



# ESTUDO DA SOLDABILIDADE DO FERRO FUNDIDO SIBODUR® 450

**LUIZ GUSTAVO RICIERI SILVA**

Setembro de 2016

## **ESTUDO DA SOLDABILIDADE DO FERRO FUNDIDO**

### **SIBODUR® 450**

Luiz Gustavo Ricieri da Silva

**2016**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO  
DO PORTO

isep

## **ESTUDO DA SOLDABILIDADE DO FERRO FUNDIDO**

### **SIBODUR® 450**

Luiz Gustavo Ricieri da Silva  
1151729

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Francisco José Gomes da Silva, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP e Co-Orientado pela Doutora Olga Maria Maia Coutinho de Paiva, Professora Coordenadora do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP e pelo Doutor Paulo Cezar Moselli, Professor na Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

**2016**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO  
DO PORTO

isep

# JÚRI

## **Presidente**

Doutor Rui Pedro Cardoso da Silva Martinho  
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

## **Orientador**

Doutor Francisco José Gomes da Silva  
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

## **Co-orientadora**

Doutora Olga Maria Maia Coutinho de Paiva  
Professora Coordenadora, Instituto Superior de Engenharia do Porto

## **Co-orientador**

Doutor Paulo Cezar Moselli  
Professor, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procópio

## **Arguente**

Doutor António Manuel de Bastos Pereira  
Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus pela oportunidade de poder cursar, de modo parcial, a minha graduação em Portugal e por todas as bênçãos concedidas nessa curta, mas árdua caminhada.

Aos meus pais, pelo carinho e apoio incondicional que tive ao longo da minha vida, principalmente nesse último ano. Foram e sempre serão fundamentais para mim.

Ao meu orientador Francisco Silva, por todo o auxílio e conhecimento concedido na execução desse projeto. Também agradeço pela maneira amistosa como me recebeu, desde o primeiro dia no ISEP até a conclusão dessa tese, sempre se prontificando (independentemente do horário) à ajudar em qualquer que fosse a situação. Certamente, o grande responsável pelo sucesso dessa temporada em Porto é o grandioso Professor.

À minha co-orientadora Olga Paiva que se dedicou nos últimos meses, quase de modo integral, para que os ensaios tivessem o maior rigor e os resultados fossem os melhores.

À Engenheira Fátima Andrade, pela atenção, paciência e dedicação que sempre teve para a realização de todos os ensaios práticos.

Ao Técnico Superior Victor Moreira pelo trabalho brilhante que desempenhou na usinagem para a obtenção dos provetes para os ensaios.

Ao Técnico Superior Vítor Ribeiro que contribuiu com sua enorme técnica soldando todas as amostras, resultando em provetes com excelentes cordões

Ao Professor Paulo Cezar Moselli (Professor e Diretor da UTFPR-CP) pelo apoio dado desde a aprovação da minha candidatura ao processo seletivo até o último dia deste intercâmbio.

À UTFPR-CP que estabeleceu o acordo de Dupla Diplomação com o IPP e nos possibilitou cursar um ano letivo no exterior, para a obtenção de um título dessa magnitude.





**PALAVRAS CHAVE**

Soldagem, Sibodur® 450, Soldabilidade, Defeitos de soldagem, Ensaio destrutivo, Ensaio não-destrutivo, Ferro fundido dúctil

**RESUMO**

Considerando a exigência do mundo atual pela redução na exploração dos recursos naturais e pelo apelo cada vez maior no âmbito de reciclar e reutilizar equipamentos com a finalidade de diminuir o impacto ambiental, este estudo tem como objetivo dar a possibilidade às indústrias que utilizam peças à base do Sibodur® 450 utilizar a soldagem como método de reparação.

Logo, este trabalho de modo experimental obteve êxito em seu objetivo de determinar parâmetros para que fosse possível a soldagem do ferro fundido Sibodur® 450, adequando temperaturas para tratamentos térmicos e técnicas de solda para que os resultados fossem satisfatórios.



**KEYWORDS**

*Welding, Sibodur® 450, Weldability, Welding defects, Destructive testing, Non-destructive testing, Ductile Iron*

**ABSTRACT**

Considering the today World requirements for global reduction in the natural resources exploitation and increasing appeal regarding the recycling and reuse of equipment and goods in order to decrease the environmental impact, this study intend to give an opportunity to the industry that use Sibodur® 450 as raw material to use welding process as repairing methodology.

Thus, using the experimental mode as main way, this work allow to achieve its main goal selecting some sets of parameters those become possible the Sibodur® 450 welding, adjusting heat treatment temperatures and welding procedures becoming the final results satisfactory.



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

AWS	<i>American Welding Society</i>
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gás</i>
ZTA	Zona termicamente afetada
ZFM	Zona fundida misturada
ZFNM	Zona fundida não misturada
ZPF	Zona parcialmente fundida
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
EN	<i>European Norm</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
CCPD	Corrente contínua com polaridade direta

### Lista de Unidades

$R_m$	Resistencia à tração
$R_{p0.2}$	Tensão limite convencional de proporcionalidade a 0.2% (tração)
A(%)	Alongamento
$\sigma_{d0.2}$	Tensão limite convencional de proporcionalidade a 0.2% (compressão)
$T_{aB}$	Tensão de cisalhamento
E	Módulo de Young
G	Módulo de cisalhamento
$\nu$	Coeficiente de Poisson
a	Força de impacto
$a_k$	Resistência ao impacto
$p_{G0.02}$	Pressão de contato
HB	Dureza Brinell
$\sigma_A$	Tensão à fadiga ( $r = -1$ )
$\rho$	Densidade
$\alpha$	Coeficiente de expansão térmica
$c_p$	Capacidade térmica específica

$\rho_e$	Resistividade elétrica específica
$\lambda$	Condutividade térmica
%	Porcentagem
N/mm <sup>2</sup>	Newton por milímetro quadrado
kN/mm <sup>2</sup>	Quilo-Newton por milímetro quadrado
°C	Graus Celsius
K	Kelvin
$\geq$	Maior ou igual
$\leq$	Menor ou igual
J/cm <sup>2</sup>	Joule por centímetro quadrado
HV	Dureza Vicker
J/(g·K)	Joule por grama-Kelvin
$\mu\Omega\cdot m$	Microhm metro
W/(K·m)	Watt por Kelvin-metro
mm	milímetros
°C/h	Graus Celsius por hora
°	Graus
A	Ampere
kgf	Quilograma força

#### Lista de Símbolos

Al	Alumínio
Sb	Antimônio
B	Boro
Cr	Cromo/Crómio
Mn	Manganês
Cu	Cobre
Mo	Molibdênio
Ni	Níquel
Si	Silício
Te	Telúrio
Sn	Estanho
Ti	Titânio
V	Vanádio
S	Enxofre
P	Fósforo
C	Carbono
Mg	Magnésio
Pb	Chumbo
Be	Berílio
Zn	Zinco

---

Ar	Argônio/Argôn
He	Hélio
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
TiO <sub>2</sub>	Dióxido de Titânio
CC <sup>+</sup>	Elétrodo ligado ao pólo positivo (aparelho em Corrente Contínua)
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada

---







## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – PORCENTAGEM DE C E SI EM AÇOS E FERROS FUNDIDOS [13].	37
FIGURA 2 – COLETOR DE ESCAPE FABRICADAS COM FERRO FUNDIDO [5].	38
FIGURA 3 – TARUGO DE FERRO FUNDIDO [6].	42
FIGURA 4 – MICROESTRUTURA DO FERRO FUNDIDO CINZENTO [7].	43
FIGURA 5 – DIAGRAMA METAESTÁVEL DO FERRO FUNDIDO BRANCO [9].	44
FIGURA 6 – MICROESTRUTURA TÍPICA DO FERRO FUNDIDO BRANCO (A REGIÃO CLARA É CARACTERIZADA PELA PRESENÇA DA CEMENTITA) [8].	45
FIGURA 7 – COMPARAÇÃO ENTRE AS GRAFITAS NOS FERROS FUNDIDOS [12].	48
FIGURA 8 – BLOCO DE MOTOR A DIESEL [11].	49
FIGURA 9 – MICROESTRUTURA TÍPICA DOS ADI [16].	50
FIGURA 10 – COMPARATIVO ENTRE TRATAMENTOS TÉRMICOS EM FERROS FUNDIDOS NODULARES [33]. ADAPTADO [32].	51
FIGURA 11 – TRATAMENTO TÉRMICO DE AUSTÊMPERA EM FERROS FUNDIDOS (ADAPTADO) [34].	52
FIGURA 12 – ESTÁGIOS DO PROCESSO DE AUSTÊMPERA EM FERROS FUNDIDOS [33].	53
FIGURA 13 – VIRABREQUIM DE MOTOR TURBO DA FORD.	54
FIGURA 14 – BRAÇO DE CONTROLE TRANSVERSAL FABRICADO COM SIBODUR 450® [52].	56
FIGURA 15 – REPRESENTAÇÃO DO ARCO ELÉTRICO DE BERNARDOS [44].	57
FIGURA 16 – REPRESENTAÇÃO DO ARCO ELÉTRICO DE ZERENER [44].	57
FIGURA 17 – REPRESENTAÇÃO DO ARCO ELÉTRICO DE SLAVIANOFF [44].	58
FIGURA 18 – REPRESENTAÇÃO DO ARCO ELÉTRICO DE KJELLBERG [44].	58
FIGURA 19 – REPRESENTAÇÃO DO ARCO ELÉTRICO DE LUNGUMIR [44].	59
FIGURA 20 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO PROCESSO MIG/MAG [49].	64
FIGURA 21 – ESQUEMA COM OS PRINCIPAIS COMPONENTES DO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG [45, 51].	67
FIGURA 22 – EQUIPAMENTO UTILIZADO NO PROCESSO TIG [45, 51].	68
FIGURA 23 – ESQUEMA DA SOLDAGEM POR ELÉTRODO REVESTIDO [45].	69
FIGURA 24 – ESQUEMA DA SOLDAGEM POR ELETRODO REVESTIDO [45].	70
FIGURA 25 – DIFERENTES ZONAS EXISTENTES NA REGIÃO DA JUNTA SOLDADA [53, 77].	79
FIGURA 26 – ASPECTO DA GEOMETRIA DO MATERIAL SIBODUR® 450 RECEBIDO.	84
FIGURA 27 – GEOMETRIA E MEDIDAS DOS PROVETES OBTIDOS DO TARUGO.	84
FIGURA 28 – TORNEAMENTO DE DUAS PARTES DO TARUGO PARA A OBTENÇÃO DE UMA ÚNICA PARCELA COM 35 MM.	85
FIGURA 29 – PARTE DO TARUGO (BRUTO) DE 45 MM DE DIÂMETRO ANTES DO TORNEAMENTO.	86
FIGURA 30 – ASPECTO DO TARUGO APÓS A REALIZAÇÃO DO TORNEAMENTO DA EXTREMIDADE COM MAIOR DIÂMETRO (45 MM).	86
FIGURA 31 – COMPARAÇÃO ENTRE O TARUGO TORNEADO (PARTE SUPERIOR) E O TARUGO BRUTO RECEBIDO (PARTE INFERIOR).	87
FIGURA 32 – CORTE DA EXTREMIDADE COM DIÂMETRO DE 45 MM.	87
FIGURA 33 – PROVETE APÓS O PRIMEIRO CORTE.	88

FIGURA 34 – RETIRADA DE MATERIAL, DEIXANDO-O UNIFORME COM DIÂMETRO DE 35 MM.	88
FIGURA 35 – PROVETE APÓS O TORNEAMENTO PARA A RETIRADA DE MATERIAL, DEIXANDO O TARUGO COM 35 MM DE DIÂMETRO.	89
FIGURA 36 – REALIZAÇÃO DE UM SEGUNDO CORTE NO TARUGO E OBTENÇÃO DE UM NOVO CILINDRO COM 61 MM DE COMPRIMENTO E 35 MM DE DIÂMETRO.	89
FIGURA 37 – CENTRO DE USINAGEM CNC HAAS VF-2.	90
FIGURA 38 - FACEAMENTO DOS CILINDROS, RETIRANDO O MATERIAL NECESSÁRIO PARA AGREGAR A DIMENSÃO NECESSÁRIO NA LARGURA, 30 MM.	91
FIGURA 39 – RETIRADA, TRAVÉS DA SERRA DE FITA, DA PARTE CÔNCAVA EXISTENTE NO MATERIAL.	91
FIGURA 40 – FACEAMENTO NO MATERIAL PARA TIRAR AS POSSÍVEIS IRREGULARIDADES CAUSADAS PELO CORTE ANTERIOR.	92
FIGURA 41 – CORTE NO MATERIAL PARA A RETIRADA DO PROVETE, DE ACORDO COM AS ESPECIFICAÇÕES.	92
FIGURA 42 – REALIZAÇÃO DO CHANFRO DE 45° NO PROVETE.	93
FIGURA 43 – PROVETES OBTIDOS APÓS USINAGEM DO TARUGO DE SIBODUR® RECEBIDO.	94
FIGURA 44 – EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM <i>OERLIKON SAXOTIG 1600</i> [89].	94
FIGURA 45 – MUFLA NABERTHERM N 11/H NA QUAL FOI FEITO O AQUECIMENTO DOS PROVETES ANTES DA DEPOSIÇÃO DE NÍQUEL E ANTES DA SOLDAGEM DEFINITIVA	95
FIGURA 46 – PROCEDIMENTO PARA PRÉ-AQUECIMENTO DOS PROVETES ANTES DA DEPOSIÇÃO DO NÍQUEL.	96
FIGURA 47 – PROVETES SENDO AQUECIDOS NA MUFLA A 300 °C, ANTES DA DEPOSIÇÃO DE NÍQUEL.	96
FIGURA 48 – ELÉTRODOS DE NÍQUEL FN 10 UTILIZADOS NA PRIMEIRA DEPOSIÇÃO.	97
FIGURA 49 – SIDODUR® 450 APÓS DEPOSIÇÃO DE NÍQUEL E AINDA COM ESCÓRIA DEIXADA PELO PROCESSO.	97
FIGURA 50 – PROVETES APÓS O PRIMEIRO PROCEDIMENTO (PRÉ-AQUECIMENTO, DEPOSIÇÃO DE NÍQUEL E REALIZAÇÃO DOS CHANFROS A 45°).	98
FIGURA 51 – PROCEDIMENTO PARA AQUECIMENTO DOS PROVETES APÓS REBARBAGEM DO NÍQUEL E ANTES DA SOLDAGEM COM INCONEL.	98
FIGURA 52 – PROPRIEDADES E COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO INCONEL LR 82 UTILIZADO PARA SOLDAR OS PROVETES.	99
FIGURA 53 – PROVETE APÓS SOLDAGEM COM INCONEL.	99
FIGURA 54 – EQUIPAMENTO SHIMADZU AUTOGRAPH AGS-X – 100 KN UTILIZADO NO ENSAIO DE TRAÇÃO.	101
FIGURA 55 – FIXAÇÃO DA AMOSTRA PARA INÍCIO DO ENSAIO DE TRAÇÃO, COM DISTÂNCIA ENTRE GARRAS DE 85 MM.	102
FIGURA 56 – AMOSTRA APÓS ENSAIO DE TRAÇÃO, EVIDENCIANDO A FRATURA NA REGIÃO DA ZTA.	103
FIGURA 57 – EQUIPAMENTO <i>DISCOTOM 2</i> UTILIZADO PARA O CORTE DAS AMOSTRAS ATRAVÉS DE DISCO ROTATIVO.	104
FIGURA 58 – PRENSA <i>STRUERS PREDOPRESS</i> UTILIZADA PARA EMBUTIR AS AMOSTRAS EM RESINA.	104
FIGURA 59 – AMOSTRA DE SIBODUR 450 EMBUTIDA EM RESINA TERMOENDURECÍVEL, COM DIÂMETRO DE APROXIMADAMENTE 30 MM.	105
FIGURA 60 – LIXADEIRA <i>STRUERS ROTOPOL 1</i> UTILIZADA PARA RETIRAR AS IMPERFEIÇÕES DAS AMOSTRAS.	105

FIGURA 61 – POLIMENTO DAS AMOSTRAS NA <i>STRUERS ROTOPOL 1</i> . PRIMEIRO A AMOSTRA FOI POLIDA NO LADO ESQUERDO NA IMAGEM (PANO AZUL) ONDE SE UTILIZOU ABRASIVO DE DIAMANTE COM GRANULOMETRIA DE 3 $\mu$ M. APÓS ESSE PROCEDIMENTO, POLIU-SE A AMOSTRA COM ABRASIVO DE DIAMANTE COM GRANULOMETRIA DE 1 $\mu$ M, NO LADO DIREITO (PANO VERMELHO).	106
FIGURA 62 – MICROSCÓPIO <i>OLYMPUS BX51M</i> UTILIZADO PARA OBSERVAR OS MICROCONSTITUINTES DAS AMOSTRAS.	107
FIGURA 63 – PENETRADOR DE DIAMANTE EM FORMATO PIRAMIDAL DE BASE QUADRADA [85].	108
FIGURA 64 – DIAGONAIS DE INDENTAÇÃO FEITA PELO PENETRADOR [85].	108
FIGURA 65 – DURÔMETRO <i>EMCO – TEST MAU 025G3</i> UTILIZADO PARA OS ENSAIOS DE DUREZA.	109
FIGURA 66 – PRODUTOS UTILIZADOS NO ENSAIO DE LÍQUIDOS PENETRANTES, REVELANDO POSSÍVEIS FALHAS EXISTENTES NO CORDÃO DE SOLDA, BEM COMO NA JUNTA SOLDADA.	110
FIGURA 67 – AMOSTRAS APÓS A LIMPEZA COM SOLVENTE.	111
FIGURA 68 – AMOSTRAS APÓS A APLICAÇÃO DO LÍQUIDO PENETRANTE.	111
FIGURA 69 – AMOSTRA APÓS A RETIRADA DO EXCESSO DE LÍQUIDO PENETRANTE E ANTES DA APLICAÇÃO DO REVELADOR.	112
FIGURA 70 – AMOSTRA APÓS A APLICAÇÃO DO REVELADOR.	112
FIGURA 71 – EQUIPAMENTO UTILIZADO NO ENSAIO DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS YOKE.	113
FIGURA 72 – ALINHAMENTO DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS DE ACORDO COM O CAMPO MAGNÉTICO GERADO.	113
FIGURA 73 – INSPEÇÃO VISUAL DA REGIÃO DE SOLDA DO SIBODUR® 450 COM BOA QUALIDADE.	114
FIGURA 74 – INSPEÇÃO VISUAL DA REGIÃO DE SOLDA COM PÉSSIMA QUALIDADE.	114
FIGURA 75 – RUPTURA DEVIDO AO ENSAIO DE TRAÇÃO.	118
FIGURA 76 – LOCAL DE RUPTURA DA AMOSTRA 05_PO_W2_P700.	119
FIGURA 77 – PRESENÇA DE POROS NO INTERIOR DO CORDÃO DE SOLDA DA AMOSTRA 05_PO_W2_P700.	119
FIGURA 78 – RADIOGRAFIA DA JUNTA SOLDADA DAS AMOSTRAS COM O PARÂMETRO P300_N_P700_W2_PO.	120
FIGURA 79 – RUPTURA DA AMOSTRA (20_P300_N_P700_W2_PO) APÓS ENSAIO DE TRAÇÃO.	120
FIGURA 80 – INDENTAÇÃO COM SUAS RESPECTIVAS DUREZAS AMOSTRA 05_PO_W2_P700.	121
FIGURA 81 – GRÁFICO COM O PERFIL DE DUREZA AMOSTRA 05_PO_W2_P700.	121
FIGURA 82 – INDENTAÇÃO COM SUAS RESPECTIVAS DUREZAS AMOSTRA 09_P300_N_P300_W2_PO.	122
FIGURA 83 – GRÁFICO COM O PERFIL DE DUREZA AMOSTRA 09_P300_N_P300_W2_PO.	122
FIGURA 84 – INDENTAÇÃO COM SUAS RESPECTIVAS DUREZAS AMOSTRA 18_P300_N_P300_W4_PO.	123
FIGURA 85 – GRÁFICO COM O PERFIL DE DUREZA AMOSTRA 18_P300_N_P300_W4_PO.	123
FIGURA 86 – INDENTAÇÃO COM SUAS RESPECTIVAS DUREZAS AMOSTRA 22_P300_N_PO_W2_P700.	124
FIGURA 87 – GRÁFICO COM O PERFIL DE DUREZA AMOSTRA 22_P300_N_PO_W2_P700.	124
FIGURA 88 – MICROESTRUTURA DO MATERIAL DE BASE RECEBIDO SEM ATAQUE QUÍMICO, 200X.	126
FIGURA 89 – MICROESTRUTURA EVIDENCIANDO AS 3 REGIÕES DA AMOSTRA 05_PO_W2_P700. ATAQUE NITAL 4%. 50X.	126
FIGURA 90 – MICROESTRUTURA COM UMA AMPLIAÇÃO MAIOR DAS 3 REGIÕES DA AMOSTRA 05_PO_W2_P700. ATAQUE NITAL 4%. 100X.	127
FIGURA 91 – MICROESTRUTURA DA AMOSTRA 22_P300_N_PO_W2_P700. ATAQUE NITAL 4%. 50X.	127
FIGURA 92 – MICROESTRUTURA DA AMOSTRA 09_P300_N_PO_W2_PO. ATAQUE NITAL 4%. 100X.	128

---

FIGURA 93 – MICROESTRUTURA DA AMOSTRA 18_P300_N_P300_W4_P0. ATAQUE NITAL 4%. 100X.	128
FIGURA 94 – MICROESTRUTURA DA ZTA NA AMOSTRA 09_P300_N_P300_W2_P0, COM ATAQUE DE NITAL 4%. 200X.	129
FIGURA 95 – MICROESTRUTURA DA AMOSTRA 09_P300_N_P300_W2_P0 COM ATAQUE DE NITAL 4%.100X.	130

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – EFEITOS ESTRUTURAIS DE ALGUNS ELEMENTOS DE LIGA NO FERRO FUNDIDO [2].	39
TABELA 2 – FAIXA DE COMPOSIÇÃO DO FERRO FUNDIDO CINZENTO, SEM ELEMENTOS DE LIGA [2].	42
TABELA 3 – FAIXA DE COMPOSIÇÃO DO FERRO FUNDIDO BRANCO, SEM ELEMENTOS DE LIGA [2].	44
TABELA 4 – FAIXA DE COMPOSIÇÃO DO FERRO FUNDIDO MALEÁVEL, SEM ELEMENTOS DE LIGA [2].	46
TABELA 5 – FAIXA DE COMPOSIÇÃO DO FERRO FUNDIDO NODULAR, SEM ELEMENTOS DE LIGA [ASTM A536].	47
TABELA 6 – FAIXA DE COMPOSIÇÃO DO FERRO FUNDIDO VERMICULAR, SEM ELEMENTOS DE LIGA [2].	49
TABELA 7 – PROPRIEDADES DOS DIFERENTES TIPOS DE SIBODUR® [52].	55
TABELA 8 – PROCESSOS DE SOLDAGEM POR FUSÃO E SUAS CARACTERÍSTICAS [37].	61
TABELA 9 – CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO MIG [38,41].	65
TABELA 10 – CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO MAG-CO <sub>2</sub> (COM TRANSFERÊNCIA POR PULVERIZAÇÃO) [38,41].	65
TABELA 11 – CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO MAG-CO <sub>2</sub> (COM TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO) [38,41].	66
TABELA 12 – CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO MIG (PULSADO) [38,41].	66
TABELA 13 – QUADRO COMPARATIVO DOS GASES INERTES MAIS UTILIZADOS NO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG [45, 48].	68
TABELA 14 – CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR TIG [38,41].	69
TABELA 15 – CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR ELÉTRODO REVESTIDO [38,41].	72
TABELA 16 – TEMPERATURA DE PÓS-AQUECIMENTO PARA FERROS FUNDIDOS CINZENTOS [53,56,73].	77
TABELA 17 – TEMPERATURA DE PÓS-AQUECIMENTO PARA FERROS FUNDIDOS NODULARES [53,56,73].	77
TABELA 18 – PARÂMETROS ADOTADOS PARA CADA TIPO DE AMOSTRA.	116
TABELA 19 – RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE TRAÇÃO.	117
TABELA 20 – PARÂMETROS ADOTADOS QUE FORAM SATISFATORIO E NÃO SATISFATORIO.	118



# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>31</b>
<b>1.1</b>	<b>Enquadramento</b>	<b>31</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>31</b>
<b>1.3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>32</b>
<b>1.4</b>	<b>Estrutura</b>	<b>32</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>37</b>
<b>2.1</b>	<b>FERROS FUNDIDOS</b>	<b>37</b>
2.1.1	FERRO CINZENTO	41
2.1.2	FERRO BRANCO	43
2.1.3	FERRO MALEÁVEL	45
2.1.4	FERRO NODULAR/DÚCTIL	46
2.1.5	FERRO VERMICULAR	48
<b>2.2</b>	<b>FERROS FUNDIDOS DE ALTA RESISTÊNCIA</b>	<b>50</b>
<b>2.3</b>	<b>SIBODUR</b>	<b>54</b>
<b>2.4</b>	<b>SOLDAGEM</b>	<b>56</b>
2.4.1	HISTÓRICO	56
2.4.2	PROCESSOS DE SOLDAGEM	60
<b>2.5</b>	<b>SOLDAGEM DE FERRO FUNDIDO</b>	<b>73</b>
2.5.1	DIFICULDADES PARA A SOLDAGEM DO FERRO FUNDIDO	73
<b>2.6</b>	<b>EFEITOS DOS PARÂMETROS NA SOLDAGEM E MICROESTRUTURA</b>	<b>75</b>
2.6.1	PRÉ-AQUECIMENTO	75
2.6.2	PÓS-AQUECIMENTO	76
<b>2.7</b>	<b>ELEMENTOS QUÍMICOS E SEUS EFEITOS NA SOLDAGEM</b>	<b>78</b>
<b>2.8</b>	<b>REGIÃO DA SOLDAGEM</b>	<b>78</b>

---

<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>83</b>
<b>3.1</b>	<b>SIBODUR® 450</b>	<b>83</b>
3.1.1	CARACTERÍSTICAS DO SIBODUR® 450	83
3.1.2	GEOMETRIA INICIAL DO MATERIAL RECEBIDO	83
<b>3.2</b>	<b>USINAGEM E APROVEITAMENTO DAS AMOSTRAS</b>	<b>85</b>
<b>3.3</b>	<b>SOLDAGEM</b>	<b>94</b>
3.3.1	PROCESSO DE SOLDAGEM UTILIZADO	94
3.3.2	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS E JUNTA SOLDADA	95
<b>3.4</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DAS SOLDAGENS</b>	<b>100</b>
3.4.1	ENSAIO DE TRAÇÃO	100
3.4.2	ANÁLISE METALOGRAFICA	103
3.4.3	ENSAIO DE DUREZA	108
3.4.4	ENSAIO COM LÍQUIDO PENETRANTE	109
3.4.5	PARTÍCULAS MAGNÉTICAS	112
3.4.6	INSPEÇÃO VISUAL	114
<b>3.5</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>115</b>
3.5.1	ENSAIO DE TRAÇÃO	117
3.5.2	PERFIL DE DUREZA	121
3.5.3	ENSAIO METALOGRÁFICO	125
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>133</b>
<b>5</b>	<b>BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO</b>	<b>139</b>
<b>6</b>	<b>ANEXOS</b>	<b>153</b>

# INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

1.2 OBJETIVOS

1.3 METODOLOGIA

1.4 ESTRUTURA



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

A palavra ferro deriva-se do latim “ferrum” [1]. Segundo alguns historiadores há evidências que este metal já era conhecido por nossos ancestrais no século X a.C., porém as primeiras armas e ferramentas à base deste material são datadas do século II a.C. Só foi possível o emprego do ferro na construção destes artefactos, uma vez que se tinha o conhecimento de técnicas de fundição.

Posteriormente, a adoção do ferro (em substituição ao bronze) como matéria-prima para a fabricação de instrumentos para o cotidiano do homem primitivo se deu principalmente pela sua ductilidade e sua alta tenacidade.

Mesmo com o passar dos anos, o ferro continua a ser demasiadamente empregado em diversas áreas da engenharia, como na construção civil, mecânica, naval entre outras. Porém, com a alta exigência da indústria e aliado aos avanços tecnológicos, surgiu a possibilidade do aprimoramento no uso do ferro, isto é, a formação de novas ligas metálicas que tenham características específicas e eficazes, como: alta resistência à tração e ductilidade.

Considerando esses requisitos do mercado, entre outras, a Georg Fischer tem desenvolvido uma gama (ou “família”) de ligas de ferro fundido (denominada *SiboDur*<sup>®</sup> que, de certa forma, tem revolucionado o cenário mundial.

## 1.2 Objetivos

Esta tese tem como objetivo principal analisar a soldagem do ferro fundido *SiboDur*<sup>®</sup> 450, pois quando uma peça feita de *SiboDur*<sup>®</sup> 450 sofre algum tipo de avaria, ela é imediatamente substituída por uma nova, descartando a peça trocada. Conhecendo esse procedimento e levando em consideração tanto a redução de custos pela indústria

quanto a cultura global em preservar cada vez mais o meio ambiente, pensou-se na possibilidade de recuperar o Sibodur® 450 através da soldagem, tentando manter sua nova característica próximo da primária.

### 1.3 Metodologia

A metodologia utilizada nesse estudo pode ser descrita superficialmente a partir das descrições abaixo:

- Escolha do tamanho dos provetes, mediante o melhor aproveitamento do material de base cedido pela Georg Fischer;
- Análise preliminar da microestrutura do Sibodur® 450;
- Pesquisa bibliográfica para analisar as características intrínsecas do Sibodur® 450 e compará-los a ferros fundidos especiais largamente utilizados, para assim analisar os diagramas de fases e escolher o tipo de tratamento térmico a ser aplicado;
- Escolha do método de soldagem mais adequado, bem como o material que será depositado;
- Realização de uma segunda análise micro-estrutural após a soldagem (considerando que há uma mudança na microestrutura devido ao tratamento térmico e analisar as características da junta soldada);
- Elaboração de ensaios de tração e micro-dureza;
- Análise dos resultados obtidos, comparando com o *data sheet* cedido pela Georg Fischer;
- Conclusões finais.

### 1.4 Estrutura

Já que este ferro fundido específico em análise é recente e muito pouco estudado, optou-se em particionar esta tese em dois capítulos, após esta introdução. No seguinte, será feito a revisão bibliográfica, onde será feita uma resenha do conhecimento já

publicado sobre a soldadura e sobre o material em causa, Sibodur® 450. Por último, no desenvolvimento, serão projetadas as experiências, descritas com detalhes e apresentando os resultados obtidos, além da realização de uma análise crítica dos mesmos, com as devidas conclusões.



# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 2.1 FERROS FUNDIDOS

### 2.1.1 FERRO CINZENTO

### 2.1.2 FERRO BRANCO

### 2.1.3 FERRO MALEÁVEL

### 2.1.4 FERRO NODULAR/DÚCTIL

### 2.1.5 FERRO VERMICULAR

## 2.2 FERROS FUNDIDOS DE ALTA RESISTÊNCIA

## 2.3 SIBODUR

## 2.4 SOLDAGEM

### 2.4.1 HISTÓRICO

### 2.4.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM

## 2.5 SOLDAGEM DE FERRO FUNDIDO

### 2.5.1 DIFICULDADES PARA A SOLDAGEM DO FERRO FUNDIDO

## 2.6 EFEITOS DOS PARÂMETROS NA SOLDAGEM E MICROESTRUTURA

### 2.6.1 PRÉ AQUECIMENTO

### 2.6.2 PÓS AQUECIMENTO

## 2.7 ELEMENTOS QUÍMICOS E SEUS EFEITOS NA SOLDAGEM

## 2.8 REGIÃO DA SOLDAGEM



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 FERROS FUNDIDOS

Constituídos por uma liga ferro-carbono, os ferros fundidos são compostos pertencentes a um grupo seletivo de materiais que são importantes à indústria, pois além de suas características intrínsecas, quando adicionados outros elementos de liga, se tornam eficazes para diversas aplicações [2].

Em sua maioria, a composição de carbono varia entre 2% e 4,5% (quanto maior a porcentagem de carbono, maior é a dureza agregada ao material) [3].

Devido à presença habitual do Silício (figura 1), adicionado como elemento de liga nos ferros fundidos, alguns autores os consideram como sendo uma liga ternária (Fe-C-Si). O Si está relacionado com a formação de grafite na estrutura, porém quanto maior a concentração de grafite maior será a fragilidade do material, não podendo ser forjado ou laminado a qualquer temperatura. Este elemento pode levar um ferro fundido a tender para o cinzento ou para o branco, independente do teor de C [2].

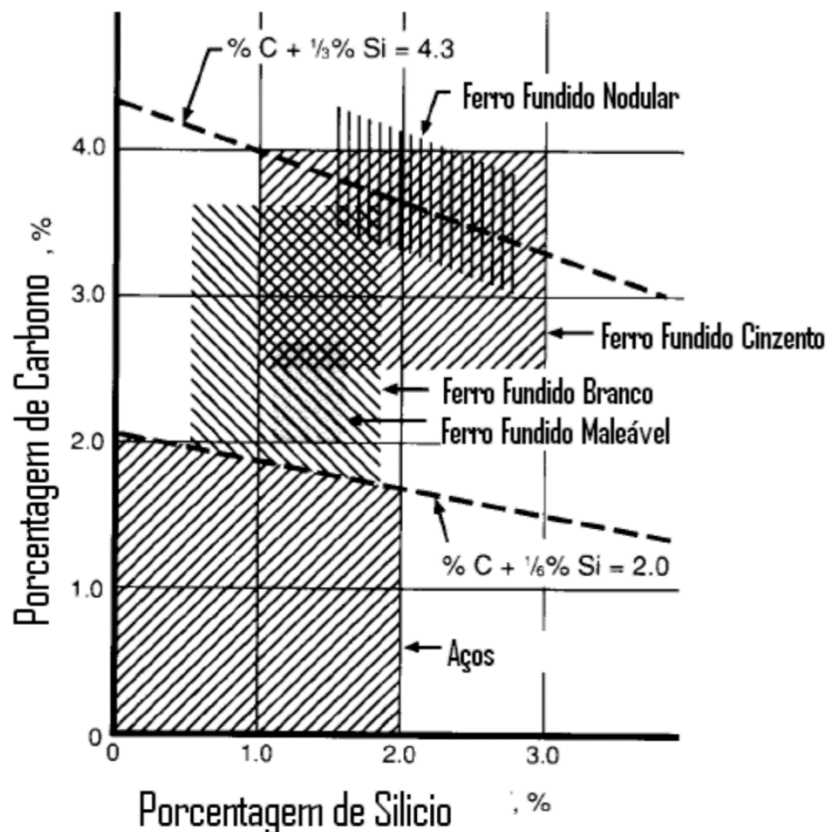


Figura 1 – Porcentagem de C e Si em aço e ferros fundidos [13].

Outros elementos (Tabela 1) são acrescentados como elementos de liga (S, Mn, P, entre outros) quando se deseja agregar alguma propriedade especial [4]. O manganês atua como estabilizador da cementita ( $Fe_3C$ ), contrabalançando o efeito do silício assim como elemento dessulfurante. Porém, o excesso de Mn faz com que este atue como estabilizador de perlita (caracterizando um efeito oposto ao Si), e, portanto, sendo usado para a produção de estrutura com matriz predominantemente perlítica [2].

Já o fósforo, além de agir como estabilizador de  $Fe_3C$ , reage com o ferro formando o fosfeto de ferro, o qual possui aparência branca e perfurada [2]. Os ferros fundidos são divididos em seis principais tipos:

- Ferro Cinzento (estrutura lamelar);
- Ferro Branco;
- Ferro Maleável;
- Ferro Nodular/Dúctil (podendo ser cinzento).
- Ferro Vermicular.
- Ferros Fundidos Dúcteis Austemperados (ADI – *Austempered Ductile Iron*).



Figura 2 – Coletor de escape fabricadas com ferro fundido [5].

Tabela 1 – Efeitos estruturais de alguns elementos de liga no ferro fundido [2].

<b>ELEMENTO</b>	<b>EFEITOS DURANTE A SOLIDIFICAÇÃO</b>	<b>EFEITO DURANTE A REAÇÃO EUTETÓIDE</b>
ALUMÍNIO (Al)	Forte grafitizante	Promove a formação de ferrita e grafita
ANTIMÔNIO (Sb)	Nas quantidades usadas, pequeno efeito	Forte estabilizador de perlita
BORO (B) [ATÉ 0,15%]	Forte grafitizante	Promove a formação de grafita
BORO (B) [ACIMA 0,15%]	Estabilizador de carboneto	Forte tendência à retenção da perlita
CROMO/CROMÍO (Cr)	Forte ação carbonetante. Forma carbonetos complexos muito estáveis	Forte tendência à formação de perlita
COBRE (Cu)	Grafitizante fraco	Promove a formação de perlita
MANGANÊS (Mn)	Fraca tendência carbonetante	Formador de perlita
MOLIBDÊNIO (Mo)	Fraca tendência carbonetante	Forte formador de perlita
NÍQUEL (Ni)	Grafitizante	Fracamente promotor de perlita
SILÍCIO (Si)	Forte grafitizante	Promove a formação de ferrita e grafita
TELÚRIO (Te)	Forte tendência carbonetante, mas não estabilizadora	Muito fraco estabilizador da perlita
ESTANHO (Sn)	Pequeno efeito na quantidade usada	Forte tendência à retenção da perlita
TITÂNIO (Ti) [até 0,25%]	Grafitizante	Promove a formação de grafita
VANÁDIO (V)	Forte tendência carbonetante	Forte formador da perlita

Alguns componentes microestruturais dos ferros fundidos que merecem destaque devido ao seu elevado grau de importância [14]:

- **Grafita:** considerada a forma mais estável do carbono puro no ferro fundido. Baixa densidade, baixa dureza e alta condutividade térmica são algumas de suas características físicas. Quanto ao seu formato, pode variar de veios (age como trincas na matriz de ferro) à esferoidal ou nodular (age como inibidoras de trincas).
- **Carboneto:** são compostos duros e frágeis oriundos da união entre ferro e carbono (cementita) ou da junção de outros elementos formadores, como, vanádio, cromo ou molibdênio. Ferros fundidos que apresentam grandes quantidades de carbonetos têm a sua resistência ao desgaste aumentada, entretanto se tornam frágeis e difíceis de serem usinados.
- **Ferrita:** também conhecida como ferro na fase ( $\alpha$ ) é a forma mais pura do ferro fundido e responsável por atribuir resiliência e ductilidade ao material. Sua presença acaba por diminuir a resistência mecânica e dureza do ferro.
- **Perlita:** a perlita é produzida após uma reação eutetóide na qual é formada uma estrutura de cementita em uma matriz ferrítica. Uma especificidade da perlita é a combinação entre a alta resistência com a fraca redução da ductilidade, mantendo elevada ductilidade.
- **Martensita:** é composta por uma solução sólida supersaturada de carbono no ferro devido a um acelerado resfriamento. A martensita é normalmente revenida (tratamento térmico para reduzir a porcentagem de carbono a partir da precipitação de carbonetos) a fim de se obter uma estrutura que tenha alta resistência mecânica e resistência ao desgaste. Sem o processo de revenimento, a martensita apresenta uma elevada dureza, bem como fragilidade.

- **Austenita:** compreende-se por uma fase que é formada a elevadas temperaturas e consiste em carbono dissolvido no ferro. Em ferros fundidos austeníticos e austemperados, a austenita se faz presente à temperatura ambiente. Nos austeníticos, ela sofre uma estabilização devido à adição de níquel (teor entre 18-36%). Já em ferros austemperados (também chamados ADI – *Austempered Ductile Iron*), a austenita está contida na microestrutura, devido a um rápido resfriamento com a supressão da formação de perlita e pela supersaturação de carbono durante a austêmpera, que retarda o início da transformação de austenita para martensita a temperaturas inferiores à ambiente.
- **Bainita:** é uma mistura de ferrita e carbonetos. Sua formação se deve à adição de elementos de liga ou por tratamento térmico.
- **Ausferrita:** composta por uma mistura de ferrita acicular e austenita com carbono estabilizado, formadas durante a transformação isotérmica da austenita a temperaturas superiores à temperatura de início de formação da martensita (austêmpera).

### 2.1.1 FERRO CINZENTO

No ferro fundido cinzento, o carbono se apresenta na forma de grafita (em flocos ou em lâminas). A formação da grafita se deve a alguns fatores, os quais podemos citar [3]:

- Adição do silício como elemento de liga: este favorece a decomposição da cementita em ferro mais grafita. Logo, essa liga apresenta um maior teor de silício.
- Resfriamento lento;

Tabela 2 – Faixa de composição do ferro fundido cinzento, sem elementos de liga [2].

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)	
CARBONO (C)	2,5 – 4,0
SILÍCIO (Si)	1,0 – 3,0
MANGANÊS (Mn)	0,2 – 1,0
ENXOFRE (S)	0,02 – 0,25
FÓSFORO (P)	0,02 – 1,00

Dentre as suas características, se destacam três: boa usinabilidade; frágil à tração, a qual se deve à presença da grafita em forma de lâminas/lamelas em sua microestrutura; resistência à compressão; grande capacidade de absorver vibrações; resistência ao desgaste; além de sua fluidez, pois quando fundido, é possível fabricar componentes com formatos variados e alta complexidade geométricas, incluindo paredes relativamente finas.

São utilizados na indústria automobilística para a fabricação de blocos e cabeçotes de motor, bem como carcaças e discos de embreagem. Em máquinas, servem de base na construção de corpos, suportes, barras e barramentos. Alguns equipamentos agrícolas também contêm peças oriundas de ferro fundido cinzento [3, 8].



Figura 3 – Tarugo de ferro fundido [6].

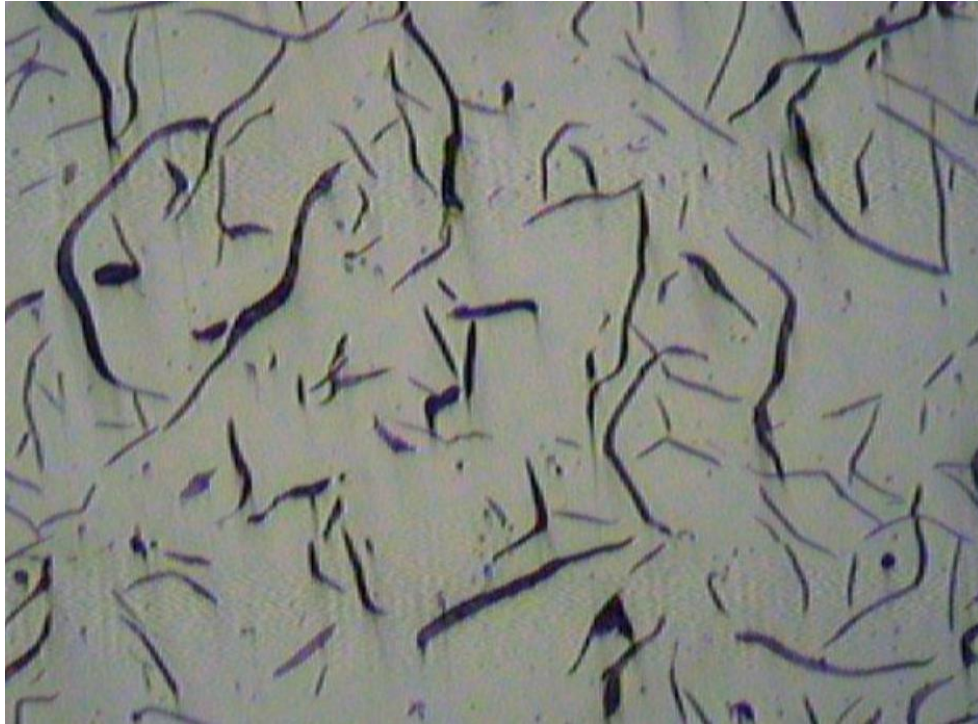


Figura 4 – Microestrutura do ferro fundido cinzento [7].

### 2.1.2 FERRO BRANCO

O ferro fundido branco é constituído no processo de solidificação a partir de um rápido resfriamento. Grande parte do carbono origina o carboneto de ferro (cementita). Assim, sua superfície se apresenta com uma coloração clara (dando-se o nome de ferro fundido branco). Apresenta um baixo teor de silício [3].

Alguns elementos de liga são adicionados, como: molibdênio, cromo e vanádio. Esses componentes químicos funcionam como estabilizadores dos carbonetos, gerando um aumento da dureza do composto e, conseqüentemente, tornando-o frágil.

Entre outras características, esse tipo de ferro fundido apresenta uma grande resistência à compressão, ao desgaste e à abrasão. Assim sendo, são empregados em equipamentos utilizados no manuseio de terra, mineração, moagem e em rodas de vagões mineiros (ou outros de menor responsabilidade).

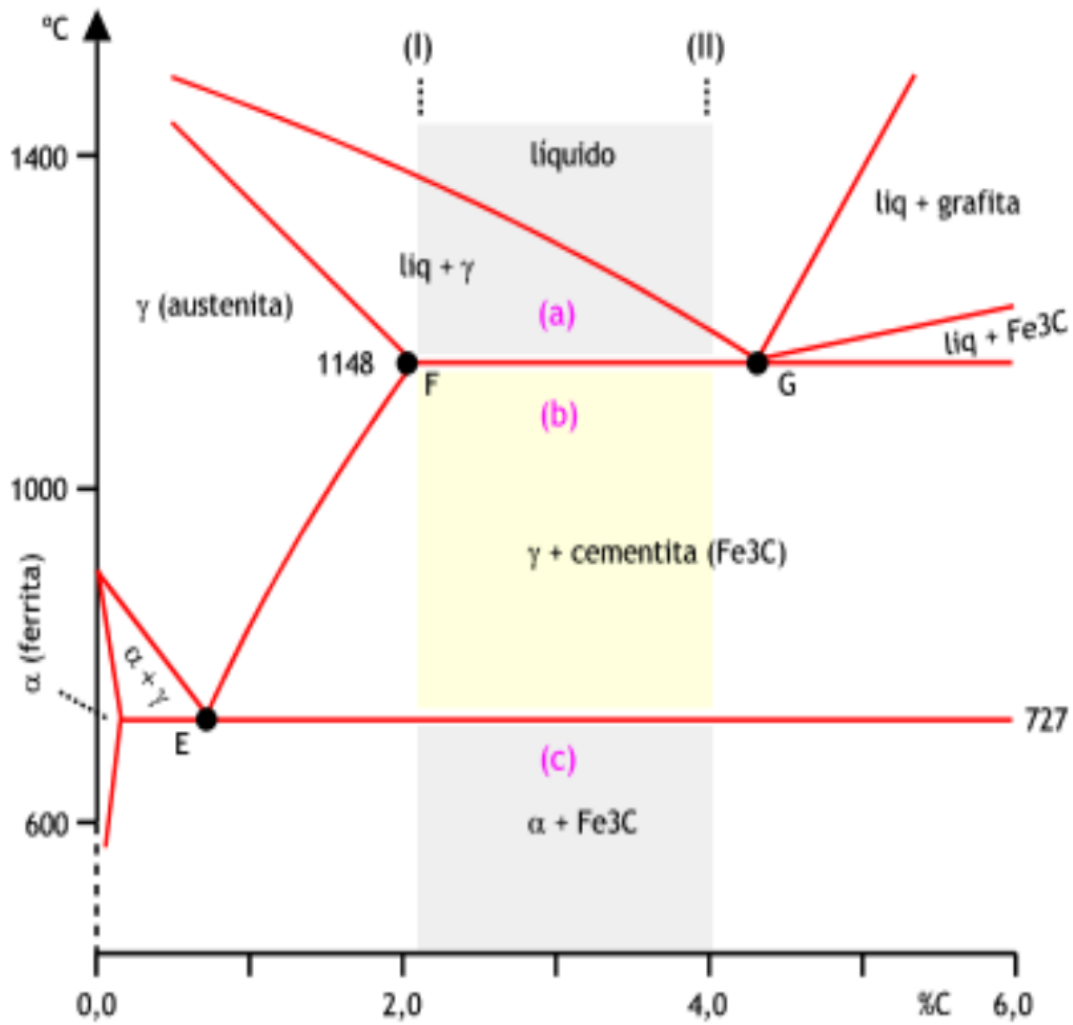


Figura 5 – Diagrama metaestável do ferro fundido branco [9].

Tabela 3 – Faixa de composição do ferro fundido branco, sem elementos de liga [2].

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)	
CARBONO (C)	1,8 – 3,6
SILÍCIO (Si)	0,5 – 1,9
MANGANÊS (Mn)	0,25 – 0,80
ENXOFRE (S)	0,06 – 0,20
FÓSFORO (P)	0,06 – 0,20

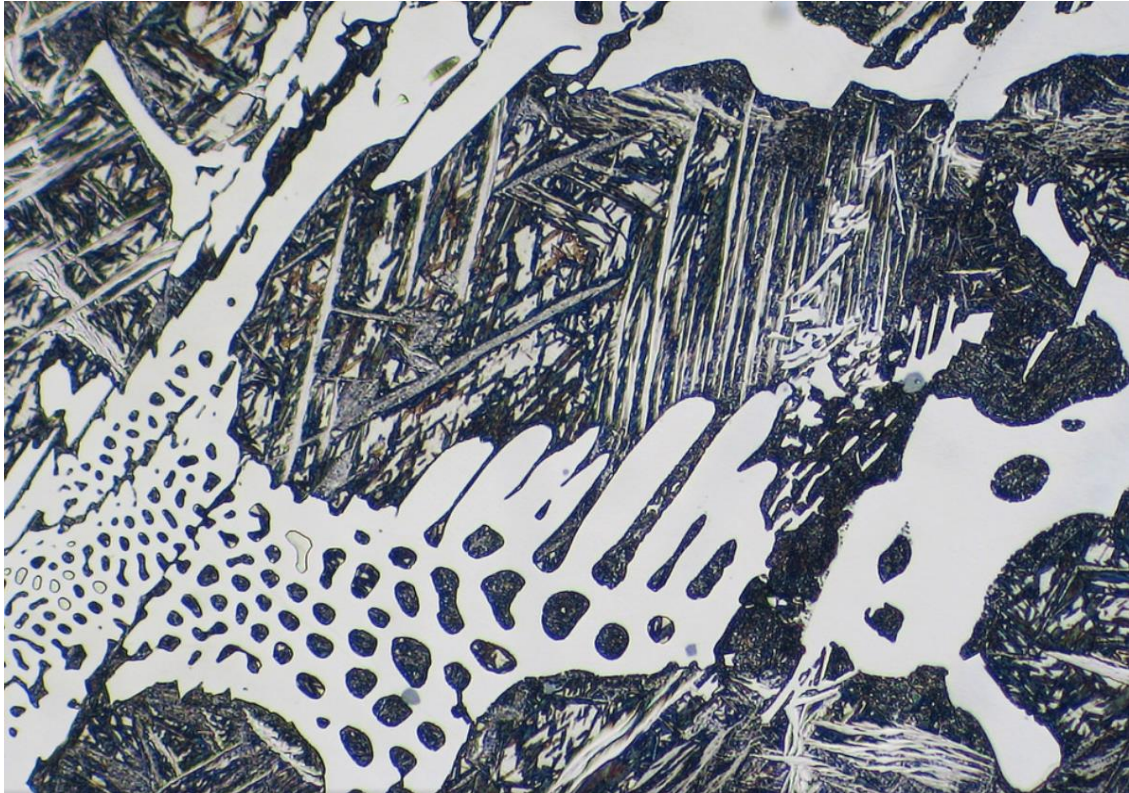


Figura 6 – Microestrutura típica do ferro fundido branco (a região clara é caracterizada pela presença da cementita) [8].

### 2.1.3 FERRO MALEÁVEL

O ferro fundido maleável é produzido a partir de um ferro fundido branco, o qual é submetido a um tratamento térmico, por várias horas. As peças que são fabricadas desse material apresentam maior resistência ao choque e a deformações. Dependendo das condições do tratamento térmico, o ferro pode apresentar o núcleo preto ou branco. Este ferro reúne as principais vantagens do aço e do ferro fundido cinzento: alta resistência mecânica e alta fluidez no estado líquido. Essas características permitem que possa ser utilizado na produção de peças complexas e com espessura reduzida [2, 3].

- Núcleo preto: submetido a um tratamento térmico em atmosfera neutra, em que a cementita se decompõe em ferro e carbono, o qual origina uma grafita compacta, se diferenciando da forma laminada dos ferros fundidos cinzentos [3].

**Aplicações:**

- suporte de molas;
  - caixas de direção;
  - cubos de roda;
  - bielas;
  - conexões para tubulações hidráulicas e industriais.
- Núcleo branco: tratado termicamente em atmosfera oxidante, faz com que o carbono seja removido por descarbonetação, não havendo a formação da grafita. Assim, o ferro fundido adquire características similares às de um aço de baixo carbono, podendo ser soldado.

**Aplicações:**

- barras de torção;
- corpos de mancais;
- flanges para tubos de escapamento.

Tabela 4 – Faixa de composição do ferro fundido maleável, sem elementos de liga [2].

<b>COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)</b>	
CARBONO (C)	2,2 – 2,9
SILÍCIO (Si)	0,5 – 1,9
MANGANÊS (Mn)	0,15 – 1,20
ENXOFRE (S)	0,02 – 0,20
FÓSFORO (P)	0,02 – 0,20

**2.1.4 FERRO NODULAR/DÚCTIL**

O ferro fundido nodular surgiu através de pesquisas realizadas em laboratório nas quais foi adicionado magnésio (na forma de uma liga de Cu-Mg) ao ferro fundido cinzento. Após a solidificação, foi notado que ao invés de veios de grafita o ferro fundido

resultante apresentava a grafita, em forma de nódulos. Com o auxílio de tratamentos térmicos adequados, esse material pode apresentar diversas propriedades mecânicas, como [2, 3, 14]:

- Ductilidade;
- Tenacidade;
- Usinabilidade;
- Resistência mecânica e à corrosão.

Este tipo de ferro fundido não é apenas um material, mas sim, uma família. Sua característica comum é a presença da grafita em nódulos esféricos, que são responsáveis por inibirem a propagação de trincas e tornarem esse ferro dúctil (uma segunda nomenclatura).

A gama de ferros fundidos nodulares é constituída por: ferro fundido nodular ferrítico, ferro fundido nodular ferrítico-perlítico, ferro fundido nodular perlítico, ferro fundido nodular martensítico, ferro fundido nodular bainítico, ferro fundido nodular austenítico e ferro fundido nodular austemperado (ADI) [14].

Tabela 5 – Faixa de composição do ferro fundido nodular, sem elementos de liga [ASTM A536].

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)	
CARBONO (C)	3,2 – 4,1
SILÍCIO (Si)	1,8 – 3,0
MANGANÊS (Mn)	0,10 – 1,00
ENXOFRE (S)	0,035 Max
FÓSFORO (P)	0,05 Max
MAGNÉSIO (Mg)	0,025 – 0,06

Devido ao seu menor custo de processamento, o ferro fundido nodular vem substituindo alguns tipos de aços e ferros fundidos maleáveis. É utilizado principalmente na indústria

automobilística, onde serve de matéria-prima para fabricação de mancais, virabrequins, cubos de roda, caixas de diferencial e peças do sistema de transmissão (automóvel, caminhões ou tratores) [3].

### 2.1.5 FERRO VERMICULAR

O ferro fundido vermicular foi descoberto na década de 60, meio ao acaso, após erros de composição química para a fabricação de ferro fundido nodular. Notou-se na microestrutura do material resultante que a grafita se apresentava na forma de vermes, e não no formato esférico. Só na década de 90, após realização de muitos estudos e sua fabricação em larga escala, é que o ferro fundido de grafita compactada (como também é conhecido) ganhou notoriedade [10,11].

Suas propriedades são consideradas intermediárias entre os cinzentos e os nodulares, agregando as vantagens de ambos.

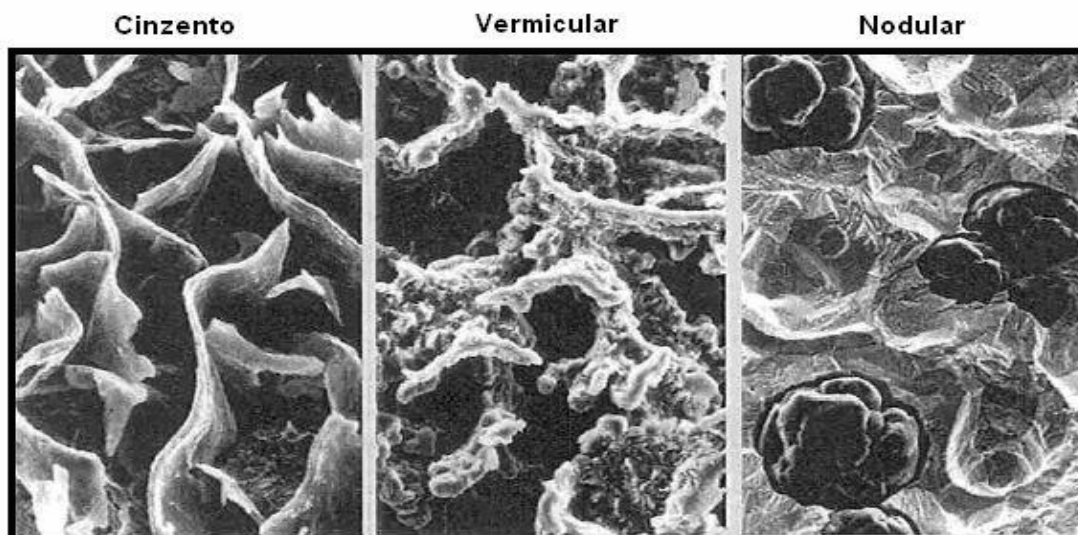


Figura 7 – Comparação entre as grafitas nos ferros fundidos [12].

Observando a Figura 7, nota-se que a grafita possui um formato alongado e orientado aleatoriamente como no ferro cinzento. Entretanto os flocos da grafita são mais curtos,

mais densos e apresentam bordas arredondas. Essas características lhe garantem uma boa resistência mecânica, tenacidade, capacidade de amortecimento, resistência a choques térmicos e condutividade térmica [11]. A principal desvantagem é a dificuldade em ser usinado.

Tabela 6 – Faixa de composição do ferro fundido vermicular, sem elementos de liga [2].

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)	
CARBONO (C)	2,5 – 4,0
SILÍCIO (Si)	1,0 – 3,0
MANGANÊS (Mn)	0,2 – 1,0
ENXOFRE (S)	0,01 – 0,03
FÓSFORO (P)	0,01 – 0,10

Este tipo de ferro fundido é amplamente utilizado na indústria automobilística, destacando-se na fabricação de blocos de motores a diesel, além de coletores de escapamento e cabeçotes.



Figura 8 – Bloco de motor a diesel [11].

## 2.2 FERROS FUNDIDOS DE ALTA RESISTÊNCIA

Os ferros fundidos nodulares austemperados (ADI - *Austempered Ductile Iron*) são considerados de alta resistência, uma vez que a realização do tratamento térmico de austêmpera acrescenta uma melhora significativa em suas características, elevando a sua resistência mecânica, absorção de impacto, bem como a relação entre alongamento e resistência à tração. Além disso, as mudanças microestruturais promovem um aumento da resistência à fadiga, o que o torna um material com alto rendimento [17-23].

Uma característica determinante dessa classe de materiais é a microestrutura ausferrítica (formada por agulhas de ferrita e placas de austenita estável de alto teor de carbono), como pode ser observada na Figura 7 [16].

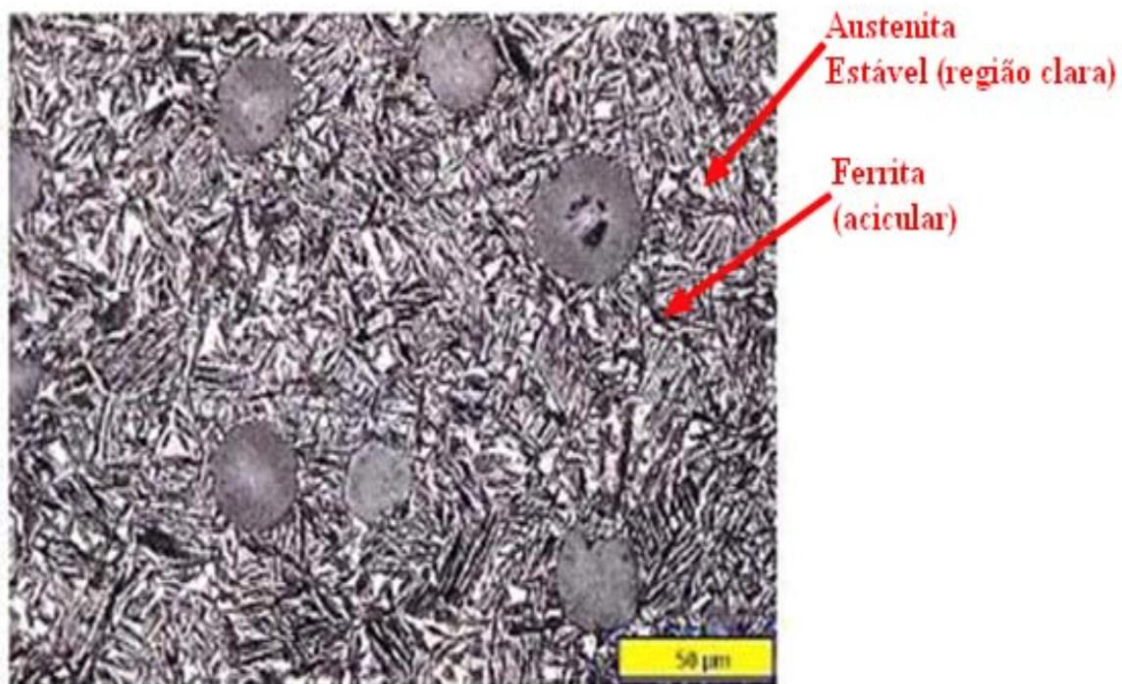


Figura 9 – Microestrutura típica dos ADI [16].

Nos ferros fundidos, ainda que o tratamento térmico de austêmpera tenha a mesma nomenclatura que nos aços, o objetivo é diferente. Devido ao baixo teor de silício presente nos aços, na austêmpera ao invés de formar ferrita, o resultado é uma mistura de ferrita e precipitação de carbonetos de ferro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), denominada bainita.

A bainita é indesejável nos ferros fundidos pois a presença de  $(Fe_3C)$  em sua microestrutura prejudica a ductilidade e a resistência ao impacto. Porém, a combinação com as fases que compõe o microconstituente ferrita, o ferro fundido ganha um aumento da resistência à tração sem perda significativa de ductilidade [15]. Assim, o ADI pode ser considerado em um patamar superior (Figura 10) na relação entre resistência mecânica e alongamento, quando comparado a ferros fundidos brutos ou submetidos a tratamento térmico de têmpera e revenimento tradicionais.

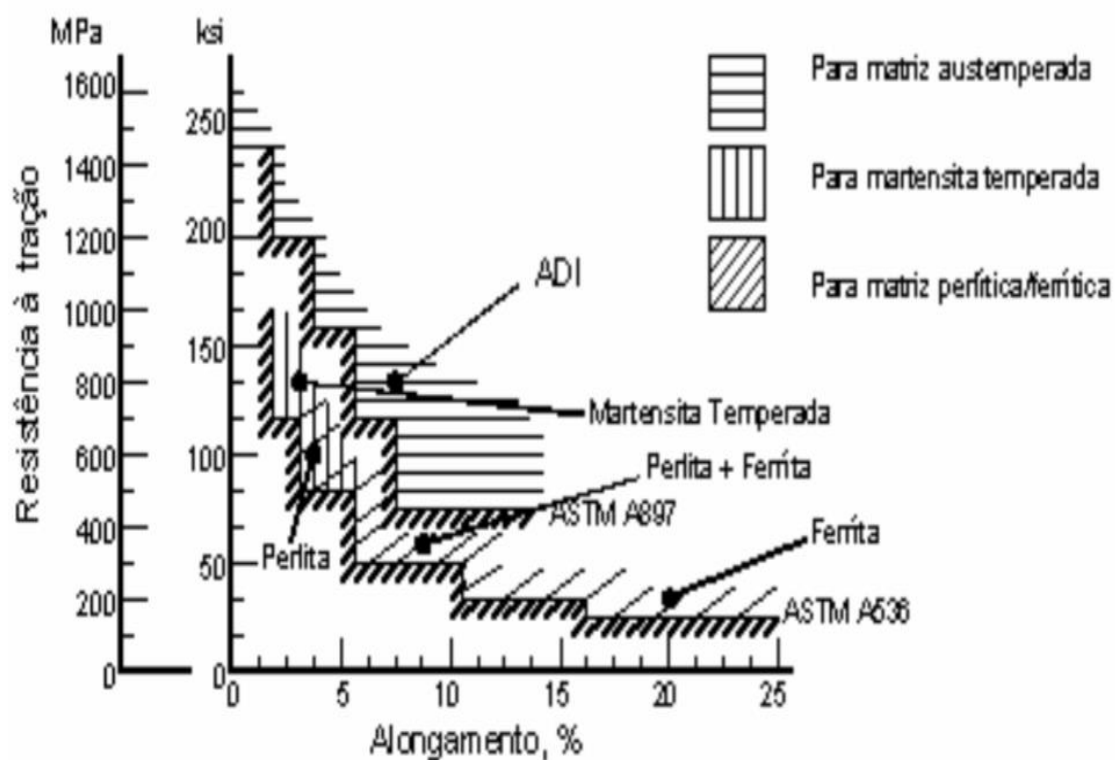


Figura 10 – Comparativo entre tratamentos térmicos em ferros fundidos nodulares [33]. Adaptado [32].

Levando em consideração o ganho em propriedades físicas e mecânicas, o ADI pode ser empregado para a fabricação de estruturas que anteriormente eram construídas à base de ferros nodulares clássicos, já que podem apresentar as mesmas características em uma secção bastante reduzida. Devido à sua boa relação resistência/peso, em alguns projetos pode-se diminuir aproximadamente 8% do peso em relação aos aços equivalentes [23-31].

O tratamento térmico de austêmpera (Figura 11) em ferros fundidos nodulares era realizado através de banhos de sal fundido, como meio de resfriamento, a fim de garantir os patamares de temperatura adequados. A utilização desses materiais requer um controle ambiental rígido, em função do impacto que podem causar ao meio ambiente. Banhos que utilizem algumas ligas, em substituição dos sais, já estão sendo estudados, como uma liga metálica Zn-Al [15]. Atualmente utilizam-se fornos de atmosfera controlada para a realização desse tratamento.

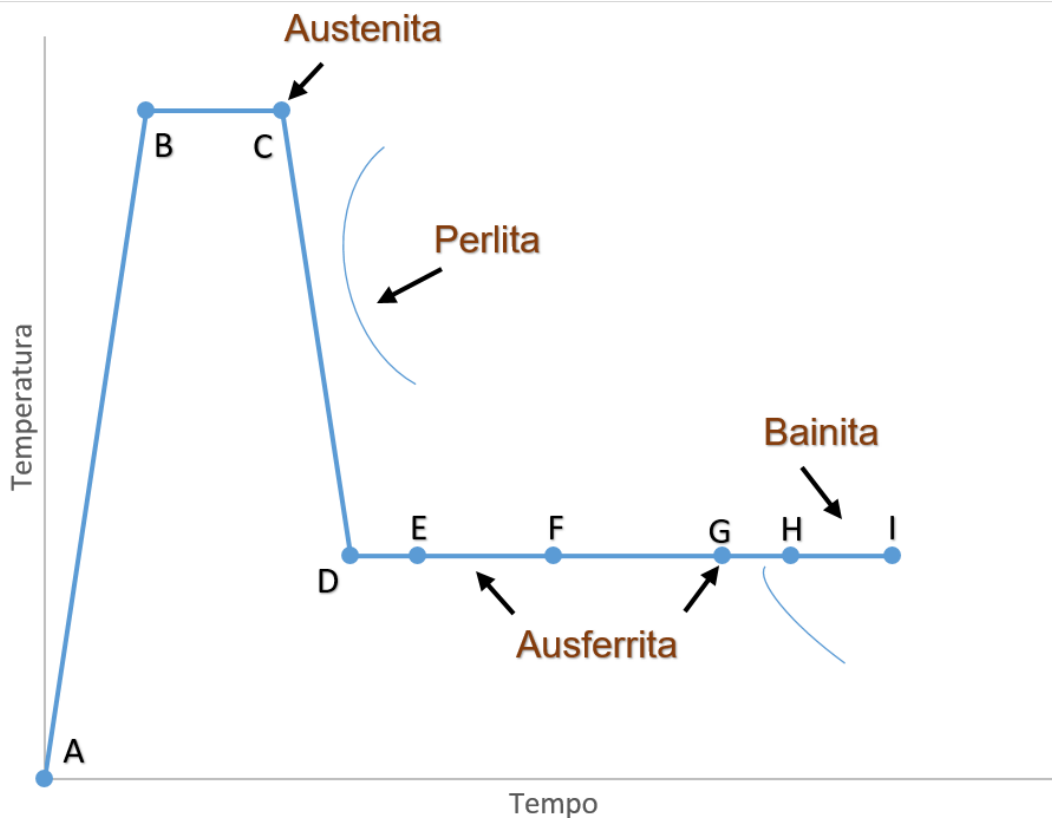


Figura 11 – Tratamento térmico de austêmpera em ferros fundidos (ADAPTADO) [34].

O processo descrito acima é dividido em três etapas (figura 11):

- **Etapa 1:** o material é aquecido (trecho A-B) até uma temperatura na faixa de 840 a 950 °C (patamar B-C), onde é mantido por período de tempo suficiente para produzir uma matriz totalmente austenítica e homogênea, saturada em carbono. Os nódulos de grafita representam um estoque de carbono e promovem a saturação desse através de um processo de difusão [33].

- Etapa 2:** após este processo, resfria-se de forma acelerada o material (trecho C-D) até à temperatura de austêmpera na faixa de 230 a 400 °C, isto é, abaixo da temperatura de transformação de perlita e acima da temperatura de transformação da martensita. De acordo com o formato geométrico da peça, escolhe-se o meio de resfriamento (óleo quente, banho de sal, nevoeiro pulverizado, leito fluidizado ou ar ventilado) mais eficiente e que evite a formação de outras fases indesejáveis, como na Figura 11 [33].
- Etapa 3:** deve-se manter isotermicamente na temperatura de transformação (trecho D-G), também conhecido como janela de processo, para a formação da ausferrita desejada. A austenita ficará com um teor de carbono na faixa de 1,8 a 2,2%. Por fim, resfria-se a peça lentamente, ao ar, para evitar tensões internas [35,36].

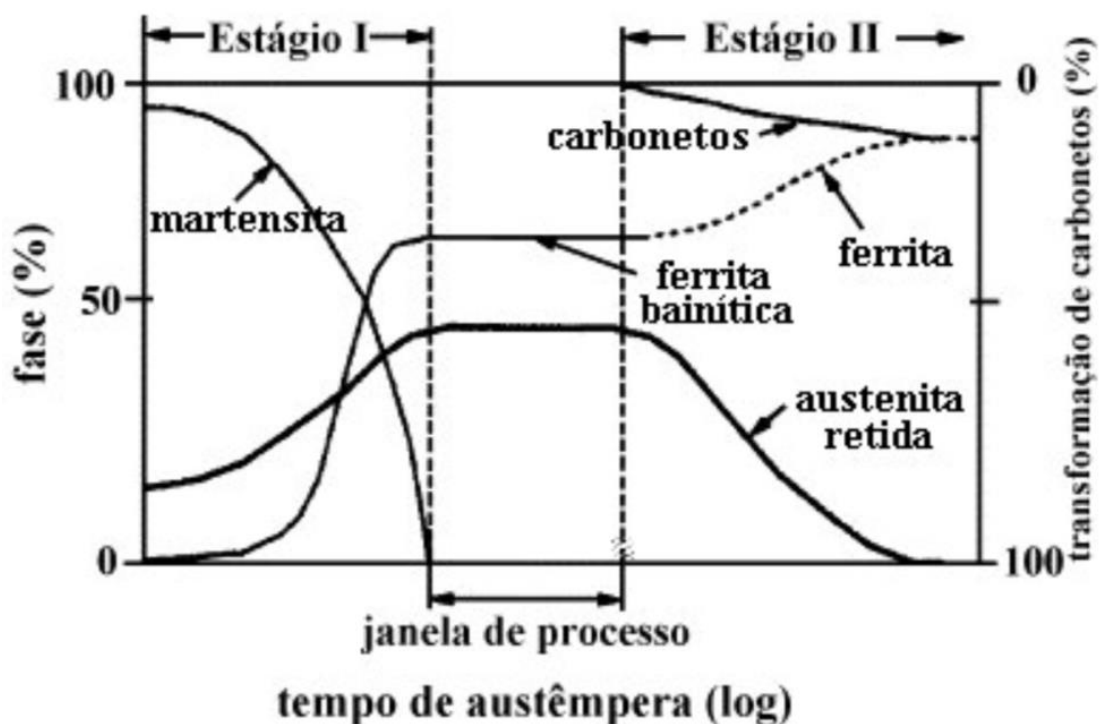


Figura 12 – Estágios do processo de austêmpera em ferros fundidos [33].

Devido às suas características, o ADI é empregado na construção das mais variadas peças. Na indústria ferroviária é utilizado para a fabricação de rodas de locomotivas e vagões; na indústria automobilística pode ser citada a sua utilização em virabrequins

(Figura 13), bielas, componentes de suspensão, suporte de molas de caminhões, entre outros.

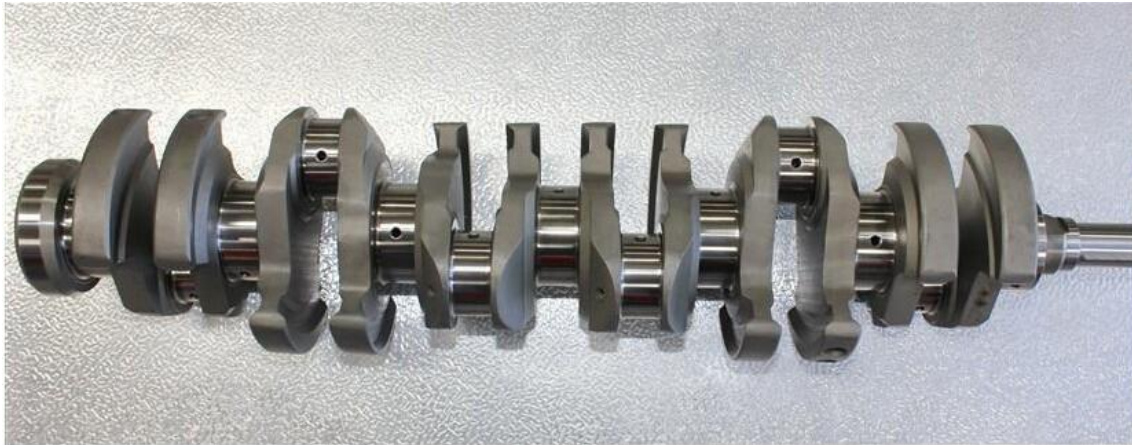


Figura 13 – Virabrequim de motor turbo da Ford.

### 2.3 SIBODUR

SiboDur é uma família de ferros fundidos dúcteis desenvolvidos e patenteados pela Georg Fischer (GF), que apresentam características excelentes como leveza, alta resistência à tração, tenacidade, alongamento, entre outros. Essas vantagens em um único ferro fundido torna o Sibodur® competitivo em um mercado onde antes ligas de alumínio e aços ganhavam preferência. Com a adição de elementos de liga (silício, manganês, cobre, entre outros) na confecção do ferro fundido, a GF garante a esse material resistência à tração que varia de 450 a 800 MPa e taxa de alongamento que variam de 6 a 23 por cento, algo que não se encontra em nenhum outro tipo de ferro fundido dúctil.

Porém a adição desses elementos é feita de maneira controlada, por exemplo: o acréscimo excessivo de grafite esferoidal acarreta no endurecimento do ferro, tornando-o muito frágil. Por outro lado, o elemento silício auxilia na ductilidade do metal.

Suas aplicações na indústria automobilística são as mais variadas, podendo destacar: rolamento longitudinal, cubos de rodas, pinças de freio, engrenagens, entre outros.

Tabela 7 – Propriedades dos diferentes tipos de SiboDur® [52].

PROPRIEDADE		UNIDADE	SIBODUR 450-17 HD	SIBODUR 450-17 HS	SIBODUR 700
COMPOSIÇÃO QUÍMICA	C	%	3.3 – 3.7	3.3 – 3.7	3.35 – 3.65
	Si	%	2.6 – 2.8	2.8 – 3.4	2.8 – 3.3
	Mn	%	0.05 – 0.3	0.05 – 0.3	0.15 – 1.0
	Cu	%	0.05 – 0.3	0.05 – 0.3	0.5 – 1.1
MATRIZ	Perlítica	%	≤ 20 (balanço: ferrita)	≤ 20 (balanço: ferrita)	60-90 (balanço: ferrita)
RESISTENCIA À TRAÇÃO	R <sub>m</sub>	N/mm <sup>2</sup>	≥ 450	≥ 450	≥ 700
0.2%- TENSÃO DE ESCOAMENTO	R <sub>p0.2</sub>	N/mm <sup>2</sup>	≥ 310	≥ 310	≥ 440
ALONGAMENTO	A	%	≥ 17	≥ 17	6 --12
0.2% RESISTÊNCIA À TENSÃO DE COMPRESSÃO	σ <sub>d0.2</sub>	N/mm <sup>2</sup>	≥ 370	≥ 385	≥ 475
TENSÃO DE CISALHAMENTO	T <sub>ab</sub>	N/mm <sup>2</sup>	≥ 350	≥ 380	≥ 545
MÓDULO DE YOUNG	E	kN/mm <sup>2</sup>	176 (RT) 155 (400 °C)	176 (RT) 155 (400 °C)	176 (RT) 157 (400 °C)
MÓDULO DE CISALHAMENTO	G	kN/mm <sup>2</sup>	68	68	68
COEFICIENTE DE POISSON	ν	-	0.285	0.285	0.289
FORÇA DE IMPACTO	a	J/cm <sup>2</sup>	110 (-40 °C) 120 (RT)	100 (-40 °C) 110 (RT)	11 (-40 °C) 40 (RT)
ISO-V NOTCH RESISTÊNCIA AO IMPACTO	a <sub>k</sub>	J/cm <sup>2</sup>	6 (-40 °C) 15 (RT)	5 (-40 °C) 13 (RT)	2 (-40 °C) 5 (RT)
PRESSÃO DE CONTATO (DEFORMAÇÃO: 0.02 MM)	p <sub>G0.02</sub>	N/mm <sup>2</sup>	> 940	> 940	> 1350
DUREZA BRINELL	HB	HBW	150 - 190	150 - 190	240 - 290
PULL-PUSH TENSÃO À FADIGA (R = -1)	σ <sub>A</sub>	N/mm <sup>2</sup>	200 (P <sub>ū50%</sub> ) 175 (P <sub>ū90%</sub> )	250 (P <sub>ū50%</sub> ) 235 (P <sub>ū90%</sub> )	260 (P <sub>ū50%</sub> ) 245 (P <sub>ū90%</sub> )
DENSIDADE	ρ	g/cm <sup>3</sup>	7.1 (RT) 6.9 (600 °C)	7.1 (RT) 6.9 (600°C)	7.1 (RT) 6.9 (600°C)
COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA	α	10-6 /K	12.2 (20 - 100 °C) 13.6 (20 - 600 °C)	12.3 (20 - 100 °C) 13.7 (20 - 600 °C)	11.8 (20 - 100 °C) 13.7 (20 - 600 °C)
CAPACIDADE TÉRMICA ESPECÍFICA	c <sub>p</sub>	J/(g·K)	0.51 (100 °C) 0.74 (600 °C)	0.52 (100 °C) 0.76 (600 °C)	0.52 (100 °C) 0.73 (600 °C)
RESISTIVIDADE ELÉTRICA ESPECÍFICA	ρ <sub>e</sub>	μΩ·m	0.51 (RT) 0.95 (600 °C)	0.55 (RT) 0.97 (600 °C)	0.62 (RT) 0.77 (600 °C)
CONDUTIVIDADE TÉRMICA	λ	W/(K·m)	30.9 (100 °C) 27.9 (600 °C)	30.9 (100 °C) 28.2 (600 °C)	28.8 (100 °C) 26.5 (600 °C)



Figura 14 – Braço de controle transversal fabricado com Sibodur 450® [52].

## 2.4 SOLDAGEM

### 2.4.1 HISTÓRICO

A soldagem é popularmente conhecida como a arte de juntar ou unir dois ou mais materiais metálicos. Sabe-se que este artifício já era usado desde a pré-história (3000 a.C.), através da brasagem, a qual utilizava ligas de ouro e cobre, ou então de chumbo e estanho. Entretanto, não se conheciam técnicas de extrair das fontes de energia (lenha e carvão mineral, matrizes energéticas à época) poder calorífico capaz de unir os metais. Após a descoberta da energia elétrica, processos de soldagens que conhecemos hoje começaram a ser desenvolvidos, no final do século XIX [43].

Em 1885, o arco elétrico foi empregado pela primeira vez por N. K. Bernardos. Nesse procedimento foi utilizado um elétrodo de grafita ou carvão (Figura 15) para a obtenção do arco voltaico [44].

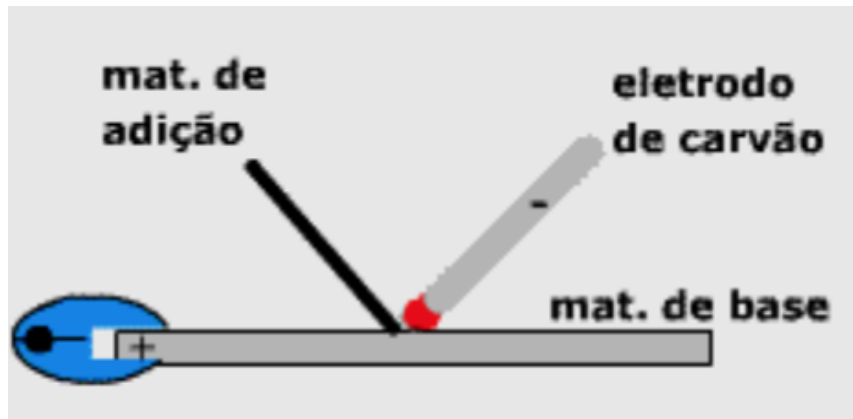


Figura 15 – Representação do arco elétrico de Bernardos [44].

Após o fechamento do arco elétrico, Bernardos manteve o eletrodo de carvão a uma distância de 2 mm no material de base e, manualmente, aplicava o metal de adição na poça de fusão, que devido ao calor gerado pelo arco, gerava a fusão entre o metal de enchimento e o metal de base.

Anos depois, baseado no princípio anterior, Zerener desenvolveu um segundo método para fundir metal de base. Diferenciava-se do processo de Bernardos, uma vez que empregou dois eletrodos de carvão, um ligado ao polo (+) e o outro ao polo (-), juntamente com a introdução manual do material de adição (figura 16). Esse arranjo gerava um campo magnético de alta intensidade, ocorrendo a fusão e, conseqüentemente, deposição do material na poça de fusão [43].

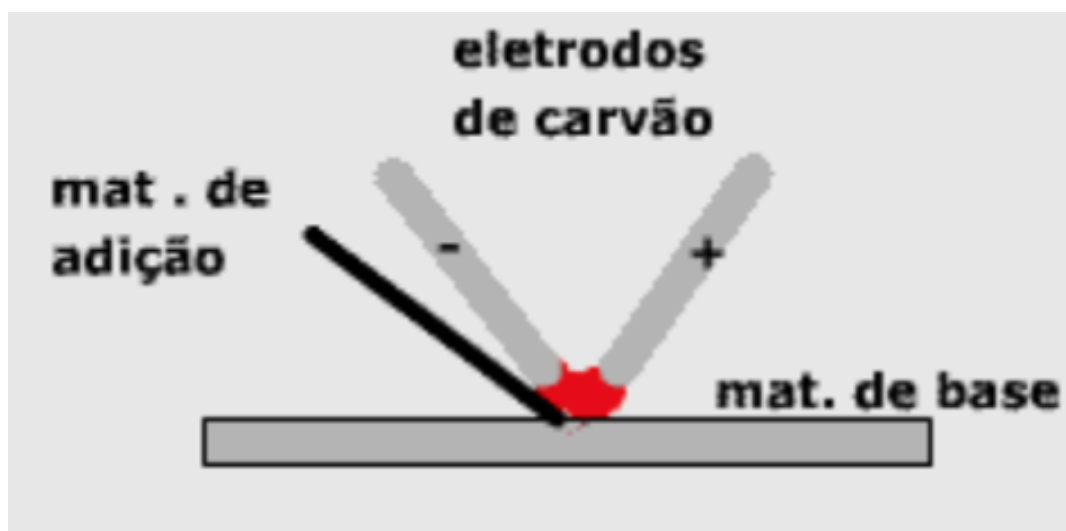


Figura 16 – Representação do arco elétrico de Zerener [44].

Em meados de 1890, Slavianoff utilizou um elétrodo metálico que se fundia na poça de fusão, tornando-se pioneiro no emprego desta técnica e entrou para a história da soldagem (Figura 17). Passados alguns anos, um sueco chamado Oscar Kjellberg, utilizou um elétrodo metálico revestido (Figura 18) por um material, formando escória. Com o resultado, notou-se que havia ocorrido uma melhora sensível quanto à qualidade da junta soldada, iniciando a “era dos elétrodos revestidos”, sendo utilizado até aos dias de hoje [43].

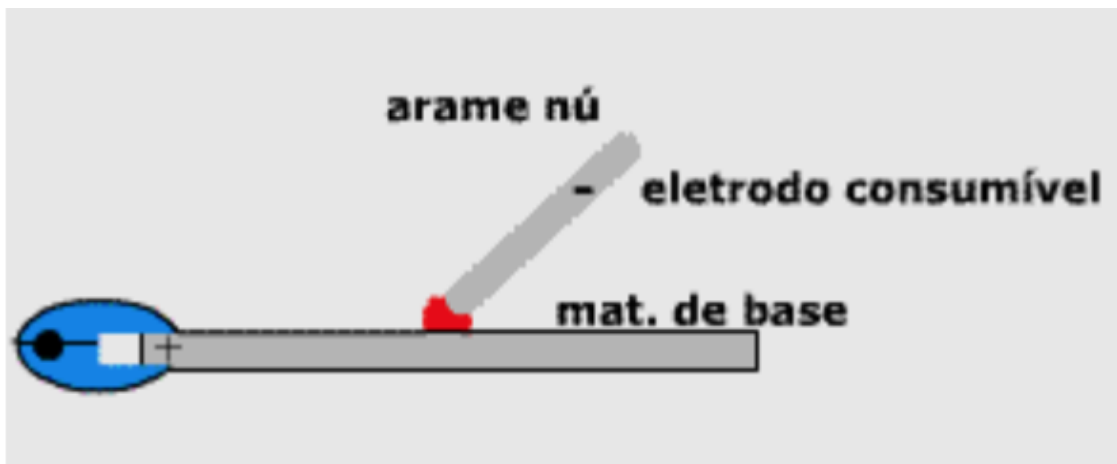


Figura 17 – Representação do arco elétrico de Slavianoff [44].

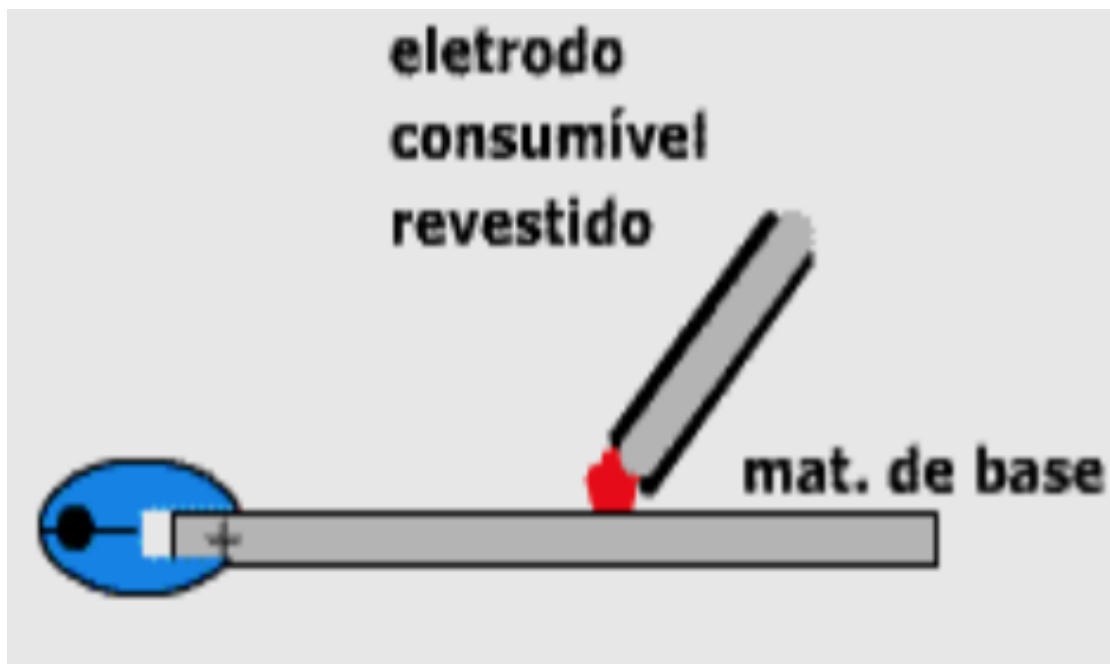


Figura 18 – Representação do arco elétrico de Kjellberg [44].

Observando as descobertas e os períodos em que elas ocorreram, pode-se considerar que existiram “fases áureas” no campo da soldagem. A primeira pode ser compreendida entre os anos de 1885 e 1901, quando foram desenvolvidos os trabalhos citados acima e que serviram de base para os métodos que são utilizados até hoje. Após alguns anos de “estagnação”, já no século XX, uma segunda fase teve início. Lungumir desenvolveu um processo de soldagem por meio de hidrogênio atômico e elétrodos de tungstênio (Figura 19), em 1926. Já Hobart e Denver, patentearam anos depois, um processo de soldagem em atmosfera de gás inerte.

Posteriormente, as técnicas existentes foram aperfeiçoadas e algumas automatizações dos processos foram introduzidas. Uma terceira fase pode ser considerada durante a década de 50, quando com os adventos dos avanços tecnológicos, processos como soldagem por pressão a frio, por atrito, em atmosfera de gás ativo ou  $\text{CO}_2$ , eletroescória, entre outros foram desenvolvidas e patenteadas [43].

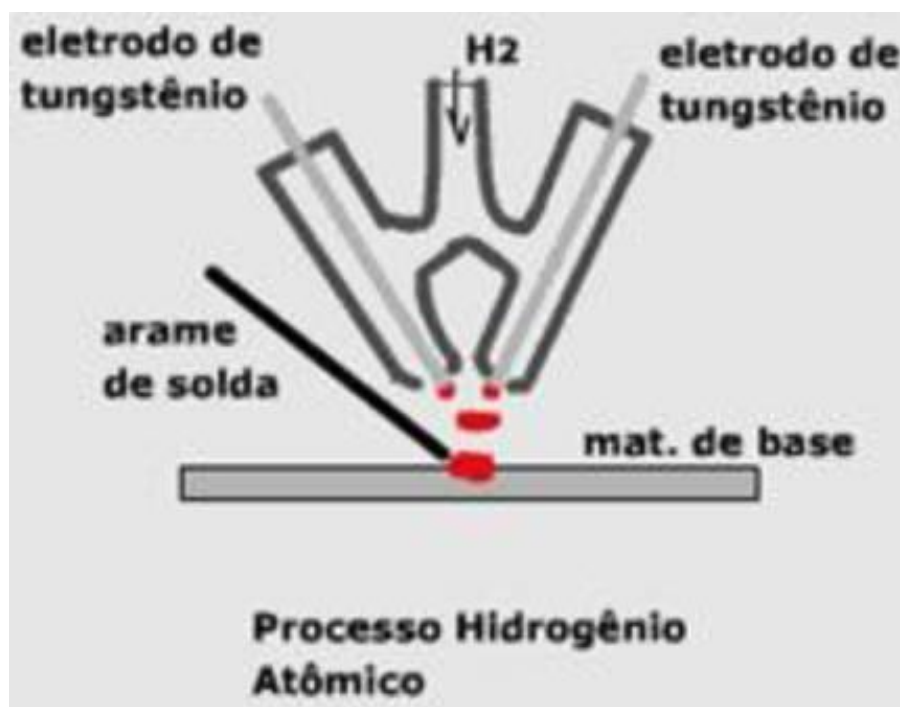


Figura 19 – Representação do arco elétrico de Lungumir [44].

## 2.4.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM

Alguns autores dividem as ligações em dois grupos: força macroscópica e força microscópica. No primeiro caso, a junção é realizada através da parafusagem ou rebiteagem, as quais através de sua resistência ao cisalhamento somada com as forças de atrito entre as superfícies de contato, garantem resistência à junta. Já no segundo caso, que são caracterizados por forças intermoleculares e interatômicas, a união é conseguida devido a aproximação dos átomos ou moléculas das peças a serem unidas, com um material intermediário sendo adicionado à junta, como ocorre na brasagem e soldagem [37].

A soldagem se destaca como o processo mais importante, uma vez que é utilizado desde a indústria microeletrônica até indústrias pesadas, que fabricam peças de grandes dimensões como na indústria naval, petrolífera, entre outras.

Na tentativa de buscar uma definição para soldagem, nota-se que esse termo abrange diferentes processos utilizados na fabricação e recuperação de peças e equipamentos. Entretanto, a definição mais abrangente e significativa é adotada pela Associação Americana de Soldagem (*American Welding Society – AWS*):

*“Processo de união de materiais usado para obter coalescência (união) localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição.”*

O processo de soldagem que será abordado está incluído no grupo que recebe a seguinte nomenclatura: *processos de soldagem por fusão*. A Tabela 8 apresenta uma síntese dos principais processos e suas características.

Tabela 8 – Processos de soldagem por fusão e suas características [37].

PROCESSO	FONTE DE CALOR	TIPO DE CORRENTE E POLARIDADE	AGENTE PROTETOR	OUTRAS CARACTERÍSTICAS	APLICAÇÕES
SOLDAGEM POR ELETRO-ESCÓRIA	Aquecimento por resistência de escória líquida	Contínua ou alternada	Escória	Automática/mecanizada. Junta na vertical. Arame alimentado mecanicamente na poça de fusão. Não existe arco elétrico.	Soldagem de aço ao carbono, baixa e alta liga, espessura $\geq 50$ mm. Soldagem de peças de grande espessura, eixos, etc.
SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eléctrodo (+)	Escória	Automática/mecanizada ou semiautomática. O arco funde sob uma camada de fluxo granular.	Soldagem de aço ao carbono, baixa e alta liga, espessura $\geq 10$ mm. Posição plana ou horizontal de peças estruturais, tanques, vasos de pressão, etc.
SOLDAGEM COM ELÉTRODO REVESTIDO	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eléctrodo (+) ou (-)	Escória e gases gerados	Manual. Vareta metálica recoberta por camada de fluxo.	Soldagem de quase todos os metais, exceto cobre puro, metais preciosos, reativos e de baixo ponto de fusão. Usado na soldagem geral.
SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR	Arco elétrico	Contínua. Eléctrodo (+)	Escória e gases gerados ou fornecidos por fonte externa. Em geral $\text{CO}_2$	Automática ou semiautomática. O fluxo está contido dentro de um arame tubular de pequeno diâmetro.	Soldagem de aço ao carbono, baixa e alta liga, espessura $\geq 1$ mm. Soldagem de chapas, tubos, etc.
SOLDAGEM MIG/MAG	Arco elétrico	Contínua. Eléctrodo +	Argônio ou Hélio, Argônio + $\text{O}_2$ , Argônio + $\text{CO}_2$ , $\text{CO}_2$	Automática/mecanizada. Ou semiautomática. O arame é sólido.	Soldagem de aço ao carbono, baixa e alta liga, espessura $\geq 1$ mm. Soldagem de chapas, tubos, etc. Qualquer posição.

Tabela 8 (continuação) – Processos de soldagem por fusão e suas características [37].

PROCESSO	FONTE DE CALOR	TIPO DE CORRENTE E POLARIDADE	AGENTE PROTETOR	OUTRAS CARACTERÍSTICAS	APLICAÇÕES
SOLDAGEM A PLASMA	Arco elétrico	Contínua. Elétron (-)	Argônio, Hélio, Argônio + Hidrogênio	Manual ou automática, o arame é adicionado separadamente. Elétron não consumível de tungstênio. O arco é constricto por um bocal.	Todos os metais importantes em engenharia, exceto Zn, Be e suas ligas. Passes de raiz.
SOLDAGEM TIG	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Elétron (-)	Argônio, Hélio ou misturas destes.	Manual ou automática. Elétron não consumível de tungstênio. O arame é adicionado separadamente.	Soldagem de todos os metais exceto Zn, Be e suas ligas, espessura de 0,1 a 8 mm. Soldagem de não ferrosos e aços inox. Passe de raiz de soldas em tubulações.
SOLDAGEM POR FEIXE DE ELÉTRONS	Feixe de elétrons	Contínua	Vácuo ( $10^{-4}$ mmHg)	Soldagem automática. Não usa, em geral, metal de adição. Feixe de elétrons permite uma elevada concentração de energia.	Soldagem de todos os metais exceto nos casos de vaporização excessiva. Indústria nuclear, automobilística e aeroespacial.
SOLDAGEM A LASER	Feixe de luz		Argônio ou Hélio	Soldagem automática. Não usa, em geral, metal de adição. Laser permite uma elevada concentração de energia.	Soldagem de todos os metais, exceto nos casos de vaporização excessiva. Indústria automobilística, nuclear e aeroespacial
SOLDAGEM A GÁS	Chama oxiacetilénica		Gás (CO, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O)	Manual. Arame adicionado separadamente.	Soldagem manual de aço ao carbono, Cu, Al, Zn, Pb e bronze. Soldagem de chapas finas e tubos de pequeno diâmetro.

A soldagem é considerada muito versátil uma vez que é empregada na união de materiais dissimilares e espessuras variáveis. Devido à existência de um grande número de processos de soldagem, é possível unir peças com espessuras inferiores a 1 mm, como joias e componentes eletrônicos, até peças de grandes dimensões. As condições em que pode ser aplicada são as mais variáveis: chão de fábrica (onde as condições de trabalhos são controladas), no campo ou em ambientes mais extremos (estruturas

elevadas ou debaixo d'água). Além de sua eficiência, o custo competitivo faz a soldagem atender diferentes requisitos de qualidade, desde trabalhos simples, que não apresentam uma elevada responsabilidade com o resultado (como grades e peças de decoração), até soldas em materiais que são submetidos a situações extremas e que não permitem uma falha do componente soldado, como estruturas marítimas e vasos de pressão) [37].

Porém, a soldagem, mesmo com muitas vantagens, está cercada por diversas limitações que devem ser consideradas. Uma vez que a solda é uma união permanente, juntas soldadas não podem ser desmontadas futuramente. A energia térmica e mecânica que é empregada na região da junta em quase todos os processos de soldagem, pode causar uma série de efeitos:

- Distorções;
- Aparecimento de tensões residuais;
- Mudança na microestrutura;
- Alteração de propriedades;
- Poros;
- Trincas (Fissuras).

Esses efeitos podem prejudicar o desempenho do material soldado e, talvez, ocasionar uma falha prematura.

#### 2.4.2.1 MIG/MAG

O processo de soldagem MIG/MAG ocorre através de um arco elétrico gerado entre um arame alimentado continuamente e a poça de fusão. Para não haver contaminação da poça de soldagem, um gás fornecido por uma fonte externa é acrescentado para a proteção [43].

Uma vez que a alimentação do metal de adição é feita de forma automática e contínua, não é possível a execução de soldagens autógenas com o MIG/MAG. A velocidade de alimentação, comprimento do arco, e a corrente de soldagem são controlados pela fonte de corrente, assim, os ajustes necessários para um procedimento de soldagem são feitos antes do início do trabalho, sem a necessidade de alterações durante o processo, o que garante um caráter semiautomático ao processo chamado MIG/MAG manual [50].

Gases inertes também podem ser usados no processo MIG/MAG. Tanto na soldagem automatizada como na soldagem semiautomática, é possível soldar chapas de aço inoxidável desde espessuras muito finas (cerca de 1 mm) até às mais espessas [50].

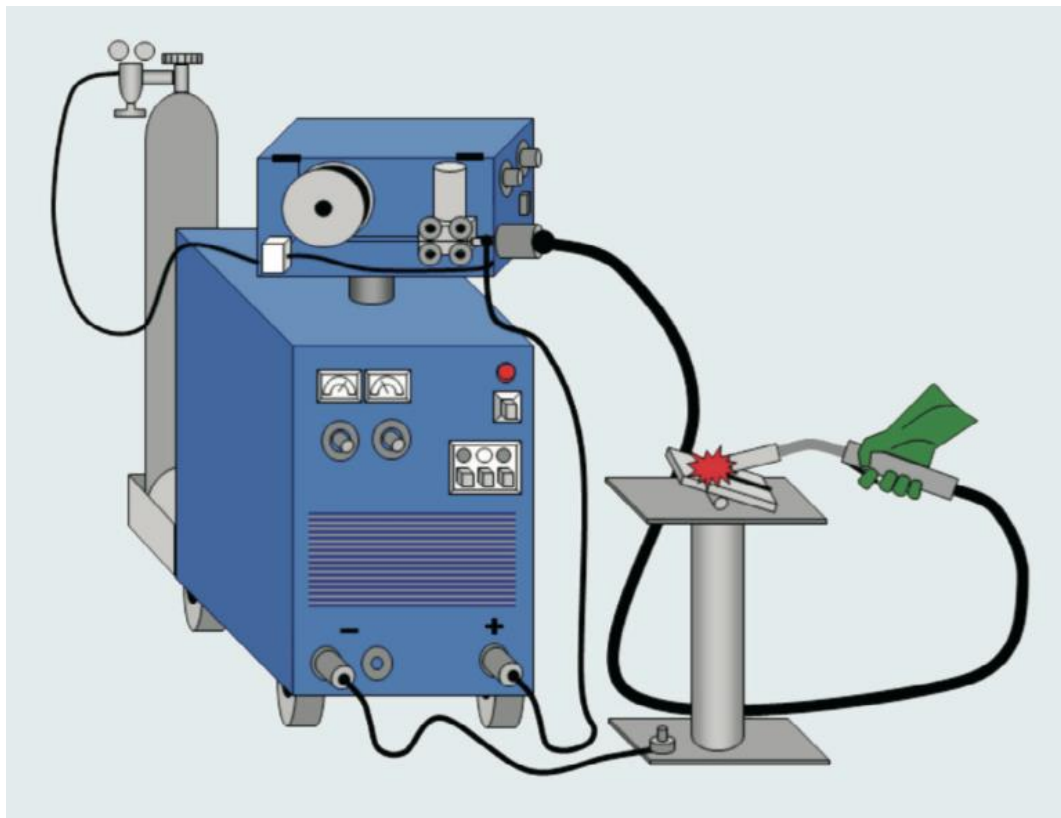


Figura 20 – Equipamentos utilizados no processo MIG/MAG [49].

O MIG/MAG apresenta características que estão presentes igualmente no processo TIG, tais como: não usa fluxo, respinga pouco, pode ser aplicável a todas as posições, além de se conseguir remover o filme de óxido com o auxílio do arco elétrico e assim possibilitar a coalescência das bordas da junta e do metal de preenchimento. Velocidade

de soldagem elevada, profundidade maior de penetração e zonas termicamente afetadas mais estreitas, são algumas das vantagens em relação ao processo TIG [50]. Abaixo, através de algumas tabelas, é possível fazer a comparação entre os diversos modos de operação do processo de soldagem MIG/MAG.

Tabela 9 – Características do processo MIG [38,41].

VANTAGENS	DESvantagens	EMPREGO
- Solda com alta qualidade para a maioria das ligas.	- custo elevado do gás inerte.	- usado em aços inoxidáveis e ligas não-ferrosas.
- Alta taxa de deposição.	- Mão-de-obra habilidosa.	
- Processo semi ou totalmente automatizado.		

Tabela 10 – Características do processo MAG-CO<sub>2</sub> (com transferência por pulverização) [38,41].

VANTAGENS	DESvantagens	EMPREGO
	- Posição plana.	
- Elevada penetração.	- Somente para aços ao carbono e de baixa liga com espessura superior a 6 mm.	- Usado para aços ao carbono e de baixa liga.
- Alta taxa de deposição.		- Para grandes produções e soldas de qualidade razoável.
- Baixo custo dos gases.	- Cuidado com o posicionamento da junta.	

Tabela 11 – Características do processo MAG-CO<sub>2</sub> (com transferência por curto-circuito) [38,41].

VANTAGENS	DESVANTAGENS	EMPREGO
- Processo semiautomático.		
- Todas as posições de soldagem.		
- Boa qualidade de solda.	- Somente para aços ao carbono e de baixa liga.	- Fabricação de equipamentos com chapa fina.
- Baixo custo dos gases.	- Ocorrência de falta de fusão com soldador sem prática.	- Passe de raiz em chapas grossas.
- Usado em chapas finas de aço (1 – 4 mm).		
- Tolerância com mau posicionamento da junta.		

Tabela 12 – Características do processo MIG (pulsado) [38,41].

VANTAGENS	DESVANTAGENS	EMPREGO
- Processo semiautomático.		
- Todas as posições de soldagem.	- Equipamento complexo.	- Usado principalmente em soldagem de aço ao carbono,
- Aplicado à maioria das ligas e espessuras.	- Custo moderado do processo.	inox e não-ferrosos.
- Qualidade de solda muito boa.		

#### 2.4.2.2 TIG

O nome TIG é a abreviação do processo em inglês, *Tungsten Inert Gás*. Este processo de união das peças metálicas ocorre devido ao aquecimento e fusão destas peças através do arco elétrico, que se estabelece entre um eletrodo de tungstênio não consumível

(tipo de eletrodo usado na soldagem em que não é fundido pela ação do arco elétrico, isto é, serve apenas para conduzir a corrente que passará pelo arco elétrico) e o objeto que se deseja soldar. Para a proteção da poça de fusão contra contaminação da atmosfera é utilizada uma nuvem de gás inerte ou uma misturas destes (Hélio e Árgon) (Figura 21) [45,48].

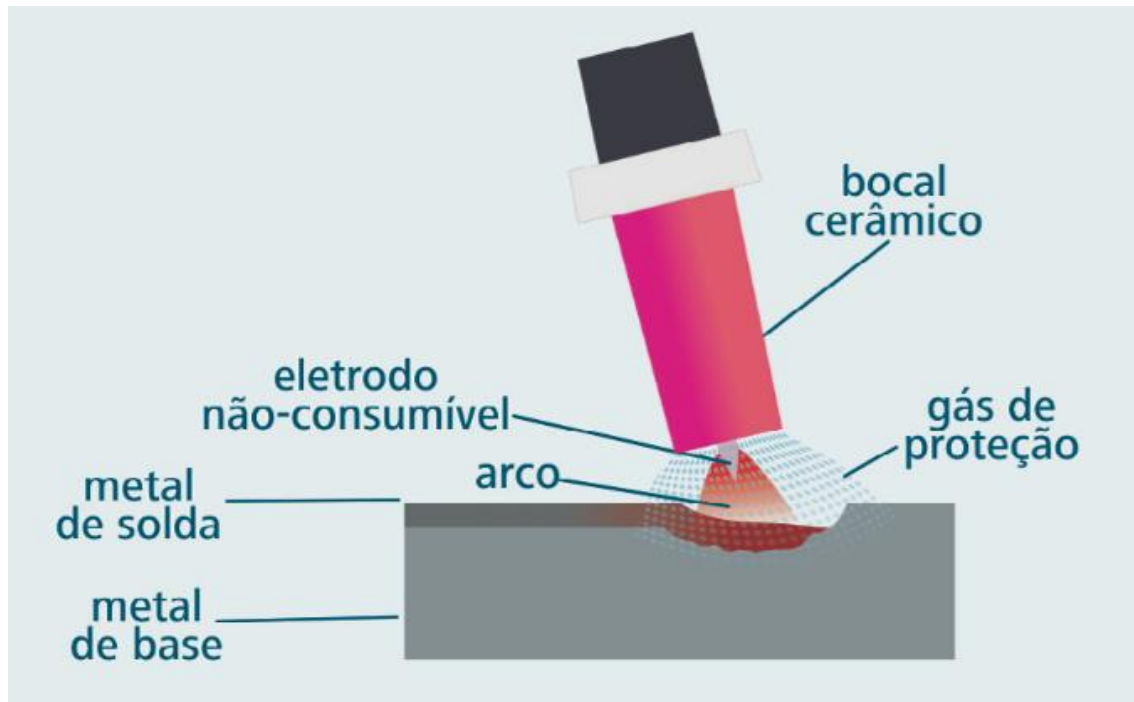


Figura 21 – Esquema com os principais componentes do processo de soldagem TIG [45, 51].

Este processo, que apresenta ótimos resultados pois é adequado à soldagem de equipamentos de pequena espessura, além de ter uma eficiente proteção contra a contaminação, também possibilita a soldagem de materiais com difícil soldabilidade [45].

Entende-se por gases inertes todos os gases pertencentes à família 8A da tabela periódica (também conhecidos por gases nobres). Hélio (He) e Argônio (Ar) são os mais utilizados, já que os demais gases são mais caros. Também podem ser usadas misturas especiais, como hidrogênio para a soldagem de aços inoxidáveis e, nitrogênio para soldagem do cobre e suas ligas, podendo ser opcionais [45, 48].

Tabela 13 – Quadro comparativo dos gases inertes mais utilizados no processo de soldagem TIG [45, 48].

ARGÔNIO (Ar)	HÉLIO (He)
Baixa tensão de arco	Elevada tensão de arco
Menor penetração	Maior penetração
Adequado à soldagem de chapas finas	Adequado à soldagem de grandes espessuras e materiais de condutibilidade térmica elevada
Soldagem manual devido ao pequeno gradiente de tensão na coluna do arco (6 V/cm)	Soldagem automática ou manual
Maior ação de limpeza	Menor ação de limpeza
Arco mais estável	Arco menos estável
Fácil abertura do arco	Dificuldade na abertura do arco
Utilizado em CC e CA	Geralmente CCPD com eletrodo de tungstênio toriado
Custo reduzido	Custo elevado
Consumo de gás normal (fluxo de 10 a 24 l/minuto)	Consumo de gás de proteção 2 a 3 vezes superior ao usual para o argônio
Maior resistência à corrente de ar lateral	Menor resistência à corrente do vento

Sendo elevado o custo dos equipamentos e consumíveis, e sendo ainda sua produtividade ou rendimento do processo relativamente baixo, a solda TIG é indicada para aplicações em que a qualidade da solda produzida seja mais importante do que o custo do procedimento.

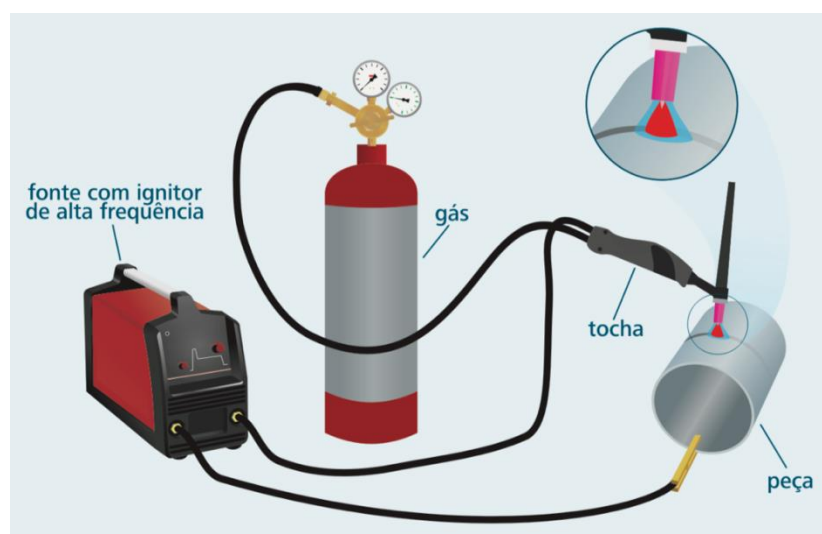


Figura 22 – Equipamento utilizado no processo TIG [45, 51].

Tabela 14 – Características do processo de soldagem por TIG [38,41].

VANTAGENS	DESVANTAGENS	EMPREGO
- Grande versatilidade manual ou automática, tipo de junta, posição de soldagem.	- Elevado custo de consumíveis.	- Passe de raiz em aços ligados.
- Soldagem com elevada qualidade.	- Mão-de-obra habilidosa.	- Usados em união de não-ferrosos e inoxidáveis.
- Adequado para metais ferrosos e não-ferrosos.	- Limitado a 8 mm de espessura.	

#### 2.4.2.3 ELÉTRODO REVESTIDO

O processo de soldagem por arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW – *Shielded Metal Arc Welding*) é composto por um arame (ou “alma”) recoberto de uma mistura de materiais, o qual se funde sobre o material que se deseja soldar (Figura 23) [43].



Figura 23 – Esquema da soldagem por eletrodo revestido [45].

Dentre as funções deste revestimento, destaca-se: estabilizar o arco elétrico; adequar a composição química do cordão, com a adição de elementos de liga e eliminação de impurezas; a geração de gases e a produção de escória ajudam na proteção da poça de

fusão e do metal de solda contra a contaminação da atmosfera e arrefecimento rápido [37].

A fusão ocorre devido ao calor produzido pelo arco elétrico entre o eletrodo e a peça. A geração da corrente elétrica que sustenta o arco pode ser alternada ou contínua. Quando a fonte de alimentação é contínua, a polaridade depende do arranjo da ligação dos polos, isto é: pólo negativo, chamado de cátodo, por onde os elétrons entram no arco; pólo positivo, chamado de ânodo. Assim como em outros processos que utilizam eletrodos consumíveis, no eletrodo revestido é comum a utilização de polaridade reversa [44].

É raro, porém existe, a realização deste processo de maneira semi-mecanizada, entretanto o modo manual é mais utilizado. Algo imprescindível para este processo é que a fonte de soldagem seja de corrente constante e, assim, evitar ou tentar prevenir mudanças na tensão durante a soldagem.

Os equipamentos necessários para a soldagem (Figura 24), além da proteção individual (luvas, máscara, avental, etc.) e ferramentas para limpeza, como picadeira e escova, também é utilizada a fonte de energia, alicate de fixação dos eletrodos, cabos de interligação e pinça para ligação à peça.

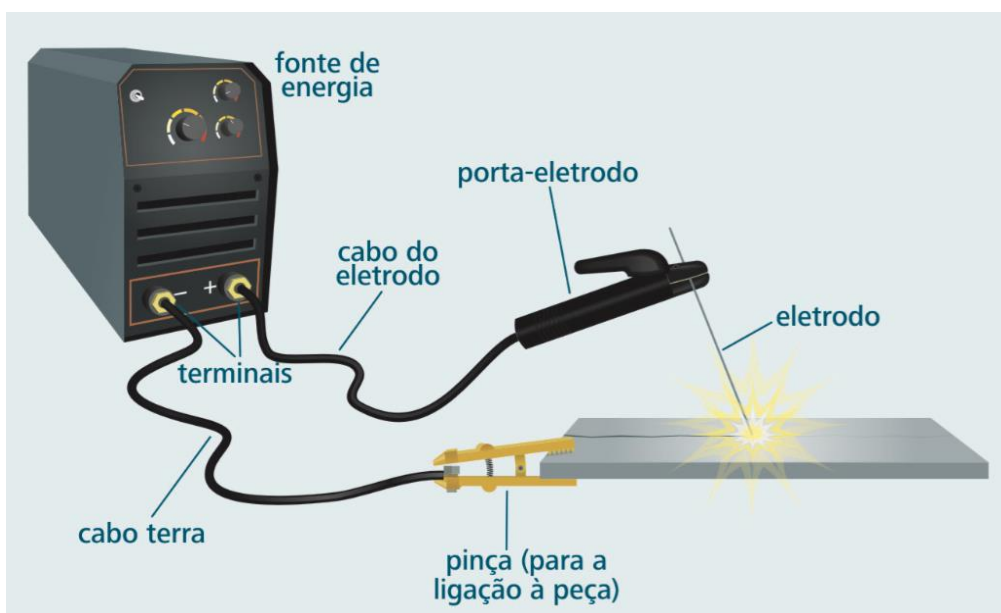


Figura 24 – Esquema da soldagem por eletrodo revestido [45].

O revestimento dos eletrodos (varetas ou consumíveis, como também são chamados) podem ser separados em diferentes tipos, de acordo com a sua composição para determinada finalidade [37,43,45]:

- **Revestimento oxidante:** é composto basicamente de óxido de ferro e manganês. A escória resultante tem como característica ser espessa, oxidante, abundante e é facilmente destacável. O cordão apresenta um bom aspecto e pequena penetração, porém seu baixo teor de carbono e manganês tornam suas propriedades inadequadas para trabalhos que exijam elevada responsabilidade. É recomendado utilizar CC<sup>+</sup> ou CA. Atualmente pouco utilizado.
- **Revestimento ácido:** em sua composição está contido óxido de ferro, óxido de manganês e sílica. Estes dão origem a uma escória ácida espessa ou de revestimento médio, abundante, porosa e de fácil remoção. Sua penetração é média e tem uma taxa elevada de fusão, o que produz uma poça de fusão volumosa e limita a sua aplicação às posições plana e horizontal. Utiliza-se CC<sup>-</sup> ou CA, sendo também pouco utilizado atualmente.
- **Revestimento rutilico:** este revestimento apresenta uma grande quantidade de rutilo (TiO<sub>2</sub>), produzindo uma escória espessa, compacta e facilmente destacável. Sendo de fácil manipulação, os eletrodos são considerados do tipo universal, já que podem ser utilizados com qualquer tipo de corrente, bem como polaridade. O cordão resultante tem um bom aspecto e tem uma média ou baixa penetração. São de uso geral.
- **Revestimento básico:** revestimento espesso, tendo em sua composição carbonato de cálcio e fluorita, o que produz uma escória básica e, juntamente com o CO<sub>2</sub> gerado pela decomposição do carbonato de cálcio, protege a solda do contacto com a atmosfera. Outra característica significativa da escória é sua ação dessulfurante sobre a solda, o que reduz a formação de trincas de solidificação. Por não possuir substâncias orgânicas e se for manuseado de maneira correta, produzirá soldas com baixo teor de hidrogênio e, conseqüentemente diminuirá

o risco de fissuras causadas por este elemento. Devido às suas boas características, média penetração e propriedades do cordão, principalmente tenacidade, é indicado para aplicações de grande espessura, estruturas de grande rigidez bem como as que exigem alta responsabilidade. Utiliza-se CC<sup>+</sup> ou CA.

- **Revestimento celulósico:** essa nomenclatura deriva da substância orgânica que a compõe, a celulose. Sua decomposição gera muitos gases protetores, além de pouca escória. Devido a alta intensidade do arco, há um grande volume de respingos, resultando em uma solda de mau aspecto (apresenta escamas irregulares). As características mecânicas são boas, porém há a possibilidade de fragilização causada pelo hidrogênio. Apresenta uma alta penetração e assim é indicado para a soldagem fora de posição, de tubagens e para passe de raiz. É recomendado trabalhar com CC<sup>+</sup>.

Tabela 15 – Características do processo de soldagem por eletrodo revestido [38,41].

VANTAGENS	DESvantagens	EMPREGO
- Grande versatilidade no projeto da junta e na posição da soldagem.	- Mão-de-obra habilidosa,	
- Baixo custo.	- Frequente mudança de eletrodos.	Processo mais usado na fabricação e na manutenção.
- União com excelentes propriedades.	- Na soldagem com vários passes é necessário remover a escória em cada passe.	
- Não exige grandes ajustes da estrutura (posição).		

## 2.5 SOLDAGEM DE FERRO FUNDIDO

Por muitos anos o ferro fundido, em geral, era considerado impossível de ser soldado. A falta de controle com as variações que ocorriam em sua microestrutura (acarretando em mudanças das propriedades mecânicas) devido ao calor gerado pelo arco elétrico, era o fator determinante. Essa era uma vantagem que o aço tinha em relação ao ferro fundido. Porém, com o passar do tempo, diversos estudos relacionados à natureza do ferro fundido tornaram possível sua soldagem, já que foram desenvolvidos meios que eliminassem ou amenizassem os efeitos do ciclo térmico. Pode-se aplicar a soldagem em três diferentes situações [53 - 55]:

- **Solda de manutenção:** é empregada quando é necessário o reparo de uma peça que sofre alguma avaria causada pelo desgaste devido ao excesso de uso.
- **Solda de construção:** utilizada para a obtenção de peças com grande complexidade.
- **Solda de produção:** realizada para recuperar defeitos ocasionados no processo de fundição, como porosidades e trincas.

Na soldagem dos ferros fundidos, tenta-se evitar que estruturas frágeis (martensita, carbonetos, entre outros) se formem na junta soldada ou próximo a ela, já que a presença destas pode diminuir a resistência mecânica e assim comprometer a atuação da peça soldada.

### 2.5.1 DIFICULDADES PARA A SOLDAGEM DO FERRO FUNDIDO

O alto teor de carbono (presente na constituição da grafita), baixa ductilidade e condutividade térmica, são características que agregam dificuldades para a soldagem dos ferros fundidos [53].

- **Alto teor de carbono:** esta característica, aliada ao gradiente térmico, são responsáveis por darem origem a estruturas duras e frágeis. De acordo com o diagrama Fe-C, pode-se notar a presença de dois eutéticos originados a partir de dois equilíbrios: estável (formado por austenita e grafita) e metaestável (formado por austenita e carbonetos) [66].

Estudos apontam que a quantidade de carbono existente na poça de fusão está diretamente relacionado com a formação de componentes duros e frágeis nessa região da junta. Este carbono, em sua maioria, está presente nas grafitas do metal de base, que em contacto com a austenita, gera o fenômeno citado. Assim, é preferível ter o carbono em grãos, ou seja, em forma de grafita esferoidal [56]. A presença de lamelas de grafita nos ferros fundidos cinzentos, além da estrutura de sua matriz, são fatores que contribuem para aumentar a sua dificuldade para soldagem. Matriz perlítica, com alto teor de carbonetos, gera um aumento de carbono na poça de fusão, quando comparada à matriz ferrítica, favorecendo assim o aparecimento de trincas devido à presença de componentes frágeis [54,56].

Carbonetos podem ser formados na região adjacente à zona fundida, devido à dissolução do carbono das grafitas durante o processo de soldagem somado com o ciclo térmico utilizado, pois o aquecimento do material de base seguido de um rápido resfriamento, impossibilita a formação da grafita [56,57].

O calor gerado pelo processo de soldagem e o rápido resfriamento também estão relacionados com a formação de martensita na zona afetada termicamente. Porém, a formação tanto de carbonetos como de martensita, não são resultantes apenas da velocidade de resfriamento, sendo dependentes também da composição química do material. Sabendo que essas duas estruturas resultantes apresentam elevada dureza e fragilidade, afetando as propriedades da região da junta soldada, é que se tenta manipular duas variáveis (ciclo térmico e composição química) para se obter resultados satisfatórios [58,59].

Sabe-se que alguns elementos químicos, como C, Si e Mg, são perdidos por vaporização devido ao calor durante o processo de soldagem (15% em processo a arco elétrico e 2 a 5% em soldagem a gás), podendo provocar porosidades no

material. Com isso, recomenda-se a utilização de um metal de adição que seja capaz de absorver essa perda e favorecer a formação de grafita [60].

Para reduzir o alto teor de carbono na junta a ser soldada, alguns autores sugerem a limpeza do local com hidróxido de sódio. Porém, o pré-aquecimento e a esmerilhagem são técnicas mais empregadas [23]. Quanto à formação de componentes frágeis, pré-aquecimento e pós-aquecimento, são empregados na tentativa de minimizar esse facto.

- **Baixa ductilidade e condutividade térmica:** o ferro fundido é definido com essas características, uma vez que apresenta uma baixa capacidade de aliviar plasticamente as tensões que são geradas durante a soldagem, algo notável no ferro fundido cinzento. Esse facto limita a utilização de solda nesse ferro fundido, pois as tensões não seriam absorvidas pelo material fora da zona afetada pelo calor [56, 63, 67].

Trincas (ou fissuras) após a soldagem nos ferros fundidos é algo que pode acontecer devido ao elevado gradiente térmico ocasionado pela solda. No ferro fundido cinzento isso ocorre com maior frequência pois este apresenta um elevado coeficiente de expansão térmica, e assim, as zonas frias, quando submetidas a tração, ficam sujeitas ao aparecimento de trincas. Como apresenta propriedades mecânicas distintas, o ferro fundido nodular é menos suscetível a este problema [64,65].

## 2.6 EFEITOS DOS PARÂMETROS NA SOLDAGEM E MICROESTRUTURA

### 2.6.1 PRÉ-AQUECIMENTO

Esta técnica é utilizada a fim de evitar trincas, reduzir tensões residuais e distorções, além de minimizar as taxas de resfriamento. Além disso, pode reduzir o gradiente térmico que se forma entre a alta temperatura do material de adição e as regiões de

fronteira, que se encontram a temperaturas inferiores. Porém, esse método contribui para o alargamento da zona de fusão e da zona termicamente afetada (ZTA). Mas, para a realização deste procedimento, devem ser consideradas algumas características da peça, como: espessuras, forma geométrica, tipo do ferro fundido, metal de adição, entre outros [64,68].

### 2.6.2 PÓS-AQUECIMENTO

O tratamento de pós-aquecimento tem como função melhorar a ductilidade e a usinabilidade da ZTA, reduzindo a dureza de estruturas presentes nessa região. Isso é possível, pois o pós-aquecimento facilita a decomposição da cementita formada durante a soldagem e o revenimento da austenita. Este tratamento não faz a restauração da ductilidade e tenacidade total da ZTA [53].

Em ferros fundidos cinzentos, realizado para alívio de tensões residuais, o pós-aquecimento é feito a uma temperatura de 600 a 650°C durante 1,5 horas (para uma peça com espessura de 25 mm) [53,68]. Temperaturas mais elevadas (870°C, por exemplo) também podem ser aplicadas, mas tornarão ferríticas as estruturas aciculares da ZTA [53,70,71]. Entretanto, com o uso de elétrodos com diâmetros maiores (cerca de 6 mm e aplicação de corrente entre 400 e 450 A) na soldagem, juntamente com resfriamento controlado, pode-se obter melhores resultados [53,56].

Para ferros fundidos nodulares, a melhora na ductilidade ocorre com o recozimento ferritizante em forno. Considerando uma peça com 25 mm de espessura, é sugerido manter por volta de três horas a uma temperatura entre 850-900°C e fazer o resfriamento, por cerca de cinco horas, dentro do próprio forno até 690°C. Posteriormente, resfriar lentamente até à temperatura ambiente [53,56]. Já para alívio de tensões, para esta mesma peça, utiliza-se aquecê-la a uma temperatura entre 510 e 680°C, durante 1,5 horas (analisando previamente os elementos de liga) [53,64,72].

A tabela 16 fornece algumas faixas de temperaturas de pós-aquecimento de ferro fundido cinzento, enquanto a tabela 17 é referente ao mesmo tratamento, mas para ferros fundidos nodulares [53,73,74].

Tabela 16 – Temperatura de pós-aquecimento para ferros fundidos cinzentos [53,56,73].

	Resfriamento em forno (a)			
	TEMPERATURA °C	TEMPO h / 25 mm	TEMPERATURA °C	TAXA DE RESFRIAMENTO °C/h
ALÍVIO DE TENSÕES	600-650	1,5	316	56
FERRITIZAÇÃO	700-760	1	316	56
RECOZIMENTO COMPLETO	790-900	1	316	56
GRAFITIZAÇÃO	900-950	1,3	316	56
NORMALIZAÇÃO	870-950	1,3	(b)	

(a) Após resfriamento em forno, resfriar ao ar até temperatura ambiente.

(b) Resfriar ao ar da temperatura de recozimento até à temperatura ambiente, ou abaixo de 482°C, seguido de alívio de tensões.

Tabela 17 – Temperatura de pós-aquecimento para ferros fundidos nodulares [53,56,73].

		Resfriamento em forno (a)			
		TEMPERATURA °C	TEMPO h / 25 mm	TEMPERATURA °C	TAXA DE RESFRIAMENTO °C/h
ALÍVIO DE TENSÕES	NÃO LIGADO	510-570	1,5	316	56
	BAIXA LIGA	570-600	1,5	316	56
	ALTA LIGA	550-650	1,5	316	56
	AUSTENÍTICO	620-680	1,5	316	56
	FERRITIZAÇÃO	900-950	2	(b)	
	RECOZIMENTO COMPLETO	870-900	1	343	56
	NORMALIZAÇÃO/REVENIDO	900-950	2 (mínimo)	(c)	

(a) após resfriamento em forno, resfriar ao ar até à temperatura ambiente.

(b) resfriar em forno até 690 °C; manter nesta temperatura até 5 h mais 1 h para cada 25 mm de espessura; resfriar ao forno até 316°C a uma taxa de 56 °C/h; resfriar ao ar até à temperatura ambiente.

(c) resfriar ao ar até 540 a 650 °C; resfriar em forno até 340 °C à taxa de 56 °C/h; resfriar até à temperatura ambiente.

## 2.7 ELEMENTOS QUÍMICOS E SEUS EFEITOS NA SOLDAGEM

Existem alguns elementos de liga que, durante a soldagem, são considerados voláteis (C, Si e Mg) e podem sair do material devido à alta temperatura do processo [60]. A perda de elementos como C e Si (grafitizantes) no ferro fundido vermicular, favorecerá a formação de componentes frágeis na junta soldada, uma vez que a volatilização desses componentes alterará a forma da grafita na região de solda [53].

A presença de outros elementos pode acarretar trincas na solda, como enxofre e fósforo. Além de trincas, o enxofre pode provocar fratura frágil em depósitos com alto teor de níquel (migração de apenas 0,1%) [53]. Outra tendência desse elemento é a de manter o carbono combinado na forma de cementita [72,75]. Já o elemento fósforo pode contribuir para a formação de um eutético Fe-Fe<sub>3</sub>P (esteadita) nos contornos de grão que, sob tensão, pode gerar trincas intergranulares (causadas pela contração no resfriamento). Isso ocorre quando a quantidade de P está próxima ao limite de 0,6% [53,25]. Devido ao seu baixo ponto de fusão, este eutético pode ocasionar trincas a quente, tanto no cordão como na ZTA [53,75].

## 2.8 REGIÃO DA SOLDAGEM

O processo de soldagem é responsável por gerar uma variação do gradiente térmico na região de união das peças. Este fator proporciona a ocorrência de transformações na junta soldada como, mudanças de fases ou precipitações, entre outras, além da formação de diversas regiões que podem ser observadas, de maneira esquemática, na figura 25 [53, 72, 76, 77, 78].

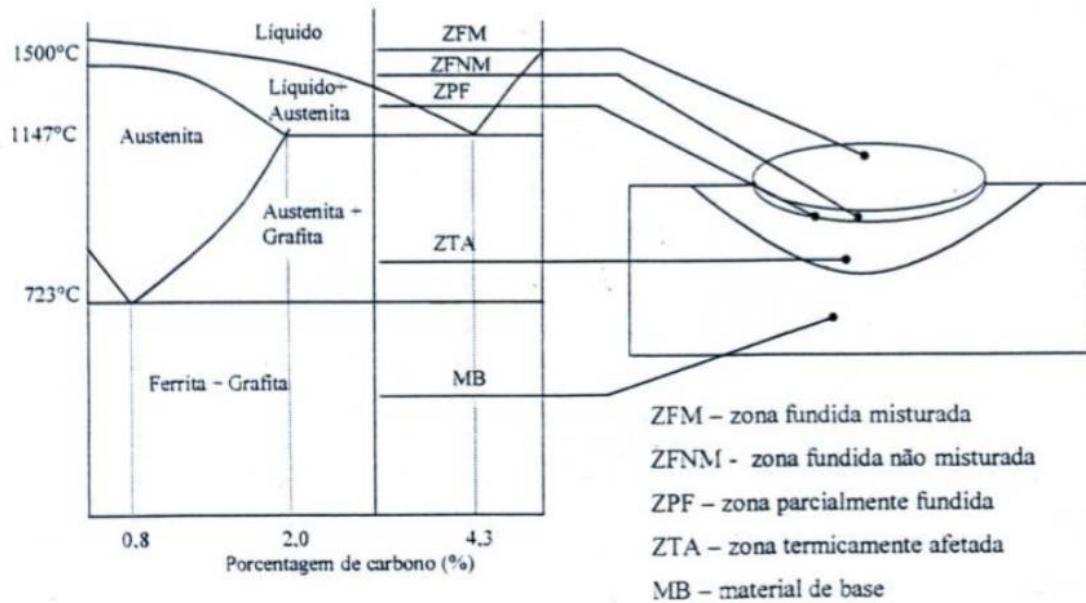


Figura 25 – Diferentes zonas existentes na região da junta soldada [53, 77].

Tanto a composição química do material de base como a do material de adição, assim como o calor gerado pela soldagem, serão responsáveis por condicionar as propriedades mecânicas dessas zonas [53, 79].

A **zona fundida** é compreendida pela junção de três regiões:

- **Zona fundida misturada (ZFM):** é uma mistura do material de adição com o material de base. As características e propriedades dessa região dependem do tipo de metal de adição. A utilização de uma solda autógena (sem metal de adição), faz com que o material se funda, resfriando rapidamente, e contribui para a formação de carbonetos, ao invés de grafita [53, 79, 83]. A soldagem utilizando elétrodos à base de níquel, constitui uma matriz austenítica com nódulos de grafita [53, 80]. Já na soldagem com elétrodos à base de aço, a matriz gerada é composta por austenita retida, para além da martensita [53, 62, 81].
- **Zona fundida não misturada (ZFNM):** composta pelo material de base que foi fundido devido ao calor gerado pelo processo de soldagem. Porém, não se misturou completamente com o material de adição [53, 81, 82].

- Zona parcialmente fundida (ZPF): composta por ledeburita, martensita e grafita que não se dissolveu, compreende a região onde parte do metal de base foi fundido [53, 80, 81, 82].

A **zona termicamente afetada (ZTA)** é compreendida pela região entre a zona fundida e o material de base que não foi afetado termicamente pelo calor gerado pelo processo de soldagem. Em ferros fundidos, o carbono presente na matriz é colocado em solução na austenita. Porém a quantidade de carbono dissolvido vai depender da sua disponibilidade, da temperatura e do tempo em que essa região afetada é submetida ao calor [53, 55]. A formação de martensita na ZTA proporciona um aumento da dureza e, conseqüentemente, uma diminuição na capacidade de absorção de tensões. Tenta-se melhorar essa propriedade e/ou diminuir a formação da martensita fazendo pré-aquecimento nas estruturas a serem soldadas (para diminuir a taxa de resfriamento na ZTA e no cordão de solda), seguido de um resfriamento lento após a soldagem [53].

# DESENVOLVIMENTO

## 3.1 SIBODUR® 450

- 3.1.1 CARACTERÍSTICAS DO SIBODUR® 450
- 3.1.2 GEOMETRIA INICIAL DO MATERIAL RECEBIDO

## 3.2 USINAGEM E APROVEITAMENTO DAS AMOSTRAS

### 3.3 SOLDAGEM

- 3.3.1 PROCESSO DE SOLDAGEM UTILIZADO
- 3.3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS E JUNTA SOLDADA

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO DAS SOLDAGENS

- 3.4.1 ENSAIO DE TRAÇÃO
- 3.4.2 ANÁLISE METALOGRAFICA
- 3.4.3 ENSAIO DE DUREZA
- 3.4.4 ENSAIO COM LÍQUIDO PENETRANTE
- 3.4.5 PARTÍCULAS MAGNÉTICAS
- 3.4.6 INSPEÇÃO VISUAL

### 3.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

- 3.5.1 ENSAIO DE TRAÇÃO
- 3.5.2 PERFIL DE DUREZA
- 3.5.3 ENSAIO METALOGRÁFICO



## 3 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

### 3.1 SIBODUR® 450

#### 3.1.1 CARACTERÍSTICAS DO SIBODUR® 450

O material escolhido para o trabalho experimental foi o ferro fundido nodular de matriz ferrítica SiboDur® 450. Anteriormente (tabela 7) foi apresentado o *data sheet* fornecido pelo fabricante, do qual serão destacados alguns dados:

- **Composição química**
  - C (3,3 – 3,7) %
  - Si (2,6 – 2,8) %
  - Mn (0,05 – 0,3) %
  - Cu (0,05 – 0,3) %
  
- **Propriedades mecânicas**
  - Alongamento:  $\geq 17$  %
  - Resistência mecânica:  $\geq 450$ MPa
  - Dureza: 150 -190 HB

Esses dados serão necessários para a análise dos resultados (todos os valores acima são referentes ao material de base).

#### 3.1.2 GEOMETRIA INICIAL DO MATERIAL RECEBIDO

A empresa Georg Fischer cedeu tarugos de ferro fundido nodular, denominado SiboDur® 450, no formato observado na Figura 26, o qual é apresentado preso às castanhas do torno.

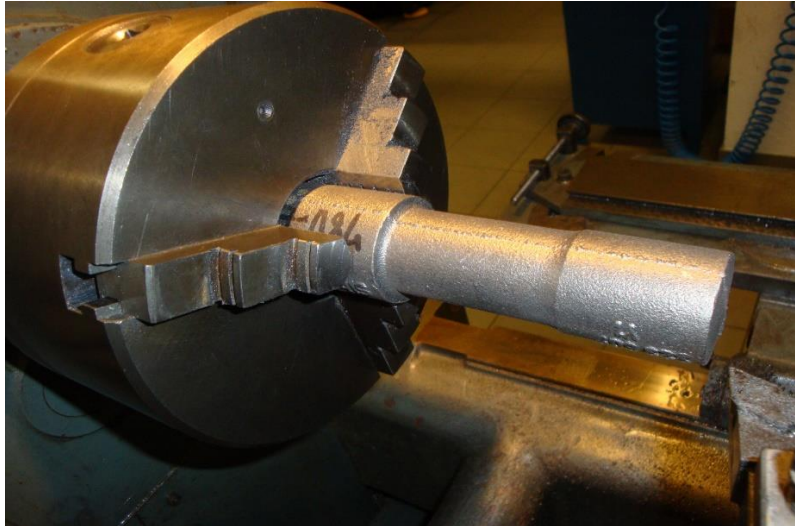


Figura 26 – Aspecto da geometria do material Sibodur® 450 recebido.

Com 190 mm de comprimento, este tarugo apresentava três diâmetros distintos. O primeiro diâmetro, da parte do material preso às castanhas, media 45 mm, enquanto na parte intermediária tinha a medida de 36 mm. A outra extremidade tinha um diâmetro de 38 mm.

Após a realização de um minucioso estudo e partindo da ideia inicial do orientador, o qual propusera a forma e as dimensões necessárias para os provetes (Figura 27), de modo eficaz e otimizada, conseguiu-se obter de cada tarugo 9 provetes para os ensaios.

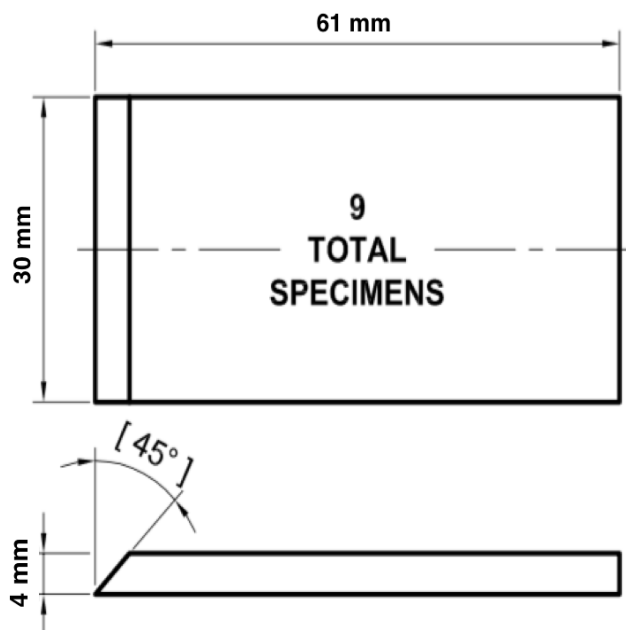


Figura 27 – Geometria e medidas dos provetes obtidos do tarugo.

### 3.2 USINAGEM E APROVEITAMENTO DAS AMOSTRAS

Para a obtenção dos provetes foram utilizados três processos de usinagem: torneamento, corte (utilizando serra de fita horizontal) e fresamento. Iniciou-se pelo torneamento no tarugo bruto. Nesse processo, foi removida uma pequena espessura no diâmetro para que fosse retirado o aspecto rugoso e algumas marcações que foram concebidas no processo de fundição do ferro, além do faceamento das extremidades.

No primeiro procedimento, foi fixado às castanhas a área de maior diâmetro do tarugo. Assim, foi realizado o torneamento nas zonas cujos diâmetros tinham 36 e 38 mm, respectivamente, a fim de se obter um único com diâmetro de 35 mm (Figura 28). Também foi realizado o faceamento dessa extremidade.

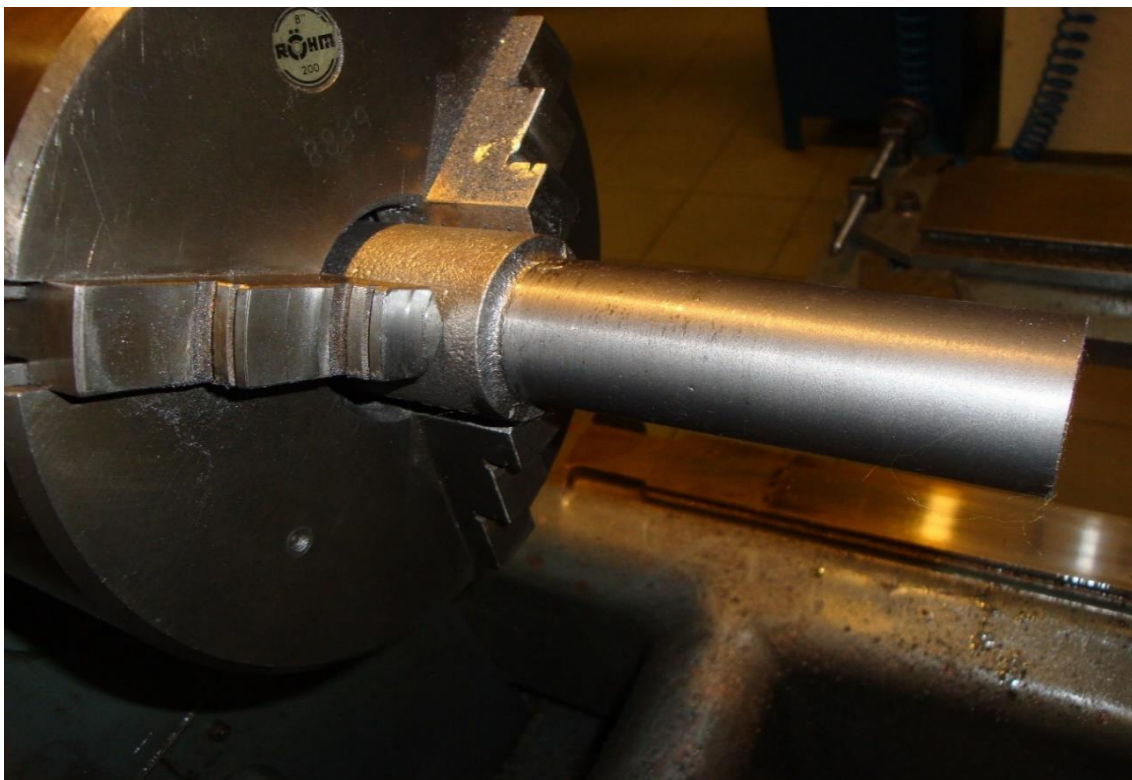


Figura 28 – Torneamento de duas partes do tarugo para a obtenção de uma única parcela com 35 mm.

Após esse procedimento, o tarugo foi mudado de posição. Prende-se às castanhas a área com diâmetro de 35 mm, para que fosse possível efetuar o torneamento na região bruta com diâmetro de 45 mm.

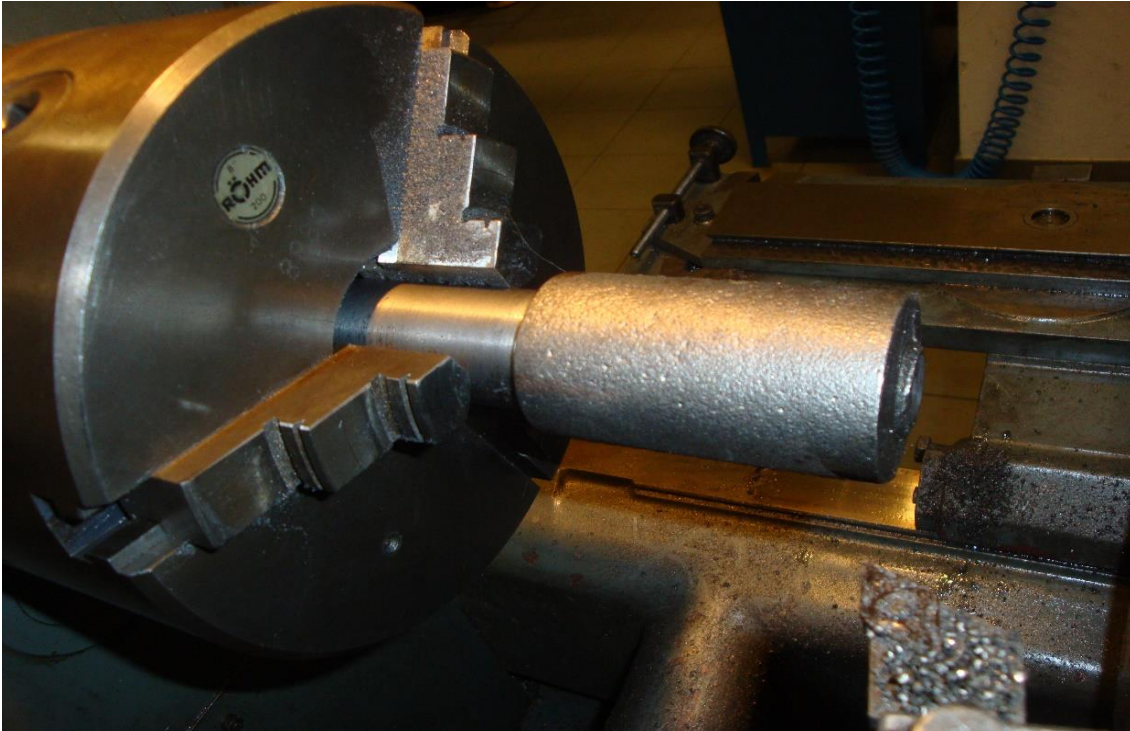


Figura 29 – Parte do tarugo (bruto) de 45 mm de diâmetro antes do torneamento.

Por último, efetuou-se o torneamento da região com o maior diâmetro, retirando as marcações e a rugosidade oriunda da fundição. Em seguida, foi realizado o faceamento da extremidade (Figura 29).

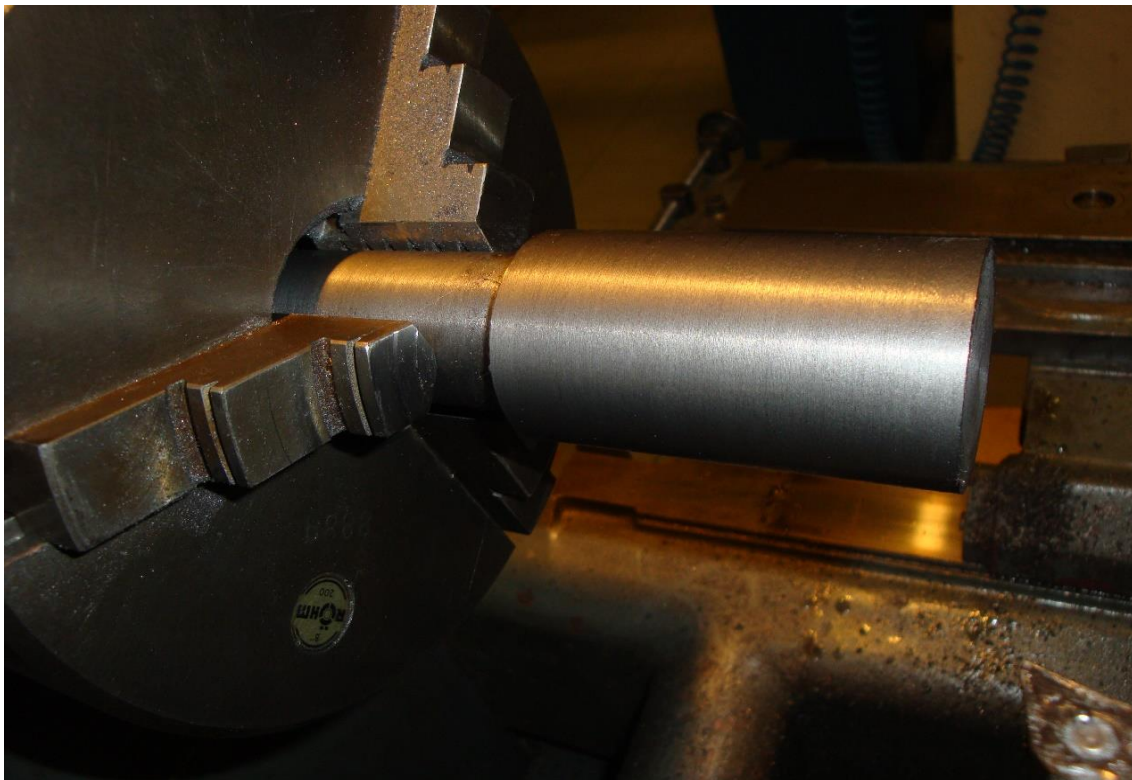


Figura 30 – Aspecto do tarugo após a realização do torneamento da extremidade com maior diâmetro (45 mm).

Após a realização desse procedimento de faceamento para tornar o material uniforme, comparou-se a diferença entre os tarugos (bruto e usinado) (Figura 31).



Figura 31 – Comparação entre o tarugo torneado (parte superior) e o tarugo bruto recebido (parte inferior).

Seguindo o plano inicial, e conforme mostrado na Figura 27, era necessário que os provetes tivessem um comprimento de 61 mm. Como o tarugo apresentava 190 mm de comprimento, foi preciso cortá-lo. Para isso, foi utilizada uma serra de fita horizontal (a perda de espessura devido ao corte foi por volta de 2,5 mm). A extremidade com diâmetro de 45 mm tinha um comprimento inicial de 80 mm (Figura 32).



Figura 32 – Corte da extremidade com diâmetro de 45 mm.



Figura 33 – Provete após o primeiro corte.

Com a realização do primeiro corte, restou no tarugo uma porção de 16,5 mm de comprimento com diâmetro de 45 mm (Figura 33). Afim de se perder o mínimo de material possível, o tarugo foi submetido novamente ao torneamento para obter uma homogeneidade em relação ao diâmetro de 35 mm (Figura 34).

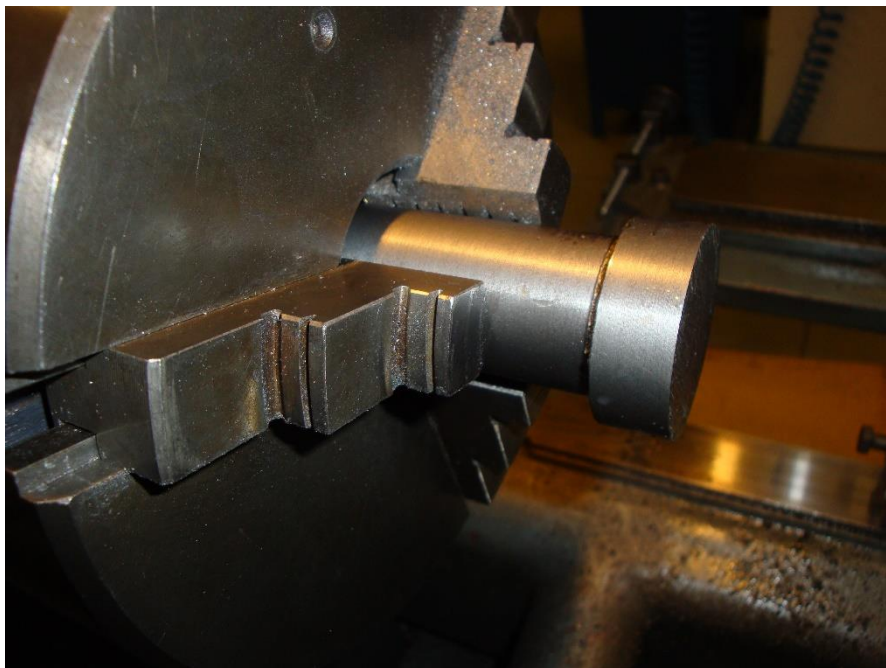


Figura 34 – Retirada de material, deixando-o uniforme com diâmetro de 35 mm.

O formato final é apresentado na figura 35.



Figura 35 – Provete após o torneamento para a retirada de material, deixando o tarugo com 35 mm de diâmetro.

Após o torneamento, foi realizado outro corte no tarugo para a obtenção de um segundo cilindro de 61 mm de comprimento e 35 mm de diâmetro (figura 36). A cada corte, perdia-se 2,5 mm no comprimento do material.



Figura 36 – Realização de um segundo corte no tarugo e obtenção de um novo cilindro com 61 mm de comprimento e 35 mm de diâmetro.

Para que fosse possível garantir que os provetes estivessem perfeitamente planos, foi utilizado o centro de usinagem CNC com eixo vertical HAAS VF-2 (figura 37).



Figura 37 – Centro de usinagem CNC HAAS VF-2.

Este CNC foi utilizado para a realização do faceamento dos cilindros, afim de obter todas as exigências previstas no plano inicial.

A finalização do torneamento do tarugo, juntamente com os cortes, resultou em alguns cilindros. Estes passaram por sucessivos processos de faceamento, bem como cortes, para a obtenção dos provetes e serão descritos abaixo, com a apresentação de imagens para facilitar o entendimento.

Primeiramente, foi feito o faceamento em relação ao comprimento (ou altura) do cilindro, para que este ganhasse as dimensões necessárias para o provete final. Neste

processo, a retirada de material garantiu a primeira medida, largura de 30 mm (figura 38).



Figura 38 - Faceamento dos cilindros, retirando o material necessário para agregar a dimensão necessário na largura, 30 mm.

Seguido do faceamento, foi realizado um corte para a retirada de uma das laterais côncavas do material (figura 39).

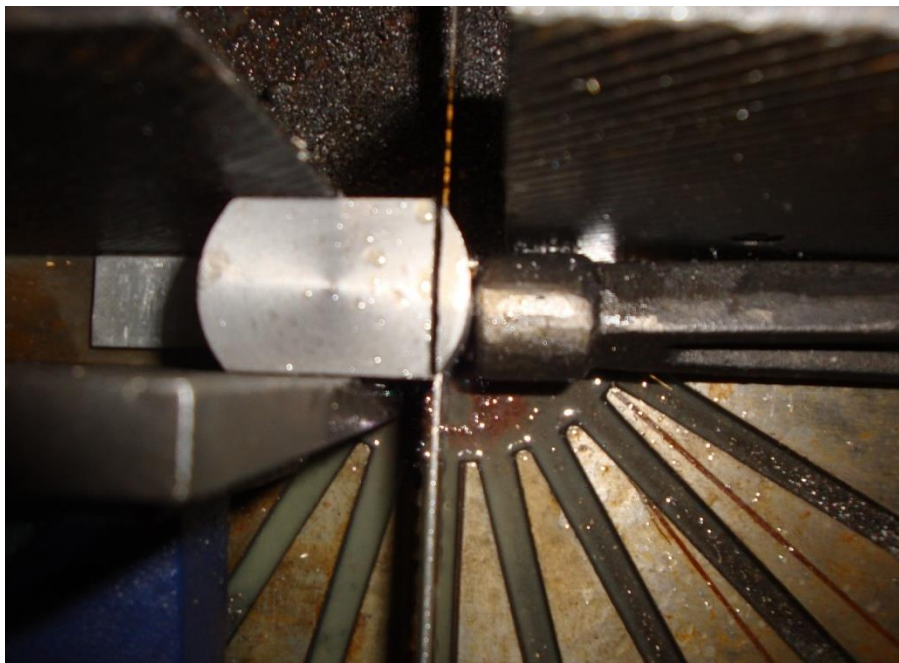


Figura 39 – Retirada, através da serra de fita, da parte côncava existente no material.

Posteriormente ao corte, um novo faceamento foi feito para garantir as tolerâncias exigidas (figura 40).



Figura 40 – Faceamento no material para tirar as possíveis irregularidades causadas pelo corte anterior.

Efetuada os processos anteriores, deu-se início aos cortes para obtenção dos provetes propriamente ditos, dentro das dimensões requeridas (figura 41).

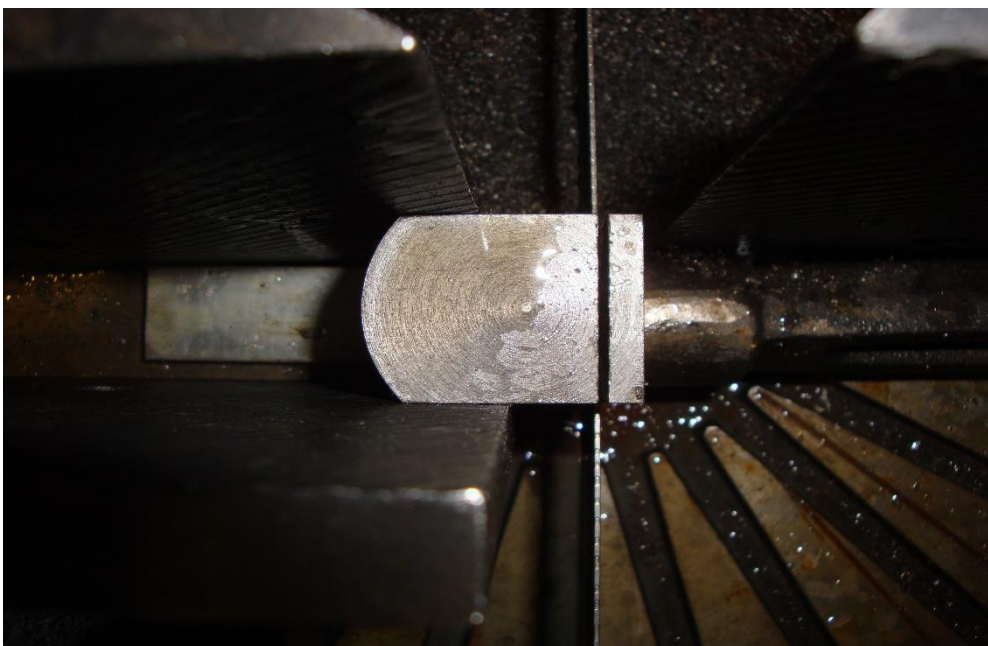


Figura 41 – Corte no material para a retirada do provete, de acordo com as especificações.

Os processos descritos nas figuras 40 e 41 se repetiram diversas vezes, até que não houvesse mais a possibilidade da obtenção de provetes com as dimensões exigidas.

A próxima etapa foi marcada pela realização do chanfro a 45° (figura 42), região que foi utilizada para se efetuar a soldagem em todos os provetes resultantes do processo de usinagem.

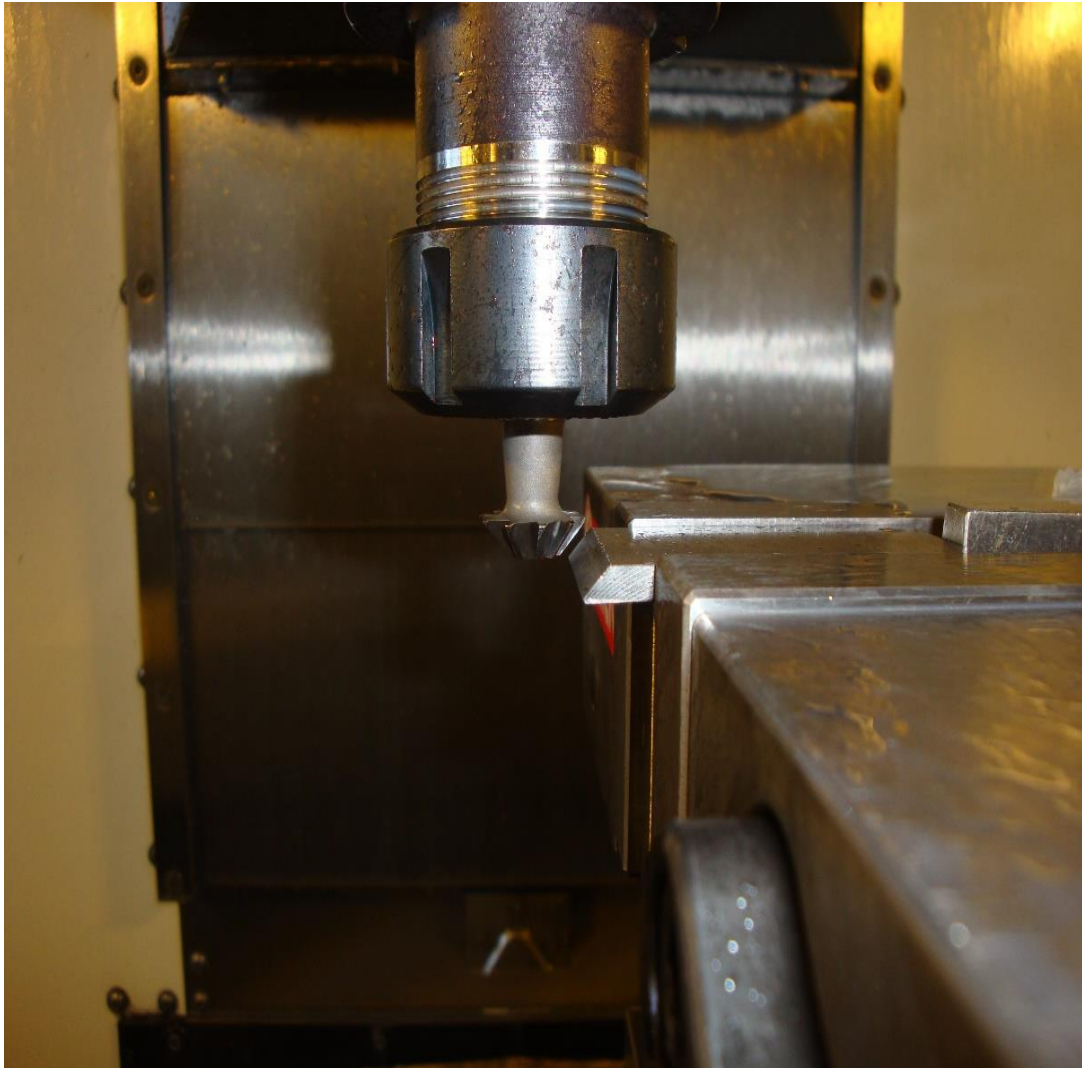


Figura 42 – Realização do chanfro de 45° no provete.

Por fim, após todos os procedimentos de usinagem citados anteriormente, foi possível a transformação do tarugo bruto de SiboDur recebido em provetes (figura 43) para a realização da soldagem e, posteriormente, as análises referentes ao cordão de solda.



Figura 43 – Provetes obtidos após usinagem do tarugo de Sibodur® recebido.

### 3.3 SOLDAGEM

#### 3.3.1 PROCESSO DE SOLDAGEM UTILIZADO

O processo escolhido para fazer a soldagem foi eletrodo revestido pela sua eficiência na soldagem de ferro fundido, praticidade e baixo custo (quando comparado a outras técnicas). Para isso, usou-se o equipamento *OERLIKON SAXOTIG 1600* (figura 44).



Figura 44 – Equipamento de soldagem *OERLIKON SAXOTIG 1600* [89].

### 3.3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS E JUNTA SOLDADA

Com o intuito de se obter a melhor eficácia no processo de soldagem do Sibodur® 450, alguns estudos na área de soldagem de ferros fundidos serviram como base. Como em trabalhos anteriores, citados ao longo do capítulo 2, foi comprovada uma melhoria no resultado da soldagem quando fosse efetuado um pré-aquecimento do ferro fundido, na região da junta a ser soldada, antes da deposição do material de adição. Assim, em todo o processo no qual foi utilizado pré ou pós-aquecimento, fez-se o uso de uma mufla *Nabertherm N 11/H* (figura 45). A soldagem nesse estudo [90] deu-se da seguinte maneira:

- Pré-aquecimento do material;
- Deposição de níquel nas partes a serem soldadas, não as juntando;
- Rebarbar cada uma das partes, para a retirada do níquel;
- Novo pré-aquecimento das peças;
- Soldagem das partes com Inconel.



Figura 45 – Mufla Nabertherm N 11/H na qual foi feito o aquecimento dos provetes antes da deposição de níquel e antes da soldagem definitiva

Outros estudos [53, 99], tiveram como resultado que um pré-aquecimento do material seguido da adição de níquel nas partes a serem soldadas (não unindo as partes) tinha uma melhora considerável, uma vez que o pré-aquecimento auxiliaria no alívio das

tensões no material, enquanto a deposição de níquel ajudaria na retirada do excesso de carbono na região a ser soldada.

Para o processo de pré-aquecimento não há uma temperatura, nem um tempo padrão, sendo estes dependentes das dimensões do material. Assim, considerando a pequena espessura do material, 4 mm, escolheu-se um pré-aquecimento a 300°C durante duas horas (figura 46).

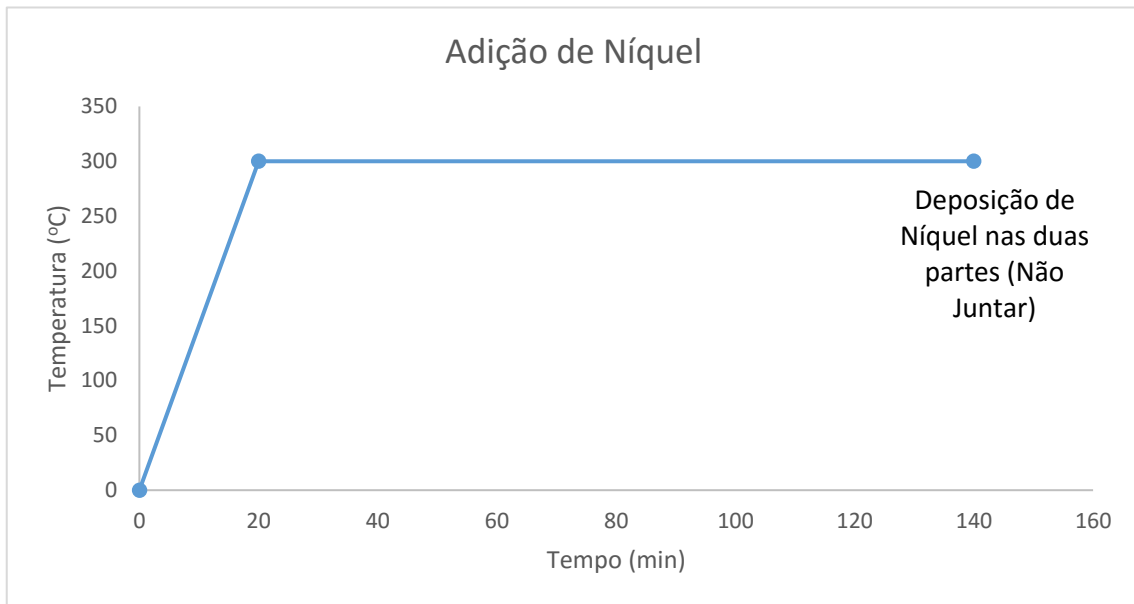


Figura 46 – Procedimento para pré-aquecimento dos provetes antes da deposição do níquel.



Figura 47 – Provetes sendo aquecidos na mufla a 300 °C, antes da deposição de níquel.

Para a retirada do excesso de carbono da matriz do ferro fundido foram utilizados elétrodos de níquel FN 10. A ligação do elétrodo ao pólo (+) e a amperagem (60 A) utilizada foi feita seguindo sugestão do fabricante (50 - 80 A), a qual pode ser observada na embalagem (figura 48).



Figura 48 – Elétrodos de níquel FN 10 utilizados na primeira deposição.

Após a deposição do níquel em todos os provetes, foi necessário esperar o arrefecimento ao ar para que fosse possível rebarbar o material e retirar o níquel (figura 49).



Figura 49 – SidoDur® 450 após deposição de níquel e ainda com escória deixada pelo processo.

A retirada do níquel foi realizada no centro de usinagem CNC *HAAS VF-2* para que fosse possível refazer o chanfro de 45° nos provetes (figura 50).

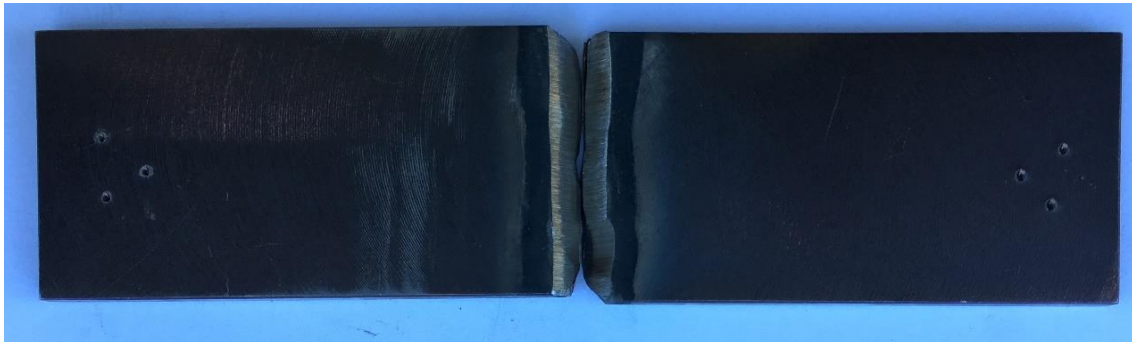


Figura 50 – Provetes após o primeiro procedimento (pré-aquecimento, deposição de níquel e realização dos chanfros a 45°).

Após a realização do primeiro procedimento, deu-se início ao segundo procedimento (figura 51): novo pré-aquecimento dos provetes a 300°C durante duas horas e posterior soldagem utilizando eletrodo revestido de *Inconel LR 82* com diâmetro de 2,5 mm (figura 52). A ligação do eletrodo ao pólo (+) e a amperagem (75 A) utilizada foi feita seguindo sugestão do fabricante (75-100 A), a qual pode ser observada na embalagem (figura 52).

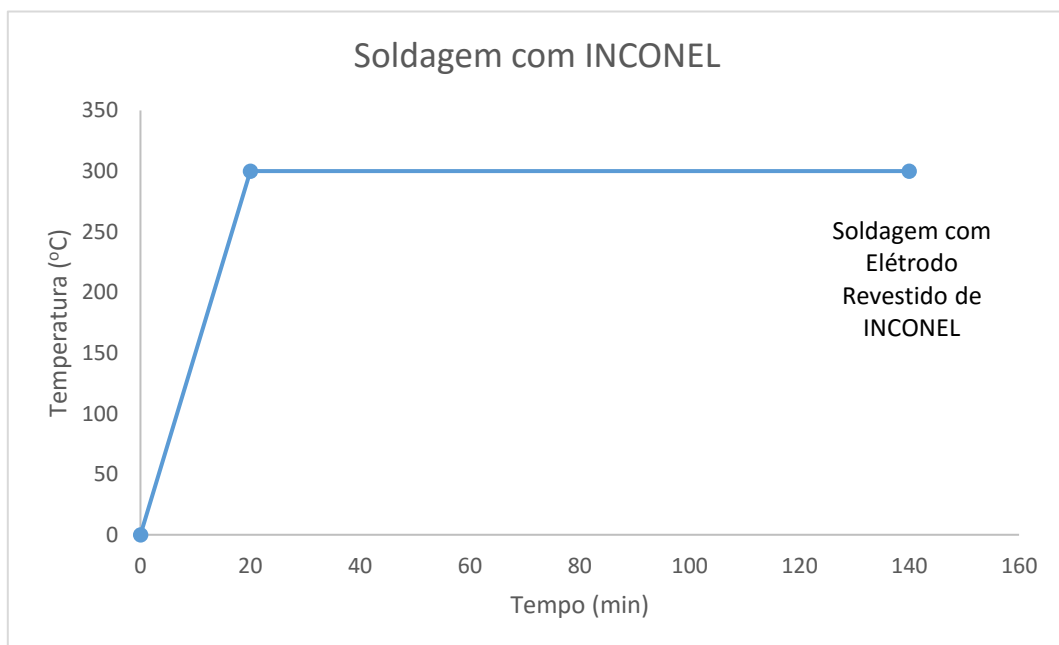


Figura 51 – Procedimento para aquecimento dos provetes após rebarbagem do níquel e antes da soldagem com Inconel.

<b>EUR TROD</b>		<b>LR 82</b>		2,5 x 300 mm		$\phi$ A (mm)	
AWS SFA 5.11: E Ni Cr Fe-3		% C = 0,04 % Si = 0,4 % Mn = 7,5	% Cr = 16 % Fe = 7 % Nb = 2	E > 390 MPa R > 550 MPa A(4d) > 30%	2,0 Kg 80 Un		
ELECTRO PORTUGAL, Lda						L-212462511 RLDBE	DC(+) Made in EC

Figura 52 – Propriedades e composição química do Inconel LR 82 utilizado para soldar os provetes.



Figura 53 – Provette após soldagem com Inconel.

Analisando a espessura e o tamanho da região a ser soldada, optou-se por utilizar a mínima corrente indicada pelo fornecedor (75A). Um elevado valor da corrente faz com que o volume e a largura da poça de fusão sejam maiores.

## 3.4 CARACTERIZAÇÃO DAS SOLDAGENS

### 3.4.1 ENSAIO DE TRAÇÃO

Sendo considerado um teste de fundamental importância por fornecer dados quantitativos referentes às características mecânicas dos corpos de prova, além de ser facilmente executado, o ensaio de tração consiste na aplicação crescente de uma força ou carga uniaxial até à ruptura do material em teste.

A resistência do corpo de prova é mensurada de maneira satisfatória uma vez que a carga no ensaio é aplicada de forma moderada e à velocidade constante, além de as deformações a que é submetido o material ocorrerem de forma distribuída ao longo de sua superfície [87].

Quando a força é aplicada de modo gradativo e crescente, atinge a carga máxima suportada pelo material, e então a uniformidade da deformação termina e, concomitantemente, começa a surgir um fenômeno de diminuição localizada da secção do provete (normalmente chamado de estrição). Certamente, a ruptura do material acontecerá nessa região mais estreita. Ruptura em local diferente poderá também ocorrer, desde que exista algum defeito interno relevante no material [87].

Os ensaios foram feitos no laboratório de Ensaios Tecnológicos do ISEP utilizando a máquina universal *Shimadzu Autograph AGS-X – 100 kN* (figura 54) com a célula de carga de 100 kN e a aquisição dos dados através do *software Trapezium*. Todos os ensaios de tração tiveram como base as normas *ISO 4136 (2012)* [93].



Figura 54 – Equipamento Shimadzu Autograph AGS-X – 100 kN utilizado no ensaio de tração.

Os provetes soldados tinham um comprimento aproximado de 120 mm. Quando fixados às garras, essas estavam distantes 75 mm (figura 55). A taxa de aplicação da carga aos provetes foi constante e com uma velocidade de 2 mm/min.

Neste ensaio determinou-se duas propriedades do corpo de prova: resistência mecânica máxima e extensão na ruptura.



Figura 55 – Fixação da amostra para início do ensaio de tração, com distância entre garras de 85 mm.

Após o ensaio, observou-se uma área muito pequena de estrição (praticamente desprezível) bem como uma ruptura do tipo frágil. Essa ocorreu na ZTA, uma vez que o elevado calor gerado pela soldagem contribuiu para a formação de microconstituintes (como martensita) com dureza superior ao material de base e ao material de adição (figura 56).



Figura 56 – Amostra após ensaio de tração, evidenciando a fratura na região da ZTA.

### 3.4.2 ANÁLISE METALOGRAFICA

Para que fosse possível analisar a microestrutura do provete soldado, o procedimento de metalografia se faz necessário. Seguindo a norma *ISO 17639 (2003)* [94], o processo metalográfico se inicia com o corte das amostras, pois estas necessitam ser embutidas em resina para os passos seguintes de análise. Este corte foi realizado na máquina *DISCOTOM 2*, a qual utiliza disco de carboneto de silício para o corte (figura 57) a uma velocidade de 45 m/s.



Figura 57 – Equipamento *DISCOTOM 2* utilizado para o corte das amostras através de disco rotativo.

Após o corte dos provetes, as amostras seguiram para a prensa *STRUERS PREDOPRESS* de montagem a quente (figura 58), onde foram embutidas em resinas termoendurecível com diâmetro, aproximadamente, de 30 mm (figura 59).



Figura 58 – Prensa *STRUERS PREDOPRESS* utilizada para embutir as amostras em resina.

A força empregada no embutimento das amostras é de 20 kN. As amostras são aquecidas a 180 °C por um período de 8 minutos. Este tempo é necessário para que a resina se funda e envolva a amostra do provete. Após a fusão e a compactação, aguarda-se 4 minutos para que a amostra possa arrefecer.

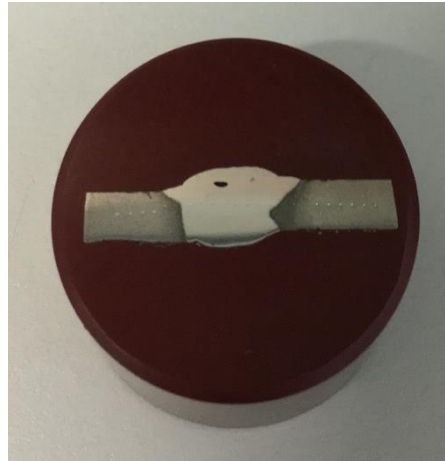


Figura 59 – Amostra de Sibodur 450 embutida em resina termoendurecível, com diâmetro de aproximadamente 30 mm.

Com as amostras embutidas na resina, o próximo passo foi lixá-las. Para isso utilizou-se a lixadeira *STRUERS ROTOPOL 1* (figura 60) e lixas com diferentes granulometrias: 220, 500 e 1000 mesh (grãos/polegada<sup>2</sup>). As amostras eram rodadas 90° manualmente, no fim da utilização de cada granulometria de lixa, por forma a tentar eliminar os riscos produzidos pela lixa na ação anterior.



Figura 60 – Lixadeira *STRUERS ROTOPOL 1* utilizada para retirar as imperfeições das amostras.

Após o lixamento, as amostras foram submetidas ao processo de polimento. Este procedimento ocorreu igualmente na polideira *STRUERS ROTOPOL 1* (figura 61), mas agora provida dos respectivos panos para suportar a suspensão de pó de diamante usada no polimento. Primeiramente, em um processo de 20 minutos, a amostra foi polida com o abrasivo de diamante com granulometria de 3  $\mu\text{m}$ , para serem retirados os riscos mais profundos gerados no lixamento. Posteriormente, após a amostra ser lavada com água corrente, álcool etílico e seca com ar comprimido, iniciou-se o novo processo de polimento, utilizando um abrasivo de diamante mais fino, com granulometria de 1  $\mu\text{m}$ , juntamente com lubrificante. Decorridos vinte minutos, lavou-se a amostra da mesma maneira que a anterior: água corrente, álcool etílico e secagem com ar comprimido.



Figura 61 – Polimento das amostras na *STRUERS ROTOPOL 1*. Primeiro a amostra foi polida no lado esquerdo na imagem (pano azul) onde se utilizou abrasivo de diamante com granulometria de 3  $\mu\text{m}$ . Após esse procedimento, poliu-se a amostra com abrasivo de diamante com granulometria de 1  $\mu\text{m}$ , no lado direito (pano vermelho).

Para se conseguir analisar todos os microconstituintes do ferro fundido em um microscópio, é necessário que a amostra sofra um ataque químico. Assim, foi usado um reagente líquido chamado Nital, com uma concentração de 4% (mistura 4% de ácido nítrico concentrado e 96% de álcool etílico em volume). O ataque químico acontece após a imersão da amostra no reagente e com um deslocamento desta afim de se obter um melhor resultado. Este processo teve uma duração de quinze segundos. Caso a amostra fique exposta ao reagente por um tempo mais prolongado, ocorrerão manchas na superfície do material, sendo necessário retroceder ao polimento da amostra.

Após o ataque químico, as amostras foram levadas ao microscópio *OLYMPUS BX51M* para analisar e fotografar os seus microconstituintes (figura 62). As ampliações utilizadas foram: 50x, 100x, 200x.

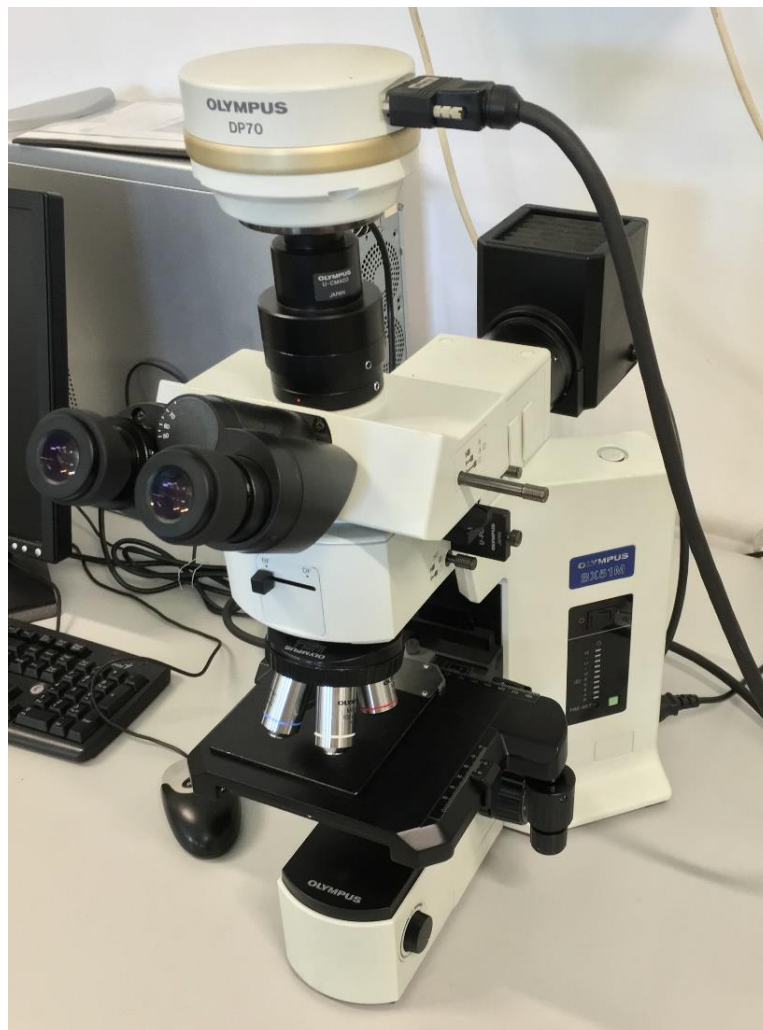


Figura 62 – Microscópio *OLYMPUS BX51M* utilizado para observar os microconstituintes das amostras.

### 3.4.3 ENSAIO DE DUREZA

Para a determinação da dureza foi escolhido o método de dureza Vickers. Este processo ocorre através da aplicação de um penetrador com a ponta de diamante (no formato de pirâmide de base quadrada, com ângulos entre faces de  $136^\circ$ ) na superfície da peça. A dureza é medida relacionando a força aplicada pelo penetrador e a área da indentação (de acordo com a medida das duas diagonais) deixada no material. As cargas aplicadas pelo penetrador podem variar de 1 a 120 kgf e o tempo de aplicação dessas cargas pode estar situado entre 10 e 15 segundos. Pela simbologia, a aplicação de 1 kgf é representada na dureza Vickers como HV1 [85].

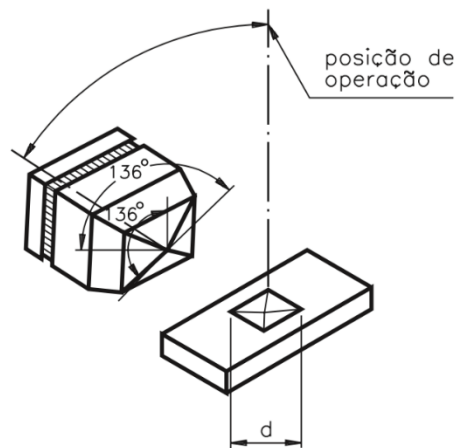


Figura 63 – Penetrador de diamante em formato piramidal de base quadrada [85].

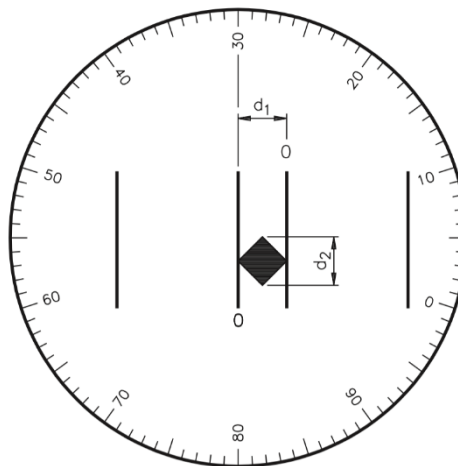


Figura 64 – Diagonais de indentação feita pelo penetrador [85].

O ensaio foi realizado no durômetro EMCO – TEST M4U 025G3 (figura 65). Foi analisada a dureza desde o metal de base, passando pela ZTA e metal de adição, até o metal de base do lado oposto. As indentações foram feitas horizontalmente (ao meio do provete) e distantes 0,7 mm (figura 59), seguindo a norma para ensaios de dureza *ISO 9015-1 (2001)* [95] e adotou-se a dureza Vickers (HV 5).

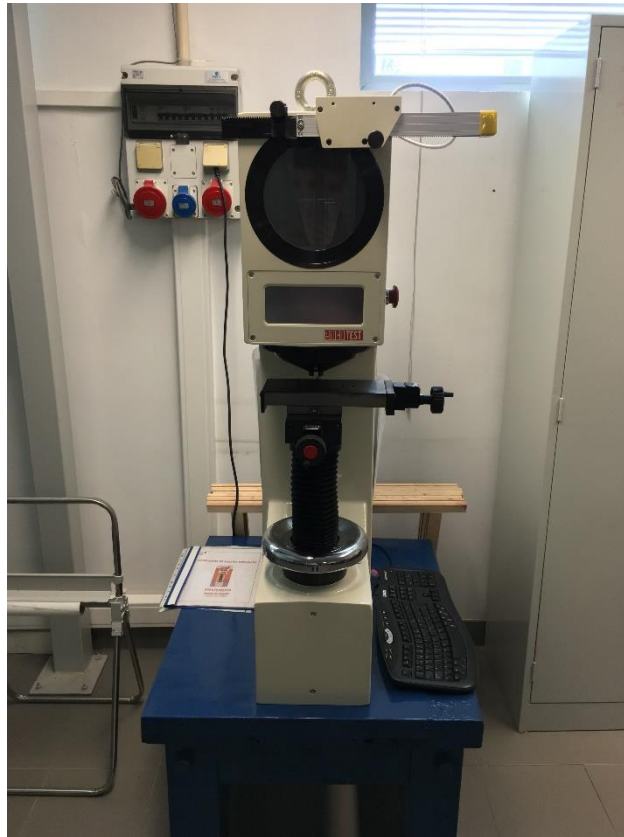


Figura 65 – Durômetro EMCO – TEST M4U 025G3 utilizado para os ensaios de dureza.

#### 3.4.4 ENSAIO COM LÍQUIDO PENETRANTE

O ensaio de líquido penetrante é utilizado com o objetivo de se detectar possíveis descontinuidades existentes nas superfícies dos materiais. É aplicado em diversos tipos de materiais como: vidros, alguns tipos de plásticos, cerâmicas, ligas ferrosas e não ferrosas, entre outras [90 - 92]. O ensaio seguiu a norma em vigor *ISO 23.277 (2015)* [96].

## LÍQUIDOS UTILIZADOS NO ENSAIO



SOLVENTE

LÍQUIDO PENETRANTE

REVELADOR

Figura 66 – Produtos utilizados no ensaio de líquidos penetrantes, revelando possíveis falhas existentes no cordão de solda, bem como na junta soldada.

Antes do início dos ensaios, é necessária a aplicação do solvente na região da junta soldada, para retirar todas as impurezas resultantes do processo de soldagem. Para isso, o spray de solvente foi aplicado em todas as amostras e posteriormente passou-se uma estopa para realizar a limpeza (figura 67).



Figura 67 – Amostras após a limpeza com solvente.

Com os provetes limpos, aplicou-se o spray com o líquido penetrante (com coloração avermelhada) na região da junta soldada (figura 68).

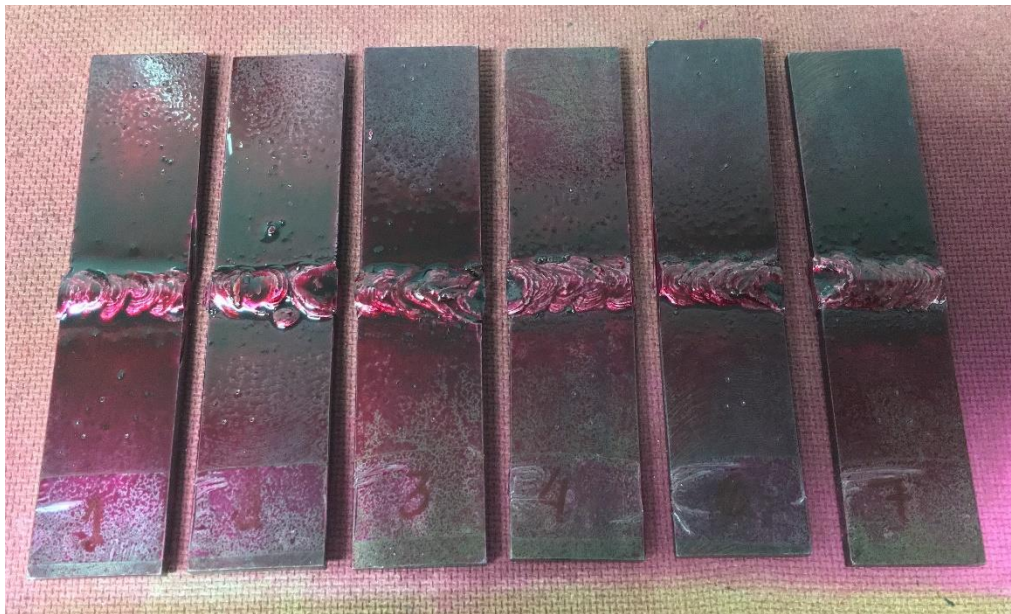


Figura 68 – Amostras após a aplicação do líquido penetrante.

Após quinze minutos, tempo necessário para que o líquido penetre nas regiões que apresentem descontinuidades, novamente foi passada uma estopa com solvente a fim de remover o excesso de líquido penetrante na região da solda (figura 69).



Figura 69 – Amostra após a retirada do excesso de líquido penetrante e antes da aplicação do revelador.

Retirado o excesso de líquido penetrante no cordão de solda, foi aplicado o revelador (spray com líquido de coloração branca). Esta substância revelará, após 15 minutos, (locais de coloração avermelhada) possíveis imperfeições que possam existir na região soldada.



Figura 70 – Amostra após a aplicação do revelador.

Observando a figura 70, nota-se que a solda não apresentou descontinuidades superficiais. Os poucos pontos vermelhos que são visíveis nessa região se deve a presença líquido não retirado durante a limpeza.

### 3.4.5 PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

Neste ensaio, ocorre a magnetização da peça pela indução de um campo magnético gerada por um eletroímã (figura 71), o qual é colocado sobre o material que se deseja analisar. A corrente que circula pelo eletroímã pode ser CA ou CC [86]. Na superfície da

solda, são colocadas partículas magnéticas que se alinham de acordo com o campo magnético longitudinal gerado pelos braços do Yoke (figura 72). Caso ocorra o agrupamento das partículas em algum ponto da solda, fica demonstrado que existe alguma descontinuidade na junta soldada (podendo ser trinca, bolhas no interior da solda ou algum tipo de falha). Porém, se isso não acontecer, a solda é aprovada para este ensaio (de acordo com a norma *BS EN ISO 23278: 2009*) [97].

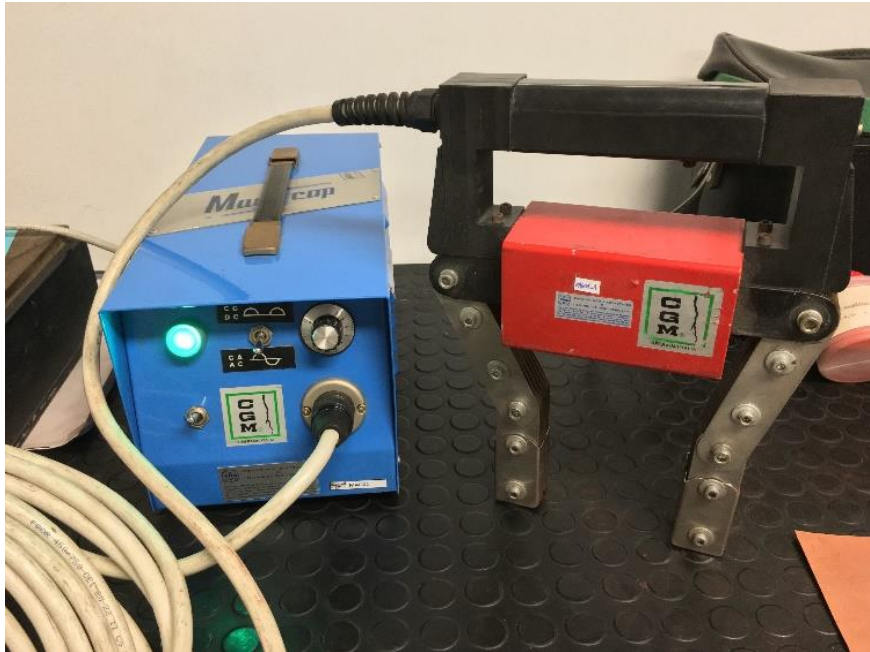


Figura 71 – Equipamento utilizado no ensaio de partículas magnéticas Yoke.

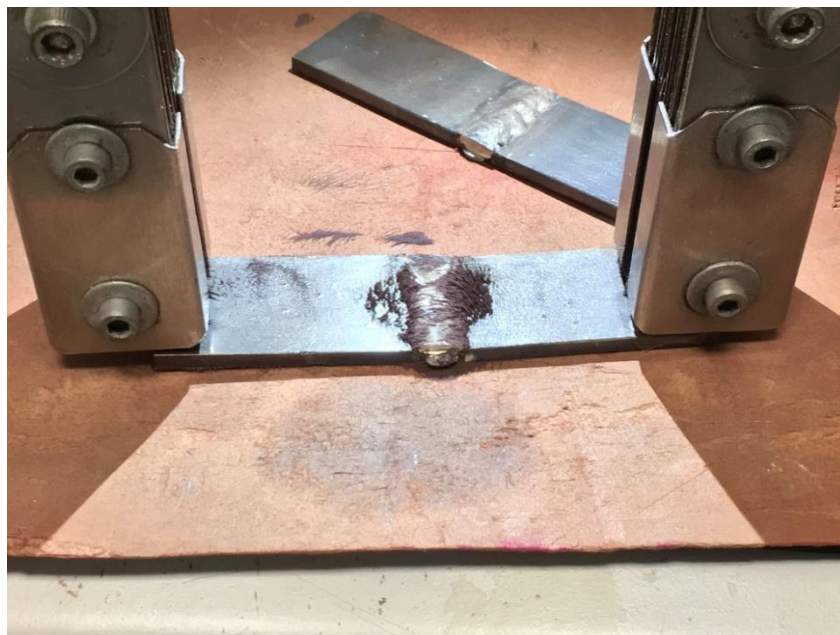


Figura 72 – Alinhamento de partículas magnéticas de acordo com o campo magnético gerado.

### 3.4.6 INSPEÇÃO VISUAL

Este ensaio, por ser um método não destrutivo e de observação, não requerendo ferramentas com alto nível de sofisticação para ser realizado, é um dos métodos mais realizados. A análise é basicamente de observação da região da solda, tanto do cordão como de irregularidades próximas à solda: trincas, falta de penetração do material de adição, porosidades na superfície do cordão, mordeduras, desalinhamentos, etc. A norma ISO 17633 (2003) [98] estabelece alguns parâmetros para a realização dessa inspeção, como: estar com os olhos distantes (entre 150 e 600 mm) da superfície a ser analisada, ter uma iluminação mínima de 350 lux (sendo recomendados 500 lux). Excesso de material de adição e excesso de penetração também são considerados defeitos na soldagem.



Figura 73 – Inspeção visual da região de solda do Sibodur® 450 com boa qualidade.

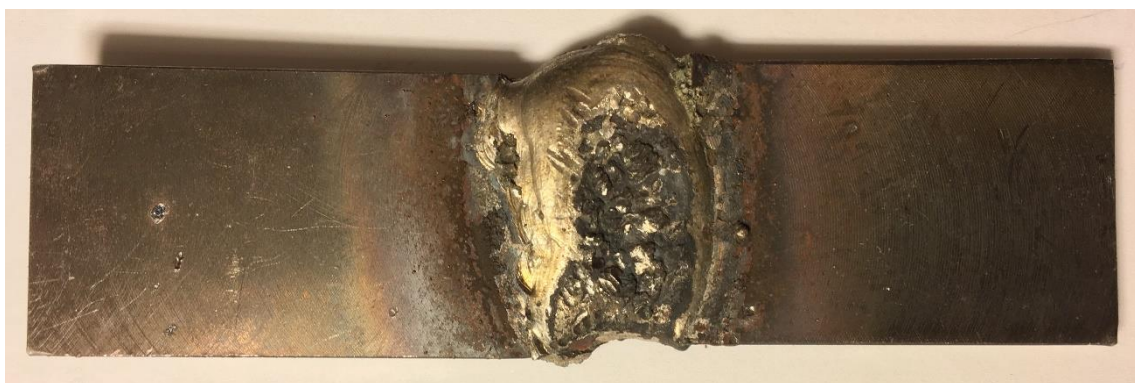


Figura 74 – Inspeção visual da região de solda com péssima qualidade.

Durante o procedimento experimental, foi feita uma análise rigorosa no padrão do cordão de solda. Provetes com falhas grosseiras como na figura 74 (excesso de material

de adição, excesso de penetração, porosidades acentuadas, deslocamento dos provetes soldados) foram evitados. Assim, todos os resultados das amostras que serão apresentados a seguir tiveram um aspecto semelhante à figura 73.

### 3.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A princípio, o estudo experimental tinha como base a realização da soldagem seguindo o planejamento citado no item 3.3.2. Porém, ao longo da execução do trabalho e com alguns resultados preliminares, surgiu a necessidade de variar os parâmetros de solda (tabela 18) a fim de se obter novos dados para assim comparar e analisar todos os resultados, selecionando o melhor parâmetro. Para isso, foi necessário desenvolver uma referência do tipo de parâmetro para cada amostra, facilitando o entendimento.

**CP\_Px\_N\_Px\_Wz\_Py**

em que:

**CP** – Código do provete;

**x** – Temperatura de pré-aquecimento;

**y** – Temperatura de Pós-aquecimento;

**1º P** – 1º Pré-aquecimento (à temperatura x) (a frio, x assume o valor 0);

**N** – Cordão de Níquel (se não levou cordão de Níquel, não leva N);

**2º P** – 2º Pré-aquecimento (à temperatura x);

**W** – Solda com Inconel;

**z** – número de cordões de solda;

**3º P** – Pós-aquecimento (à temperatura y).

A figura 70 (líquido penetrante) e figura 72 (partículas magnéticas) no capítulo 3, mostram o que ocorreu em duas amostras, mas estes resultados se repetiram em todos os ensaios não-destrutivos realizados nas demais amostras.

Tabela 18 – Parâmetros adotados para cada tipo de amostra.

EXECUÇÃO DAS SOLDAS					
REFERÊNCIA DA AMOSTRA	PRÉ-AQUECIMENTO [T/T <sub>ESTÁGIO</sub> (°C / h)]	PASSAGEM DE Ni/ PARÂMETROS DA SOLDA (I, N <sup>o</sup> PASSAGENS)	PRÉ-AQUECIMENTO O [T/T <sub>ESTÁGIO</sub> (°C / h)]	SOLDADURA INCONEL / PARÂMETROS DA SOLDA (I, N <sup>o</sup> PASSAGENS)	PÓS-AQUECIMENTO [T/T <sub>ESTÁGIO</sub> (°C / h)]
01_PO_W2	-	-	-	80A / 2 passes	-
02_PO_W2	-	-	-	-	-
03_PO_W2_P700	-	-	-	-	-
04_PO_W2_P700	-	-	-	80A / 2 passes	(700 °C / 2h)*
05_PO_W2_P700	-	-	-	-	-
06_PO_W2_P800	-	-	-	-	-
07_PO_W2_P800	-	-	-	80A / 2 passes	(800 °C / 2h)*
08_PO_W2_P800	-	-	-	-	-
09_P300_N_P300_W2_PO	-	-	-	-	-
10_P300_N_P300_W2_PO	-	-	-	-	-
11_P300_N_P300_W2_PO	(300 °C / 2h)	60A / deposição	(300°C / 2h)	80A / 2 passes	-
14_P300_N_P300_W2_PO	-	-	-	-	-
15_P300_N_P300_W2_PO	-	-	-	-	-
16_P300_N_P300_W2_PO	-	-	-	-	-
17_P300_N_P300_W4_PO	(300 °C / 2h)	60A / deposição	(300 °C / 2h)	80A / 4 passes	-
18_P300_N_P300_W4_PO	-	-	-	-	-
19_P300_N_P700_W2_PO	-	-	-	-	-
20_P300_N_P700_W2_PO	(300 °C / 2h)	60A / deposição	(700 °C / 2h)	80A / 2 passes	-
21_P300_N_P700_W2_PO	-	-	-	-	-
22_P300_N_PO_W2_P700	-	-	-	-	-
23_P300_N_PO_W2_P700	(300 °C / 2h)	60A / deposição	-	80A / 2 passes	(700 °C / 2h)*
24_P300_N_PO_W2_P700	-	-	-	-	-

\* Após o fim do ciclo de pós-aquecimento, os provetes foram deixados no interior do forno (arrefecimento lento) até atingir a temperatura ambiente

### 3.5.1 ENSAIO DE TRAÇÃO

O primeiro ensaio destrutivo realizado foi o ensaio de tração em todas as amostras. Este era o principal ensaio para comprovar a eficácia dos parâmetros adotados bem como a qualidade dos cordões de solda. Os resultados de resistência à tração obtidos em todos os provetes e de suas respectivas extensões estão descritos na tabela 19.

Tabela 19 – Resultados obtidos no ensaio de tração.

REFERÊNCIA DA AMOSTRA*	ENSAIO DE TRAÇÃO		
	RESISTÊNCIA MECÂNICA (MPa)	RESISTÊNCIA MECÂNICA MÉDIA (MPa)	EXTENSÃO NA RUPTURA (%)
01_PO_W2	293,5	299,8 ± 8,9	6,0
02_PO_W2	306,2		6,8
03_PO_W2_P700	337,6	359,4 ± 23,1	7,4
04_PO_W2_P700	357,0		8,3
05_PO_W2_P700	383,6	331,7 ± 26,3	12,9
06_PO_W2_P800	322,6		7,1
07_PO_W2_P800	361,4	378,1 ± 13,3	8,8
08_PO_W2_P800	311,2		6,5
09_P300_N_P300_W2_PO	389,8	430,1 ± 25,2	10,2
10_P300_N_P300_W2_PO	366,9		8,4
11_P300_N_P300_W2_PO	394,9	282,8 ± 23,5	8,9
15_P300_N_P300_W2_PO	367,5		8,5
16_P300_N_P300_W2_PO	371,3	373,5 ± 16,0	8,7
17_P300_N_P300_W4_PO	412,3		11,5
18_P300_N_P300_W4_PO	448,0	299,0	13,5
19_P300_N_P700_W2_PO	255,8		5,2
20_P300_N_P700_W2_PO	299,0	293,6	5,2
21_P300_N_P700_W2_PO	293,6		6,5
22_P300_N_PO_W2_P700	390,7	370,9	11,4
23_P300_N_PO_W2_P700	370,9		9,4
24_P300_N_PO_W2_P700	359,1		8,9

\*Foram soldadas 24 amostras, porém três destas (referentes ao parâmetro P300\_N\_P300\_W2\_PO) foram descartadas durante a inspeção visual por falta de alinhamento.

Como esse tipo de material nunca foi estudado com soldagem, foi decidido que a resistência mecânica mínima satisfatória após a solda deveria ser de 350 MPa, que corresponde aproximadamente a 75% da resistência mecânica do material de base fornecido pela GF (450 MPa).

Assim, constatou-se que alguns parâmetros escolhidos (PO\_W2, PO\_W2\_P800, P300\_N\_P700\_W2\_PO) não resultaram na condição pré-determinada, ou seja, não atingiram a resistência mecânica de 350 MPa (mesmo considerando o desvio padrão), enquanto as demais foram aprovadas, isto é, atingiram valores próximos ou superiores ao mínimo estabelecido.

Tabela 20 – Parâmetros adotados que foram satisfatório e não satisfatório.

<b>NÃO APROVADO</b>	<b>APROVADO</b>
PO_W2	PO_W2_P700
PO_W2_P800	P300_N_P300_W2_PO
P300_N_P700_W2_PO	P300_N_P300_W4_PO
	P300_N_PO_W2_P700



Figura 75 – Ruptura devido ao ensaio de tração.

Das 21 amostras, 20 tiveram a ruptura na região da ZTA (figura 75). Apenas em uma amostra (05\_PO\_W2\_P700) a ruptura se deu ao meio do cordão de solda, conforme mostra a figura 76.



Figura 76 – Local de ruptura da amostra 05\_PO\_W2\_P700.

Porém, uma das explicações para a ocorrência da ruptura nessa região é devido à presença de três poros de grandes dimensões no interior do cordão de solda, próximo à superfície superior (figura 77).



Figura 77 – Presença de poros no interior do cordão de solda da amostra 05\_PO\_W2\_P700.

Mesmo apresentando essas irregularidades, a amostra 05\_P0\_W2\_P700 registrou o melhor valor (383,6 MPa) em termos de resistência mecânica, no conjunto de parâmetros que a caracteriza e quando comparada às demais.

As amostras do parâmetro P300\_N\_P700\_W2\_P0, mesmo apresentando baixa resistência mecânica e diversas irregularidades na solda (figura 78), como porosidades e mordedura, não sofreram rupturas no cordão de solda (figura79).

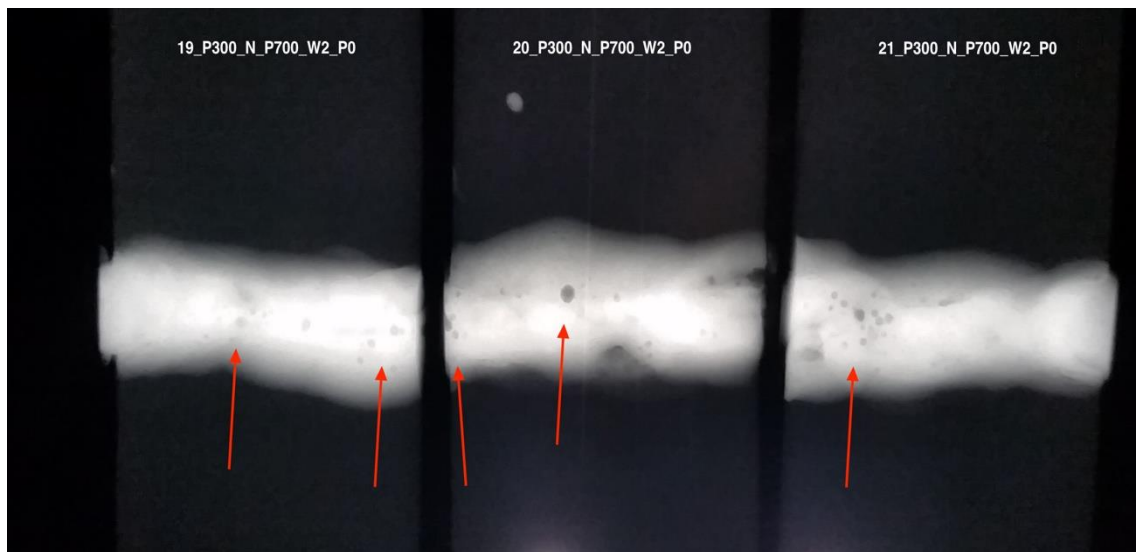


Figura 78 – Radiografia da junta solda das amostras com o parâmetro P300\_N\_P700\_W2\_P0.

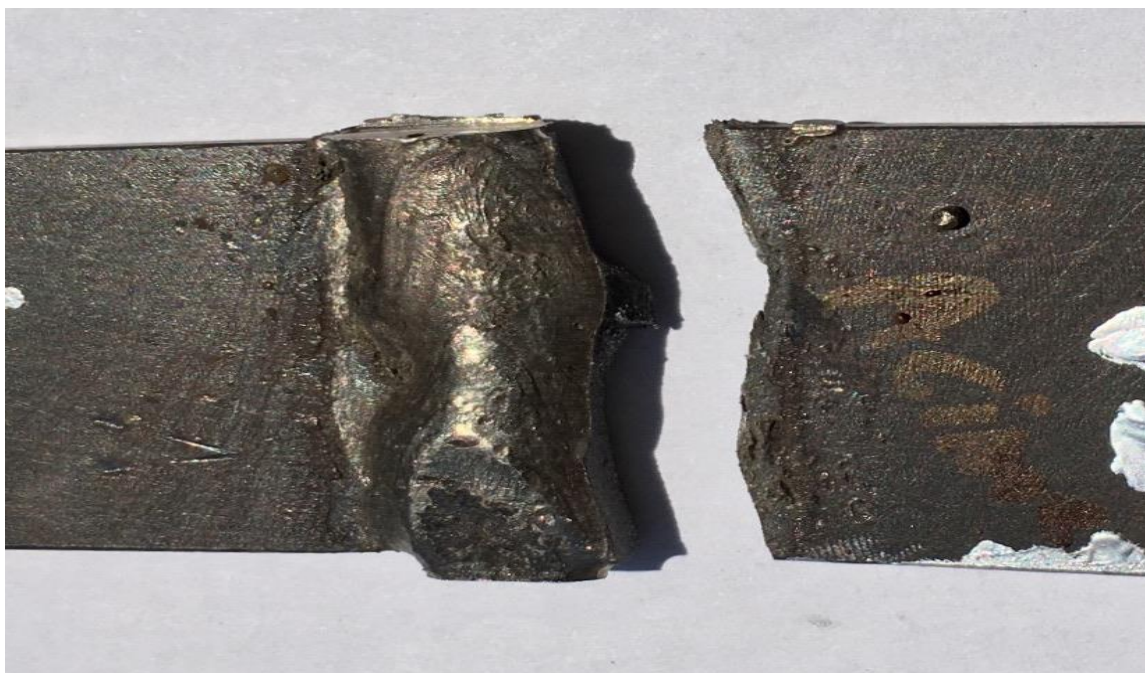


Figura 79 – Ruptura da amostra (20\_P300\_N\_P700\_W2\_P0) após ensaio de tração.

### 3.5.2 PERFIL DE DUREZA

Após os ensaios de tração, foi realizado o ensaio de dureza em todas as amostras (conforme descrito no item 3.4.3). Como os valores de dureza na região próxima ao cordão de solda são relativamente aproximados (comparando amostras em cada condição de soldagem), para análise dos resultados foram selecionadas cinco amostras dentre os parâmetros que obtiveram desempenho mais satisfatório no ensaio de tração.

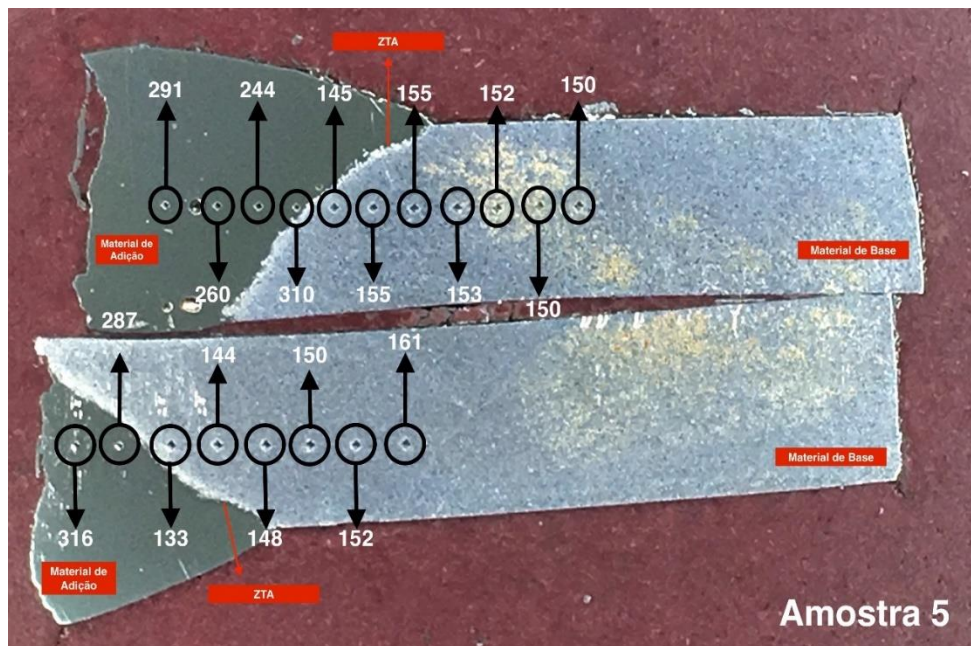


Figura 80 – Indentação com suas respectivas durezas AMOSTRA 05\_PO\_W2\_P700.

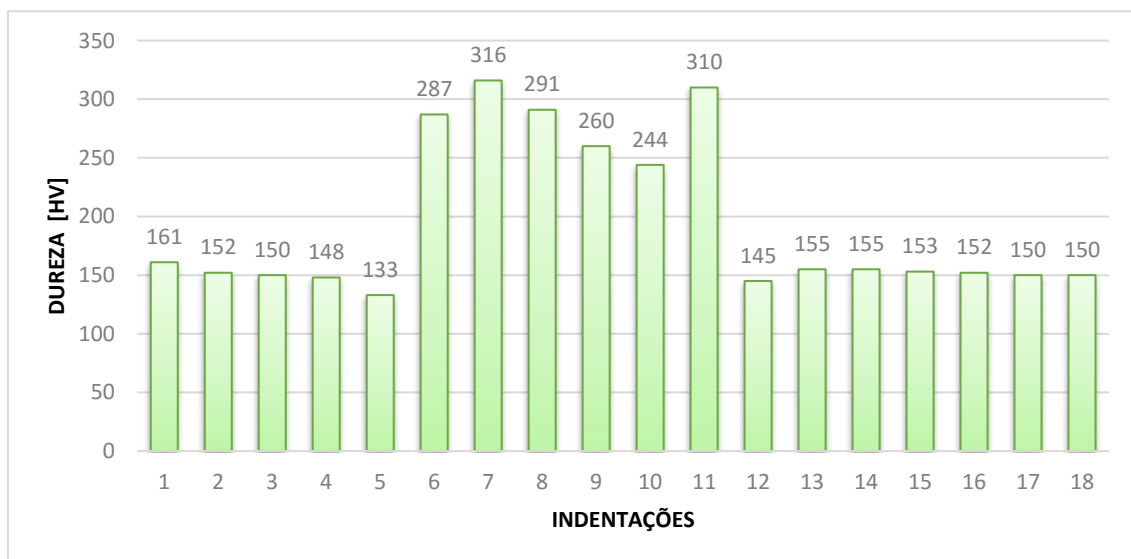


Figura 81 – Gráfico com o perfil de dureza AMOSTRA 05\_PO\_W2\_P700.

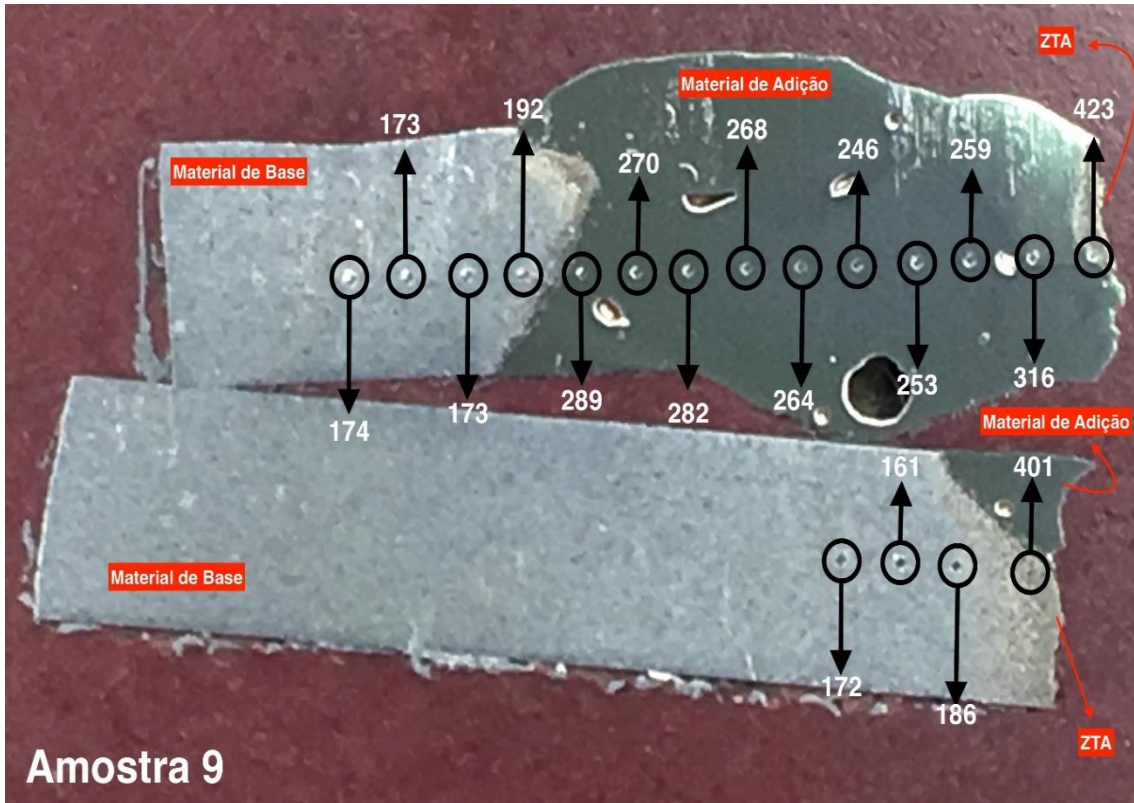


Figura 82 – Indentação com suas respectivas durezas AMOSTRA 09\_P300\_N\_P300\_W2\_P0.

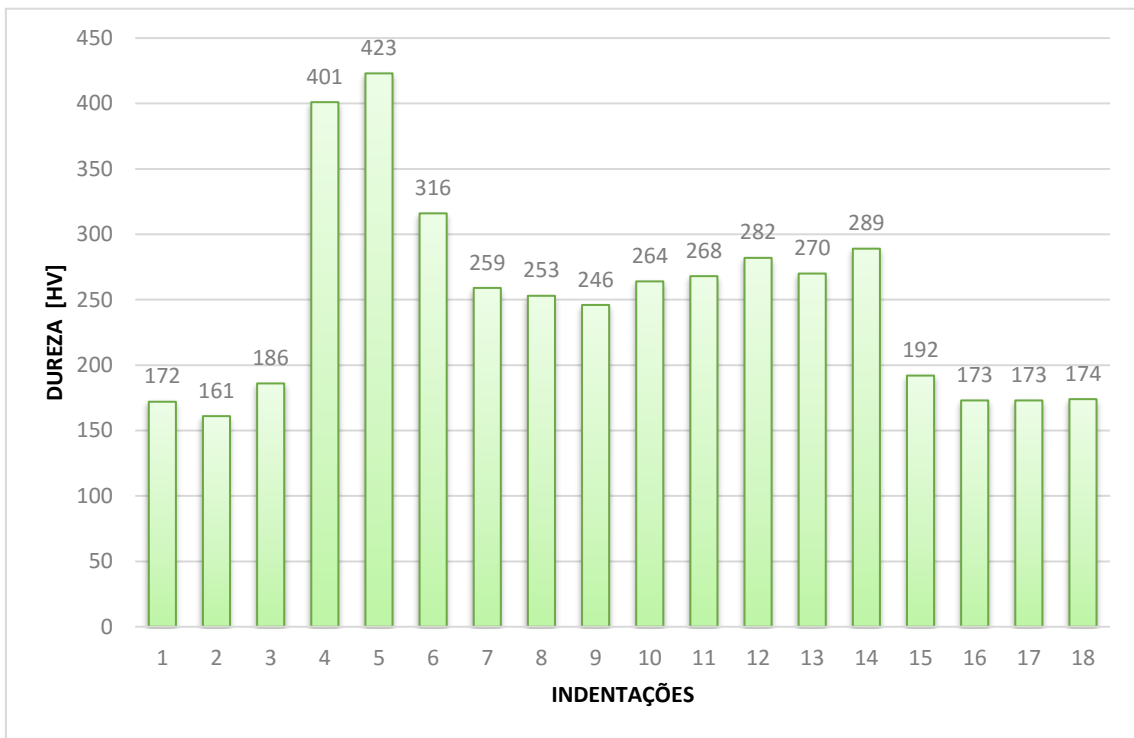


Figura 83 – Gráfico com o perfil de dureza AMOSTRA 09\_P300\_N\_P300\_W2\_P0.

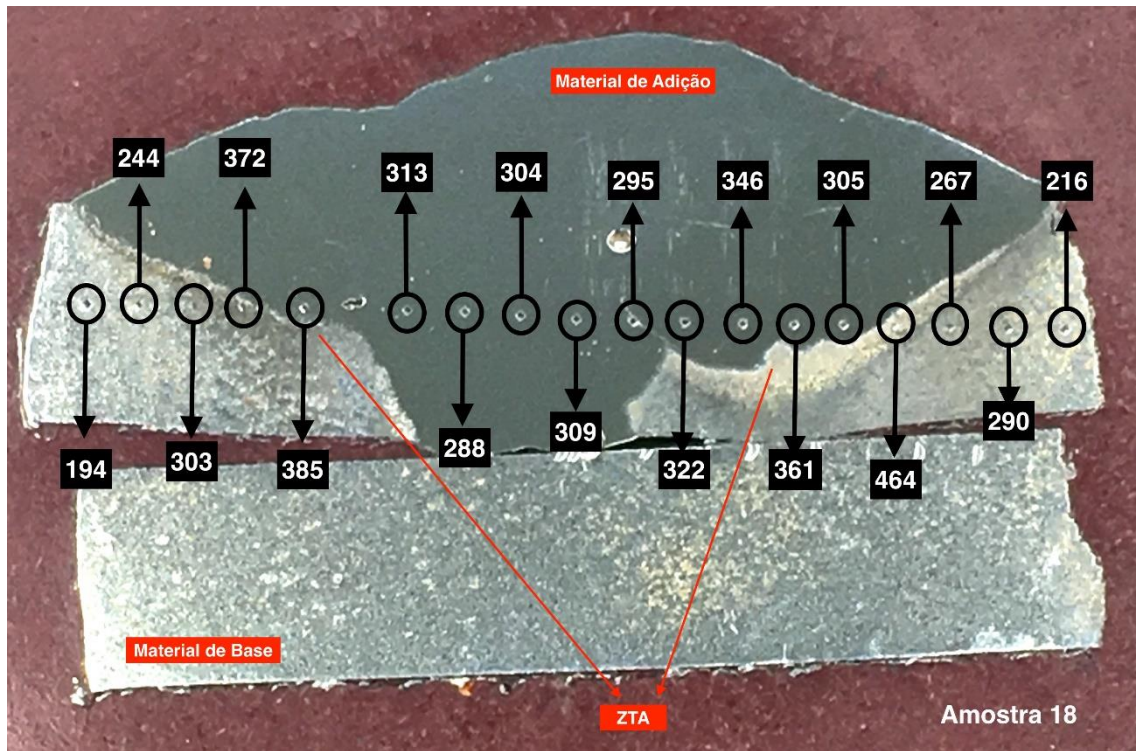


Figura 84 – Indentação com suas respectivas durezas AMOSTRA 18\_P300\_N\_P300\_W4\_PO.

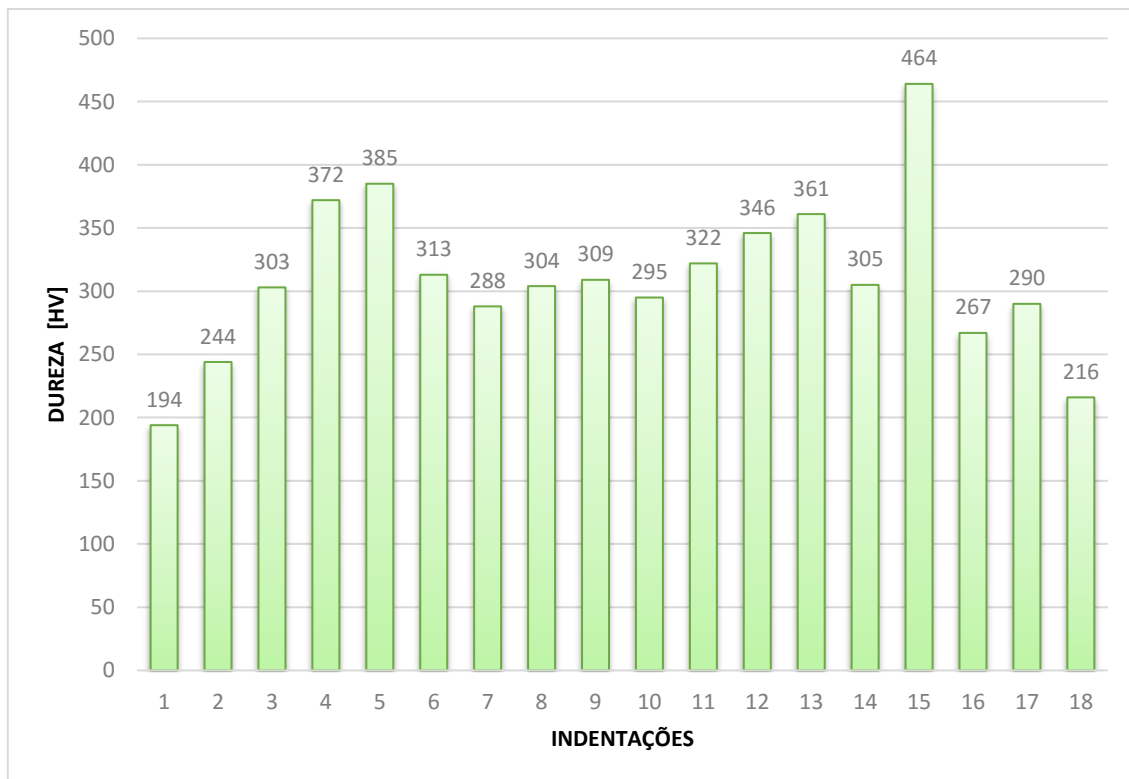


Figura 85 – Gráfico com o perfil de dureza AMOSTRA 18\_P300\_N\_P300\_W4\_PO.

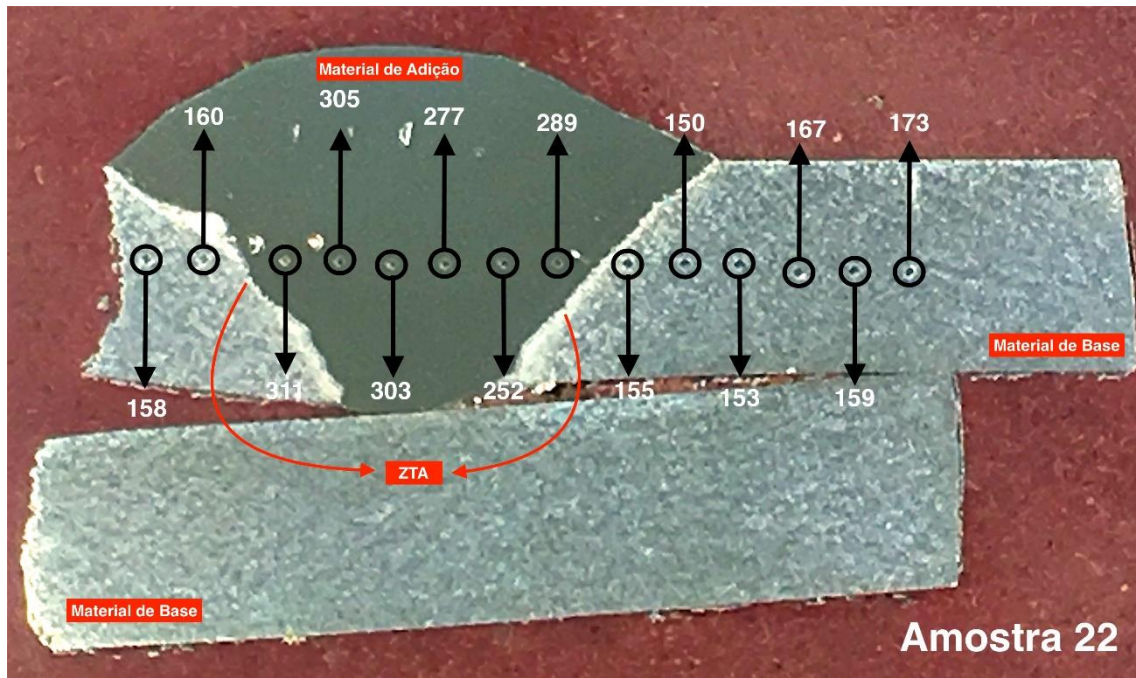


Figura 86 – Indentação com suas respectivas durezas AMOSTRA 22\_P300\_N\_P0\_W2\_P700.

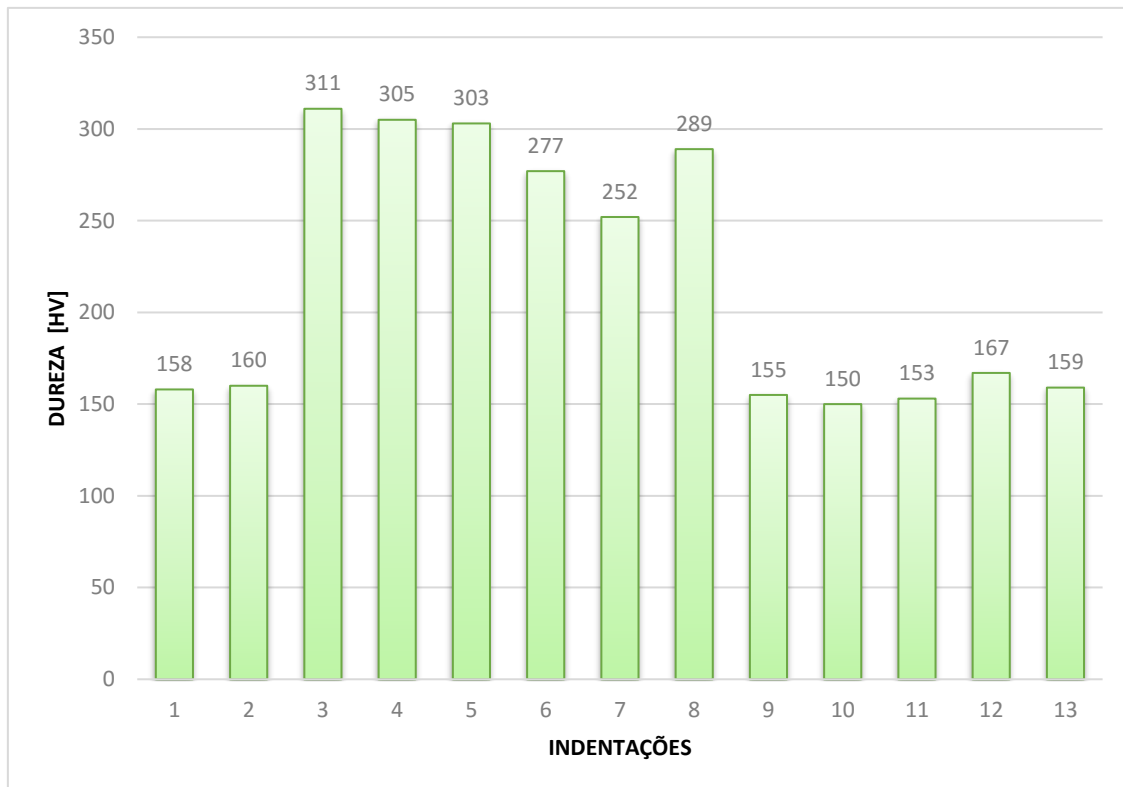


Figura 87 – Gráfico com o perfil de dureza AMOSTRA 22\_P300\_N\_P0\_W2\_P700.

Analisando todos os perfis de dureza das amostras, nota-se uma constância nos valores. O material base, como já era esperado pois ele não se altera ao longo do processo experimental, apresenta uma dureza entre 140 – 170 HV (a GF fornece seu *data sheet* uma dureza de 150 – 190 HB). Já o material de adição tem uma dureza um pouco elevada, se comparada ao material de base, entre 240-340 HV. Devido ao gradiente de calor gerado durante o processo de soldagem, a microestrutura da região próxima ao cordão de solda (conhecida como ZTA, zona termicamente afetada) sofre alterações. Esse fato contribui para a formação de novos microconstituintes com um valor de dureza maior, o que pode ser observado nos gráficos acima (entre 370 – 564 HV). Estas novas microestruturas serão analisadas no item seguinte.

Com exceção da amostra 05\_P0\_W2\_P700, em que a ruptura durante o ensaio de tração ocorreu no cordão de solda devido à presença de poros de grandes dimensões em seu interior (figura 77), nos demais provetes a fissura teve início na região próxima à solda (na ZTA) e teve seu prolongamento ao longo do material de base. Uma das justificativas para esse fenômeno é exatamente a elevada dureza que apresenta esta zona.

### 3.5.3 ENSAIO METALOGRÁFICO

Neste item serão apresentadas as imagens metalográficas das amostras que foram aprovadas (tabela 20 - página 113), comparando as semelhanças existentes nas microestruturas encontradas nos provetes com pós-aquecimento e sem pós-aquecimento (condições estudadas ao longo desse projeto). As regiões analisadas serão destacadas, tendo como ênfase os locais de ruptura.

Primeiramente, na figura 88 pode ser observada a microestrutura do Sibodur® 450 recebido. Nota-se a presença de nódulos de grafita (grãos mais escuros) em uma matriz ferrítica (parte mais clara da imagem). Isso caracteriza, como já constava no *data sheet*, que se trata de um ferro fundido nodular.

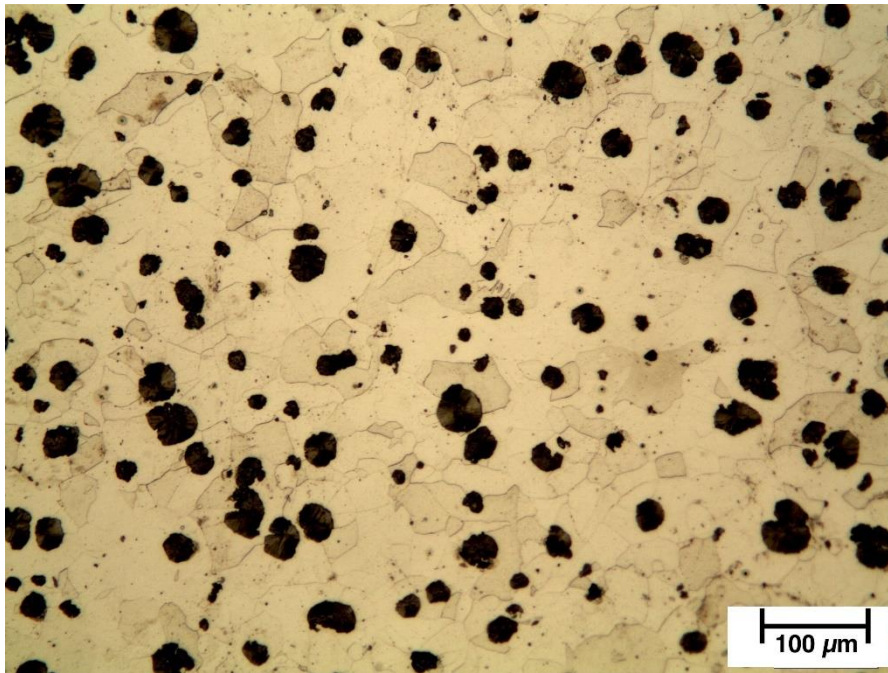


Figura 88 – Microestrutura do material de base recebido sem ataque químico, 200x.

Para facilitar a nomenclatura das regiões, adotou-se 3 siglas: (MA) material de adição; (ZTA) zona termicamente afetada; (MB) material de base.

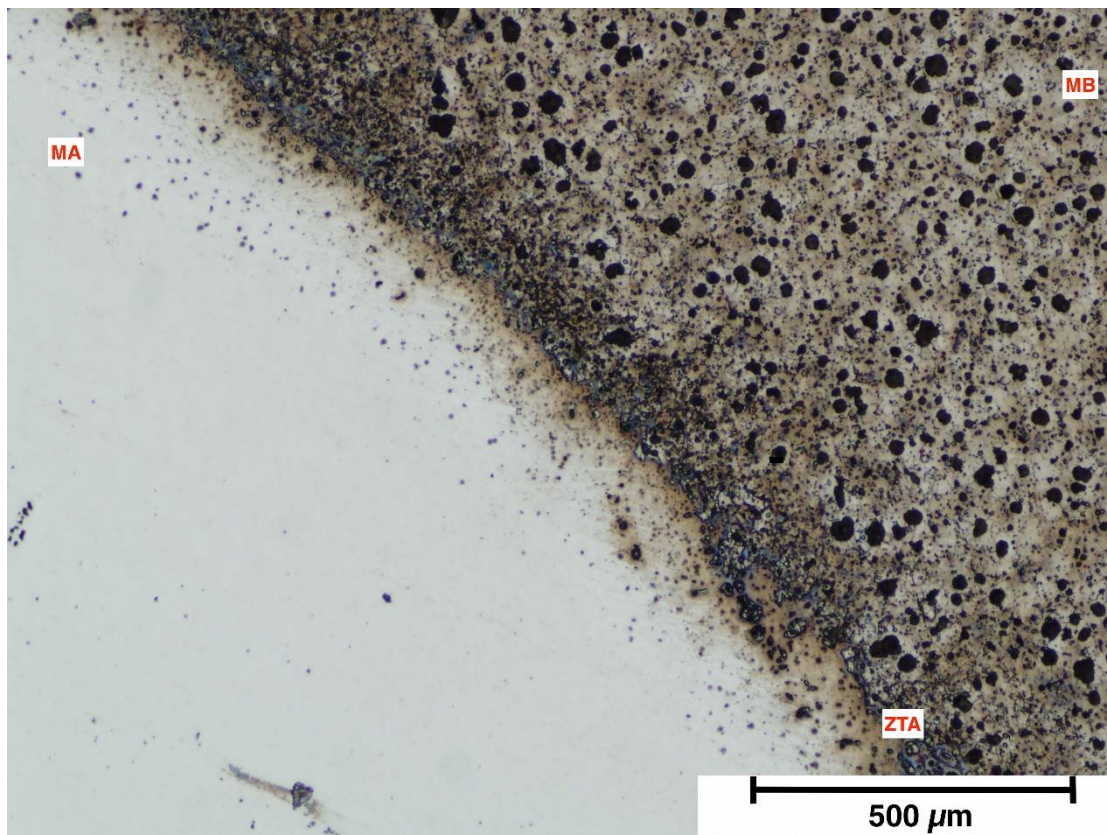


Figura 89 – Microestrutura evidenciando as 3 regiões da amostra 05\_P0\_W2\_P700. Ataque Nital 4%. 50x.

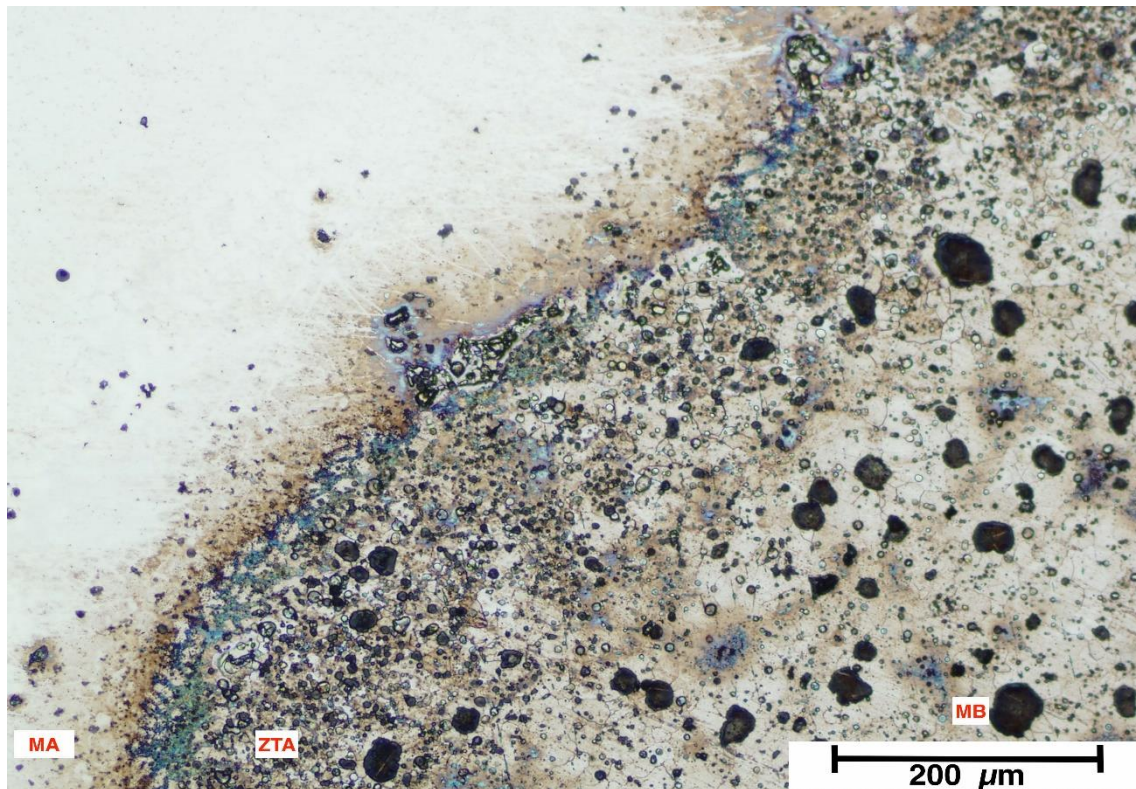


Figura 90 – Microestrutura com uma ampliação maior das 3 regiões da amostra 05\_P0\_W2\_P700. Ataque Nital 4%. 100x.

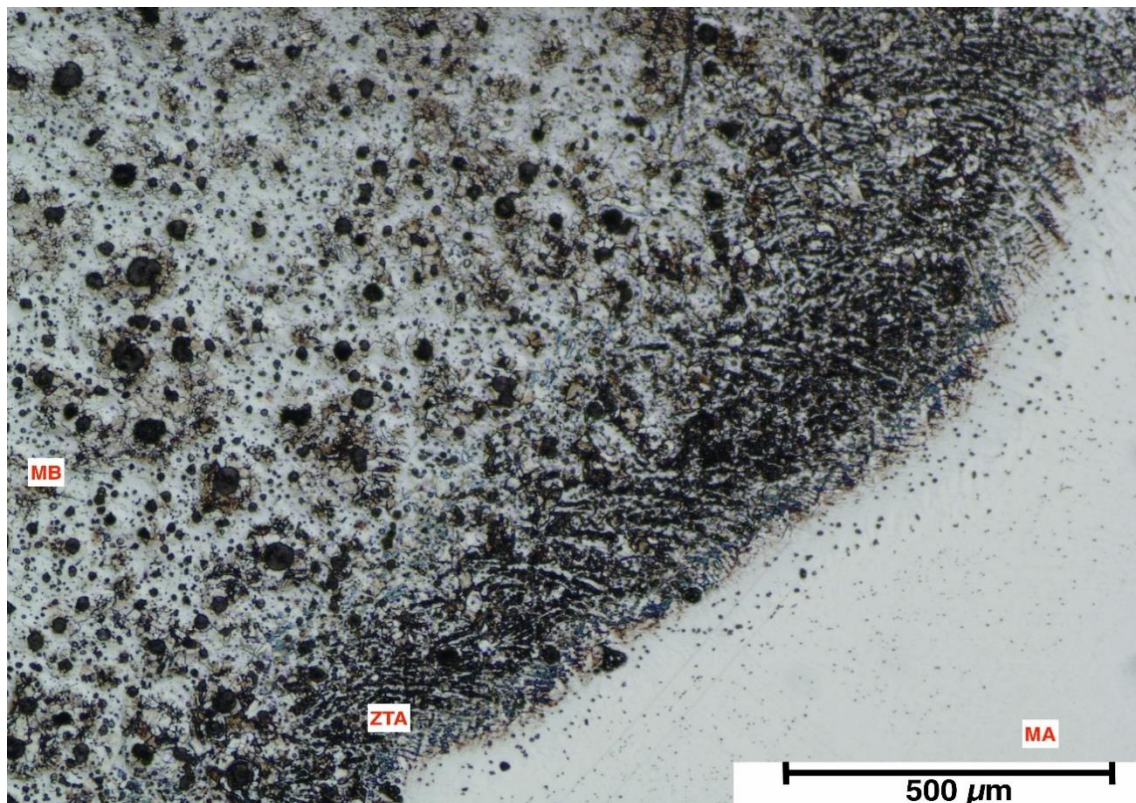


Figura 91 – Microestrutura da amostra 22\_P300\_N\_P0\_W2\_P700. Ataque Nital 4%. 50x.

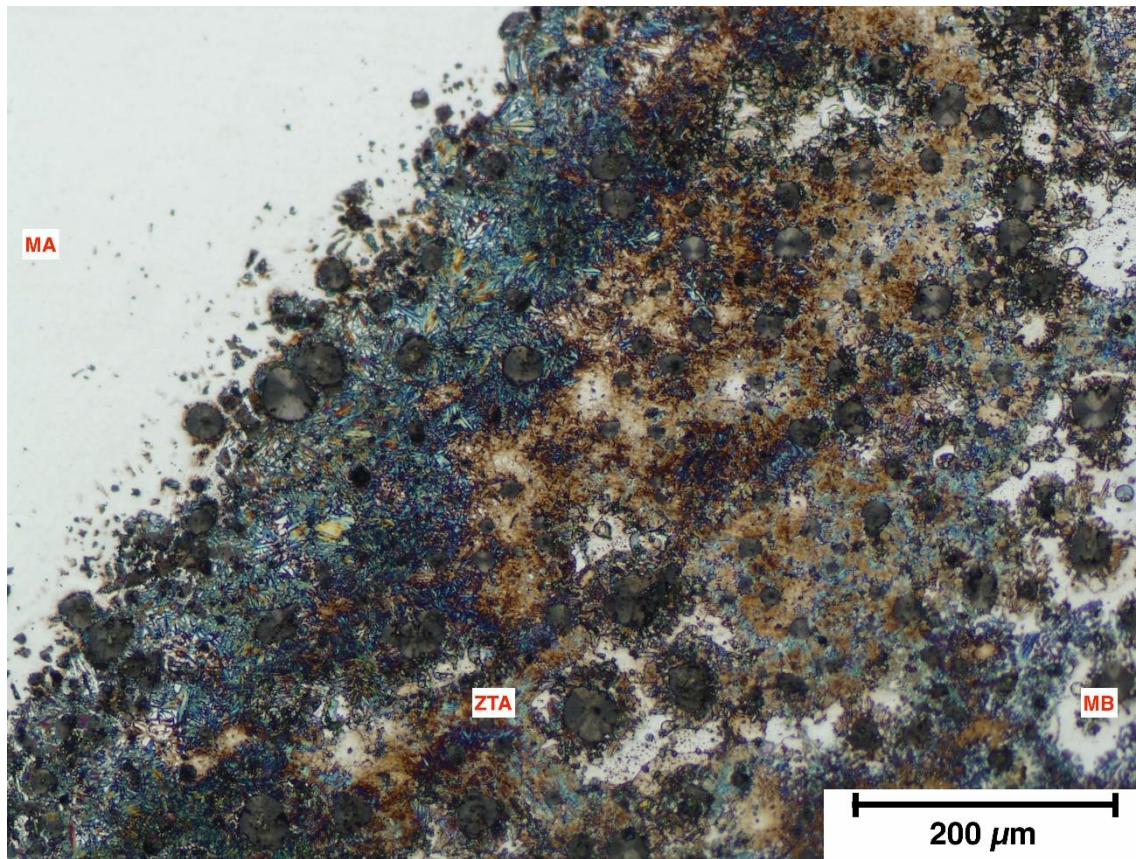


Figura 92 – Microestrutura da amostra 09\_P300\_N\_P0\_W2\_P0. Ataque Nital 4%. 100x.

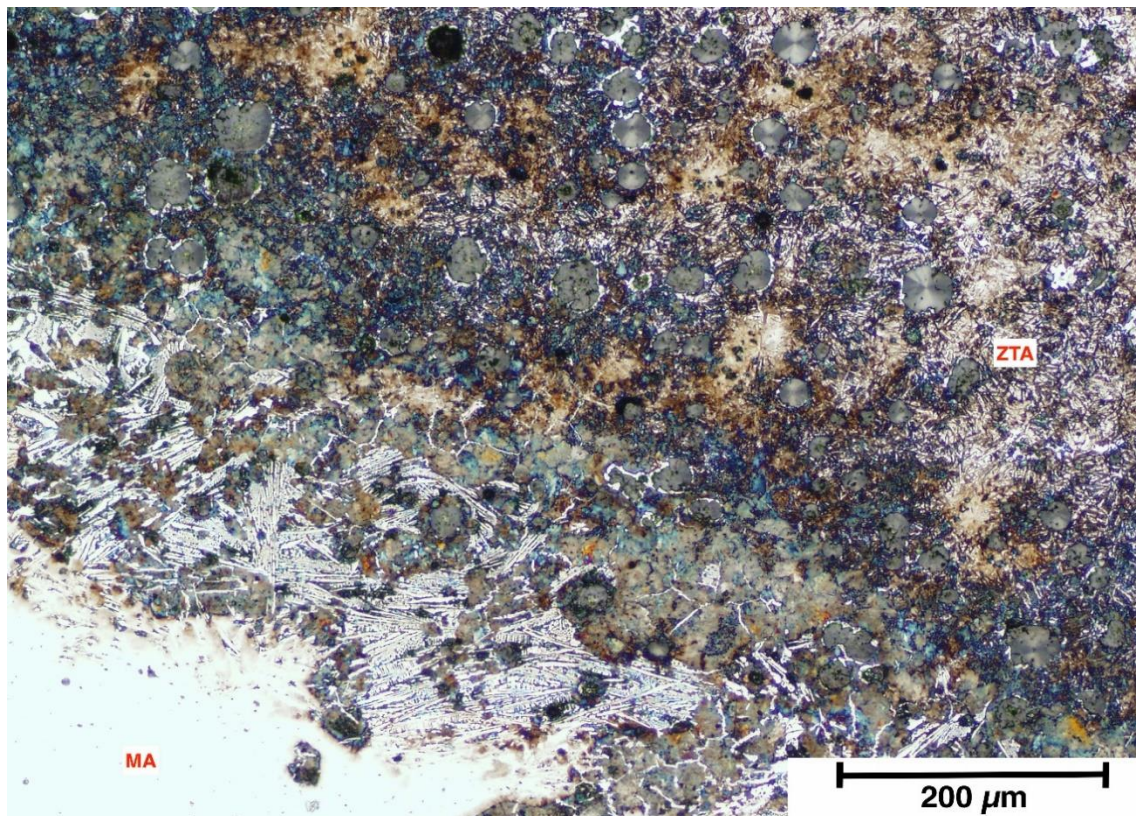


Figura 93 – Microestrutura da amostra 18\_P300\_N\_P300\_W4\_P0. Ataque Nital 4%. 100x.

Utilizou-se essas quatro amostras como exemplo do ocorrido nas demais. Tentou-se comparar duas situações diferentes: com pós-aquecimento (figuras 89, 90 e 91) e sem pós-aquecimento (figuras 92 e 93). Uma das características que merece destaque quando comparadas microestruturas das amostras desses dois conjuntos de parâmetros é a diminuição da ZTA nas amostras 05\_PO\_W2\_P700 e 22\_P300\_N\_PO\_W2\_P700. Já a amostra 18\_P300\_N\_P300\_W4\_PO, mesmo sendo soldada com 4 passes, tendo um maior volume na poça de fusão e submetida à alta temperatura durante o processo de soldagem, apresentou uma área de ZTA, aparentemente, igual à amostra 09\_P300\_N\_P300\_W2\_PO. Assim, conclui-se que o pós-aquecimento (nos parâmetros estudados) influencia diretamente nessa região, não só diminuindo a ZTA mas também reduzindo a dureza neste local como pode ser visto nos gráficos apresentados nas figuras 80 a 87.

Com relação aos microconstituintes presentes na região de fratura, será analisado com as imagens a seguir.

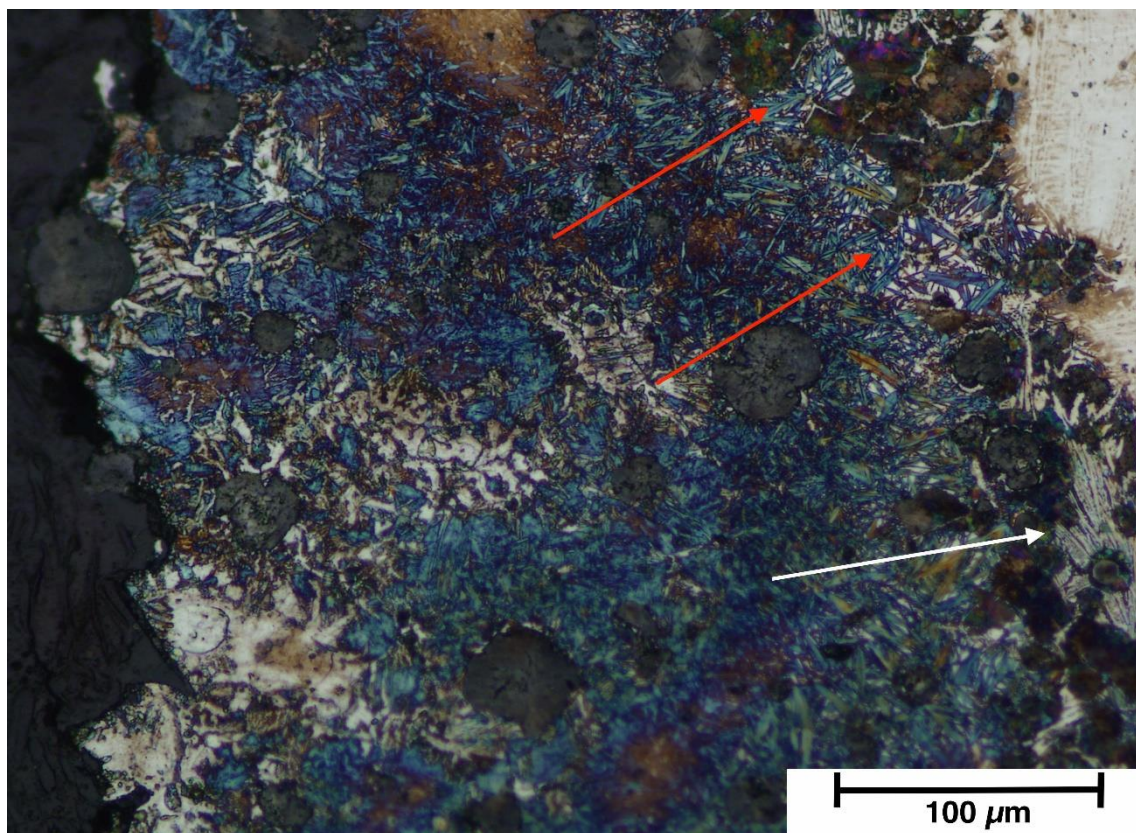


Figura 94 – Microestrutura da ZTA na amostra 09\_P300\_N\_P300\_W2\_PO, com ataque de nital 4%. 200x.

De acordo com a figura 94, destacam-se duas microestruturas que estão presentes na ZTA e próximas a zona de fratura da amostra (esta região compreende precisamente a indentação 6 da figura 83): a seta vermelha evidencia a presença de martensita, enquanto, a seta branca caracteriza a presença de ledeburita. Estes dois microconstituintes apresentam uma elevada dureza e tiveram origem devido à elevada temperatura no momento da soldagem. Esse fator, dureza elevada, favoreceu para o rompimento do provete no ensaio de tração. Estes microconstituintes estão presentes em todas as estruturas das amostras analisadas.

Outro fenômeno ocorrido devido ao intenso ciclo térmico desenvolvido no momento da soldagem, e que foi percebido durante todas as análises das microestruturas, é a fuga de carbono dos nódulos de grafita da região próxima à solda (figura 95).

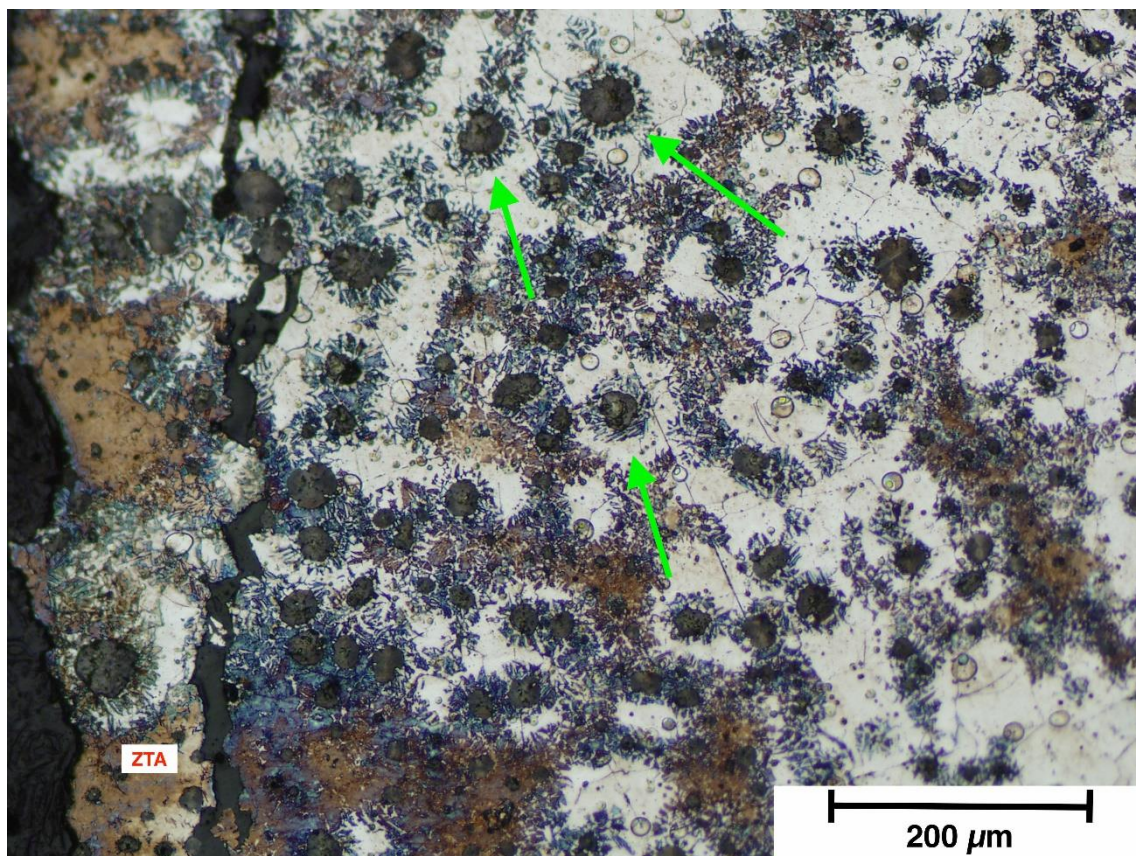


Figura 95 – Microestrutura da amostra 09\_P300\_N\_P300\_W2\_P0 com ataque de nital 4%.100x.

**CONCLUSÕES E PROPOSTAS  
PARA TRABALHOS FUTUROS**



## 4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a realização dos estudos de soldagem e tratamentos térmicos utilizando o ferro fundido nodular Sibodur® 450 da Georg Fischer, apresentam-se algumas conclusões preliminares, uma vez que este é um trabalho exploratório:

- O ferro fundido Sibodur® 450 pode ser soldado com o material de adição escolhido, o Inconel LR 82.
- O principal objetivo que era realizar a soldagem do ferro fundido Sibodur® 450 com o intuito de reparação para peças fabricadas deste material foi atingido com sucesso, uma vez que a resistência mecânica mínima 350 MPa estabelecida foi superada;
- Os parâmetros que atenderam ao requisito mínimo da resistência mecânica foram: P0\_W2\_P700, P300\_N\_P300\_W2\_P0 e P300\_N\_P0\_W2\_P700. Obtiveram os seguintes resultados:  $359,4 \pm 23,1$  MPa,  $378,1 \pm 13,3$  MPa,  $373,5 \pm 16,0$  MPa.
- As amostras que receberam 4 passes (do conjunto P300\_N\_P300\_W4\_P0) obtiveram os valores mais elevados de resistência mecânica,  $430,1 \pm 25,2$  MPa.
- Foi observada a formação de microconstituintes próximo à região soldada, como martensita e ledeburita, com elevada dureza. Este fato contribuiu para que ruptura dos provetes ocorresse nesse local.
- O tratamento de pós-aquecimento reduz a área da ZTA, bem como a dureza nessa região.

Como sugestões para futuros trabalhos, é possível destacar:

- Usar outros métodos de soldagem, como: plasma, por feixes de elétrons e laser.
- Testar a possibilidade de outro tipo de material de adição, a base de níquel, com estes mesmos parâmetros, para ter como fator comparativo.
- Fazer o pós-aquecimento com temperaturas inferiores afim de avaliar a influência da temperatura no alívio de tensões da zona termicamente afetada.
- Estudar um meio de diminuir a dureza na ZTA devido aos microconstituintes presentes lá.

- Repetir os ensaios, mas sem a deposição de níquel para avaliar sua influência na resistência mecânica final.
- Aprofundar o estudo usando a soldagem com 4 passes.





**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES  
DE INFORMAÇÃO**



## 5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

[1] HOUAISS, A.; VILLAR, M. de S. **Dicionário Houaiss da língua portuguesa**. Rio de Janeiro: Objetiva, 2001.

[2] CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7. ed. São Paulo: ABM, 1996.

[3] BEREZUK, M. E. **Curso sobre a ciência dos materiais**. Apucarana: UTFPR, 2015

[9] SOUZA, E.; ALVES, J.; ANDRADE, L.; LEÃO, P. **Fabricação ferro fundido branco**. Volta Redonda: UFF, 2015.

[10] JUNIOR, E. M.; GUESSER, W. L.; **Avaliação da usinabilidade do ferro fundido vermicular através de ensaios de furacão**.

[11] SILVA, A. de A. P.; **Tratamento térmico**. Tecnologia em projetos mecânicos. Mogi Mirim: FATEC, 2010.

[12] ANDRADE, C. L. F.; **Análise da furacão do ferro fundido vermicular com brocas de metal-duro com canais retos revestidas com TiN e TiAlN**. Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis: UFSC, 2005.

[13] WALTON, C.F.; OPAR, T.J., **Iron Castings Handbook**. Iron Castings Society, 1981.

[14] MAGALHÃES, E. F. de; **Caracterização e proposição de métodos estimativos das propriedades monotônicas e cíclicas dos ferros fundidos nodulares**. Dissertação de mestrado. São Carlos: EESC/USP, 2011.

[15] SOUZA, B. **Desenvolvimento de Ferro Fundido Nodular Austemperado (ADI) em Banho de Zinco-Alumínio Fundido**. Dissertação de mestrado. Porto Alegre: PUC-RS, 2015.

[16] KEOUGH, J.R.; HAYRYNEN, K.L.; PIOSZAK, G.L. **Designing with Austempered Ductile**

**Iron (ADI).** AFS Proceedings 2010.

[17] ZIMBA, J., SIMBI, D. J., CHANDRA, T., NAVARA, E.; **A Dilatometry Study of the Austenitization and Cooling Behavior of Ductile Iron Meant for the Production of Austempered Ductile Iron (ADI).** Materials and Manufacturing Processes 2004, 19 (5), 907-920.

[18] ROULA, A., KOSNIKOV, G. A.; **Manganese Distribution and Effect on Graphite Shape in Advanced Cast Irons.** Materials Letters 2008, 62 (23), 3796–3799.

[19] SEKER, U., HASAN, H.; **Evaluation of Machinability of Austempered Ductile Irons Interm of Cutting Forces and Surface Quality.** Journal of Materials Processing Technology 2006, 173, 260-268.

[20] TOKTAS, G., TOKTAS, A., TAYANÇ, M.; **Influence of Matrix Structure on the Fatigue Properties of an Alloyed Ductile Iron.** Materials & Design 2008, 29 (8), 1600–1608.

[21] ERIC, O., RAJNOVIĆ, D., ZEC, S., SIDJANIN, L., JOVANOVIĆ, M. T.; **Microstructure and Fracture of Alloyed Austempered Ductile Iron.** Materials Characterization 2006, 57 (4-5), 211–217.

[22] SEKER, U., IBRAHIM, C., HASAN, H.; **The Effect of Alloying Elements on Surface Roughness and Cutting Forces During Machining of Ductile Iron.** Materials and Design 2003, 24, 47–51.

[23] KLOCKE, F., KLÖPPER, C., LUNG, D., ESSIG, C.; **Fundamental Wear Mechanisms when Machining Austempered Ductile Iron (ADI).** CIRP Annals Manufacturing Technology 2007, 56, 73-76.

[24] CHANG, L. C., HSUI, I. C., CHEN, L.H., LUI, T.S.; **Effects of Heat Treatment on the Erosion Behavior of Austempered Ductile Irons.** Wear 2006, 260, 783–793.

[25] FERNANDINO, D. O., MASSONE, J. M., BOERI, R. E.; **Characterization of the Austemperability of Partially Austenitized Ductile Iron.** Journal of Materials Processing Technology 2013, 23 (10), 1801-1809.

- [26] KIM, Y.-J., SHIN, H., PARK, H., LIM, J. D.; **Investigation into Mechanical Properties of Austempered Ductile Cast Iron (ADI) in Accordance with Austempering Temperature.** *Materials Letters* 2008, 62, 351-360.
- [27] PUTATUNDA, S. K., PAVAN, K., GADICHERLA; **Influence of Austenitizing Temperature on Fracture Toughness of a Low Manganese Austempered Ductile Iron (ADI) with Ferritic as Cast Structure.** *Materials Science and Engineering A* 1999, 268, 15-31.
- [28] CAKIR, M. C., ISIK, Y.; **Investigating the Machinability of Austempered Ductile Irons Having Different Austempering Temperatures and Times.** *Materials and Design* 2008, 29, 937-942.
- [29] YANG, J., PUTATUNDA, S. K.; **Influence of a Novel Two-Step Austempering Process on the Strain-Hardening Behavior of Austempered Ductile Cast Iron (ADI).** *Material Science and Engineering A* 2004, 382, 265-279.
- [30] YANG, J., PUTATUNDA, S. K.; **Effect of Microstructure on Abrasion Wear Behavior of Austempered Ductile Cast Iron (ADI) Processed by a Novel Two-Step Austempering Process.** *Materials Science and Engineering A* 2005, 406 (1-2), 217- 228.
- [31] PUTATUNDA, S. K.; **Comparison of the Mechanical Properties of Austempered Ductile Cast Iron (ADI) Processed by Conventional and Step-Down Austempering Process.** *Materials and Manufacturing Processes* 2010, 25 (8), 749-757.
- [32] SORELMETAL, **Austempered Ductile Iron. Publisher Rio Tinto & Titanium.** Section IV. Montreal. 1990
- [33] LUSSOLI, R. J. **Efeitos da Adição de Cobre e da Seção da Peça Sobre as Características Microestruturais e Mecânicas de Ferro Fundido Nodular Austemperado. 98p.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.
- [34] MORRISON, J. **Os 50 anos do Ferro fundido Nodular e do Níquel. Revista Fundação e Serviços: São Paulo, no. 91, Julho, 2000, 42-51.**

- [35] ALAGARSAMY, et. al. **Ductile Iron Castings for Austempering. World Conference of Austempered Ductile Iron**, Chicago. 1991.
- [36] CARMO, D. J. do. **Ferro Fundido nodular Austemperado ADI**. Itaúna: Senai, MG. 2001.
- [37] MARQUES, P. V; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte: UFMG, 2009.
- [38] WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. De. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.
- [39] OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. **Engenharia de soldagem e aplicações**. Livros técnicos e científicos editora: Rio de Janeiro, p. 1-6, 1982.
- [40] HOULDCROFT, P. T. **Welding Process Technology**. Cambridge University Press, London, p. 1-15, 1979.
- [41] APPS, R. L. **Welding process and applications**; in Proc. Conf. Weld, Proc. Plant., London, Mar. 1970, Inst. Mech. Eng. and Welding Institute.
- [42] CONNOR, L. P. (ed) – **Welding Handbook – Welding Technology**, vol. 1, 8ª ed., p.1-30, 1987.
- [43] RIBEIRO, D. M. **Tecnologia da Solda**. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. Rio de Janeiro: UFRJ, 2000.
- [45] PEIXOTO, A. L. **Soldagem**. Belém: IFPA; Santa Maria: UFSM, 2012.
- [46] FONSECA, A. S da. **SOLDAGEM TIG**. SENAI – Centro de formação Profissional “Aloysio Ribeiro de Almeida”. Varginha – MG, 2004
- [47] PEIXOTO, A. L. **Estudo da microestrutura de soldas almg – 5083 depositado pelo processo mig pulsado**. Relatório Técnico Científico – Projeto: Soldagem MIG do Alumínio em Corrente Pulsada. UFPA. Belém – PA, 2003.
- [48] NASCIMENTO, A. S. do. **Soldagem pelo processo tig**. Notas de aula da disciplina

Processos de Soldagem. Coordenação da Mecânica. Belém: IFPA, 2010.

[49] NASCIMENTO, A. S. do. **Soldagem mig/mag (gmaw)**. Notas de aula da disciplina Processos de Soldagem. Coordenação da Mecânica. Belém: IFPA, 2010.

[50] POVOA, A. A. **Ficha técnica da alcan**. Alumínio Brasil S/A. 1ª. Brasil, 1993.

[51] MODENESI, P. J. **Técnica Operatória da Soldagem GTAW**. Trabalho Prático. Disponível em: <[www.infosolda.com.br](http://www.infosolda.com.br)>. Acesso em:

[53] CANALE, A. J. **Estudo da soldagem de recuperação do ferro fundido vermicular através do processo oxiacetileno**. Dissertação de Mestrado. Florianópolis: UFSC, 2005.

[54] ZEEMANN, A. **Soldagem a frio de ferro fundido nodular**. Metalurgia & Materiais – ABM. Agosto, 1993.

[55] FENILLI, R.; GUESSER, W. L. **Soldagem de ferros maleáveis, aspectos técnicos e aplicações**. 1 Simpósio Estadual de Técnicos Mecânicos. Dezembro, 1984.

[56] PARIS, A.A. F. **Tecnologia da soldagem de ferros fundidos**. Santa Maria: UFSM, 2003.

[57] KISER, S. D.; IRVING, B. **Unraveling the mysteries of welding cast irons**. Welding Journal. August, 1993.

[58] KISER, S. D. **Production welding of cast iron**. AFS Transactions, v.85. p. 37- 42, 1977.

[59] COOKSON, C. **Quench welding process for joining cast iron**. Welding and Metal Fabrication, n. 38, p. 42 – 46. August, 1970.

[60] DATTAM, G. L. **Metallurgical Considerations in Fusion Welding of Cast Irons**. Indian Foundry Journal. April, 1978.

[61] WELDING HANDBOOK, **Welding Process-Arc and Gas welding and cutting, brazing and soldaring**. Miami: American Welding Society, 7. P. 235-241.

[62] STRASSER, V. **A soldagem moderna**. Rio de Janeiro: Ao livro Técnico S. A, 1963. Capítulo 19: O ferro fundido. p. 208-221.

- [63] MORGAN, H.L. **Joining of Iron Casting** . BCIRA Journal, p. 403-424, Sept. 1970.
- [64] BOWEN, M. **The Welding of Ductile Irons**. The British Foundryman, p. 303-312, Jul. 1984
- [65] DEVLETIAN, J.H. **Weldability of gray iron using fluxless gray iron electrodes for SMAW**. Welding Journal. Research Suppl. p . 183-188, Jul. 1978.
- [66] PIESKE, A., CHAVES FILHO, L.M., REIMER, J. F. **Ferros Fundidos de Alta Qualidade**. Joinville: Sociedade Educacional Tupy, 1976. Cap. 1: Metalurgia do ferro fundido cinzento.
- [67] CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 6ª edição, 1990.
- [68] KLIMEK, J.; A.V. **Gray cast iron welding**. *Weld. J.*, v. 56, n. 3, p. 29-33, 1973.
- [69] PEASE, G.R. **The welding of ductile iron**. *Weld Journal*. v.39, n.1, p. 1-9, 1960.
- [70] KOTECHI, D. J.; BRATON, N. R.; LOPER JR., C. R. **Preheat effects on gas metal-arc welded ductile cast iron**. *Weld. J.*, v. 48, n. 4, 161s-166s, 1969.
- [71] AMERICAN WELDING SOCIETY. **Materials and application**: part 2.8ª ed., v.5, Miami: AWS, 1998. 621p.
- [72] GREGORY, E. N.; JONES, S. B. **Welding cast irons**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WELDING, 1977, Cambridge. Proceedings, Cambridge, England: TWI, 1977. p. 23-28.
- [73] FLANNERY, J.W. **Welding ductile iron-Part One**. *Weld. Engineer*, v. 53, n. 11, p. 57-61, 1968.
- [74] FLANNERY, J.W. **Welding ductile iron-Part Two**. *Weld. Engineer*, v. 53, n.12, p. 50-63, 1982.
- [75] CATHOLICO, R. AR. **Soldagem do ferro fundido a arco elétrico**. *Mundo Mecânico*, v. 4, n. 51, p. 12-17, Outubro 1980.
- [76] WAINER, Emilio (Cord). **Soldagem : Processos e Metalurgia**. São Paulo: Editora

Edgard Blucher, 2000

[77] BROSILOW, Rosalie. **Welding the cast irons**. Welding Design & Fabrication, March 1990.

[78] GREGORY, E.N. **Welding cast irons**. The Welding Institute, n.16, p.145- 156, 1977.

[79] BUSHEY, R. A. **Welding of cast irons**. ASM Handbook, v.6, p. 708- 721,1993.

[80] COSTA, S.C. **Influência da concepção de fabricação de elétrodos à base de níquel sobre a soldabilidade do ferro fundido cinzento**. Dissertação (mestrado) – Departamento de engenharia mecânica. Florianópolis: UFSC, junho-1987.

[81] AWS COMMITTEE ON WELDING IRON CASTINGS. **Guide for Welding Iron Castings**. Florida: American Welding Society, 1989. 125p.

[82] BOND, D. **Correlação entre microestrutura e variáveis de soldagem em ferro fundido cinzento**. Dissertação (mestrado) – Departamento de engenharia mecânica. Florianópolis: UFSC, maio – 1999. Dissertação (mestrado) – Departamento de engenharia mecânica.

[83] COTRELL, C. L. M. **Welding cast iron**. Cambridge: The Welding Institute, 1985, 22p

[84] METALS HANDBOOK. **Welding and Brazing**. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 8ed., vol. 6, Chap. Arc Welding of Cast Irons. p. 235-244

[87] DALCIN, G. B. **Ensaio dos Materiais**. Curso de Engenharia Industrial Mecânica – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões. Santo Ângelo: URI, 2007.

[88] RUCKERT, C. O.F. T. **Ensaio Mecânico dos Materiais – Tração**. Notas de aulas. Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística. USP – Escola de Engenharia de São Carlos.

[93] **ISO (International Organization for Standardization), 2012**. ISO 4136 (Destructive tests on welds in metallic materials – Transverse tensile test). Suíça.

[94] **ISO (International Organization for Standardization), 2003.** ISO 17639 (Destructive tests on welds in metallic materials – Macroscopic and microscopic examination of welds). Suíça.

[95] **ISO (International Organization for Standardization), 2001.** ISO 9015-1 (Destructive tests on welds in metallic materials — Hardness testing). Suíça

[96] **ISO (International Organization for Standardization), 2015.** ISO 23277 (Non-destructive testing of welds — Penetrant testing of welds — Acceptance levels). Suíça

[97] **BS (British Standard), 2009.** (BS EN ISO 23278:2006) (Non-destructive testing of welds — Magnetic particle testing of welds — Acceptance levels), Reino Unido.

[98] **ISO (International Organization for Standardization), 2003.** ISO 17637 - Non-destructive testing of welds – Visual testing of fusion welds joints. Suíça.

[99] PASCUAL, M.; FERRER, C.; RAYON, E.; **Weldability of spheroidal graphite ductile cast iron using Ni / Ni-Fe electrodes.** Revista de metalurgia, 45 (5). Setembro-Outubro, 334-338, 2009. Madrid.

## OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

[4] INFORMET. **Ferros fundidos – Generalidades**. [Consultado em 5 de junho de 2016]. Disponível em : <http://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=134>

[5] PERFILVILLE. **Fundição/Formato**. [Consultado em 5 de junho de 2016]. Disponível em: <https://www.spaturbo.com.br/loja/produto/coletor-turbo-vw-ea111-golf-iv-compativel-com-turbo-t2>

[6] TEKMEKA. **Ferro-fundido**. [Consultado em 5 de junho de 2016]. Disponível em : <http://tekmeka.blogspot.pt/2011/04/ferro-fundido.html>

[7] **Relatório de atividades práticas**. [Consultado em 5 de junho de 2016]. Disponível em: <http://engprodmech.blogspot.pt>

[8] AIRTON MORASSI. **Ferro fundido branco**. [Consultado em 5 de junho de 2016]. Disponível em : <https://www.flickr.com/photos/metalog/5366531947/in/photostream/>

[44] BORGES. **Soldagem**. [Consultado em 20 de junho de 2016]. Disponível em: <http://mmborges.com/processos/Uniao/uniao%20termica%20-%20soldagem.htm>.

[52] GEORG FISCHER. **Material Data Sheet GF**. Não disponível em site (fornecido juntamente com o material).

[85] CLAUDIO SCHAEFFER. **Dureza Vickers**. [Consultado em 29 de junho de 2016]. Disponível em: [http://docente.ifsc.edu.br/claudio.schaeffer/material/2\\_Mecatrônica/Materiais\\_2\\_Meca\\_3/Ensaio%20de%20Materiais\\_\(Apostila\\_Principal\)/ensa13.pdf](http://docente.ifsc.edu.br/claudio.schaeffer/material/2_Mecatrônica/Materiais_2_Meca_3/Ensaio%20de%20Materiais_(Apostila_Principal)/ensa13.pdf)

[86] RICARDO ANDREUCCI. **Partículas Magnéticas**. [Consultado em 29 de junho de 2016]. Disponível em:

<http://www.aendur.ancap.com.uy/boletin/ensaioporparticulasmagneticas.pdf>

[89] OERLIKON. [Consultado em 29 de junho de 2016]. Disponível em:  
[http://www.oerlikon.es/catalogo/foto.php?tabla=articulos&id=418&campo=idarticulo&imagen=imagen1\\_gr&directorio=/pub/articulos/](http://www.oerlikon.es/catalogo/foto.php?tabla=articulos&id=418&campo=idarticulo&imagen=imagen1_gr&directorio=/pub/articulos/)

[90] **Líquidos penetrantes**. [Consultado em 29 de junho de 2016]. Disponível em :  
<http://www.qualidadeaeronautica.com.br>

[91] **Equipamentos para inspeção**. [Consultado em 29 de junho de 2016]. Disponível em:  
<http://mmlabtest.com.br>

[92] **Ensaio não destrutivo e inspeção**. [Consultado em 29 de junho de 2016]. Disponível em : <http://www.abendi.org.br/index.php?w=1024&h=600>





# ANEXOS

6.1 ANEXO1

6.1.1 ANEXO2



## 6 ANEXOS



