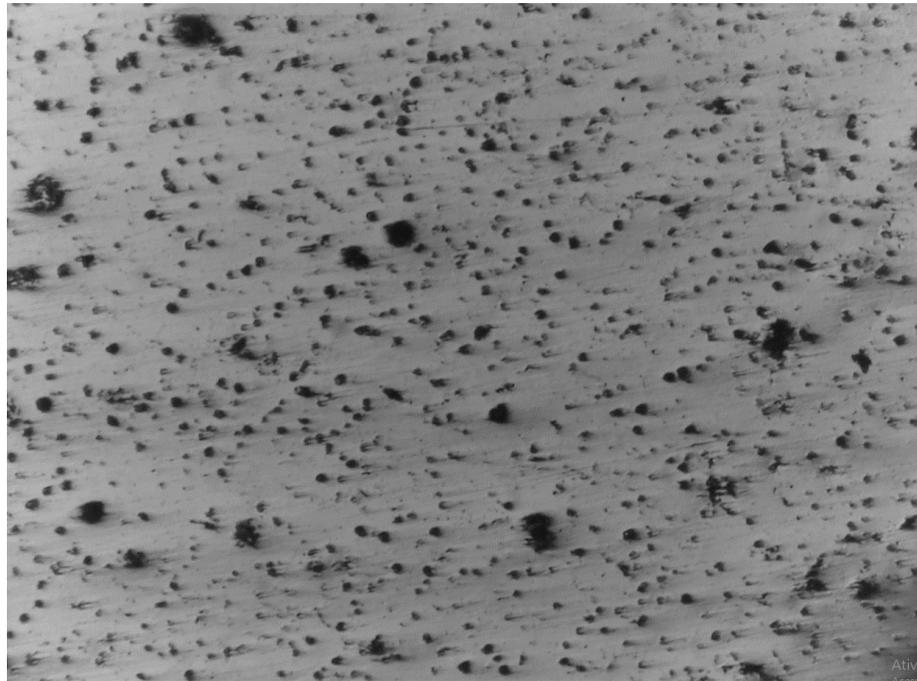
Figura 41 - Região E da amostra de ferro fundido nodular com eletrodo E - NiCi + E 7018.



Fonte: (O Autor, 2023).

A região (F) (figura 42) está contida na região do cordão formada pelo E – NiCi, sendo assim formada pela grafita em matriz de níquel. O formato esferoidal da grafita aponta para altas velocidades de resfriamento experimentadas durante a soldagem.

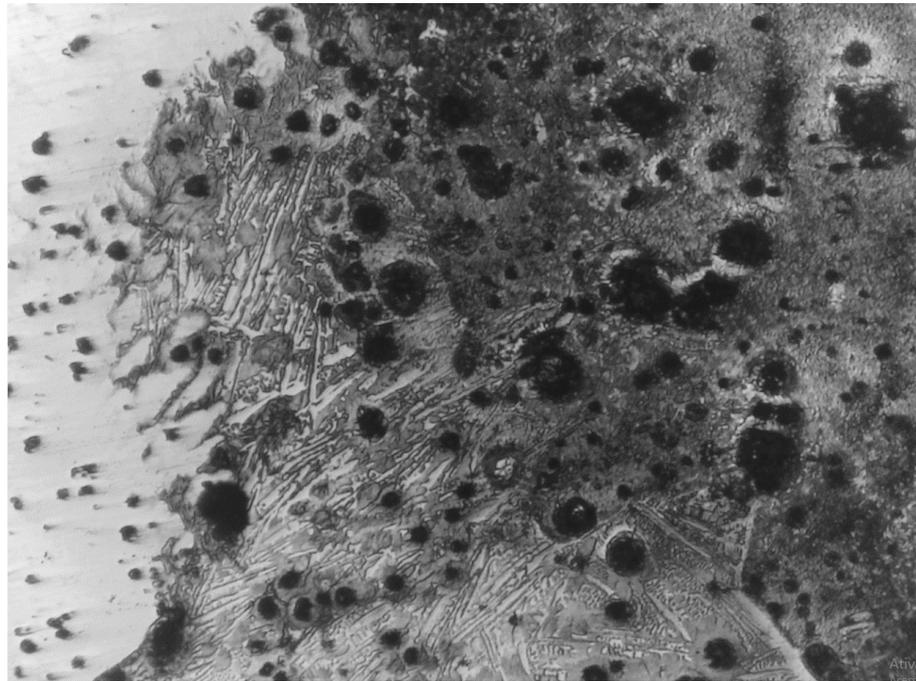
Figura 42 - Região F da amostra de ferro fundido nodular com eletrodo E - NiCi + E 7018. Aumento de 100x.



Fonte: (O Autor, 2023).

Na figura 43 (região G), observa-se entre a região do eletrodo E Ni-Ci e a ZTA, a zona parcialmente fundida, cuja estrutura frágil favorece a ocorrência de trincas na solda. A formação de ZPF ocorre tanto na região adjacente ao eletrodo E 7018, quanto na região adjacente ao E – NiCi. No entanto, para a amostra de soldagem aqui analisada (ferro fundido nodular com os dois eletrodos), os trincamentos observados localizam-se nas zonas adjacentes ao depósito do eletrodo E 7018.

Figura 43 - Região G da amostra de ferro fundido nodular com eletrodo E - NiCi + E 7018. Aumento de 100x.



Fonte: (O Autor).

#### 5.1.2.1 Ensaio de dureza

Na figura 44 são mostrados os pontos de medição de dureza para a amostra de ferro fundido nodular soldado com E NiCi + E7018.

Figura 44 - Pontos de medição de dureza para amostra de nodular com E-NiCi + E7018.



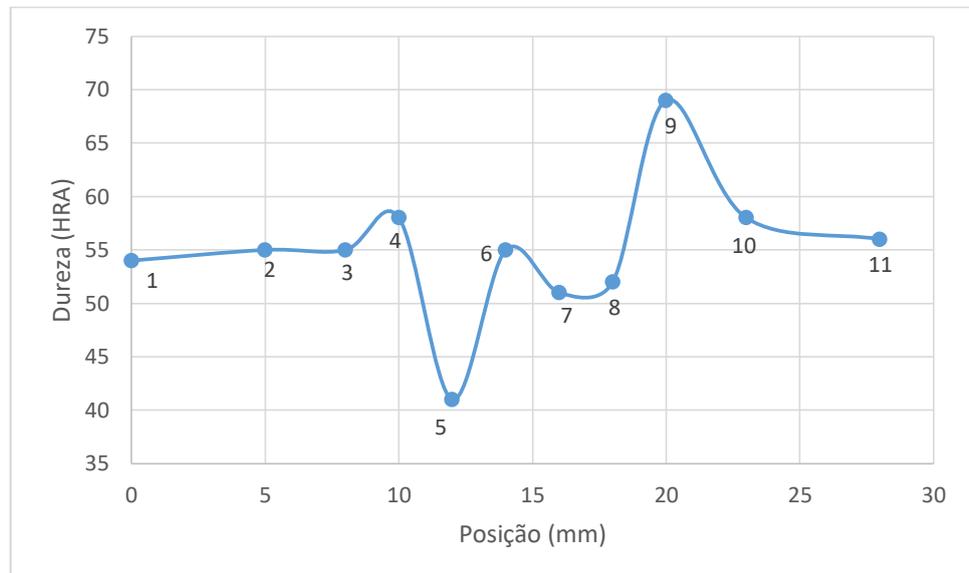
Fonte: (O Autor, 2023).

No perfil de dureza da figura 45, os pontos (1), (2) e (3) correspondem ao metal base, enquanto a maior dureza de (4) em relação a estes pontos pode indicar que este se encontra na ZTA.

O ponto (5) apresenta dureza de 41 HRA, inferior às durezas dos pontos (6) e (7), onde se esperava as menores durezas devido a se localizarem na região central do cordão, com depósito de E – NiCi.

Para o ponto (9), o valor de 69 HRA deve-se possivelmente à presença de carbonetos nesta região, a qual conforme observado na figura de fato se encontra próximo à zona de transição entre o cordão e o metal base. Assim, o valor de dureza encontrado pode ter sido influenciado pelas microestruturas de elevada dureza que compõem a ZPF.

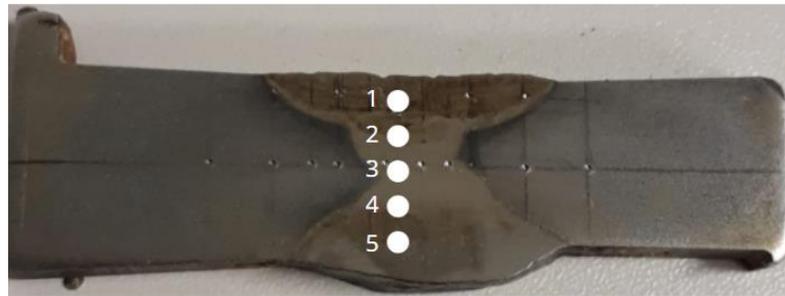
Figura 45 - Perfil de dureza para amostra de nodular com E - NiCi + E 7018.



Fonte: (AUTOR, 2023).

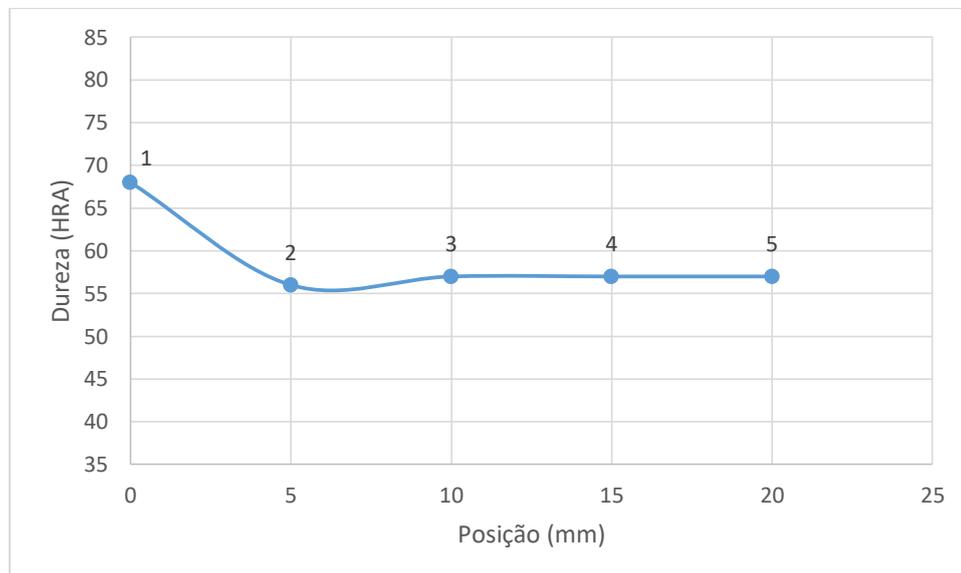
Na figura 46 são mostrados os pontos de medição de dureza transversal para a amostra de ferro fundido nodular soldado com E NiCi + E7018. O perfil de dureza transversal é apresentado na figura 47.

Figura 46 - Medições de dureza transversal para amostra de nodular com E - NiCi + E 7018.



Fonte: (Autor, 2023).

Figura 47 - Perfil de dureza transversal para amostra de nodular com E - NiCi + E 7018.



Fonte: (O Autor, 2023).

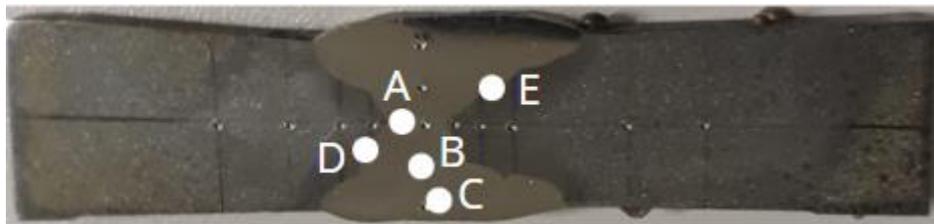
Os pontos (2), (3) e (4) possuem valor de dureza igual a 57 HRA (3 e 4) e 56 HRA (2). Tal resultado pode ser compreendido pelo fato de os três pontos se localizarem na estrutura do cordão de E – NiCi, formado por matriz de níquel com grafita esferoidal. Não havendo formação de outras microestruturas nessa região, é razoável que se encontre durezas iguais ou ao menos com valores próximos entre si.

Para o ponto (1), o valor de 68 HRA indica a possível formação de martensita na região de depósito do eletrodo E 7018. Por outro lado, no ponto (5) encontrou-se dureza de apenas 57 HRA, apesar de ter sido encontrada estrutura martensítica na região do eletrodo E 7018. Isto pode indicar que a martensita não se formou em toda esta região (parte inferior da amostra), mas somente em regiões específicas como aquela mostrada na figura 38.

### 5.1.3 Ferro fundido cinzento soldado com eletrodo E – NiCi

A figura 48 mostra as diferentes regiões da amostra de ferro fundido FC 200 soldado com o eletrodo E – NiCi das quais foram obtidas micrografias.

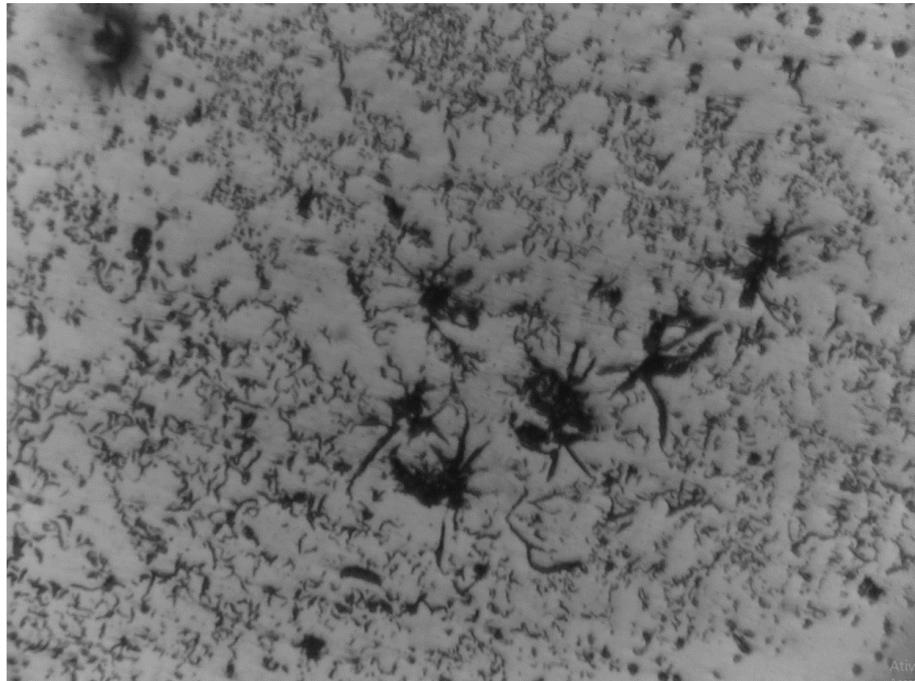
Figura 48 - Regiões da amostra de ferro fundido FC 200 soldado com eletrodo E - NiCi.



Enquanto nas demais imagens do cordão de níquel vistas até aqui se observou grafita esferoidal, nota-se que em (A), (figura 49), houve formação de outros tipos de grafita, possivelmente por segregação interdendrítica e formando uma estrutura majoritariamente refinada, formada por grafita do tipo D ou E. Além disso, há também a presença de grafita irregular desorientada. Nota-se que tal estrutura se formou na região do passe-raiz da solda.

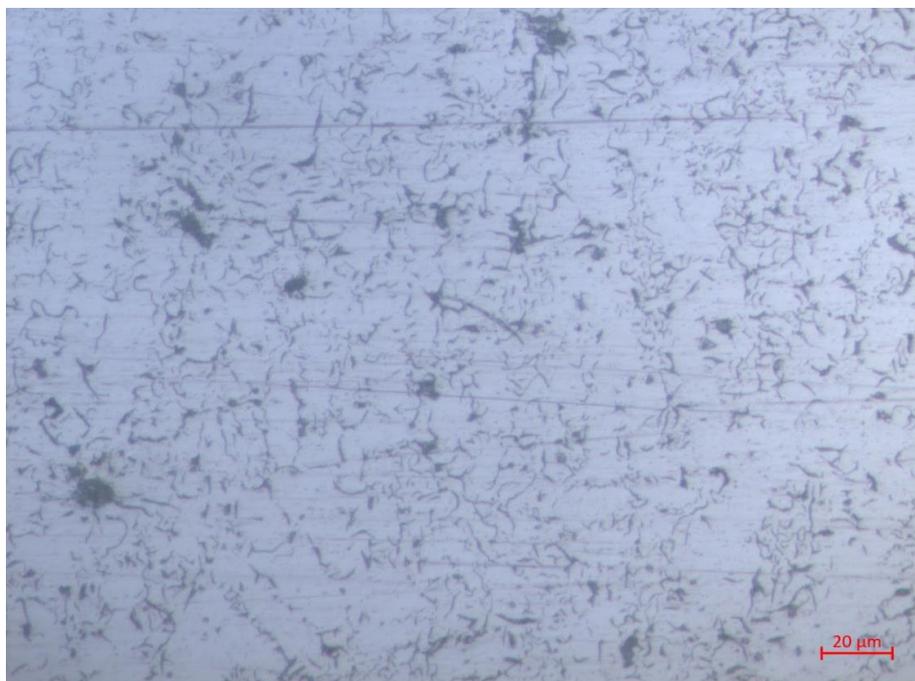
Em (B) (figura 50), a grafita também se apresenta em formatos diferentes do esferoidal, enquanto em (C) (figura 51) esta é nodular (formato esferoidal). A formação de diferentes tipos de grafita está associada, conforme Scheid (2010), à composição química do material e às taxas de resfriamento às quais a grafita é submetida. No caso aqui abordado, supõe-se que a variação dos tipos de grafita de acordo com a região analisada se deva às diferentes taxas de resfriamento associadas aos múltiplos passes de solda realizados – pode ter havido variação considerável entre as taxas de resfriamento nos diferentes passes.

Figura 49 - Região A da amostra de ferro fundido cinzento com eletrodo E - NiCi.  
Aumento de 200x.



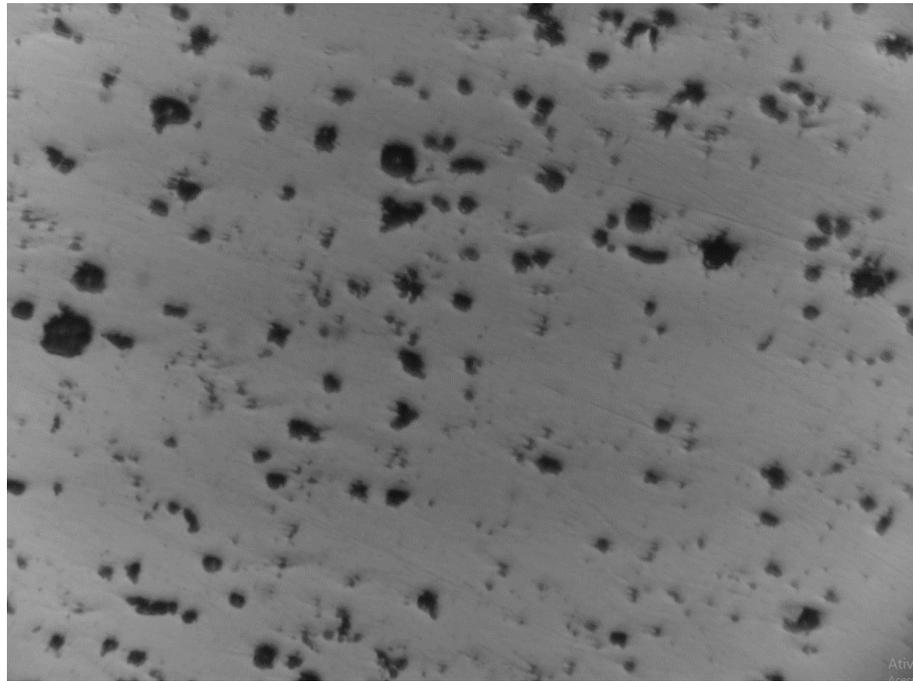
Fonte: (O Autor, 2023).

Figura 50 - Região B da amostra de ferro fundido cinzento com eletrodo E - NiCi.



Fonte: (O Autor, 2023).

Figura 51 – Região C da amostra de ferro fundido cinzento com eletrodo E – NiCi.  
Aumento de 200x.

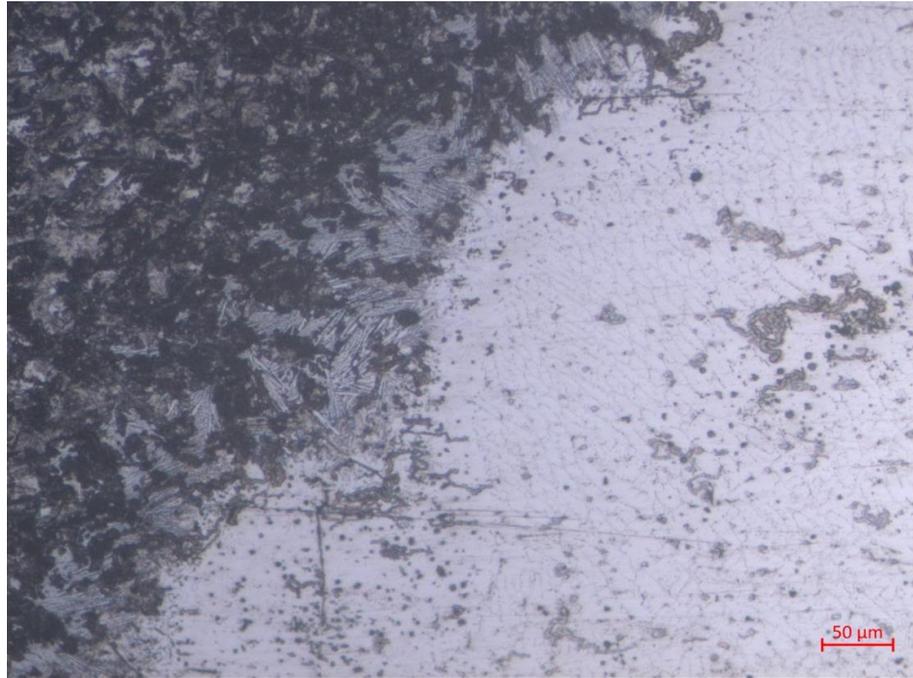


Fonte: (O Autor, 2023).

Na região (D) (figura 52), observa-se que houve formação de uma zona parcialmente fundida relativamente estreita (valor máximo de 115  $\mu\text{m}$ ), o que é positivo à solda, pois uma vez contendo geralmente fases frágeis, as pequenas dimensões desta zona apontam para uma menor tendência ao trincamento.

Na região (E) (figura 53), observa-se à direita uma zona com carbonetos, e adjacente à esta uma zona mais estreita, as quais juntamente constituem a ZPF da solda. Quanto ao cordão, nota-se que na região mais próxima à ZPF a grafita se dispõe em formatos diferentes do esferoidal, sendo que este último pode ser observado na extremidade esquerda da imagem. Supõe-se que isto ocorra devido ao cordão ter sido submetido a diferentes taxas de resfriamento em diferentes regiões, sendo esta taxa maior na região mais próxima à ZPF.

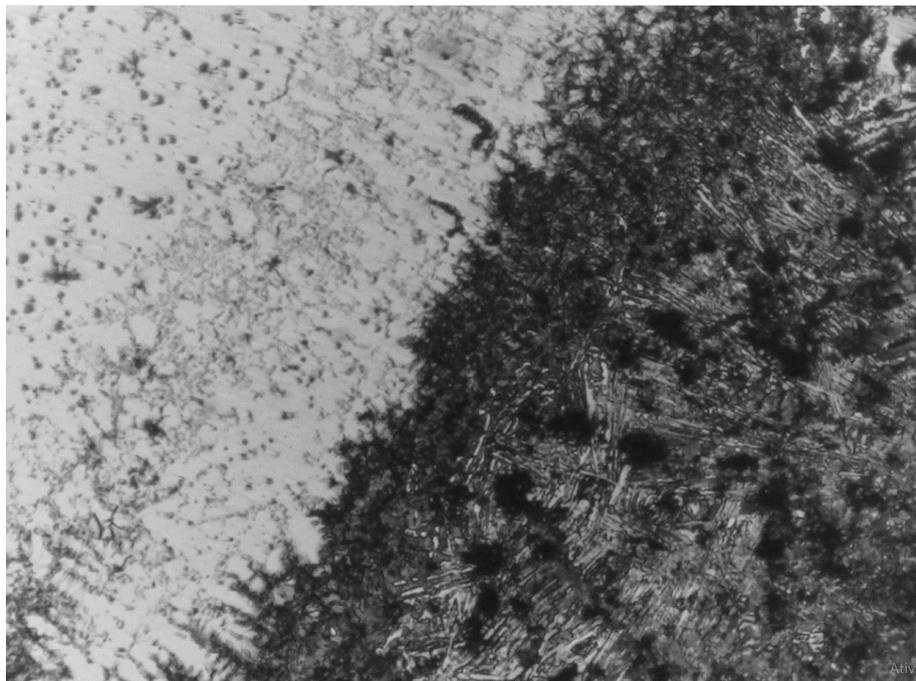
Figura 52 - Região D da amostra de ferro fundido cinzento com eletrodo E - NiCi.



Fonte: (O Autor, 2023).

Figura 53 - Região E da amostra de ferro fundido cinzento com eletrodo E - NiCi.

Aumento de 100x.



Fonte: (O Autor, 2023).

### 5.1.3.1 Ensaio de dureza

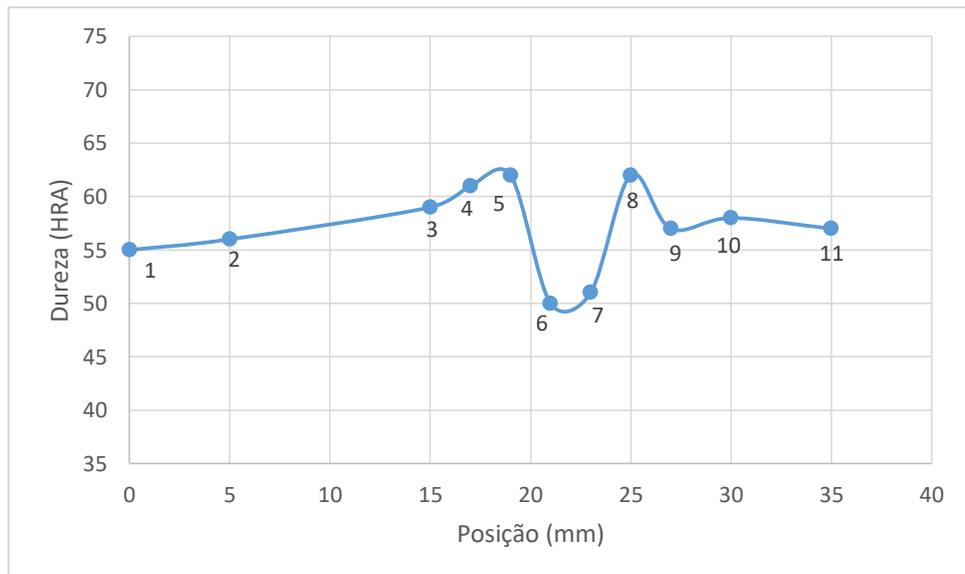
Na figura 54 são mostrados os pontos de medição de dureza para a amostra de ferro fundido cinzento soldado com E - NiCi. O perfil de dureza é mostrado na figura 55.

Figura 54 - Pontos de medição de dureza para amostra de ferro fundido cinzento com eletrodo E - NiCi.



Fonte: (O Autor, 2023).

Figura 55 - Perfil de dureza para amostra de cinzento com eletrodo de E – NiCi.



Fonte: (O Autor, 2023).

No perfil de dureza apresentado, nota-se que os pontos (6) e (7) apresentam valores próximos de 50 HRA, representando os valores mais baixos encontrados nesta amostra. Nota-se que, para algumas amostradas já apresentadas anteriormente, as dureza no cordão não são as menores observadas. Na amostra aqui analisada, no entanto, o metal base apresentou dureza superior ao cordão.

Observando os valores de dureza dos pontos (3), (4) e (5), é razoável supor que são nesta ordem crescentes devido à aproximação em relação às zonas ZTA e ZPF, e afastamento em relação ao metal base. A partir da análise da imagem da amostra (figura 54), é possível

observar uma região escurecida próxima ao cordão, a qual consiste na ZTA. Assim, destaca-se que (3) e (4) encontram-se nesta região, a qual apresenta maiores durezas devido a ser afetada pelo calor da soldagem.

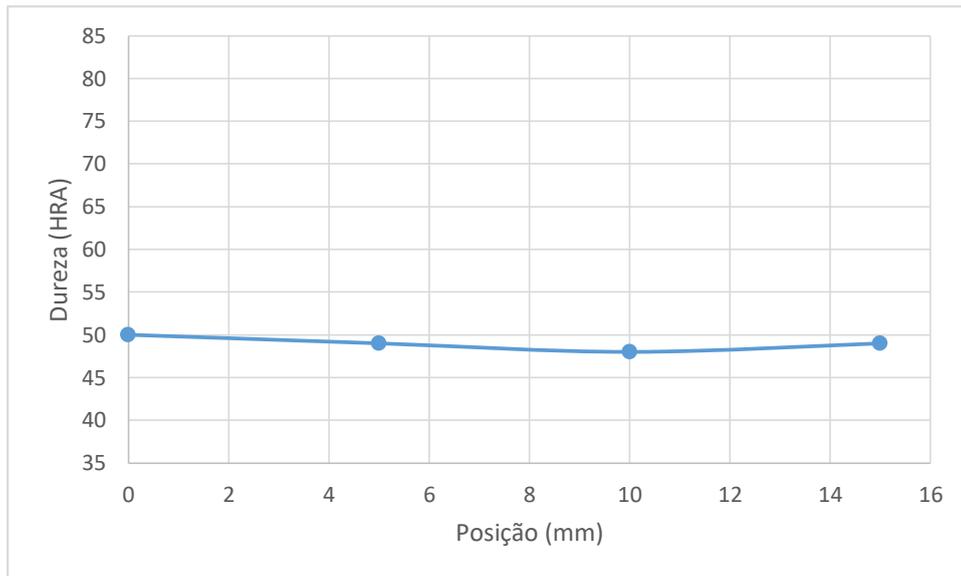
Nas figuras 56 e 57 tem-se, respectivamente, os pontos de medição de dureza transversal e o perfil de valores gerado.

Figura 56 - Medições de dureza transversal para amostra de cinzento com E - NiCi.



Fonte: (O Autor, 2023).

Figura 57 - Perfil de dureza transversal para amostra de cinzento com E - NiCi.



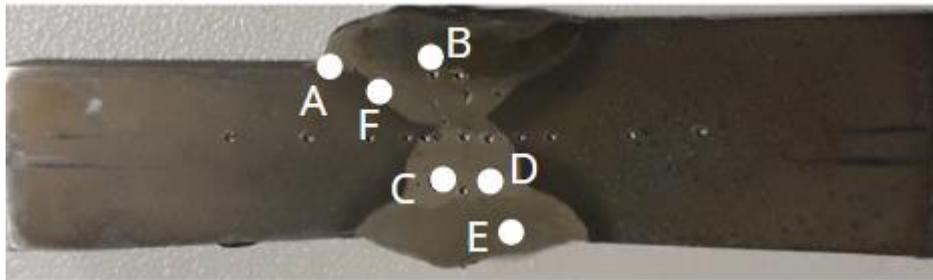
Fonte: (O Autor, 2023).

Para os valores de dureza transversal da figura 57, os valores variam entre 48 – 50 HRA, ou seja, não se observam grandes variações de dureza no cordão de E – NiCi, conforme também se observou para a soldagem do FE 42012 apenas com eletrodo de níquel.

#### 5.1.4 Ferro fundido cinzento soldado com eletrodos E – NiCi + E 7018

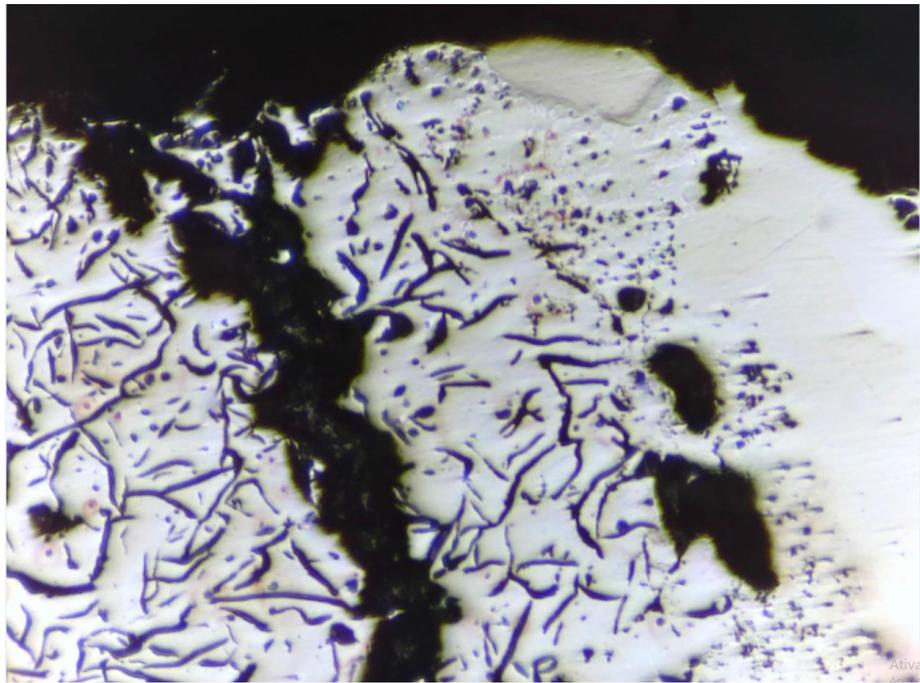
A figura mostra as diferentes regiões da amostra de ferro fundido FC 200 soldado com os eletrodos E – NiCi e E 7018 das quais foram obtidas micrografias.

Figura 58 - Regiões da amostra de ferro fundido FC 200 soldado com eletrodos E - NiCi + E 7018.



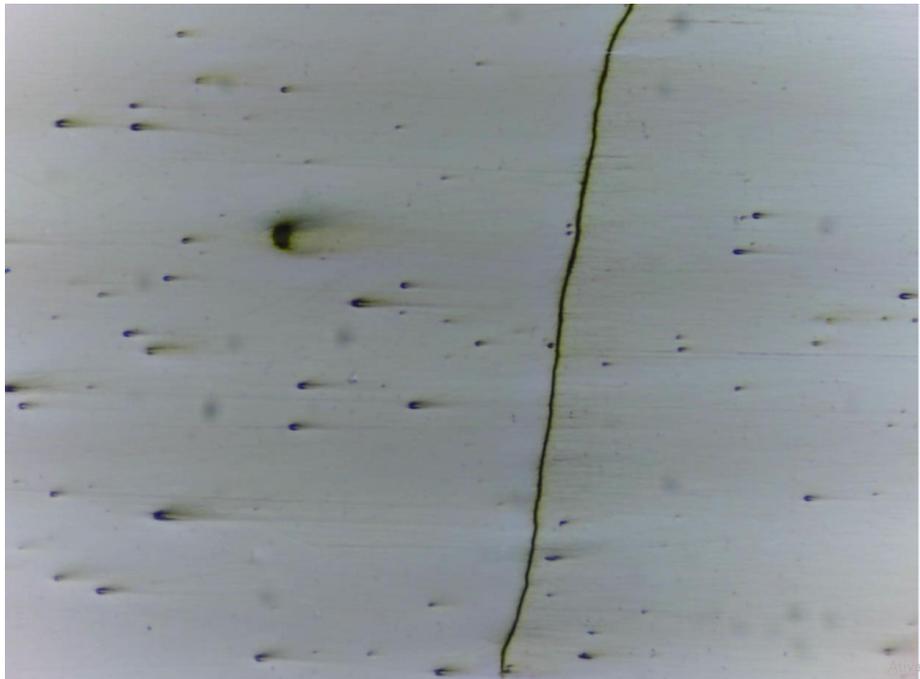
Nas figuras 59, 60 e 61 observa-se a ocorrência de trincamentos, sendo que no caso da região (A) trata-se de uma trinca na ZTA, próximo à região de deposição do eletrodo E 7018. Na região (B), destaca-se que a trinca foi gerada no cordão de solda, na região do eletrodo E 7018, possivelmente devido à formação de fases frágeis. Na região (C), houve também trincamento no cordão, neste caso na região do eletrodo E – NiCi, o que não foi observado para as demais amostras de soldagem. Nota-se a presença de diferentes formatos de grafita em (C), o que possivelmente se relaciona a diferentes velocidades de resfriamento experimentadas.

Figura 59 - Região A da amostra de ferro fundido cinzento com eletrodos E - NiCi + E 7018. Aumento de 50x.



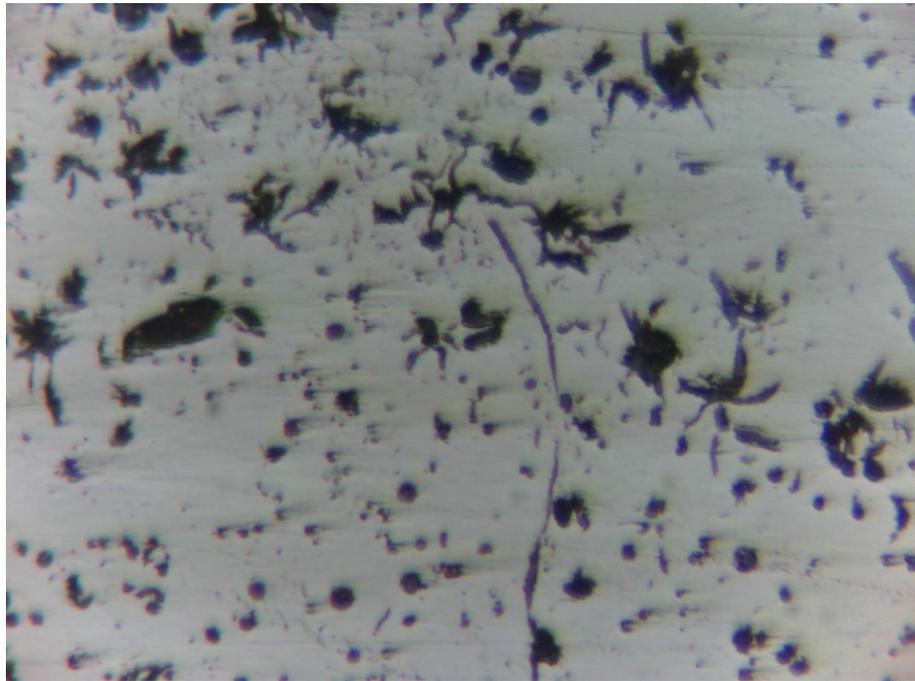
Fonte: (O Autor, 2023)

Figura 60 - Região B da amostra de ferro fundido cinzento com eletrodos E - NiCi + E 7018. Aumento de 50x.



Fonte: (O Autor, 2023).

Figura 61 - Região C da amostra de ferro fundido cinzento com eletrodos E - NiCi + E 7018. Aumento de 200x.

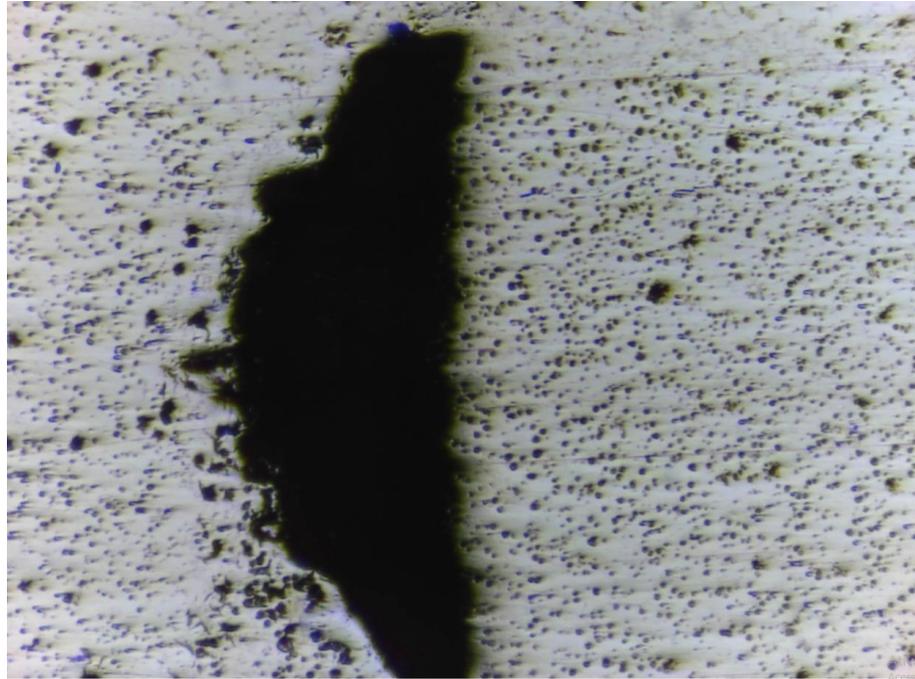


Fonte: (O Autor, 2023).

Na figura 62, é possível visualizar um poro na região (D), que se localiza na região do cordão contendo E – NiCi, ou seja, além de trincas houve outros tipos de defeitos que podem diminuir expressivamente as propriedades mecânicas da solda, tais como a resistência à flexão e ao impacto.

Note-se que as regiões (C) e (D), apesar de se encontrarem na região do eletrodo E – NiCi, onde se espera menor ocorrência de defeitos, localizam-se próximos da região em que foi depositado o eletrodo E7018.

Figura 62 - Região D da amostra de ferro fundido cinzento com eletrodos E - NiCi + E 7018. Aumento de 200x.

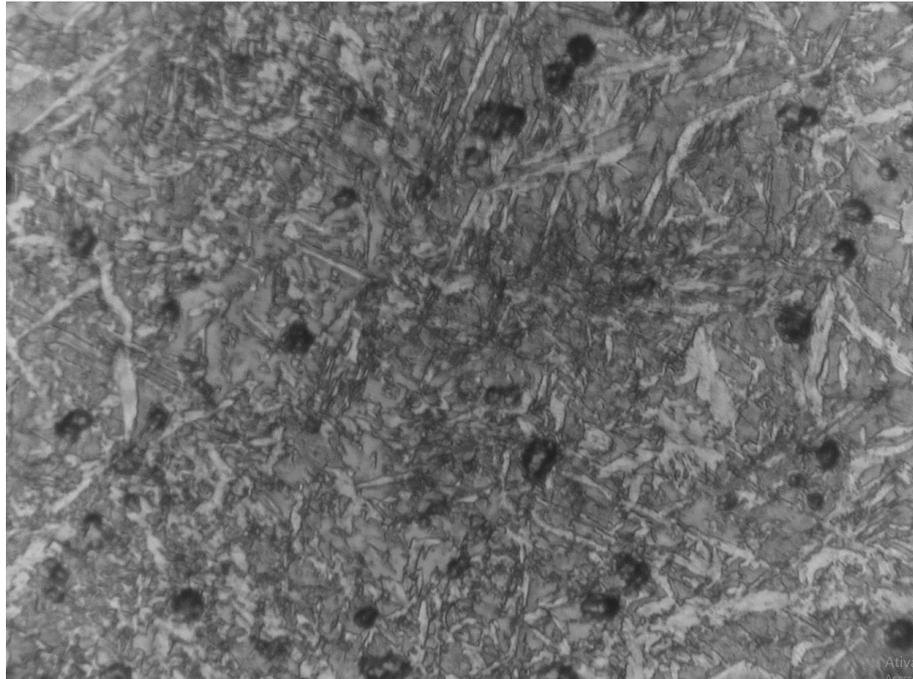


Fonte: (O Autor, 2023).

A figura 63 mostra que na região (E) houve formação de martensita, o que indica velocidades de resfriamentos suficientemente altas nesta região, que associadas à elevada disponibilidade de carbono fornecido pelo metal base ocasionaram a formação de tal estrutura frágil.

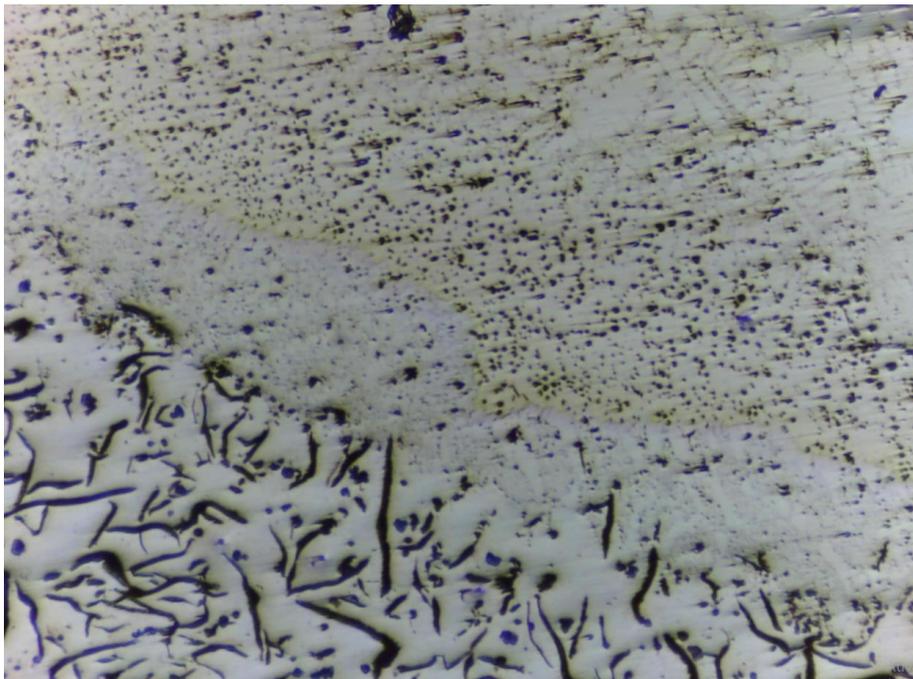
Na figura 64, observa-se a ZTA (região inferior da imagem), o cordão de níquel (região superior) e uma zona de transição, em que tem-se possivelmente a formação de microestruturas frágeis como carbonetos, conforme observado nas demais amostras soldadas e previsto com base na literatura.

Figura 63 - Região E da amostra de ferro fundido cinzento com eletrodos E - NiCi + E 7018. Aumento de 200x.



Fonte: (O Autor, 2023).

Figura 64 - Região F da amostra de ferro fundido cinzento com eletrodos E - NiCi + E 7018. Aumento de 50x.



Fonte: (O Autor, 2023).

#### 5.1.4.1 Ensaio de dureza

Na figura 65 são mostrados os pontos de medição de dureza para a amostra de ferro fundido cinzento soldado com E NiCi + E7018.

O perfil de dureza da figura 66 evidencia que os pontos 5, 6 e 7 encontram-se no centro do cordão de solda, na região do eletrodo E –NiCi, apresentando os três pontos o valor de 52 HRA. Menores valores de dureza são observados para pontos mais afastados do cordão de solda, o que é devido ao afastamento em relação às zonas endurecidas por efeito do ciclo térmico gerado na soldagem (ZTA, ZPF).

Figura 65 - Pontos de medição de dureza para amostra de cinzento com E - NiCi + E 7018.

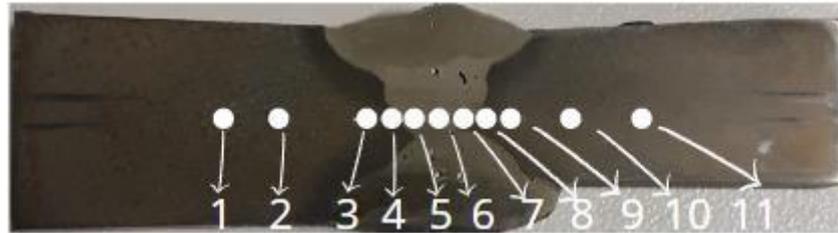
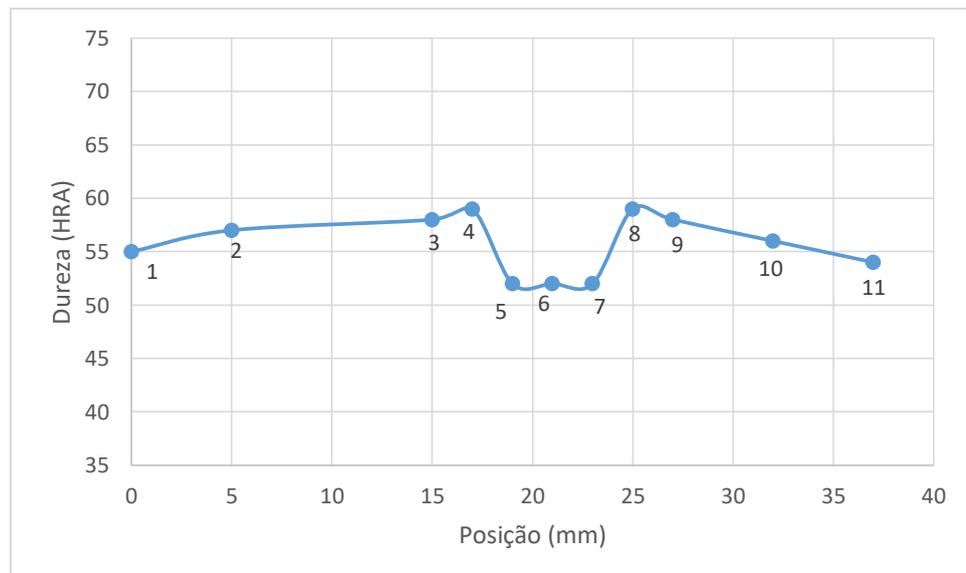


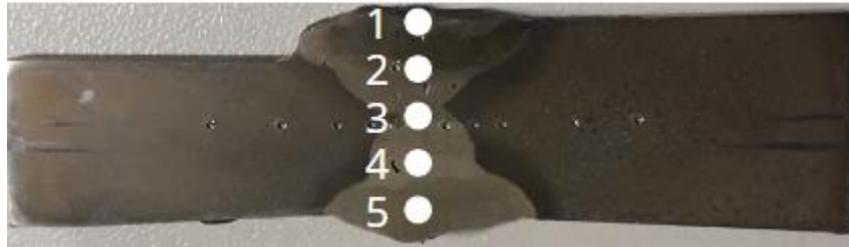
Figura 66 - Perfil de dureza para amostra de ferro fundido cinzento com eletrodos E - NiCi + E 7018.



Fonte: (AUTOR, 2023).

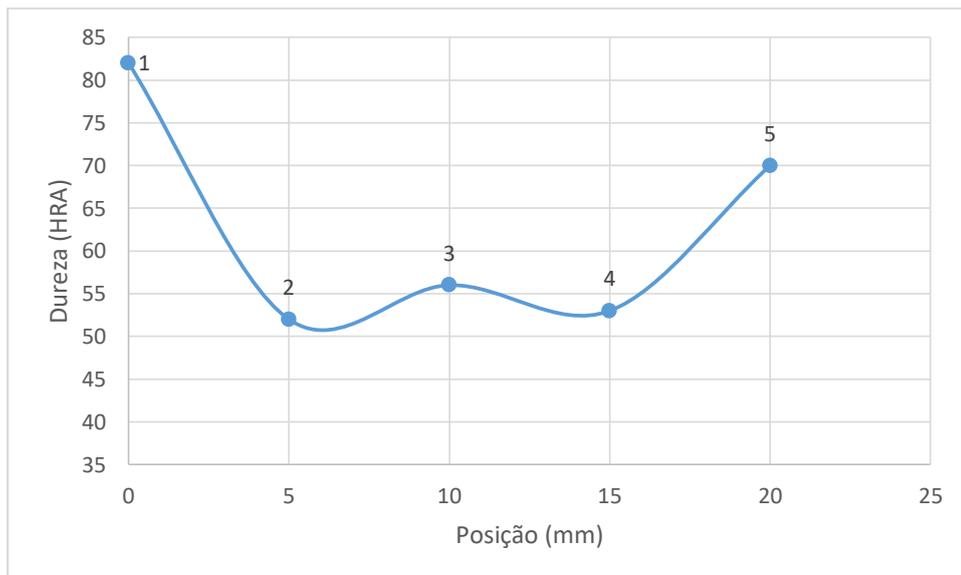
Na figura 67 são mostrados os pontos de medição de dureza transversal para a amostra de ferro fundido cinzento soldado com E NiCi + E7018.

Figura 67 - Medições de dureza transversal para amostra de ferro fundido cinzento com eletrodos E - NiCi + E 7018.



No perfil de dureza transversal da figura 68, destacam-se as durezas de 82 HRA no ponto (1) e 70 HRA no ponto (5), relativamente altas comparado ao ponto (3), por exemplo, em que se mediu 56 HRA. A dureza elevada do ponto (1) na região do E 7018 aponta para a fragilidade da região do cordão formada por esse eletrodo, o que condiz com a ocorrência do trincamento mostrado na figura 59. No ponto (5), a dureza de 70 HRA condiz com a formação da microestrutura martensítica nesta região inferior do cordão, mostrada na figura 63.

Figura 68 – Perfil de dureza transversal para amostra de cinzento com eletrodos E – NiCi + E 7018.

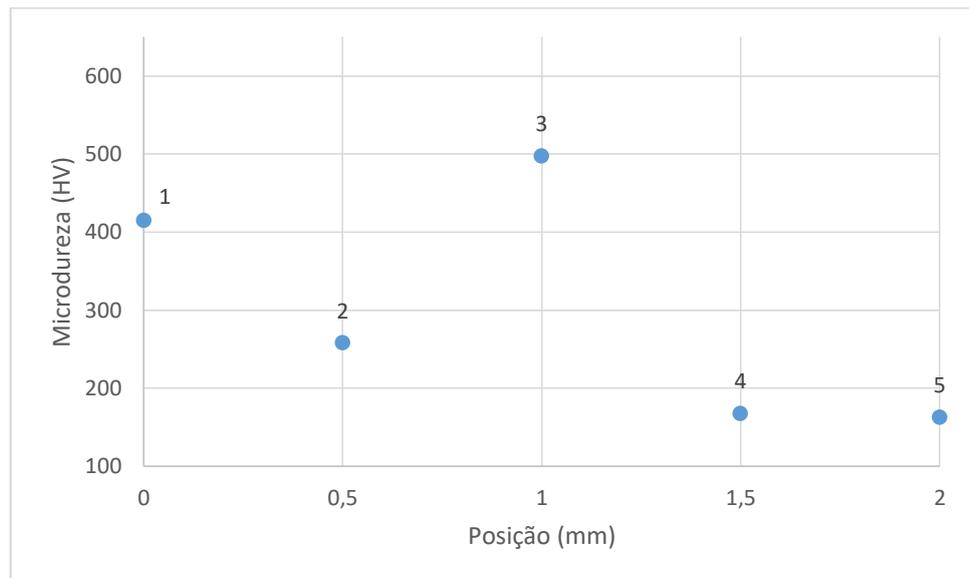


Fonte: (O Autor, 2023).

## 5.2 ENSAIOS DE MICRODUREZA

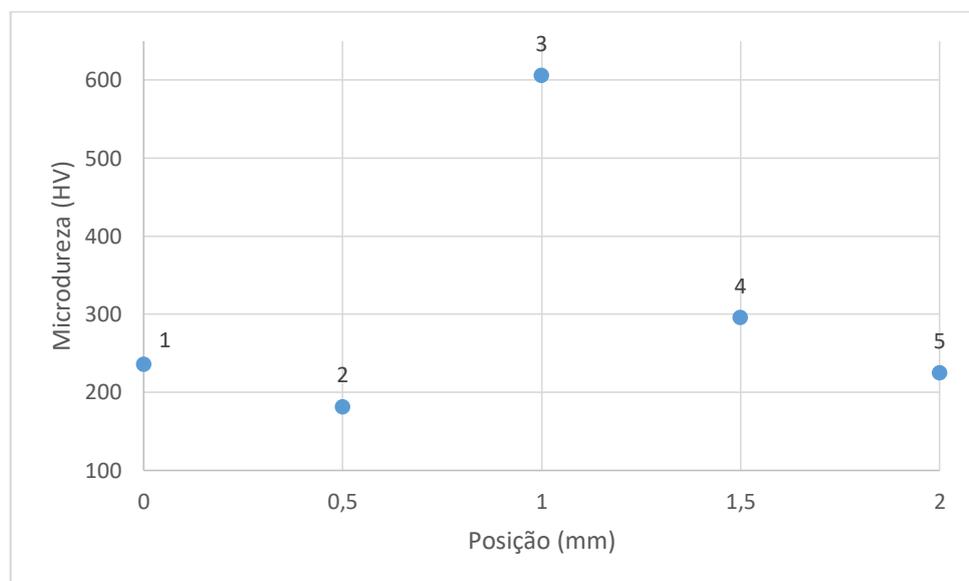
Nas figuras 69 a 72 são mostrados os gráficos referentes às medições de microdureza para cada amostra de solda produzida.

Figura 69 - Medições de microdureza para ferro fundido FE 42012 soldado com E - NiCi.



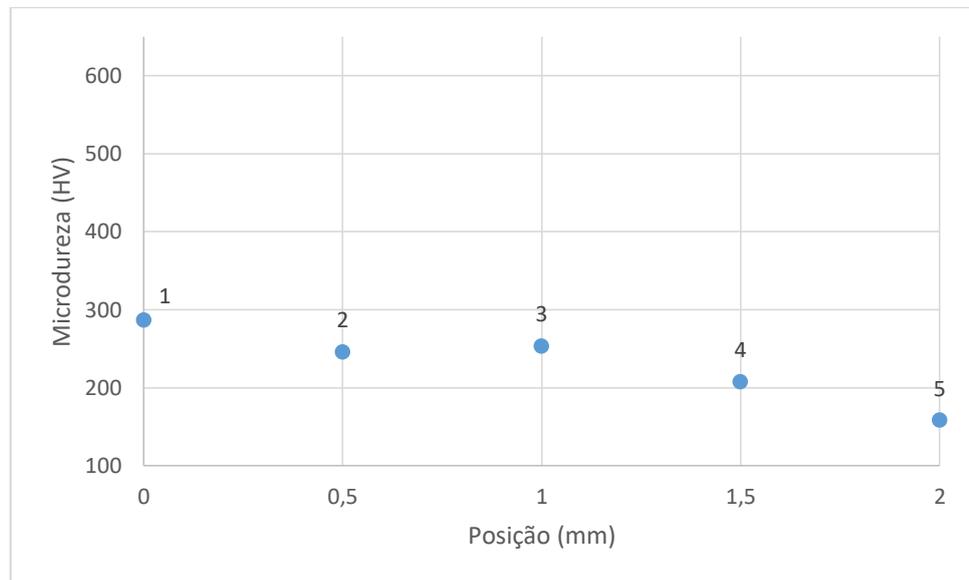
Fonte: (O Autor, 2023).

Figura 70 - Medições de microdureza para ferro fundido FE 42012 soldado com E - NiCi + E 7018.



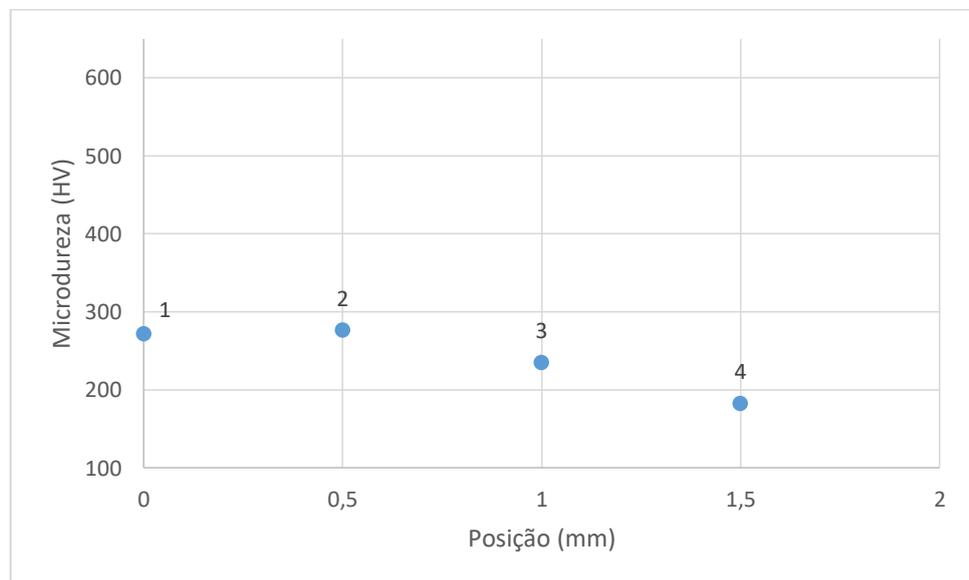
Fonte: (O Autor, 2023).

Figura 71 - Medições de microdureza para ferro fundido cinzento soldado com E - NiCi.



Fonte: (O Autor, 2023).

Figura 72 - Medições de microdureza para ferro fundido cinzento soldado com E - NiCi + E 7018.



Fonte: (O Autor, 2023).

No perfil de microdureza para a amostra de FE 42012 soldado com E – NiCi, os pontos (1) e (2) encontram-se no metal base ou na ZTA, o que foi evidenciado no momento em que se analisou as indentações produzidas ao microscópio óptico. O ponto (3) localiza-se entre a ZTA e o cordão de solda e evidencia que houve formação de microestruturas de elevada dureza

(carbonetos) nessa região, conforme está evidenciado também nas micrografias mostradas na seção de resultados do presente trabalho. Já os pontos (4) e (5) localizam-se na ZF, apresentando as menores microdurezas para esta amostra.

No perfil de microdureza da figura 70, os pontos (1) e (2) correspondem possivelmente à ZTA, devido a ter sido observado que se localizam em uma região adjacente à ZPF e ZL. O ponto (3), mas próximo do cordão que (1) e (2), evidentemente corresponde à região de estrutura de carbonetos, de modo que se obteve o valor de 606 HV. O ponto (4) foi medido aproximadamente na interface do cordão de solda com a ZPF, e foi obtido o valor de 295 HV, indicando que neste caso não foi medida a microdureza da estrutura de carbonetos como ocorreu no ponto (3). Observou-se ao microscópio que o ponto (5) encontrava-se inteiramente no cordão de solda, tendo assim fornecido a microdureza de 225 HV.

Para as medições de microdureza das soldas realizadas no ferro fundido cinzento, não são observados picos (correspondentes à microestruturas de carbonetos na ZL, ZPF) como ocorreu para as amostras de ferro fundido nodular. Na amostra de FC 200 soldada com E – NiCi + E7018, não foi possível visualizar ao microscópio as típicas zonas com estruturas de carbonetos. Isto não evidencia sua eventual ausência, pois pode simplesmente ter se apresentado relativamente estreita na região em que foram medidas as microdurezas.

Para a solda de FC 200 com E – NiCi, os pontos de medição de microdureza estavam localizados apenas no MB ou ZTA, e na ZF (cordão), não havendo dessa forma a observação de picos. Nota-se, portanto, que os picos de microdureza são de maneira geral devidos às zonas contendo carbonetos. Nas regiões do MB e da ZTA não há formações de microestruturas duras como ocorre nas zonas de transição próximas ao cordão. Conhecida a microestrutura dos ferros fundidos utilizados nas soldagens, sabe-se que no MB os valores de microdureza devem corresponder à ferrita e perlita, e na ZTA pode-se encontrar valores diferentes devido à influência do calor sobre os grãos do metal base ou sobre as características da grafita, por exemplo, no entanto espera-se diferenças de microdureza muito menos expressivas entre o MB e a ZTA do que quando se compara os valores destas regiões àqueles observados para as regiões de carbonetos.

### 5.3 ENSAIOS DE FLEXÃO

Na tabela 10 são apresentados os valores médios das tensões máximas obtidas nos ensaios de flexão das amostras soldadas e dos metais no estado de entrega (metal base).

Tabela 10 - Resultados do ensaio de flexão para as soldagens realizadas.

<b>Material</b>	<b>Tensão máxima (média) (MPa)</b>
FE 42012 – Estado de entrega	787
FE 42012 – Amostra com E - NiCi	939
FE 42012 – Amostra com E – NiCi + E7018	803
FC 200 – Estado de entrega	415
FC 200 – Amostra com E - NiCi	369
FC 200 – Amostra com E – NiCi + E7018	376

Fonte: (O Autor, 2023).

Com os ensaios de flexão realizados, buscou-se observar uma eventual influência do processo de soldagem na resistência à flexão dos ferros fundidos FC 200 e FE 42012.

Para o ferro fundido nodular, nota-se o aumento da resistência à flexão em relação à do material no estado de entrega. A amostra soldada com os dois eletrodos apresenta valor aproximadamente 2% superior ao estado de entrega, não consistindo num resultado conclusivo sobre ter havido aumento de resistência. Por outro lado, para a amostra soldada apenas com E – NiCi, o aumento foi de 19,3%, o que supõe-se ser devido a alterações microestruturais produzidas pelas temperaturas durante a soldagem e o posterior resfriamento. Corrobora com tal hipótese o fato de se ter analisado nesses testes de flexão uma zona próxima ao cordão, de modo que a ZTA localizava-se no centro dos corpos de prova de flexão.

Analisando os valores obtidos para o FC 200, nota-se diminuição na resistência à flexão em relação ao estado de entrega, sendo esta de até 11% no caso da amostra soldada somente com E – NiCi. Assim como para as amostras de ferro fundido nodular (destaque para aquela que apresentou variação de 19% na resistência), a diminuição nos valores de resistência pode estar associada a alterações microestruturais geradas pelo calor de soldagem, no entanto, nota-se que neste caso do FC 200 não houve aumento, mas diminuição da resistência. Tal observação indica a possibilidade de os corpos de prova do cinzento e nodular terem contido regiões diferentes da solda em seu centro, e as alterações na resistência à flexão dependerem da região da amostra soldada que se avalia, onde esta propriedade mecânica pode sofrer tanto aumentos quanto diminuições, a depender da forma como a microestrutura da região avaliada foi afetada pelo ciclo térmico da soldagem.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Na soldagem do ferro fundido FE 42012 somente com E – NiCi houve formação de martensita, porém em quantidades pouco pronunciadas comparativamente aos métodos envolvendo o eletrodo 7018;
- A soldagem de FC 200 com E - NiCi + E 7018 apresentou defeitos como trincas e poros. Sendo assim, o método se mostrou inadequado para a soldagem desse material, isto para as condições de soldagem utilizadas neste trabalho;
- A mistura entre os eletrodos E – NiCi e E 7018 apresentou o aspecto negativo da potencial formação de estrutura martensítica no cordão de solda; isto apesar do amanteigamento realizado com eletrodo E – NiCi;
- Na soldagem de FC 200 apenas com E-NiCi, foram encontradas regiões com ZPF relativamente estreitas, o que é bastante positivo em termos de propriedades mecânicas;
- O ferro fundido FE 42012 soldado com os dois eletrodos apresentou trincas na região de depósito do E 7018 e na zona adjacente (ZTA, ZPF), assim como observado para o caso em que estas condições de soldagem foram aplicadas ao ferro fundido FC 200.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Testar a realização das soldagens a frio, mantendo os demais parâmetros e observando o comportamento da microestrutura e em relação a ocorrência de defeitos;
- Realizar ensaio de tenacidade ao impacto da zona termicamente afetada e/ou zona de transição;
- Utilizar métodos alternativos para pré-aquecimento e aquecimento interpases, gerando um aquecimento mais uniforme da junta de solda;
- Avaliar o efeito da aplicação de tratamentos pós-soldagem sobre as microestruturas frágeis formadas (martensita, carbonetos).

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACQUA, Almir Luis Dall'. **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM GMAW NA RESISTÊNCIA DE UMA ESTRUTURA TUBULAR APLICADA EM UM MICRO ÔNIBUS SUBMETIDA A UM CARREGAMENTO CÍCLICO**. 2015. 67 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Caxias do Sul, 2015.

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. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Cefet/Mg, Belo Horizonte, 2014.

AMINI, Shaahin; KALAANTARI, Haamun; GARAY, Javier; BALANDIN, Alexander A.; ABBASCHIAN, Reza. Growth of graphene and graphite nanocrystals from a molten phase. **Journal Of Materials Science**, [S.L.], v. 46, n. 19, p. 6255-6263, 11 mar. 2011. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-011-5432-9>.

AZZOLINI, Diego. **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE PRÉ-AQUECIMENTO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM AÇO SAE 1045, SOLDADO PELO PROCESSO MIG/MAG**. 2017. 79 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharel em Engenharia Mecânica, Centro Universitário Univates, Lajeado, 2017.

BASTOS, Gilberto de Figueiredo Schitine. **IMPORTÂNCIA DO ENSAIO POR ULTRASSOM PARA GARANTIA DA QUALIDADE DA SOLDA**. 2018. 49 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Soldagem, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

BOCKOR, Daniel Eduardo. **COMPORTAMENTO MECÂNICO E MICROESTRUTURAL DO FERRO FUNDIDO NODULAR QUANDO SUBMETIDO A DIFERENTES CONDIÇÕES DE TRATAMENTO TÉRMICO**. 2019. 80 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Automotiva, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville. Joinville, 2019.

CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2016.

CANALE, Anderson Junior. **ESTUDO DA SOLDAGEM DE RECUPERAÇÃO DO FERRO FUNDIDO VERMICULAR ATRAVÉS DO PROCESSO OXIACETILÊNICO**. 2005. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

CAROLINO, Rogério da Silva. **ANÁLISE MICROESTRUTURAL E MECÂNICA DAS JUNTAS SOLDADAS MULTIPASSE DO AÇO A516 GRAU 70 PELOS PROCESSOS ELETRODO REVESTIDO E ARAME TUBULAR UTILIZADAS EM VASO DE PRESSÃO**. 2013. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Profissional em Materiais, Centro Universitário de Volta Redonda - Unifoa, Volta Redonda, 2013.

CÉSAR, Paulo. Características da soldagem com eletrodos revestidos. **Alusolda**, 05 fev. 2018. Disponível em: <https://alusolda.com.br/caracteristicas-da-soldagem-com-eletrodos-revestidos/>. Acesso em: 12 dez. 2023.

CHIMENDES, Nilis Cunha. **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ZINCO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO FERRO FUNDIDO CINZENTO G2500**. 2019. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

EFEITOS do Aporte Térmico na Soldagem – Heat Input. **Aventa**, 2018. Disponível em: <https://aventa.com.br/novidades/aporte-termico-heat-input>. Acesso em: 12 dez. 2023.

ELETRODO Ferro Fundido AWS E NiCI 99. **MJV Soldas**, 2016. Disponível em: <https://www.mjvsoldas.com.br/produto/mjv-eletrodo-ferro-fundido-aws-e-nici-99>. Acesso em: 07 dez. 2023.

FELIZARDO, Ivanilza. Conceito de Soldagem. In: FELIZARDO, Ivanilza. **Apostila - Tecnologia da Soldagem**. Belo Horizonte: Cefet - Mg, 2016. p. 4-5.  
FERRARESI, Henrique Nardon. **EFEITO DOS CICLOS TÉRMICOS DA MANUFATURA ADITIVA POR SOLDAGEM A ARCO SOBRE A DUREZA E MICROESTRUTURA DA ZAC DE UM FERRO FUNDIDO NODULAR**. 2018. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pósgraduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia Faculdade de Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2018.

FERREIRA, Raphael; DALMOLIN, Eduardo; LIMA, Diego Rodolfo Simões de. **ANÁLISE DA MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM FERRO FUNDIDO NODULAR FE-40015 EM FUNÇÃO DO TEMPO DE VAZAMENTO**. In: SEMANA DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 6., 2017, Luzerna. -. Luzerna: Secitec, 2017. p. 1-9.

FRANCKLIN, Alexandre Reis. **UM BREVE ESTUDO SOBRE FERRO FUNDIDO NODULAR**. 2009. 30 f. TCC (Graduação) - Curso de Graduação em Tecnologia em Produção Siderúrgica, Uezo, Rio de Janeiro, 2009.

JIMENES, Marco Aurélio Rosa. **Estudo de Defeitos de Inclusão em um Processo de Fundição Industrial e a Relação Destes com A Variabilidade dos Insumos**. 2021. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2021.

LUCIO, Wilson de Carvalho. **DEMONSTRAR FORMAS DE EVITAR REGUFO EM PEÇAS DE FERRO FUNDIDO CINZENTO CONSIDERANDO A PORCENTAGEM DE CARBONO, SILÍCIO E COBRE NA LIGA FUNDIDA**. 2014. 49 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Universitário do Sul de Minas Unis, Varginha, 2014.

MARODIN, Mateus; PEREIRA, Warley Augusto. **COMPARAÇÃO DAS TÉCNICAS DE SOLDAGEM A QUENTE E A FRIO EM FERRO FUNDIDO**. Rio Verde: Universidade de Rio Verde, . 12 f.

MARQUES, Eva Soledade Vaz. **Estudo da Soldabilidade do Ferro Fundido Sibodur 450**. 2018. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2018.

OLIVEIRA, Victor Caloni de. **Cenário atual e perspectivas do ferro fundido**. 2021. 40 f. TCC (Graduação) - Curso de Graduação em Engenharia de Materiais, Unesp, Guaratinguetá, 2021.

REIS, Bárbara Cristina Mendanha. **INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE NIÓBIO SOBRE A USINABILIDADE DE FERRO FUNDIDO CINZENTO PERLÍTICO NA OPERAÇÃO DE TORNEAMENTO**. 2021. 200 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

RUNDMAN, K.B.; IACOVIELLO, F. **Cast Irons**. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. 2016. p. 1-3.

SANTANA, Ivan José de; CORRÊA, Elaine Carballo Siqueira; RIBEIRO, Douglas Marçal Brito; VAZ, Cláudio Turani. **SOLDABILIDADE DO FERRO FUNDIDO NODULAR SOLDADO PELO PROCESSO GMAW**. In: CONGRESSO ABM 2012, 67., 2012, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Abm, 2012. p. 1-12.

SANTOS, Carlos Henrique Reis dos. **ESTRUTURAÇÃO DE UM PROCEDIMENTO PARA REPARO EM TUBULAÇÕES DE FERRO FUNDIDO E AÇO, UTILIZANDO SOLDAGEM COM ELETRODO ESPECIAL**. 2019. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Mestrado Profissional em Materiais, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2019.

SCHEGOSCHESKI, André Luís. **CARACTERIZAÇÃO DE FERRO FUNDIDO NODULAR SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE AUSTÊMPERA**. 2017. 67 f. TCC (Graduação) - Curso de Graduação em Engenharia Automotiva, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.

SCHEID, Adriano. **Ciência dos Materiais – Ferros Fundidos**. Apresentação do Power Point. Disponível em: [http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM052/Prof.Sheid/Aula\\_FOFOS.pdf](http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM052/Prof.Sheid/Aula_FOFOS.pdf). Acesso em: 06 dez. 2023.

SCHWANKE, Rui Gustavo Lippert. **FERRO FUNDIDO NODULAR COMO ALTERNATIVA PARA O AÇO FUNDIDO AAR M-201, UTILIZADO EM TRUQUES FERROVIÁRIOS DE CARGA**. 2013. 75 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2013.

SILVA, Gulliver Catão. **ANÁLISE COMPARATIVA DO CORDÃO DE SOLDA GERADO PELOS PROCESSOS DE SOLDAGEM FCAW E SMAW NA SOLDAGEM DE AÇOS DE BAIXO TEOR DE CARBONO**. 2016. 69 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.

SILVEIRA, Rosnei. **REVESTIMENTO SUPERFICIAL EM COMPONENTE FUNDIDO DE MÁQUINA AGRÍCOLA**. 2004. 63 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado

Profissionalizante em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

SOUZA, Augusto Cesar de. **ESTUDO DA RECUPERAÇÃO DE PEÇAS DE FERRO FUNDIDO NODULAR POR PROCESSO DE SOLDAGEM**. 2018. 80 f. Tese (Doutorado) - Curso de Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Jaraguá do Sul, 2018.

VIDEIRA, Arthur Moraes e. **INFLUÊNCIA DO APORTE TÉRMICO DA SOLDAGEM GTAW NO BALANÇO DE FASES FERRITA/AUSTENITA DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S32205**. 2016. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2016.

WEBER, Bruno Becker. Introdução a Soldagem - Solda a arco elétrico por eletrodo revestido x Processo Arco-Ar. **Carbografite**, 09 fev. 2021. Disponível em: <https://carbografite.com.br/blog/detalhe/introducao-a-soldagem/>. Acesso em: 12 dez. 2023.