



Estudo da Soldabilidade do Ferro Fundido Sibodur 450

EVA SOLEDADE VAZ MARQUES

dezembro de 2018

ESTUDO DA SOLDABILIDADE DO FERRO FUNDIDO

SIBODUR®450

Eva Soledade Vaz Marques
1140681

2018

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



ESTUDO DA SOLDABILIDADE DO FERRO FUNDIDO

SIBODUR®450

Eva Soledade Vaz Marques
1140681

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 Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva e coorientada pela Professora Doutora Olga Maria Maria Coutinho de Paiva.

2018

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

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

Coorientador

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

Arguente

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores Doutor Francisco Silva (ISEP) e Doutora Olga Paiva (ISEP), pelo desenvolvimento da estratégia de investigação definida nesta dissertação.

Aos Eng.º. Vítor Moreira (ISEP) e Eng.º. Vítor Ribeiro (ISEP) pela realização dos provetes usados neste trabalho.

À Eng.ª. Fátima Andrade (ISEP) pela supervisão prestada nos ensaios efetuados para caracterização de amostras, e pela autorização que me concedeu junto da Direção, para que conseguisse efetuar estes mesmos ensaios em horário pós-laboral.

Ao Dr. Rui Rocha (CEMUP) pela realização dos ensaios de microscopia eletrónica de varrimento, presentes nesta dissertação.

PALAVRAS CHAVE

Ferro Fundido, Ferro Fundido Nodular, Soldadura por elétrodo revestido, Zona Termicamente Afetada, Fases, Tratamentos térmicos.

RESUMO

Para a soldadura de ferros fundidos nodulares poderão ser utilizados processos como *Metal Inert Gas* (MIG), soldadura com elétrodo não consumível de tungstênio e proteção gasosa inerte (TIG), e soldadura com elétrodo revestido são, sendo que este último utiliza como consumíveis materiais à base de níquel para produzir soldaduras de alta qualidade.

A soldadura em ferro fundido serve essencialmente para reparar defeitos que ocorreram durante o processo de fundição (porosidades, inclusões de areia, rechupes), antes de estas entrarem no seu ciclo de serviço, ou para manutenção corretiva de peças já aplicadas. Como tal, é necessário que a junta soldada possua características semelhantes ou superiores às do ferro fundido nodular, que serve como material base das peças.

Nesta dissertação, serão abordadas técnicas de melhoria da resistência mecânica (R_m) de juntas soldadas a elétrodo revestido, usando como material de adição um elétrodo com 98% de Ni.

KEYWORDS

Cast Iron, Nodular Cast Iron, Shield Metal Arc Welding, Heat Affected Zone, Phases, Heat treatments.

ABSTRACT

In terms of welding cast iron, processes like Metal Inert Gas (MIG), Tungsten Inert Gas (TIG), Shield Metal Arc Welding (SMAW), are the most used. The last one (SMAW) uses nickel-based electrodes as a filler metal to make high quality welded joints.

Welding cast iron is mainly used to repair defects that were induced in parts, during the foundry process (porosities, sand inclusions), before they enter in their working cycle, or to do corrective maintenance to those which were already applied. Therefore, it is necessary to have a welded joint with similar or better characteristics, than the parent metal (nodular cast iron).

In this dissertation, techniques to improve the tensile strenght of welded joints by SMAW are studied, using as a filler metal an electrode with 98% Ni.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Símbolos

Al	Alumínio
Be	Berílio
C	Carbono
Ca	Cálcio
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
Cr	Crómio
Cu	Cobre
E Ni-Cl	Designação AWS dos elétrodos de níquel para a soldadura do ferro fundido
E NiFe-Cl	Designação AWS dos elétrodos de Ni/Fe para a soldadura do ferro fundido
E St	Designação AWS dos elétrodos de aço macio para a soldadura do ferro fundido
Fe ₂ O ₃	Hematite
Fe ₃ C	Cementite
Fe ₃ O ₄	Magnetite
Fe-C	Ferro-Carbono
Fe-Fe ₃ C	Ferro-Cementite
Fe-Gr	Ferro-Grafite
FeSi	Ferro-Sílica
H ₂	Hidrogénio
H ₂ O	Água
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
Mo	Molibdénio
Ms	Temperatura de início da formação de martensite
Ni	Níquel
O	Oxigénio
P	Fósforo
Pb	Chumbo
Rm	Tensão de rotura
S	Enxofre
Si	Silício
Sn	Estanho
Ti	Titânio
V	Vanádio
W	Tungsténio
Zn	Zinco

Lista de Abreviaturas

ADI	<i>Austempered Ductile Iron</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
CEV	Carbono Equivalente
GF	<i>George Fischer</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
SMAW	<i>Shield Metal Arc Welding</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
ZPF	Zona Parcialmente Fundida
ZTA	Zona Termicamente Afetada
SEM	<i>Scanning Electron Microscope</i>
MA	Material de adição
MB	Material base

Lista de Unidades

°C	Temperatura em graus celsius
µm	Micrómetro
A	Ampére
cm	Centímetro
h	Horas
HB	Dureza Brinell
HV	Dureza Vickers
kgf	Quilograma-força
kN	Quilonewton
kN/mm ²	Quilonewton por milímetro quadrado
kV	Quilovolt
m/s	Metro por segundo
mm	Milímetros
mm/min	Milímetro por minuto
mmHg	Milímetro de mercúrio
MPa	Mega-Pascal
ppm	Parte por milhão
V	Volt

GLOSSÁRIO DE TERMOS

Austenite	Solução sólida constituída essencialmente por ferro e carbono. Possui estrutura FCC. Forma-se quando uma liga de ferro é aquecida acima da temperatura de 750°C e abaixo da temperatura de 1450°C.
Coefficiente de expansão térmica	É o quociente que mede a alteração relativa de comprimento, ou volume, que se produz quando um corpo sólido, ou um fluido dentro de um recipiente, experimenta uma alteração de temperatura, resultando assim numa dilatação térmica.
Coefficiente de Poisson	O coeficiente de Poisson (ν), mede a deformação transversal (em relação à direção longitudinal de aplicação da carga) de um material homogêneo e isotrópico.
Ductilidade	Quanto mais dúctil o material for, maior será a redução da área da secção transversal e maior será o alongamento antes da rutura. Logo, a ductilidade é uma medida da extensão da deformação que ocorre até a fratura, medida pelo alongamento.
Dureza	Pode ser avaliada a partir da capacidade de um material "riscar" o outro, como na popular escala de Mohs para os minerais. Outra maneira de avaliar a dureza é a capacidade de um material penetrar o outro.
Ferritização	Tratamento dado ao ferro fundido cinzento ou nodular cuja finalidade é produzir uma matriz essencialmente ferrítica.
Ledeburite	Mistura de austenite e cementite que ocorre principalmente em ferros fundidos com $C > 2\%$; este constituinte é duro e frágil, devido à cementite ser cerca de 50%; é o eutético do sistema metaestável ($C=4.3\%$).
Limite de escoamento	Também denominado de tensão de cedência ou tensão de limite elástico, é a tensão máxima que o material suporta ainda no regime elástico de deformação. Se houver algum acréscimo de tensão, o material deixa de seguir a lei de Hooke e começa a sofrer deformação plástica.
Maquinabilidade	Refere-se à facilidade com que um metal pode ser cortado (maquinado), permitindo uma remoção de material de forma a obter um bom acabamento a baixo custo. Materiais com boa maquinabilidade exigem pouca energia durante o processo e permitem um longo ciclo de vida à ferramenta de corte.
Permeabilidade magnética	Mensura o campo magnético no interior de um material - devido ao campo magnetizante pré-existente na região onde o material é colocado bem como à magnetização por este induzida no material - em relação ao próprio campo magnetizante em questão.
Reação eutética	Ocorre quando um líquido se transforma em duas fases sólidas. Ocorre abaixo do ponto de fusão dos materiais envolvidos na reação.
Reação eutectoide	Ocorre quando uma fase sólida se decompõe em duas fases sólidas. No diagrama Fe-C ocorre à temperatura de 723°C.
Resistência à corrosão	Capacidade de um material suportar a ação de agentes corrosivos (oxidantes) quando em serviço, sem que haja prejuízo das suas características e funcionalidades mecânicas, dimensionais e visuais. Entre esses agentes, podemos citar: gases, ácidos, etc.
Resistência à fadiga	Capacidade de um material suportar solicitações cíclicas.

Resistência à tração	É indicada pelo ponto máximo de uma curva de tensão-deformação. Em outros termos é a máxima tensão que um material pode suportar ao ser esticado ou puxado antes de falhar ou fraturar.
Resistência ao desgaste	O desgaste ocorre quando dois materiais sobre carga deslizam um sobre o outro. A resistência ao desgaste de um material é medida através de testes que analisam a perda de material.
Resistência mecânica	A tensão de rotura à tração ou resistência mecânica (R_m), define-se como a razão entre a força máxima (F_m) alcançada durante o ensaio, após a cedência, expressa em N, e a área da secção inicial da zona útil ou zona calibrada do provete, expressa em mm^2 .
Soldabilidade	Pode referir-se à facilidade de realizar a operação de soldadura utilizando-se parâmetros normais de regulação da máquina, de material de adição e de rendimento, ou à capacidade de o material ser soldado sem que haja a formação de microestruturas prejudiciais às suas características e propriedades mecânicas.
Temperatura liquidus	A temperatura liquidus, especifica a máxima temperatura na qual cristais podem coexistir com o material em fusão em equilíbrio termodinâmico. Acima da temperatura liquidus o material é homogéneo.
Tenacidade	Atendendo à teoria da mecânica da fratura, é a capacidade de um material resistir à progressão de uma fenda.

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – CONSTITUIÇÃO DO ALTO-FORNO [3]	3
FIGURA 2 – METODOLOGIA EXPERIMENTAL	5
FIGURA 3 - DIAGRAMA FE-C (TRACEJADO) E FE-Fe ₃ C (A CHEIO) [9]	12
FIGURA 4 - FERRO FUNDIDO NODULAR NUMA MATRIZ FERRÍTICA-PERLÍTICA (NÓDULOS – GRAFITE; ZONA BRANCA – FERRITE; ZONA ESCURA – PERLITE) ATAQUE COM 4% DE NITAL; AMPLIAÇÃO: 100X [2]	14
FIGURA 5 - FERRO FUNDIDO NODULAR NUMA MATRIZ FERRÍTICA; ATAQUE COM 4% DE NITAL; AMPLIAÇÃO: 100X [2]	14
FIGURA 6 - MARTENSITE (AGULHAS NEGRAS) [7]	14
FIGURA 7 – MICROESTRUTURA DO FERRO FUNDIDO CINZENTO NUMA MATRIZ FERRÍTICA; ATAQUE COM 4% PICRAL; AMPLIAÇÃO: 100X [2]	16
FIGURA 8 - MICROESTRUTURA DO FERRO FUNDIDO CINZENTO NUMA MATRIZ PERLÍTICA; AMPLIAÇÃO: 200X [13]	17
FIGURA 9 - MICROESTRUTURAS DO FERRO FUNDIDO CINZENTO [2]	17
FIGURA 10 - FERRO FUNDIDO CINZENTO APÓS INOCULAÇÃO [2]	18
FIGURA 11 – MICROESTRUTURA DO FERRO FUNDIDO BRANCO; ATAQUE COM 4% PICRAL; AMPLIAÇÃO: 1000X [10]	19
FIGURA 12 – MICROESTRUTURA DO FERRO FUNDIDO MALEÁVEL DE NÚCLEO BRANCO; AMPLIAÇÃO: 200X [13]	21
FIGURA 13 – MICROESTRUTURA DO FERRO FUNDIDO MALEÁVEL DE NÚCLEO NEGRO; AMPLIAÇÃO: 200X [13]	21
FIGURA 14 - A) FERRO FUNDIDO DÚCTIL COM MATRIZ FERRÍTICA AMACIADO A 700°C; B) FERRO FUNDIDO DÚCTIL COM MATRIZ PERLÍTICA TEMPERADA; ATAQUE COM 2% NITAL; AMPLIAÇÃO: 100X. [10]	23
FIGURA 15 - MICROESTRUTURA DO FERRO FUNDIDO NODULAR COM GRAFITE VERMICULAR; AMPLIAÇÃO: 200X [17]	25
FIGURA 16 - MICROESTRUTURA DE FERRO FUNDIDO NODULAR COM GRAFITE “SPIKY”; AMPLIAÇÃO: 400X [17]	26
FIGURA 17 - DEPOSIÇÃO DE GRAFITE SOBRE NÓDULO PRÉ-EXISTENTE; AMPLIAÇÃO: 500X [17]	26
FIGURA 18 - CEMENTITE EM FERRO FUNDIDO NODULAR; AMPLIAÇÃO: 1000X [17]	27
FIGURA 19 - MICROESTRUTURA TÍPICA DE UM ADI COM NÓDULOS DE GRAFITE NUMA MATRIZ FERRÍTICA; AMPLIAÇÃO: 200X [5]	27
FIGURA 20 - DIAGRAMA DO CICLO TÉRMICO CONVENCIONAL DO TRATAMENTO TÉRMICO DE AUSTÊMPERA [5]	28
FIGURA 21 - RELAÇÃO ENTRE O SIBODUR® 450 E OUTROS MATERIAIS [44]	29
FIGURA 22 – MICROESTRUTURA SIBODUR® 450 [22]	31
FIGURA 23 – APLICAÇÃO DE SIBODUR® 450 NUMA PEÇA DE CHASSIS [23]	31
FIGURA 24 - SOLDADURA POR ELÉTRODO REVESTIDO [5]	33
FIGURA 25 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO PROCESSO DE SOLDADURA POR ELÉTRODO REVESTIDO	33

FIGURA 26 - ELÉTRÓDOS REVESTIDOS [24]	34
FIGURA 27 – CORDÃO IRREGULAR	39
FIGURA 28 – PENETRAÇÃO EXCESSIVA	39
FIGURA 29 - ELEVADA QUANTIDADE DE RESPINGOS/PROJEÇÕES	39
FIGURA 30 – CORDÃO POROSO	39
FIGURA 31 - RELAÇÃO ENTRE OS MATERIAIS DE ADIÇÃO E RESPECTIVAS DUREZAS, ORIGINADAS NAS DIFERENTES ZONAS DA JUNTA [26]	42
FIGURA 32 - ESTRUTURAS QUE OCORREM NA JUNTA SOLDADA DE UM FERRO FUNDIDO CINZENTO E NODULAR [34]	43
FIGURA 33 – CICLO TÉRMICO NA SOLDADURA DE FERRO FUNDIDO NODULAR [28]	44
FIGURA 34 – CICLO DE RECOZIDO SUBCRÍTICO [4]	48
FIGURA 35 – CICLO DE RECOZIDO TOTAL [4]	48
FIGURA 36 – TARUGO PRESO NOS MORDENTES	51
FIGURA 37 – DIMENSÕES DOS PROVETES	51
FIGURA 38 - EQUIPAMENTO UTILIZADO - OERLIKON SAXOTIG 1600	52
FIGURA 39 - PROVETES FIXOS NO GABARI	53
FIGURA 40 - MUFLA NABERTHERM N 11/H	53
FIGURA 41 - CAIXA DE AÇO REFRAATÁRIO FORRADA A CARVÃO	54
FIGURA 42 – MÉTODOS USADOS NA DISSERTAÇÃO	54
FIGURA 43 - TORNEAMENTO D2 E D3	55
FIGURA 44 - TORNEAMENTO D1	55
FIGURA 45 - CORTE DOS TARUGOS	55
FIGURA 46 – TARUGO COM DIÂMETRO FINAL (D4=30MM)	55
FIGURA 47 - CENTRO DE MAQUINAGEM COM EIXO VERTICAL CNC HAAS VF-2	56
FIGURA 48 - FACEJAMENTO	56
FIGURA 49 - CORTE DAS ZONAS CÔNCAVAS NA SERRA DE DISCO	56
FIGURA 50 – FACEJAMENTO NO CENTRO DE MAQUINAGEM	56
FIGURA 51 - REALIZAÇÃO DO CHANFRO.	56
FIGURA 52 - DISCOTOM 2	60
FIGURA 53 - STRUERS PREDOPRESS	60
FIGURA 54 – AMOSTRA FINAL	60
FIGURA 55- STRUERS ROTOPOL 1	60
FIGURA 56 - STRUERS ROTOPOL PARA POLIMENTO	61
FIGURA - 57 MICROSCÓPIO DE ANÁLISE A RAIOS-X FEI QUANTA 400 PROVIDO DE SONDA EDAX [48]	61
FIGURA 58 - ENSAIO DE DUREZA - DURÓMETRO EMCO – TEST M4U 025G3	62
FIGURA 59 – RESULTADOS POR GRUPO DE AMOSTRAS VS OBJETIVO	63
FIGURA 60 – RELAÇÃO DE RM COM DUREZA PARA DOIS E QUATRO PASSES	66
FIGURA 61 – A) MICROESTRUTURA DE 1P0W2P400; ATAQUE COM NITAL 4%; AMPLIAÇÃO: 100X; B) MICROESTRUTURA DE 1P0W2P400; ATAQUE COM NITAL 4%; AMPLIAÇÃO: 200X;	67
FIGURA 62 – A) MICROESTRUTURA DE 3P0W4P400; ATAQUE COM NITAL 4%; AMPLIAÇÃO: 100X; B) MICROESTRUTURA DE 3P0W4P400; ATAQUE COM NITAL 4%; AMPLIAÇÃO: 200X	67
FIGURA 63 – RELAÇÃO ENTRE RM E DUREZA PARA PÓS-AQUECIMENTOS DE 300°C, 400°C, 500°C E 700°C	69

FIGURA 64 – MICROESTRUTURA DE 3P0W2P300; ATAQUE COM NITAL 4%; AMPLIAÇÃO: 100X	69
FIGURA 65 – MICROESTRUTURA DE 1P0W2P400; ATAQUE COM NITAL 4%; AMPLIAÇÃO: 200X	70
FIGURA 66 – MICROESTRUTURA DE 1P0W2P500; NITAL 4%; AMPLIAÇÃO: 100X	70
FIGURA 67 – MICROESTRUTURA DE 1P0W2P700; NITAL 4%; AMPLIAÇÃO: 100X	71
FIGURA 68 – RELAÇÃO ENTRE RM E DUREZA PARA PRÉ-AQUECIMENTOS DE 300°C, CONJUGADOS COM PÓS-AQUECIMENTOS DE 300°C, 400°C E 500°C.	72
FIGURA 69 A) MICROESTRUTURA DE 2P300W2P300; ATAQUE COM NITAL 4%; AMPLIAÇÃO: 100X; B) MICROESTRUTURA DE 2P300W2P300 - MARTENSITE; ATAQUE COM NITAL 4%; AMPLIAÇÃO: 200X; C) MICROESTRUTURA DE 2P300W2P300 - LEDEBURITE; ATAQUE COM NITAL 4%; AMPLIAÇÃO: 200X;	73
FIGURA 70 – A) MICROESTRUTURA DE 3P300W2P400; ATAQUE COM NITAL 4%; AMPLIAÇÃO: 100X; B) MICROESTRUTURA DE 3P300W2P400 – MARTENSITE, LEDEBURITE; ATAQUE COM NITAL 4%; AMPLIAÇÃO: 200X;	73
FIGURA 71 – MICROESTRUTURA DE 3P300W2P500; ATAQUE COM NITAL 4%; AMPLIAÇÃO: 100X;	74
FIGURA 72 – ZPF E ZTA OBSERVADAS POR SEM; 3P300W2P500; NITAL 4%;	74
FIGURA 73 – RELAÇÃO ENTRE RM E DUREZA PARA AMOSTRAS QUE FORAM SUBMETIDAS A TRATAMENTOS TÉRMICOS A 300°C	75
FIGURA 74 - A) MICROESTRUTURA DE 2P300W2; ATAQUE COM NITAL 4%; AMPLIAÇÃO: 100X; B) MICROESTRUTURA DE 2P300W2– MARTENSITE; ATAQUE COM NITAL 4%; AMPLIAÇÃO: 200X; C) MICROESTRUTURA DE 2P0W2P300 – LEDEBURITE; ATAQUE COM NITAL 4%; AMPLIAÇÃO: 200X.	76
FIGURA 75 – MICROESTRUTURA DE 3P0W2P300; ATAQUE COM NITAL 4%; AMPLIAÇÃO: 100X;	76
FIGURA 76 – MICROESTRUTURA DE 2P300W2P300; ATAQUE COM NITAL 4%; AMPLIAÇÃO: 100X;	77
FIGURA 77 – MARTENSITE E CEMENTITE OBSERVADA EM SEM; 2P300W2P300	77
FIGURA 78 – ZPF E ZTA OBSERVADAS EM SEM; AMOSTRA 2P300W2P300	78
FIGURA 79 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS MELHORES AMOSTRAS COM OS VALORES SOLDADOS A FRIO DE SIBODUR® 450	79
FIGURA 80 – MICROESTRUTURA DE 2P0W2; ATAQUE COM NITAL 4%; AMPLIAÇÃO: 100X	80
FIGURA 81 – MICROESTRUTURA DE 1P0W2P400; ATAQUE COM NITAL 4%; AMPLIAÇÃO: 100X	80
FIGURA 82 – SEM - ANÁLISE DA AMOSTRA 1P0W2P400	81
FIGURA 83 – A) SEM - ANÁLISE DA AMOSTRA 3P0W4P400; ATAQUE 4% NITAL; B) SEM - ANÁLISE DA AMOSTRA 3P0W4P400; ZTA; ATAQUE 4%	81
FIGURA 84 -SEM - ANÁLISE DA AMOSTRA 2P300W2P300; ATAQUE 4% NITAL.	82

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO A NORMA ASTM A247 [10]	13
TABELA 2 - PROPRIEDADES MECÂNICAS TÍPICAS DOS FERROS FUNDIDOS CINZENTOS [13]	15
TABELA 3 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA TÍPICA DO FERRO FUNDIDO CINZENTO [12]	15
TABELA 4 - INFLUÊNCIA DE ELEMENTOS DE LIGA NA ESTRUTURA DO FERRO FUNDIDO CINZENTO [2,3]	16
TABELA 5 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO FERRO FUNDIDO BRANCO [12]	19
TABELA 6 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO FERRO FUNDIDO BRANCO [13]	19
TABELA 7 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA FERRO FUNDIDO MALEÁVEL [12]	20
TABELA 8 - PROPRIEDADES MECÂNICAS FERRO FUNDIDO MALEÁVEL [13]	20
TABELA 9 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA TÍPICA DO FERRO FUNDIDO DÚCTIL [12]	22
TABELA 10 - PROPRIEDADES MECÂNICAS PARA AS DIFERENTES MATRIZES DO FERRO FUNDIDO NODULAR [12]	24
TABELA 11 – PROPRIEDADES DO FERRO FUNDIDO NODULAR [12]	24
TABELA 12 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS FERROS FUNDIDOS ADI [20]	27
TABELA 13 – PROPRIEDADES MECÂNICAS APÓS A AUSTEMPERIZAÇÃO [5]	29
TABELA 14 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO SIBODUR®450 [21]	30
TABELA 15 – PROPRIEDADES DO SIBODUR® 450 [21,44]	30
TABELA 16 - CLASSIFICAÇÃO DO GRUPO DE SOLDADURAS POR FUSÃO, SEGUNDO A ENERGIA NECESSÁRIA [5]	32
TABELA 17 - FUNÇÕES AGREGADAS AO REVESTIMENTO DOS ELÉTODOS [24]	35
TABELA 18 – PARÂMETROS DE SOLDADURA – INTENSIDADE DA CORRENTE [24]	37
TABELA 19 – DEFEITOS NOS CORDÕES DE SOLDADURA [25]	39
TABELA 20 – SOLDABILIDADE DE FERROS FUNDIDOS DE MATRIZ FERRÍTICA VS. PERLÍTICA [4]	41
TABELA 21 - ELÉTODOS PARA SOLDADURA DE FERROS FUNDIDOS [4]	43
TABELA 22 – TEMPERATURAS DE PRÉ-AQUECIMENTO PARA DIFERENTES MATERIAIS DE ADIÇÃO [26]	46
TABELA 23 – TEMPERATURAS DE PÓS-AQUECIMENTO PARA FERROS FUNDIDOS NODULARES [29]	47
TABELA 24 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO ELÉTRODO REVESTIDO COM A REFERÊNCIA FN10 [43]	52
TABELA 25 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DE MAQUINAGEM	55
TABELA 26 - IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS	57
TABELA 27 - PARÂMETROS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO	59
TABELA 28 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA ANÁLISE METALOGRÁFICA	60
TABELA 29 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO	64
TABELA 30 – QUADRO – RESUMO DE RESULTADOS VS OBJETIVO	85

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1- COMPOSIÇÃO CEV [2]	15
-------------------------------	----

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	3
1.1 Enquadramento	3
1.2 Objetivos	4
1.3 Metodologia	5
1.4 Estrutura da dissertação	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 Ferros Fundidos	11
2.1.1 Metalurgia do Ferro Fundido	11
2.1.2 Classificação dos Ferros Fundidos	12
2.1.3 Ferro Fundido Cinzento	15
2.1.4 Ferro Fundido Branco	18
2.1.5 Ferro Fundido Maleável	20
2.1.6 Ferro Fundido Dúctil ou Nodular	22
2.1.7 Ferro Fundido de Alta Resistência	27
2.1.8 Sibodur® 450	29
2.2 Soldadura	31
2.2.1 Classificação da soldadura	32
2.2.2 Soldadura por elétrodo revestido	33
2.2.3 Soldabilidade do Ferro Fundido Nodular	40
3. DESENVOLVIMENTO	51
3.1 Materiais e métodos	51
3.1.1 Materiais e equipamentos	51
3.1.2 Métodos	54
3.2 Análise e discussão dos resultados	63
3.2.1 Influência do número de passes no cordão	66
3.2.2 Influência de diferentes temperaturas de pós-aquecimento	68
3.2.3 Influência da junção do Pré e Pós-Aquecimento	72
3.2.4 Influência da temperatura de 300°C	75
3.2.5 Sibodur® 450 (2P0W2) vs melhores resultados	79

4. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	85
4.1 Conclusões	85
4.2 Propostas para trabalhos futuros	86
1. BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO	91
ANEXOS	95

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

1.2 Objetivos

1.3 Metodologia

1.4 Estrutura da dissertação

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Denominam-se por ligas ferrosas aquelas em que o ferro é o constituinte principal. Estas ligas são produzidas em maior quantidade do que qualquer outro tipo de liga, e nelas estão incluídos os aços ao carbono comuns, os aços-ferramenta, os aços inoxidáveis e os ferros fundidos. O ferro não é encontrado puro na natureza, geralmente apresenta-se combinado com outros elementos formando vários compostos, como a hematite (Fe_2O_3) e a magnetite (Fe_3O_4). Estes compostos são denominados de minério de ferro e são extraídos do subsolo [1]. A fundição do ferro fundido iniciou-se na China em meados dos anos 500 a.C., e depois no século XV na Europa quando se deu a invenção do alto-forno (figura 1) [2].

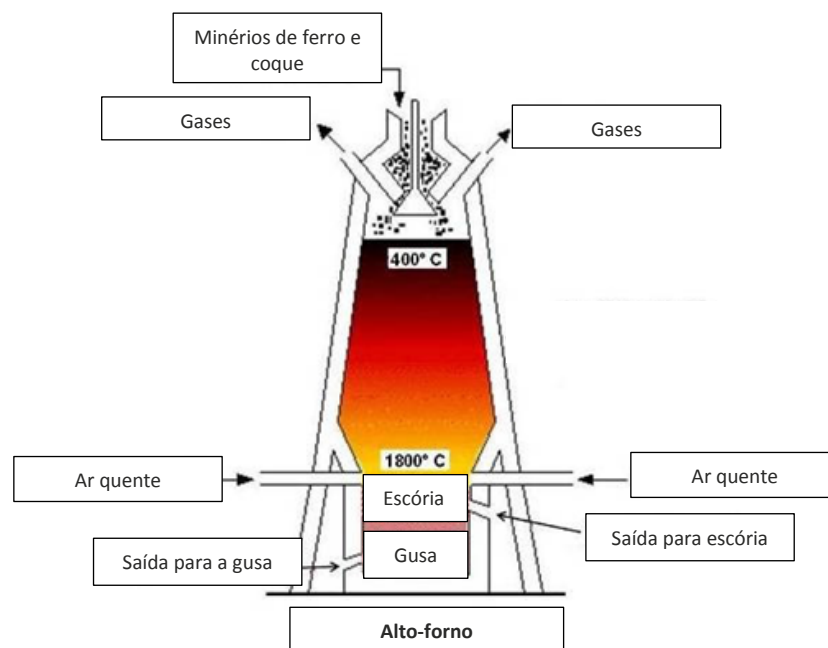


Figura 1 – Constituição do Alto-forno [3]

O amplo uso do ferro deve-se a estes fatores principais [2]:

- Compostos que contêm ferro ainda existem em grande quantidade no interior da crosta terrestre;

- O ferro e as ligas de aço podem ser produzidas usando-se técnicas de extração, formação de ligas e fabricação relativamente económicas;
- Os ferros fundidos são versáteis, no sentido de que podem ser adaptados para possuir uma ampla variedade de propriedades mecânicas e físicas.

A grande desvantagem do ferro fundido é o facto de apresentar suscetibilidade à corrosão. A soldabilidade também constitui um problema, visto que os ferros fundidos têm um teor de carbono elevado (aproximadamente 3%) em relação ao aço, o que, quando submetido a elevadas temperaturas causadas pela soldadura, pode originar alterações nas microestruturas, provocando fissuração precoce, entre outros defeitos possíveis.

A soldadura utilizada nos ferros fundidos pode ser dividida em três grupos, as soldaduras de construção, manutenção e produção. As soldaduras de construção, embora sejam pouco utilizadas são usadas para obter peças com grande complexidade. As soldaduras de manutenção, são empregadas quando é necessário a reparação de uma peça que sofre alguma avaria causada pelo desgaste, e as soldaduras de produção são realizadas para recuperar defeitos ocasionais no processo de fundição, como porosidades e fissuras [4]. Conclui-se assim que a grande vantagem de soldar ferro fundido é a reciclagem de componentes e a diminuição do desperdício.

Com a evolução das tecnologias de fabrico, têm surgido cada vez mais materiais inovadores, de entre os quais está o Sibodur®. Este material é um ferro fundido dúctil de alta resistência, com características que não são comuns no ferro fundido convencional, como resistência à tração que varia entre 450 e 700 MPa, e a taxa de alongamento que chega aos 22%. No entanto, ainda existem assuntos a serem estudados neste ferro, nomeadamente a sua soldabilidade.

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo principal estudar a soldabilidade do ferro fundido Sibodur®450, de modo a ser possível utilizar a soldadura por elétrodo revestido, para reparação de fundições novas e manutenção corretiva de peças que já estejam em serviço, diminuindo o desperdício na indústria. Para que estas reparações/correções sejam bem-sucedidas, a junta soldada deve possuir propriedades aproximadamente iguais ou superiores às do material de base. Assim sendo, tem-se 360 MPa como valor de referência de resistência

mecânica (Rm) para esta dissertação, visto que este valor corresponde a 80% do valor original de resistência mecânica do Sibodur®450.

1.3 Metodologia

O desenvolvimento deste estudo foi efetuado em duas partes: estudo teórico e prático. A metodologia geral está explícita nos pontos abaixo e a metodologia prática está representada na figura 2.

- Estudo teórico das características dos ferros fundidos dando principal importância ao ferro fundido nodular;
- Estudo teórico da soldadura por eletrodo revestido e da soldabilidade do ferro fundido nodular;
- Estudo teórico das características do Sibodur®450;
- Estabelecimento da estratégia de investigação e correspondentes iterações;
- Soldadura dos provetes a frio para valores de referência;
- Análise dos resultados previamente conseguidos;
- Soldadura dos provetes com diferentes tratamentos térmicos;
- Caracterização das amostras: ensaios de tração, metalografia, microscopia eletrônica de varrimento e ensaios de dureza;
- Análise e discussão de resultados;
- Redação desta dissertação.

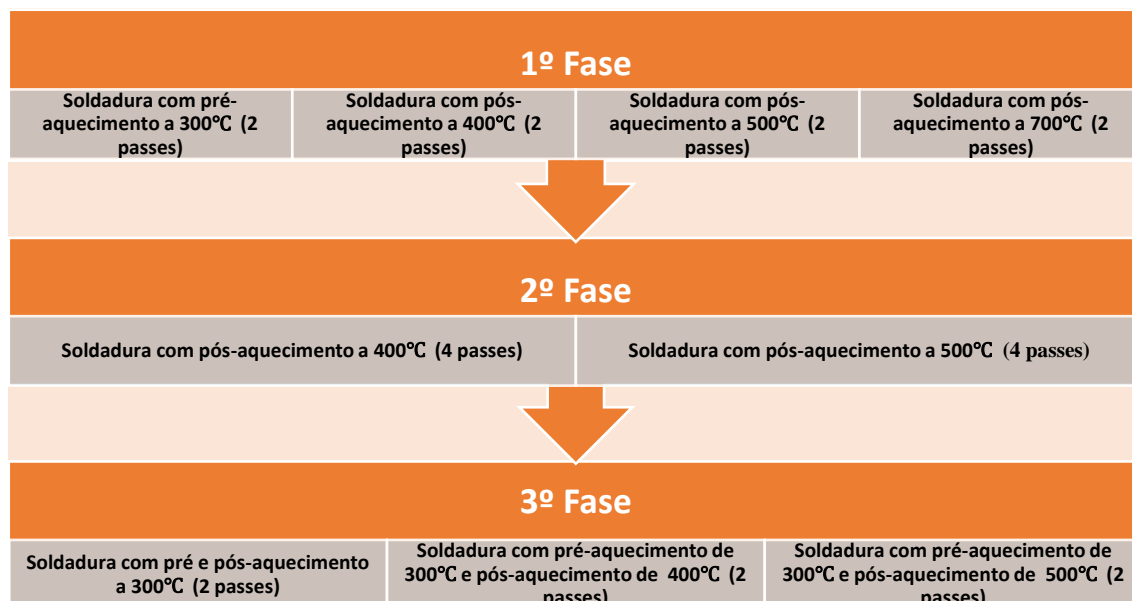


Figura 2 – Metodologia experimental

Com base em trabalhos anteriores [5,6], é possível verificar na figura 2 que numa primeira fase foram testados quatro conjuntos de provetes: um com um pré-aquecimento de 300°C durante duas horas, e os restantes com pós-aquecimentos de 400°C, 500°C e 700°C, durante duas horas, respetivamente. Todas estas soldaduras foram realizadas com dois passes. Como se obteve bons resultados com os pós-aquecimentos de 400°C e 500°C decidiu-se verificar se aumentando ao número de passes, os resultados seriam melhores em termos de resistência mecânica.

Assim sendo, decidiu-se soldar dois conjuntos com quatro passes e submetê-los a pós-aquecimentos de 400°C e 500°C, durante duas horas, respetivamente. Visto que os resultados com quatro passes não foram muito superiores aos de dois passes, decidiu-se experimentar juntar o tratamento de pré-aquecimento com o de pós-aquecimento, soldando-se assim três conjuntos com pré-aquecimento a 300°C durante uma hora, e com pós-aquecimentos de 300°C, 400°C e 500°C, respetivamente.

A principal característica a ser estudada nesta dissertação foi a resistência mecânica. A dureza e a microestrutura foram necessárias como apoio às conclusões que se puderam retirar a partir de Rm.

1.4 Estrutura da dissertação

O projeto intitulado “Estudo da soldabilidade do Ferro Fundido Sibodur®450”, está dividido em quatro partes. O capítulo 1 é composto pela introdução, esta é constituída pelo enquadramento, pela apresentação dos objetivos, e explicação da metodologia de trabalho seguida.

O capítulo 2 é constituído pela revisão bibliográfica, onde são abordados os conceitos teóricos relativos aos ferros fundidos, nomeadamente a sua metalurgia, classificação, tipos de ferros fundidos existentes no mercado e conceitos relacionados com a soldadura. Foi dado particular relevo à soldadura por elétrodo revestido, onde se estudou a influência dos parâmetros de soldadura e a soldabilidade dos ferros fundidos nodulares.

O capítulo 3 demonstra o caso prático, onde são expostos os procedimentos experimentais (maquinagem e soldadura) para a realização dos provetes, e consequente caracterização das

amostras (ensaios de tração, metalografia, microscopia eletrónica de varrimento e ensaios de dureza com indentador Vickers). É também elaborada a apresentação dos resultados e a sua discussão. No capítulo 4 estão presentes as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ferros Fundidos

- 2.1.1 Metalurgia do Ferro Fundido
- 2.1.2 Classificação dos Ferros Fundidos
- 2.2.3 Ferro Fundido Cinzento
- 2.2.4 Ferro Fundido Branco
- 2.2.5 Ferro Fundido Maleável
- 2.2.6 Ferro Fundido Dúctil ou Nodular
- 2.1.7 Ferro Fundido de Alta Resistência
- 2.1.8 Sibodur®450

2.2 Soldadura

- 2.2.1 Classificação da soldadura
- 2.2.2 Soldadura por eletrodo revestido
- 2.2.3 Soldabilidade do Ferro Fundido Nodular

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ferros Fundidos

2.1.1 Metalurgia do Ferro Fundido

Visto que o ferro fundido é uma liga ferrosa que contém carbono (C) e silício (Si) numa quantidade superior à do aço, e que devido ao seu elevado teor em carbono, o ferro fundido, ao contrário do aço, exhibe uma fase rica em carbono, é necessário referir o diagrama de equilíbrio das ligas Ferro-Carbono (Fe-C), de modo a se perceber as transformações pelas quais o ferro fundido passa, para originar os dois ferros fundidos mais relevantes: ferro fundido branco e ferro fundido cinzento [2].

Na figura 3 é possível verificar que ocorre uma reação eutética durante a solidificação, que, dependendo da composição química, da taxa de arrefecimento e do potencial de nucleação do líquido, pode ocorrer de duas formas: através do sistema Ferro-Cementite (Fe-Fe₃C) denominado metastável, ou Ferro-Grafite (Fe-Gr), denominado estável, que se encontra representado a tracejado na figura 3 [2,4].

Na reação metaestável, a reação eutética dá origem a austenite e a cementite, originando assim a ledeburite. Na reação estável, os produtos da reação são a austenite e o carbono em forma de grafite.

Teores em C e Si mais elevados e leis de arrefecimento lentas, favorecem a solidificação segundo o sistema estável, originando ferro fundido cinzento. Inversamente, baixos teores de carbono e silício e velocidades de arrefecimento rápidas, formam ledeburite, originando o ferro fundido branco [2,40].

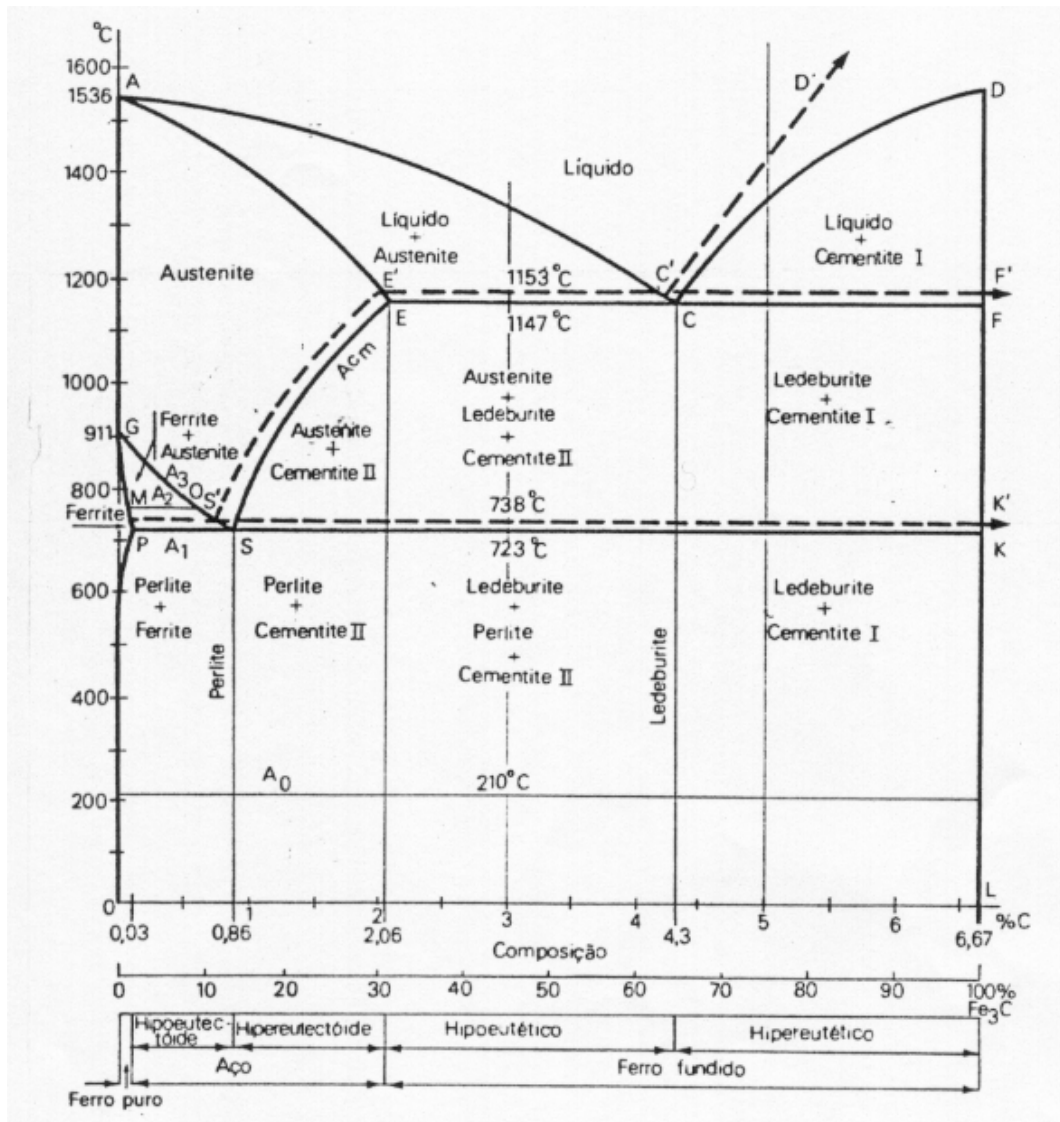


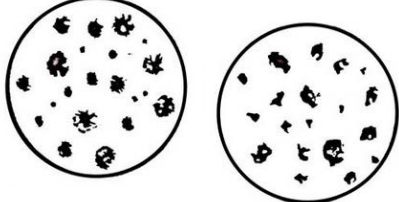
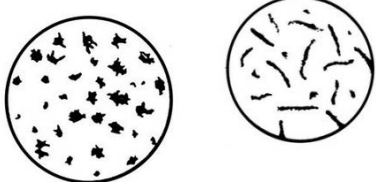
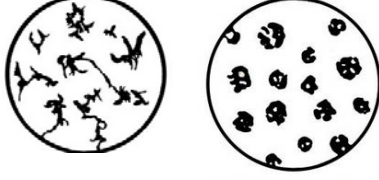

Figura 3 - Diagrama Fe-C (tracejado) e Fe-Fe₃C (a cheio) [9]

2.1.2 Classificação dos Ferros Fundidos

A primeira classificação que surgiu para os ferros fundidos foi baseada na sua fratura. Essencialmente, dois tipos foram identificados: o ferro fundido branco, visto que mostra uma fratura branca cristalina, já que esta ocorre ao longo das placas dos carbonetos resultantes da solidificação metastável; e os ferros fundidos cinzentos, que exibem uma fratura cinzenta, visto que a fratura ocorre ao longo das placas de grafite, resultante da solidificação do sistema estável [2].

Com o aparecimento da metalografia, outras classificações surgiram relativas à forma da grafite e da matriz. A classificação quanto à forma da grafite está presente na tabela 1.

Tabela 1 - Classificação segundo a norma ASTM A247 [10]

Tipo	Descrição
	<p>Tipo I e II: grafite nodular e grafite nodular imperfeita. Presente nos ferros fundido nodulares, a sua forma é originada pela adição de magnésio (Mg) durante o processo de inoculação.</p>
	<p>Tipo III e IV: grafite de carbono temperado (mais comum no ferro fundido maleável) e grafite quasi-lamelar.</p>
	<p>Tipo V e VI: grafite em forma de estrela e grafite irregular.</p>
	<p>Tipo VII: grafite lamelar, característica do ferro fundido cinzento, a sua formação é promovida pela presença de alumínio (Al), carbono (C) e sílica (Si).</p>

A matriz é classificada da seguinte forma: Ferrítica, Perlítica, Austenítica, Martensítica e Bainítica [7].

- Matriz ferrítica (figura 4): a ferrite é uma solução sólida do diagrama Fe-C em que algum silício (Si), manganês (Mn), cobre (Cu) etc. pode estar dissolvido. É macia e possui baixa resistência mecânica [2];
- Matriz perlítica (figura 5): a perlite é constituída por lamelas alternadas de ferrite com cementite, que provêm de uma reação eutética da austenite, que consiste na formação simultânea de ferrite quase isenta de carbono, e de cementite com 6.67% C em proporções tais, que o teor em carbono na austenite é de 0,86%. A espessura das lamelas de perlite depende da velocidade de arrefecimento. É relativamente dura e as propriedades mecânicas de um ferro perlítico são afetadas pelo espaçamento das

lamelas de perlite, que conseqüentemente são afetadas pela taxa de arrefecimento do ferro à temperatura eutectóide de 730°C. Possui baixa resistência à tração e elevada ductilidade [2,40];

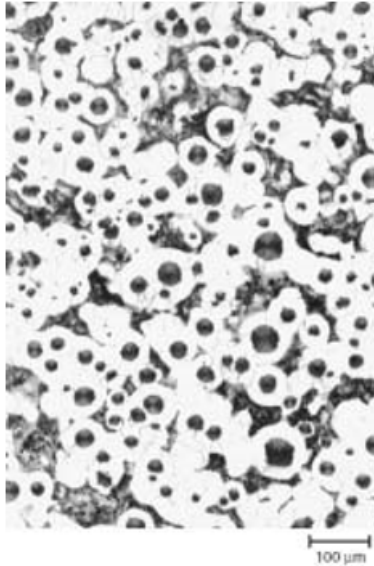


Figura 4 - Ferro fundido nodular numa matriz ferrítica-perlítica (Nódulos – grafite; zona branca – ferrite; zona escura – perlite) Ataque com 4% de Nital; Ampliação: 100x [2]

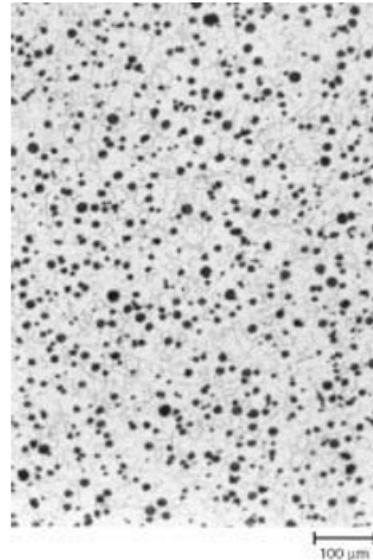


Figura 5 - Ferro fundido nodular numa matriz ferrítica; Ataque com 4% de Nital; Ampliação: 100x [2]

- Matriz bainítica: possui maior dureza e tenacidade que a matriz perlítica. A bainite é usualmente originada por um tratamento térmico de austêmpera, normalmente em ferros fundidos nodulares [2];
- Matriz austenítica: a austenite é retida quando o ferro arrefece. O calor e a resistência à corrosão são característicos dos ferros fundidos austeníticos [2];
- Matriz martensítica (figura 6): a fase martensite resulta do arrefecimento rápido da austenite. A estrutura resultante possui forma de agulhas, tem considerável dureza e resistência ao desgaste [2].



Figura 6 - Martensite (agulhas negras) [7]

2.1.3 Ferro Fundido Cinzento

As propriedades dos ferros fundidos (tabela 2) dependem do tamanho, da quantidade e distribuição das lamelas de grafite e da estrutura da matriz. Estes fatores dependem da composição química (tabela 3), em particular do seu conteúdo de carbono (C) e de silício (Si), e também de variáveis inerentes ao processo, como a forma de fundição, inoculação e a taxa de arrefecimento [5,6]

O ferro fundido cinzento apresenta uma excelente aptidão à maquinagem e boa resistência ao desgaste por atrito, devido ao facto de a grafite atuar como lubrificante. Apresenta uma alta capacidade de amortecimento de vibrações e resistência à corrosão.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas típicas dos ferros fundidos cinzentos [13]

Propriedades mecânicas	
Resistência mecânica (MPa)	152-431
Resistência à compressão (MPa)	572 - 1293
Dureza Brinell (HB)	156-302
Alongamento (%)	2-20

Tabela 3 – Composição química típica do ferro fundido cinzento [12]

Composição química (%)	C	Si	Mn	P	S
	2,5-4	1-2,8	0,2-1	0,002-1,0	0,002-0,25

Os três constituintes do ferro fundido que mais afetam a resistência e a dureza são o carbono, silício e fósforo. Um índice denominado de carbono equivalente (CEV), combina os efeitos destes três elementos como se mostra na equação 1 [2].

$$CEV = T.C\% + Si\% + P\%$$

Equação 1- Composição CEV [2]

A partir do CEV, é possível ter a seguinte classificação dos ferros fundidos cinzentos [2]:

- CEV = 4,3% Ferro Fundido cinzento eutético;
- CEV < 4,3% Ferro Fundido cinzento hipoeutético;
- CEV > 4,3% Ferro Fundido cinzento hipereutético.

O CEV confere ao ferro fundido um grande efeito na resistência e na dureza, mas caso o CEV seja inferior a 3,6%, é difícil de conseguir obter uma boa moldação, devido ao à contração do ferro [2,3,4]. Para além do CEV, outros elementos de liga presentes na tabela 4, causam mudanças estruturais no ferro fundido cinzento.

Tabela 4 - Influência de elementos de liga na estrutura do ferro fundido cinzento [2,3]

Elemento	Efeito
Magnésio (Mg)	Neutraliza o efeito do Sulfureto de Ferro; Estabiliza a perlite que aumenta a dureza.
Níquel (Ni), Cobre (Cu), Titânio (Ti)	Aumentam o potencial de grafitação durante a transformação eutética. Aumentam a dureza e a resistência mecânica.
Molibdénio (Mo), Tungsténio (W), Vanádio (Va)	Diminuem o potencial de grafitação.

Baixas taxas de arrefecimento e altas quantidades de silício (Si) e carbono (C) promovem uma completa grafitação, e a maioria do carbono dissolvido no ferro a altas temperaturas é depositado como grafite nas lamelas existentes, durante o arrefecimento numa matriz ferrítica [12].

O ferro fundido cinzento, desenvolve uma matriz ferrítica (figura 7) devido ao facto de a reação eutectoide ter ocorrido no sistema estável, tal como a reação eutética. A reação eutectoide deu origem à decomposição da austenite eutectoide em ferrite e grafite [8].

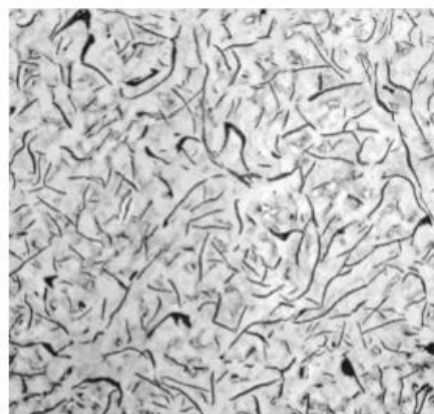


Figura 7 – Microestrutura do ferro fundido cinzento numa matriz ferrítica; Ataque com 4% Picral; Ampliação: 100x [2]

Se a grafitação do carbono dissolvido no ferro a altas temperaturas é prevenida durante o arrefecimento, os carbonetos de ferro precipitam-se, e a matriz torna-se perlítica (figura 8) [8,46]. Ou seja, a reação eutética ocorreu segundo o sistema estável, e a reação eutectoide segundo o sistema metaestável, originando assim perlite e grafite.



Figura 8 - Microestrutura do ferro fundido cinzento numa matriz perlítica; Ampliação: 200x [13]

A fundição pode ter condições variadas para que a nucleação e o crescimento das lamelas de grafite alcancem as propriedades desejadas. A figura 9 mostra as diferentes distribuições e tipos de grafite que podem ocorrer nos ferros fundidos cinzentos [7].

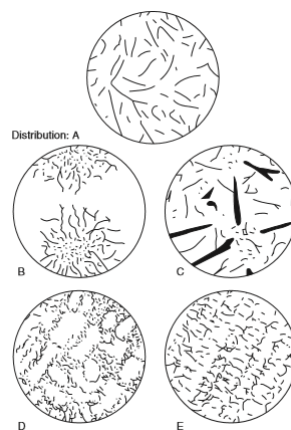


Figura 9 - Microestruturas do ferro fundido cinzento [2]

- Tipo A: lamelas com tamanho uniforme distribuídas aleatoriamente;
- Tipo B: grafite em forma de roseta;
- Tipo C: estrutura típica dos ferros hipereutéticos;
- Tipo D e E: grafite fina e sub-arrefecida, que se formam em ferros que arrefecem rapidamente.

O tratamento líquido pode mudar drasticamente a nucleação e as condições de crescimento durante a solidificação. Como resultado, a morfologia da grafite pode ser afetada (figura 10). Este tratamento, denominado inoculação, consiste na adição de elementos como Ferro (Fe), Silício (Si), Alumínio (Al) e Cálcio (Ca), no ferro fundido cinzento, antes de este ser vazado nos cadinhos [7].

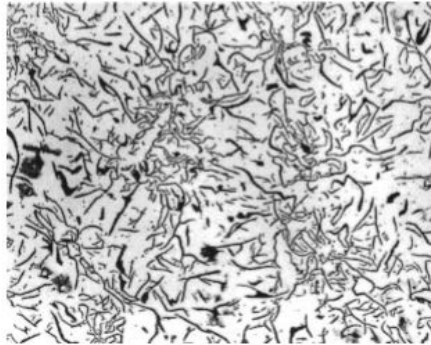


Figura 10 - Ferro fundido cinzento após inoculação [2]

A inoculação permite [7]:

- Diminuir a tendência para a formação de ferro fundido branco;
- Eliminar a grafite fina e permitir a obtenção de grafite lamelar e uma matriz perlítica homogênea;
- Afinar o tamanho de grão.

Os ferros fundidos cinzentos são usados na indústria automóvel: como em segmentos de pistões, tambores, sapatas de travões, blocos de combustão interna e discos de embraiagem [14,40].

2.1.4 Ferro Fundido Branco

O ferro fundido branco tem um baixo conteúdo de silício (Si) (tabela 5), em comparação com ferro fundido cinzento, e pode conter elementos que estabilizam o carbono, como o crómio (Cr). Quando arrefecido rapidamente na fundição, a formação de grafite não ocorre, o carbono está presente como cementite e não como grafite, e a microestrutura consiste em carbonetos de ferro e austenite numa matriz eutética [7].

Tabela 5 - Composição química do ferro fundido branco [12]

Composição química (%)	C	Si	Mn	P	S
	1,8-3,6	0,5-1,9	0,25-0,8	0,06-0,2	0,06-0,2

Como consequência de grandes quantidades da fase cementite, o ferro fundido branco é extremamente duro, porém, é também muito frágil, a ponto de ser virtualmente impossível a sua maquinagem. As suas propriedades mecânicas estão presentes na tabela 6 [2]. É adequado para aplicações como cilindros de laminação, rodas de vagões e britadores de mandíbula [39].

Tabela 6 – Propriedades mecânicas do ferro fundido branco [13]

Propriedades mecânicas	
Resistência mecânica (MPa)	200-410
Resistência à compressão (MPa)	-
Dureza Brinell (HB)	351-500
Alongamento (%)	Muito baixa

A microestrutura do ferro fundido branco está apresentada na figura 11, em que se pode verificar secções mais espessas com uma camada superficial de ferro fundido branco, que foi arrefecida mais rapidamente durante o processo de fundição [10].

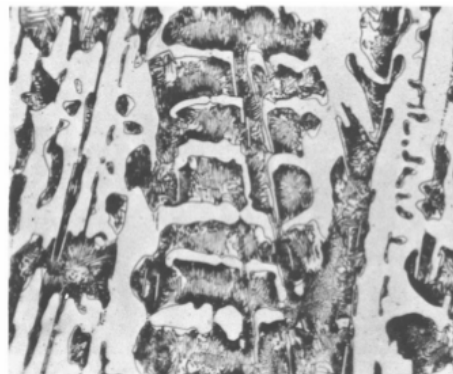


Figura 11 – Microestrutura do ferro fundido branco; Ataque com 4% Picral; Ampliação: 1000x [10]

Em termos de soldadura, o ferro fundido branco é considerado “insoldável”. A ausência de ductilidade, que pode acomodar tensões residuais provenientes da soldadura no metal de base, e na Zona Termicamente Afetada (ZTA), resulta em fraturas durante o arrefecimento da junta soldada [12]. Em geral, o ferro fundido branco é usado como intermediário na produção de um outro tipo de ferro fundido, o ferro fundido maleável [5].

2.1.5 Ferro Fundido Maleável

O ferro fundido maleável é produzido através do amaciamento do ferro fundido branco, que converte os carbonetos primários em carbono temperado. Esta formação tem dois requisitos: a grafite não se deve formar durante a solidificação do ferro fundido branco, e a grafite já deve estar formada durante o tratamento de recozido de amaciamento [4]. Este recozido é seguido de tratamentos térmicos adicionais, que produzem a matriz desejada (ferrítica ou perlítica) [2]. Um das composições químicas típicas está presente na tabela 7.

Tabela 7 – Composição química ferro fundido maleável [12]

Composição química (%)	C	Si	Mn	P	S
	2,2-2,9	0,9-1,9	0,15-1,2	0,02-0,2	0,02-0,2

O rendimento do metal vazado é mais baixo do que no caso do ferro fundido cinzento. Por este motivo, só é utilizado para peças que exijam espessuras finas. Pode competir com o ferro fundido nodular em todas as aplicações que exijam pouca espessura, como em peças como canalizações [8].

O ferro fundido maleável, tal como o ferro fundido dúctil, possui uma considerável ductilidade e tenacidade, devido à combinação de grafite nodular com uma matriz de baixo carbono. O ferro fundido maleável exibe alta resistência à corrosão, excelente maquinabilidade, permeabilidade magnética e boa resistência à fadiga [4]. As propriedades deste ferro estão presentes na tabela 8.

Tabela 8 - Propriedades mecânicas ferro fundido maleável [13]

Propriedades mecânicas	
Resistência mecânica (MPa)	276-724
Resistência à compressão (MPa)	1350-3600 (matriz perlítica)
Dureza Brinell (HB)	110-156 (ferrítica) 149-321 (perlítica)
Alongamento (%)	1-10

Ferro Fundido maleável de núcleo branco

O ferro fundido maleável de núcleo branco (figura 12) é originado a partir do recozido de amaciamento, que consiste numa combinação de descarbonização e de grafitização, realizados numa atmosfera oxidante. Este ferro possui características semelhantes às de um aço de baixo carbono, podendo ser soldado [2]. Como possui ferrite, a sua fratura é de cor branca, justificando a sua designação.

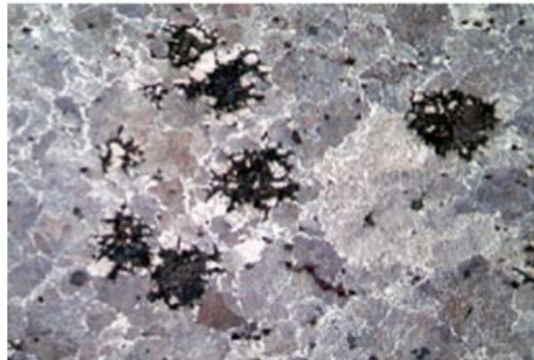


Figura 12 – Microestrutura do ferro fundido maleável de núcleo branco; Ampliação: 200x [13]

Ferro Fundido maleável de núcleo negro

Para se obter este tipo de ferro fundido maleável (figura 13), recorre-se a um recozido de amaciamento numa atmosfera neutra, em que a cementite se decompõe em ferro e carbono, o qual origina uma grafite vermicular.

A resistência mecânica, aliada a uma boa tenacidade e ductilidade, permite utilizar estes ferros em peças para a indústria automóvel, tais como conexões para tubulações, bielas e cubos de rodas [14].



Figura 13 – Microestrutura do ferro fundido maleável de núcleo negro; Ampliação: 200x [13]

2.1.6 Ferro Fundido Dúctil ou Nodular

O ferro fundido nodular tem origem na fusão de material metálico, tal como sucata de aço, retornos, gitos e lingotes. Estes materiais são pesados, e será o seu peso e a sua composição química que ajudarão na escolha dos aditivos (grafite, carboneto de silício e ferro-silício), de modo a se corrigir os teores de carbono (C) e de silício (Si) [15].

A percentagem de sucata de aço na carga é de 60% a 65%, no máximo, devendo os retornos e os lingotes perfazer o restante. Valores mais elevados de sucata de aço originam cementite. A utilização de maior percentagem de retornos e lingote contraria esta tendência. Tipicamente, o ferro fundido nodular é produzido a partir de um metal com a composição química presente na tabela 9.

Tabela 9 – Composição química típica do ferro fundido dúctil [12]

Composição química (%)	C	Si	Mn	P	S
	3,0-4,0	1,8-2,8	0,1-1,0	0,01-0,1	0,01-0,03

O silício (Si) nas fases posteriores do processo (tratamento de nodularização e inoculação) é elevado (2% a 2,8%). Outros elementos relevantes são o crómio (Cr), devido ao facto de ser carborígeno, e o chumbo (Pb), visto que deforma a forma esférica da grafite. Estes devem estar abaixo dos seguintes limites (Cr <0,08%; Pb <0,008%) [15].

Durante o processo de fundição, quantidade suficiente de magnésio (Mg), é adicionada ao ferro ainda líquido originando um conteúdo residual de magnésio (Mg), de cerca de 0,04%. O ferro é inoculado e fundido, originando grafite precipitada na forma de nódulos. O ferro fundido dúctil difere do ferro fundido cinzento nas características de fundição em dois fatores importantes: forma escória e tem necessidade de ser alimentado para prevenir efeitos de contração [15].

Os ferros fundidos dúcteis têm sempre um alto valor de CEV, para que o volume da grafite precipitada durante a solidificação assegure completamente as secções. No entanto, a expansão resultante da precipitação da grafite resulta numa grande pressão a ser colocada nas paredes do molde, muito superior à encontrada no ferro fundido cinzento [2].

De acordo com a adição de certos elementos, a matriz do ferro fundido nodular pode ser manipulada de várias formas, originando os seguintes tipos de matrizes [16]:

- Ferro fundido nodular com matriz ferrítica (figura 14 a)): boa ductilidade e resistência ao impacto, assim como resistência à tração, podendo ser comparado a aços de baixo carbono;
- Ferro fundido nodular com matriz perlítica (figura 14 b)): alta resistência mecânica, boa resistência ao desgaste, boa ductilidade e reduzida resistência ao impacto;
- Ferro fundido nodular com matriz ferrítico-perlítica: estes são os mais comuns, tem boa maquinabilidade e baixos custos de produção;
- Ferro fundido nodular com matriz austenítica: alta resistência à corrosão e oxidação, com boa resistência à tração e boas propriedades mecânicas a altas temperaturas;
- Ferro fundido nodular com matriz martensítica: são obtidos através do controlo da composição química, para evitar a formação de perlite. As suas propriedades são: alta resistência à tração e resistência ao desgaste, mas com valores mais baixos de ductilidade e tenacidade;
- Ferro fundido nodular com matriz bainítica: é obtido controlando a composição química e / ou tratamento térmico;
- Ferro fundido nodular austemperado: são obtidos após um tratamento térmico de austêmpera. Possuem alta resistência à tração e valores de resistência duas vezes superiores aos ferros fundidos nodulares de matriz perlítica.

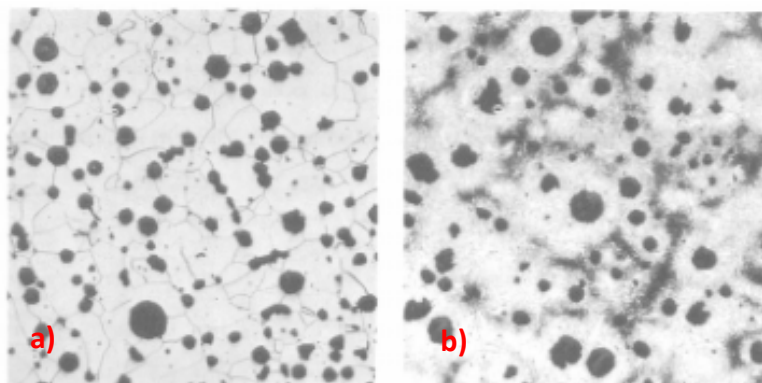


Figura 14 - a) Ferro fundido dúctil com matriz ferrítica amaciado a 700°C b) Ferro Fundido dúctil com matriz perlítica temperada; Ataque com 2% Nital; Ampliação: 100x. [10]

As propriedades das matrizes mais comuns (ferrítica, perlítica e ferrítico-perlítica), estão presentes na tabela 10.

Tabela 10 - Propriedades mecânicas para as diferentes matrizes do ferro fundido nodular [12]

Propriedades	Matriz Ferrítica	Matriz Ferrítico-Perlítica	Perlítica
Resistência à tração (MPa)	350-400	500-600	700-800
Limite de escoamento (MPa)	220-250	320-380	440-500
Alongamento (%)	22-15	7-3	2-2

Para além dos tratamentos de nodularização, existem também os tratamentos térmicos, cujo principal benefício é o aumento da resistência ao impacto. A maior parte das formas de tratamento térmico, com exceção da austêmpera, causa perda na resistência à fadiga, ao desgaste e impacto à temperatura ambiente [10].

O tratamento térmico vai eliminar as secções de carbonetos, produzir uma matriz mais consistente, e as propriedades mecânicas (tabela 11) são muitas vezes melhoradas, especialmente por recozido de normalização [10].

A grafite nodular permite que este ferro possua propriedades mecânicas superiores às do ferro fundido cinzento, sendo de referir a sua maior tenacidade e a maior resistência à deformação plástica [8].

Tabela 11 – Propriedades do ferro fundido nodular [12]

Propriedades mecânicas	
Resistência mecânica (MPa)	345-827
Resistência à compressão (MPa)	359-920
Dureza Brinell (HB)	143-302
Alongamento (%)	2-20

O ferro fundido nodular pode ser usado em peças para tratores agrícolas, pistões para automóveis a *diesel*, portas de fornos, matrizes para moldar aços, alumínio e bronze, eixos e

engrenagens, se efetuado tratamento térmico [12]. Substitui o ferro fundido cinzento, e mesmo o aço, em numerosas aplicações como cambotas, rodas dentadas e válvulas [8].

Defeitos na microestrutura do ferro fundido nodular

São considerados defeitos de microestrutura nos ferros fundidos nodulares, as alterações na forma esférica da grafite, bem como a presença de fases indesejadas, como a cementite, capazes de provocar alterações nas propriedades mecânicas, como a diminuição da resistência mecânica e taxa de alongamento [17].

A presença de ferro fundido vermicular no ferro fundido nodular ferrítico (figura 15), reduz a taxa de alongamento. Mesmo percentagens baixas, na ordem dos 8%, levam a uma redução de cerca de 30% da taxa de alongamento [42]. A tendência para a formação de grafite vermicular está associada a baixos teores de magnésio (Mg) e contaminações [18].

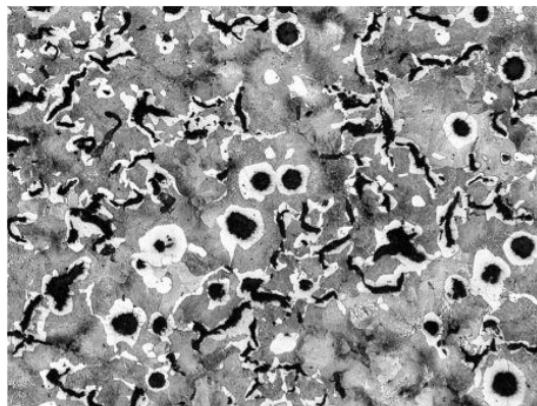


Figura 15 - Microestrutura do ferro fundido nodular com grafite vermicular; Ampliação: 200x [17]

Outra forma de grafite, que também prejudica as propriedades mecânicas do ferro fundido nodular, é a forma conhecida como “*spiky*”. Este tipo de grafite, (figura 16), provoca uma queda acentuada das propriedades mecânicas, e geralmente está associada à presença de carbonetos, sendo a causa mais comum para a sua formação, um alto teor de magnésio (Mg) [17].



Figura 16 - Microestrutura de ferro fundido nodular com grafite "Spiky"; Ampliação: 400x [17]

Outro defeito, é a deposição de grafite sobre nódulos existentes (figura 17). É observado que quando este fenômeno ocorre, há uma diminuição no módulo de elasticidade em função da grafite depositada [19].

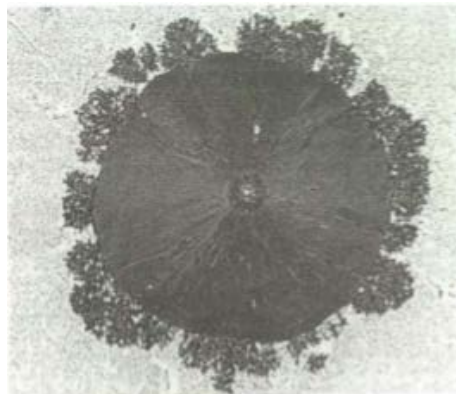


Figura 17 - Deposição de grafite sobre nódulo pré-existente; Ampliação: 500x [17]

Além da variação na forma da grafite, pode ocorrer a presença de fases indesejadas na microestrutura, que influenciam as propriedades mecânicas. Essas fases são consequência da composição química e tratamentos térmicos inadequados, como por exemplo a presença de cementite (figura 18), que contribui para a diminuição da taxa de alongamento e da resistência à tração [17].

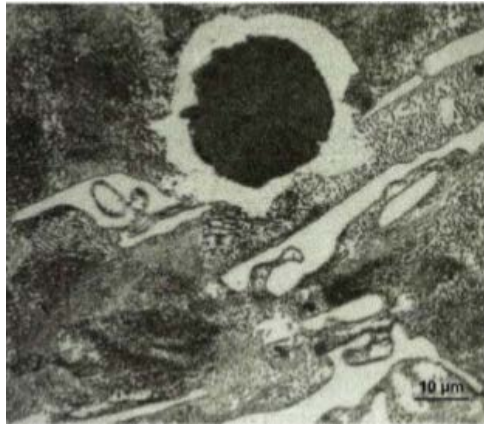


Figura 18 - Cementite em ferro fundido nodular; Ampliação: 1000x [17]

2.1.7 Ferro Fundido de Alta Resistência

O ferro fundido austêmperado possui uma matriz austenítica e ferrítica, originando a ausferrite. É um material novo, que ganhou reconhecimento devido à combinação da resistência mecânica (850-1400 MPa) e ductilidade (4-10%), propriedades comparáveis com as dos aços [5,10]. Um exemplo da sua microestrutura está presente na figura 19. A sua composição química está presente na tabela 12.

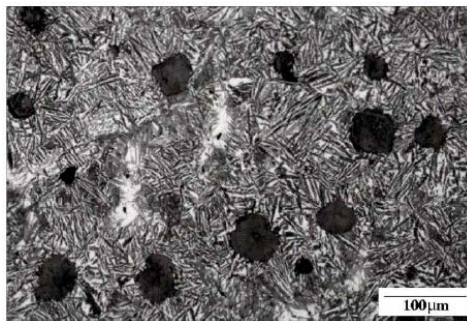


Figura 19 - Microestrutura típica de um ADI com nódulos de grafite numa matriz ferrítica; Ampliação: 200x [5]

Tabela 12 – Composição química dos Ferros fundidos ADI [20]

Composição	C	Si	Mn	Pb	Sn	O
química (%)	3,4-4	2,0-4,0	0,35% a) 0,50% b)	0,025-0.06	0,02	50 ppm

a) Espessuras abaixo de 13 mm

b) Espessuras entre 13 mm e 30 mm

O tratamento para Ferro Fundido Dúctil Austemperado (ADI), possui duas fases [20,12,15]:

- Vazamento de um ferro fundido nodular isento de carbonetos eutéticos, e com composição química e nodularidade controlada;
- Tratamento térmico conhecido por austêmpera, que consiste num ciclo de austenização, seguido de uma transformação isotérmica no domínio bainítico.

Ciclo térmico-austêmpera (figura 20): austenização e transformação isotérmica [20,12,15]:

- A austenização é feita a 815°C e a 930°C, para transformar completamente a matriz em austenite. Isto é feito num forno com atmosfera não oxidante ou num banho de sais a altas temperaturas. As temperaturas e os tempos são calculados pelas composições e tamanho da secção, 1 a 5 horas é o tempo adequado.
- Transformação isotérmica: as moldações são arrefecidas à temperatura isotérmica entre 210°C e 400°C. Isto geralmente é realizado num banho de sais. As moldações são mantidas à temperatura durante 1 a 2 horas, para completar a transformação da austenite em bainite. Depois do tratamento isotérmico, as moldações são arrefecidas à temperatura ambiente.

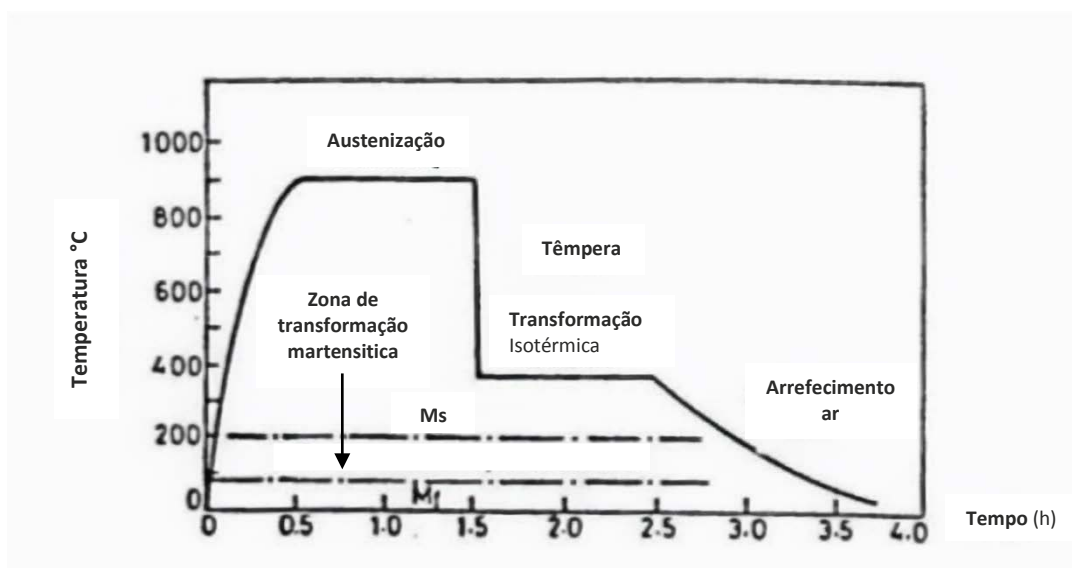


Figura 20 - Diagrama do ciclo térmico convencional do tratamento térmico de austêmpera [5]

Ferros fundidos dúcteis podem ser austemperados até espessuras de 8 mm, para secções mais espessas deve-se adicionar Molibdénio (Mo) ou Níquel (Ni), para aumentar a dureza. As mudanças típicas que ocorrem após a austemperização estão presentes na tabela 13.

Tabela 13 – Propriedades mecânicas após a austemperização [5]

	Após fundição	Austemperado a 300°C por 1 h	Austemperado a 375°C por 1 h
Resistência mecânica (MPa)	475	1165	1105
Dureza Brinell (HB)	19	1	9
Alongamento (%)	160	450	320

Este tipo de ferro fundido possui aplicações como substituto do aço forjado em componentes para maquinaria agrícola, mineração e indústria automóvel. O uso deste ferro ainda está limitado, visto que ainda não existem condições adequadas para os tratamentos térmicos que este necessita [5,10].

2.1.8 Sibodur® 450

O material em estudo nesta tese, Sibodur®450, faz parte de uma família de ferros fundidos dúcteis desenvolvidos e patenteados pela *Georg Fischer Automotive (GF)*, na Suíça, exclusivamente para a indústria automóvel [21]. Estes ferros apresentam características excelentes, como o facto de serem mais leves que o ferro fundido dúctil convencional, e de possuírem alta resistência à tração e tenacidade, e elevada taxa de alongamento, entre outros. A adição de silício e boro (Sibo) torna-o mais forte, mais durável (Dur, do inglês *durable*) do que os ferros fundidos convencionais (figura 21) [44].

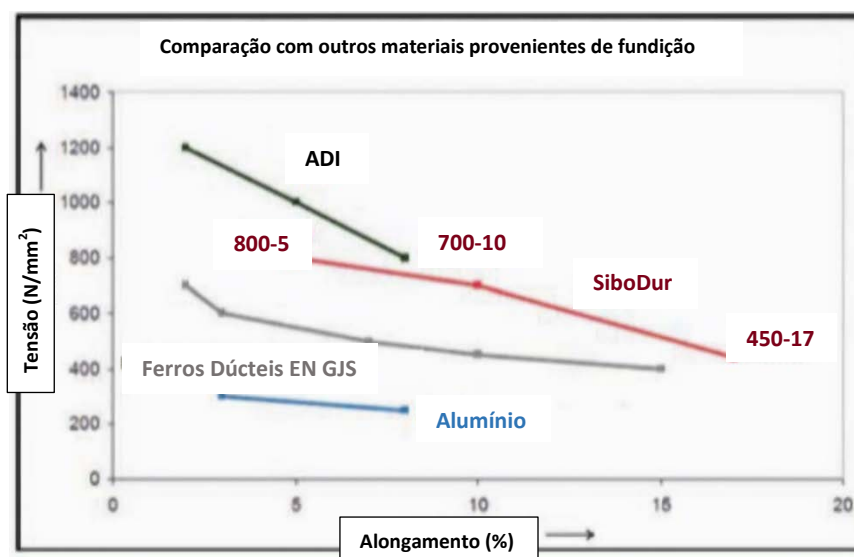


Figura 21 - Relação entre o Sibodur® 450 e outros materiais [44]

Com a adição de elementos de liga (silício, manganês, cobre, entre outros, tabela 14) na produção do ferro fundido, a GF garante para este material uma resistência à tração que varia de 450 a 800 MPa, uma taxa de alongamento que varia de 6 a 23%, e dureza de 150 – 190 HB, algo que não se encontra em nenhum outro tipo de ferro fundido dúctil.

Tabela 14 - Composição química do Sibodur®450 [21]

Composição química	C	Si	Mn	Cu
	(3,3 – 3,7) %	(2,6 – 2,8) %	(0,05 – 0,3) %	(0,05 – 0,3) %

As suas propriedades (tabela 15) estão relacionadas com a composição química inovadora, na qual o teor em silício foi aumentado, de modo a alcançar a ductilidade desejada, enquanto que a adição de boro ajuda o material a solidificar. Há cinco variantes de Sibodur®, desde o Sibodur® 450-17 ao Sibodur® 800-5, sendo que o primeiro valor representa a resistência à tração e o segundo a ductilidade. A sua microestrutura está presente na figura 22.

Tabela 15 – Propriedades do Sibodur® 450 [21,44]

Propriedade	Sibodur® 450-17HD	Sibodur® 450-17HS	Sibodur® 700
Matriz Perlítica (%)	≤20 (balanço ferrite)	≤20 (balanço ferrite)	60-90 (balanço ferrite)
Resistência à tração (MPa)	≥450	≥450	≥700
Alongamento (%)	≥17	≥17	6-12
Dureza Brinell (HB)	150-190	150-190	240-290
Módulo de Young kN/mm ²	176(RT) 155 (400°C)	176(RT) 155 (400°C)	176(RT) 157 (400°C)
Coefficiente de Poisson	0,285	0,285	0,289
Coefficiente de expansão térmica 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)

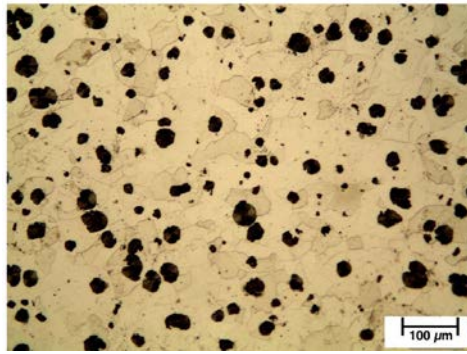


Figura 22 – Microestrutura Sibodur® 450 [22]

Os Sibodur® com maior ductilidade, são usados para componentes sujeitos ao choque, e os outros com maior resistência, usados em peças sujeitas a maiores esforços, como bielas. Um exemplo de peça em que este ferro fundido é utilizado está presente na figura 23 [23].



Figura 23 – Aplicação de Sibodur® 450 numa peça de chassi [23]

2.2 Soldadura

A soldadura é um dos processos de ligação de peças metálicas com uma melhor relação custo-benefício. Permite a ligação de uma grande gama de espessuras, é extremamente versátil, podendo ser aplicada a uma variada gama de materiais, formas e dimensões. As juntas produzidas por soldadura são inamovíveis e permanentes, normalmente ultrapassam a resistência patenteada pelos materiais de base ligados, asseguram a continuidade metálica, são reprodutíveis e podem ser inspecionadas por técnicas não destrutivas [24].

A AWS define a soldadura como sendo um “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” [5].

2.2.1 Classificação da soldadura

A soldadura por eletrodo revestido está inserida no grupo de soldaduras por fusão. A classificação mais comum é a divisão dos processos, de acordo com o tipo de fonte de energia usada para fundir as peças. Na tabela 16 são visíveis alguns processos de soldadura por fusão e as suas características.

Tabela 16 - Classificação do grupo de soldaduras por fusão, segundo a energia necessária [5]

PROCESSO	FONTE DE CALOR	TIPO DE CORRENTE E POLARIDADE	AGENTE PROTETOR	OUTRAS CARACTERÍSTICAS	APLICAÇÕES
Eléctrodo Revestido	Arco eléctrico	Contínua ou alternada. Eléctrodo (+) ou (-)	Escória e gases gerados	Manual. Vareta metálica recoberta por camada de fluxo.	Soldadura de quase todos os metais, exceto cobre puro, metais preciosos, reativos e de baixo ponto de fusão. Usado na soldadura em geral.
<i>Metal Inert Gas</i> – <i>Metal Active Gas</i> (MIG-MAG)	Arco eléctrico	Contínua. Eléctrodo +	Árgon ou Hélio, Árgon + O ₂ , Árgon + CO ₂ , CO ₂	Automática/mecanizada. Ou semiautomática. O arame é sólido.	Soldadura de aços ao carbono, baixa e alta liga, espessura ≥ 1 mm. Soldadura de chapas, tubos, etc. Qualquer posição.
<i>Tungsten Inert Gas</i> (TIG)	Arco eléctrico	Contínua ou alternada. Eléctrodo (-)	Árgon, Hélio ou misturas destes.	Manual ou automática. Eléctrodo não consumível de tungsténio. O arame é adicionado separadamente	Soldadura de todos os metais exceto Zn, Be e suas ligas, espessura de 0,1 a 8 mm. Soldadura de materiais não ferrosos e aços inox.
Arco Submerso	Arco eléctrico	Contínua ou alternada. Eléctrodo (+)	Escória	Automática/mecanizada ou semiautomática. O arco funde sob uma camada de fluxo granular.	Soldadura de aços ao carbono, baixa e alta liga, espessura ≥ 10 mm. Posição plana ou horizontal de peças estruturais, tanques, vasos de pressão, etc.
Plasma	Arco eléctrico	Contínua. Eléctrodo (-)	Árgon, Hélio, Árgon+ Hidrogénio	Manual ou automática, o arame é adicionado separadamente. Eléctrodo não consumível de tungsténio.	Todos os metais importantes em engenharia, exceto Zn, Be e suas ligas. Passes de raiz.
Laser	Feixe de luz		Árgon ou Hélio	Soldadura automática. Não usa, em geral, metal de adição. Laser permite uma elevada concentração de energia.	Soldadura de todos os metais, exceto nos casos de vaporização excessiva. Indústria automóvel, nuclear e aeroespacial.
Feixe de electrões	Feixe de electrões	Contínua	Vácuo (x10 ⁴ mmHg)	Soldadura automática. Não usa, em geral, metal de adição. Feixe de electrões permite uma elevada concentração de energia.	Soldadura de todos os metais exceto nos casos de vaporização excessiva. Indústria nuclear, automóvel e aeroespacial.
Soldadura a gás	Chama oxiacetilénica		Gás (H ₂ , CO ₂ , H ₂ O)	Manual. Arame adicionado separadamente.	Soldadura manual de aço ao carbono, Cu, Al, Zn, Pb e bronze. Soldadura de chapas finas e tubos de pequeno diâmetro.

2.2.2 Soldadura por eléctrodo revestido

Este processo de soldadura é talvez o processo de uso mais corrente, embora não seja o mais produtivo. O seu funcionamento baseia-se na aplicação de uma diferença de potencial entre um eléctrodo e o material de base, promovendo a formação de um arco eléctrico responsável pelo fornecimento de energia sob a forma de calor ao sistema (figura 24) [24].

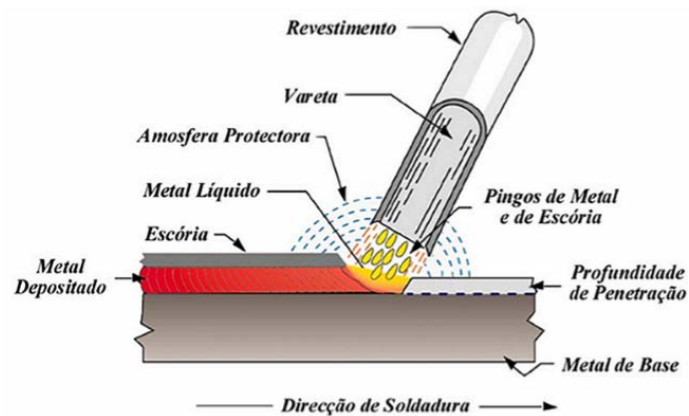


Figura 24 - Soldadura por eléctrodo revestido [5]

Este calor é o responsável pela fusão, tanto do material de base como do de adição, promovendo um banho com uma composição química, que será resultante da mistura de composições químicas dos materiais que estiveram na sua origem [24].

O diâmetro e tipo dos eléctrodos definem os requisitos de tensão de arco (dentro de 16 a 80 V), e a intensidade de 20 a 550 A. A corrente a usar pode ser do tipo alternada ou contínua, dependendo do eléctrodo usado [24]. Os equipamentos usados neste processo estão representados na figura 25.



Figura 25 – Equipamentos utilizados no processo de soldadura por eléctrodo revestido

O material de adição denomina-se por elétrodo revestido (figura 26) e é constituído pela alma e pelo revestimento. Os eléttodos possuem diâmetro compreendido normalmente entre 1,6 a 10 mm, com comprimentos na ordem dos 300 a 450 mm. A alma é uma vareta geralmente de aço macio (cobre, monel, bronze ou outros, conforme o metal de base a ligar) que, além de permitir a condução da corrente elétrica até à sua extremidade, constitui também o material de adição, através da sua fusão em pequenas gotículas [24].



Figura 26 - Eléttodos revestidos [24]

Existem vários tipos de revestimento, cada um com uma composição química complexa [6]:

- Revestimento oxidante: é composto por óxido de ferro e manganês. A escória resultante é espessa, oxidante, abundante e facilmente destacável;
- Revestimento ácido: possui na sua composição óxido de ferro, óxido de manganês e silício. Estes dão origem a uma escória ácida espessa, ou de revestimento médio, abundante, porosa e de fácil remoção;
- Revestimento rutílico: este revestimento apresenta uma grande quantidade de rutilo (TiO_2), produzindo uma escória espessa, compacta e facilmente destacável;
- Revestimento básico: revestimento espesso, possuindo na sua composição carbonato de cálcio e fluorite, o que produz uma escória básica que, em conjunto com o dióxido de carbono (CO_2) gerado pela decomposição do carbonato de cálcio, protege a solda do contacto com a atmosfera.

Após a fusão, o revestimento fundido sob a forma de escória fica a sobrenadar o banho de fusão, devido ao facto de possuir uma densidade menor do que a apresentada pelo material de adição. Esta escória deve ser removida, visto que é não condutora.

O revestimento tem como função auxiliar no processo de soldadura. Outras funções agregadas ao revestimento, estão presentes na tabela 17.

Tabela 17 - Funções agregadas ao revestimento dos eletrodos [24]

Elétricas	Metalúrgicas	Físicas e Mecânicas	Operatórias
Melhorar a passagem de corrente (ionização);	Proteção das gotículas e do cordão;	Envolve as gotículas;	Cratera da extremidade evita colagem;
Melhorar a estabilidade do arco;	Equilibra a composição química;	Camada de escória atua como barreira contra arrefecimento rápido;	Revestimento possibilita automatização;
Evitar escorvamentos laterais;	Facilita a libertação de gases do interior do cordão;	Cratera da extremidade do eletrodo direciona o arco.	Promover a retenção do material de adição;
Evitar dispersão do arco.	Proteção contra o arrefecimento rápido.		Revestimento facilita o escorvamento, devido à cratera formada.

Parâmetros de soldadura

No processo de soldadura por eletrodo revestido, existem os seguintes parâmetros a ter em consideração: [24]

- Tipo do eletrodo;
- Diâmetro do eletrodo;
- Tipo e intensidade da corrente elétrica;
- Tensão em vazio da fonte de alimentação;
- Comprimento do arco;
- Velocidade de soldadura.

Para além destes parâmetros, existem outros fatores que poderão ter implicações no processo operatório, tais como a forma de preparação da junta, a massa das peças a soldar, a existência ou não de pré-aquecimento e, em caso afirmativo, qual a temperatura a que esse pré-aquecimento foi efetuado, a temperatura ambiente, manipulação do eletrodo, experiência do operador, entre outros [24].

Tipo de eletrodo

A seleção é realizada com base nas características mecânicas pretendidas para a junta e posição de soldadura. Em função da opção tomada, torna-se necessário [24]:

- Escolher o tipo de corrente (ver indicações do fabricante);
- Regular a intensidade da corrente;
- Selecionar a polaridade, caso se esteja a atuar em corrente contínua.

Diâmetro do eletrodo

A escolha do diâmetro de eletrodo mais adequado para a realização de um passe de soldadura, depende de vários fatores, como [24]:

- Espessura do material a soldar: o diâmetro deverá ser tanto maior quanto mais espessas forem as peças a soldar;
- Posição de soldadura: o diâmetro deverá ser tanto menor quanto mais complicada for a posição de soldadura.

No entanto, deverão ser tomados em consideração os seguintes fatores [24]:

- Os eletrodos de maior diâmetro possuem uma velocidade de fusão e taxa de deposição mais elevadas do que os de menor diâmetro;
- A utilização de um eletrodo demasiado espesso pode conduzir à perfuração das peças a soldar e exige uma maior intensidade de corrente, para que haja uma fusão adequada;
- Nos passes de raiz, deverá utilizar-se um diâmetro menor, por forma a garantir uma fusão/penetração adequada.

Tipo e intensidade da corrente elétrica

Enquanto a seleção do tipo de corrente está agregada essencialmente ao tipo de revestimento do eletrodo, a regulação da intensidade de corrente poderá ser um fator crítico na realização de uma junta soldada, conforme se descreve na tabela 18 [24]:

Tabela 18 – Parâmetros de soldadura – Intensidade da corrente [24]

Corrente Contínua	Corrente Alternada	Polaridade da corrente	Intensidade da corrente
O arco elétrico é mais estável.	Não existem fenómenos de sopro magnético.	A maior parte dos elétrodos funciona melhor em polaridade inversa.	Insuficiente, o arco torna-se instável.
Cordões com forma mais uniforme.	Permite a utilização de diâmetros de elétrodo mais elevados.	A polaridade inversa permite uma maior velocidade de soldadura e taxa de deposição.	Muito elevada, pode conduzir à deteriorização do revestimento do elétrodo e à diminuição da resistência mecânica da junta soldada.
Menor tendência para existir curto-circuito na transferência do metal de adição.	Permite velocidades de soldadura e taxas de deposição melhores na soldadura ao baixo.		A regulação incorreta pode resultar num cordão de soldadura com um aspeto irregular.
Deverá afastar-se a ligação do alicate de massa, de forma a evitar o fenómeno de sopro magnético.			

Comprimento do arco

O comprimento do arco é a distância que medeia a ponta do elétrodo em fusão e a superfície do banho de fusão. É um parâmetro de grande importância para a obtenção de cordões de soldadura com bom aspeto e propriedades conforme o requerido. O comprimento ideal do arco varia com [24]:

- O tipo e diâmetro do elétrodo e composição do revestimento;
- A intensidade de corrente;
- A posição de soldadura.

O comprimento do arco é essencialmente controlado pelo soldador, resultando a sua regulação da experiência e perícia do operador. Uma diferença de potencial maior propicia um maior comprimento do arco, o qual poderá originar uma proteção deficiente do material de adição durante a transferência e após a deposição, bem como originar um número elevado de salpicos e uma trajetória mal direcionada do arco [24].

Uma diferença de potencial mais baixa, corta o arco quando este se alonga demasiado, podendo também provocar a colagem do eletrodo ao material de base. Idealmente, o comprimento do arco não deveria ultrapassar o valor do diâmetro do eletrodo [24].

Velocidade de soldadura





A velocidade de soldadura poderá ser definida como o deslocamento linear do eletrodo sobre a junta, por unidade de tempo. A velocidade de soldadura depende dos seguintes fatores [24]:

- Tipo de corrente (alternada ou contínua (polaridade)) e intensidade;
- Posição de soldadura;
- Velocidade de fusão do eletrodo;
- Estado superficial do metal de base;
- Tipo de junta;
- Pingagem e fixação da junta;
- Manipulação do eletrodo.

Durante o processo, a velocidade de soldadura deve ser ajustada, permitindo assim que o arco fique colocado sempre ligeiramente à frente do banho de fusão. Uma velocidade mais elevada, conduzirá à realização de um cordão mais estreito e com melhor penetração. Por outro lado, uma velocidade de soldadura demasiado baixa, poderá conduzir à formação de um cordão largo e convexo, mas com fraca penetração [24].

Quando os parâmetros não são respeitados, pode-se originar alguns defeitos nos cordões de soldadura. Alguns exemplos estão presentes na tabela 19.

Tabela 19 – Defeitos nos cordões de soldadura [25]

Causa	Defeito
Conexões defeituosas; Sobreaquecimento; Eléctrodo e intensidade inapropriada.	 <p>Figura 27 – Cordão irregular</p>
Corrente muito elevada; Posição inadequada do eléctrodo.	 <p>Figura 28 – Penetração excessiva</p>
Corrente muito elevada; Arco muito comprido.	 <p>Figura 29 - Elevada quantidade de respingos/projeções</p>
Corrente inadequada; Arco curto; Eléctrodo defeituoso;	 <p>Figura 30 – Cordão poroso</p>

Aplicações

O processo de soldadura por arco eléctrico com eléctrodo revestido, permite soldar inúmeros materiais. É apenas condição necessária para que duas peças de um determinado material sejam soldadas, que haja eléctrodos adequados. Comercialmente, existem eléctrodos para os seguintes materiais [24]:

- Aços ao carbono, microligados e aços resistentes à corrosão;
- Ferros fundidos;
- Alumínio e a suas ligas;
- Cobre e suas ligas;
- Níquel e suas ligas.

Este processo não é adequado para espessuras inferiores a 1,5 mm, já que o material de base funde mesmo antes de se criar um banho de fusão estável, caso a intensidade de corrente não seja devidamente regulada. Para grandes espessuras existem outros processos, tais como o

MIG-MAG e o arco submerso que, para além de poderem ser automatizados, possuem taxas de deposição bem mais atrativas [24].

2.2.3 Soldabilidade do Ferro Fundido Nodular

O ferro fundido é normalmente considerado um material de difícil soldadura e as dificuldades são grandes especialmente com o ferro fundido nodular. Os componentes fabricados com este tipo de ferro estão muitas vezes sujeitos a cargas, não sendo de admitir fragilidades numa junta soldada com este material [4].

Os problemas na soldabilidade do Ferro Fundido [26] são enumeradas em seguida:

- Elevado conteúdo de carbono: que com o aquecimento, origina cementite e martensite;
- Baixa ductilidade: o que leva a não acomodar tensões residuais na junta soldada, originando fissuração;
- Alto conteúdo de fósforo, enxofre e oxigénio, que pode originar poros na junta soldada;
- Defeitos na fundição, como inclusões de areia e contração. Estes defeitos não permitem a fusão total entre o material de base e de adição;
- Óleo impregnado, mais comum em peças que já tenham estado em serviço. O óleo contamina a junta soldada, originando poros no decorrer do processo de soldadura.

Composição do material base

As lamelas de grafite no ferro fundido cinzento têm tendência a dissolver a austenite, devido à sua grande área. No entanto, o ferro fundido cinzento torna-se frágil quando soldado, e pode não suportar com as tensões originadas pela soldadura por fusão. Como as lamelas causam falta de ductilidade, o ferro fundido lamelar é mais suscetível a fissuras e é menos soldável que o ferro fundido com lamelas pequenas, ou que o ferro fundido nodular. Ou seja, o ferro fundido dúctil possui uma melhor soldabilidade que todos os outros ferros fundidos [27,20].

Os ferros fundidos nodulares com matriz ferrítica, são os mais convenientes no que toca à soldabilidade. Grande quantidade de perlite e elevada nodularidade, favorecem a formação de martensite e cementite, conseqüentemente reduzindo a resistência ao impacto [27,19,20]. A

tabela 20 mostra as diferenças de soldabilidade entre o ferro fundido nodular de matriz ferrítica e perlítica [4].

Tabela 20 – Soldabilidade de ferros fundidos de matriz ferrítica vs. perlítica [4]

Matriz Ferrítica	Matriz Perlítica
Teor de carbono baixo, origina uma lenta transformação em austenite;	Produz grande quantidade de martensite na ZTA, maior propensão para fissuras;
Menor extensão da ZTA;	Maior extensão da ZTA;
Maior resistência ao impacto.	Menor resistência ao impacto.

Existem elementos no material base que influenciam a soldabilidade do ferro, nomeadamente o teor em silício, sendo um constituinte conhecido pela sua elevada grafitação. Este tem tendência a aumentar a temperatura eutética austenite/grafite, e a baixar a temperatura eutética austenite/cementite. De modo a evitar a formação de cementite, o teor de silício do ferro fundido nodular deve ser tão elevado quanto a especificação o permite [4, 21,30].

Outros elementos para se ter em consideração, são o manganês (Mn) e o níquel (Ni). Quanto maior for a percentagem destes, maiores serão as dificuldades na soldadura e maior a necessidade de pré-aquecimento [4].

É também importante o controlo do teor de fósforo (P), visto que contribui para a formação do eutético Fe-Fe₃P, *steadite*, nos contornos de grão, o que contribui para fissurações provocadas pela contração e arrefecimento. Como este composto tem um baixo ponto de fusão, este eutético pode provocar fissuração a quente no cordão de soldadura ou na ZTA [23, 24].

O enxofre provoca fraturas frágeis, quando existem altos teores de Ni. Alto conteúdo de oxigénio (O) e enxofre fazem acelerar a precipitação de carbonetos que, conseqüentemente, também causam fissuração da junta [4].

Seleção do material de adição

Encontram-se disponíveis vários tipos de elétrodos para a soldadura do ferro fundido. Os trabalhos de investigação com estes materiais de adição têm demonstrado que os elétrodos

de níquel (E Ni-CI), níquel-ferro (E NiFe-CI) e aço macio (E St), são aqueles que proporcionam os melhores resultados relativamente à resistência à fissuração, visto que são dos mais capazes de absorver o carbono, e reterem-no, sob formas não prejudiciais do ponto de vista das propriedades da junta [4,46].

Elérodos ENi-CI

Os eléctrodos considerados níquel puro, podem fazer com que o carbono do material base se dissolva em grafite fina na junta soldada, fazendo com que esta se torne dúctil e, conseqüentemente, maquinável. Além disso, o níquel suprime a difusão de carbono na interface entre o metal base e o de adição, diminuindo assim a formação de ferro fundido branco, e de outras estruturas com elevada dureza na ZTA. Isto ocorre devido ao facto de o níquel (Ni) possuir um baixo coeficiente de libertação de calor, o que ajuda a junta soldada a ter um arrefecimento lento [4,46].

A maquinabilidade da junta torna-se superior, e estes eléctrodos conseguem tolerar superfícies sujas e contaminadas [13]. A figura 31 mostra a relação existente entre os principais materiais de adição, com as durezas originadas na junta (material base, ZTA, material de adição) [26,27].

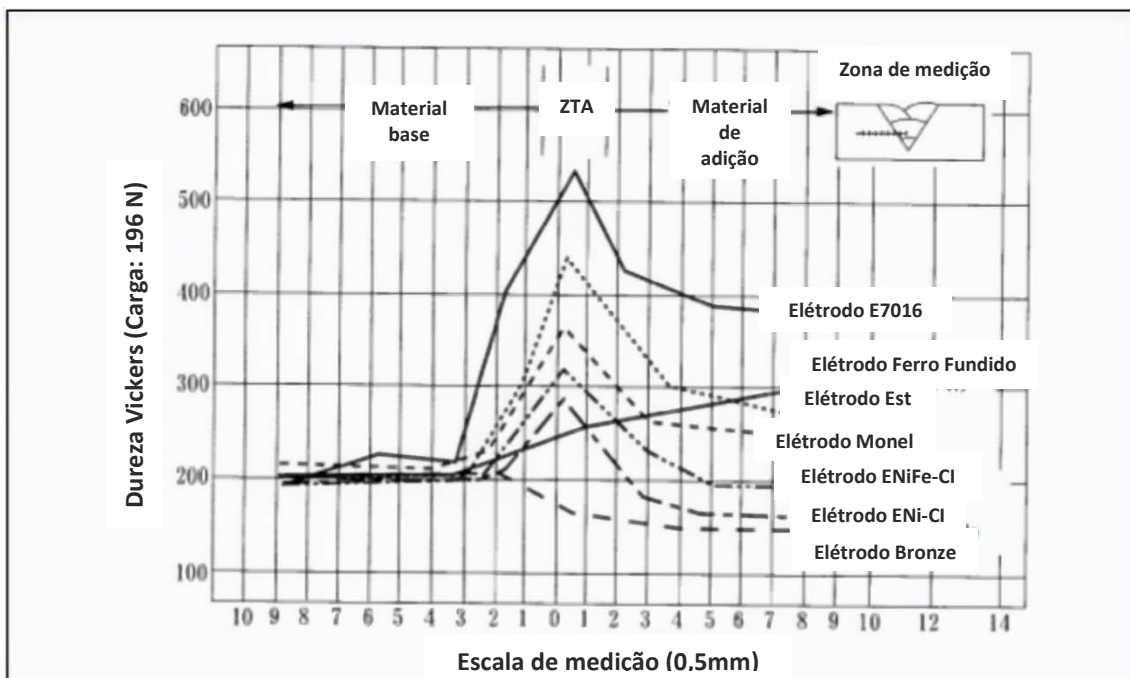


Figura 31 - Relação entre os materiais de adição e respetivas durezas, originadas nas diferentes zonas da junta [26]

A tabela 21 mostra outros tipos de materiais de adição que podem ser usados com ferro fundido nodular [4].

Tabela 21 - Eléttodos para soldadura de ferros fundidos [4]

Eléttodos de Ferro Fundido	<ul style="list-style-type: none"> • Forma uma pequena camada de escória facilmente removível; • Depósito maquinável com dureza de 170 HV a 220 HV.
Eléttodos de Aço de baixo carbono (E St)	<ul style="list-style-type: none"> • O metal depositado tem tendência a solidificar na forma de ferro fundido cinzento; • Estes eléctttodos permitem uma melhor ligação do ferro fundido ao aço, do que o ferro fundido entre si.
Eléttodos de Níquel – Ferro (ENiFe-CI)	<ul style="list-style-type: none"> • Proporcionam maior dureza e resistência ao metal depositado do que os de níquel puro; • As propriedades mecânicas e a ductilidade obtidas são boas, mesmo sem tratamentos térmicos após soldadura.
Eléttodos de Níquel-Cobre	<ul style="list-style-type: none"> • Têm o mesmo uso que os eléctttodos de níquel e níquel ferro; • Tem desempenho inferior aos outros eléctttodos de níquel, no que toca à ductilidade e resistência à fissuração do depósito; São designados por Monel.
Eléttodos de Ni-Fe-Mn	<ul style="list-style-type: none"> • Possuem parte do níquel substituído por Mn, com teor de 11%; • O metal depositado é mais resistente do que o obtido com os eléctttodos de níquel-ferro e obtém-se boas propriedades na soldadura de ferros fundidos nodulares perlíticos.
Eléttodos à base de cobre	<ul style="list-style-type: none"> • Os eléctttodos de cobre-estanho e cobre-alumínio produzem um depósito com boa resistência à fissuração e maquinável, mas com cor diferente do ferro fundido.

Estruturas da junta soldada

A figura 32 representa as microestruturas presentes num ferro fundido nodular após soldadura. O material base possui diferentes efeitos de aquecimento, dependendo da localização da ZTA. A área adjacente ao metal de adição é aquecida localmente a uma temperatura elevada, e arrefecida rapidamente, originando ledeburite. O restante também é aquecido e arrefecido rapidamente, formando martensite [26,33].

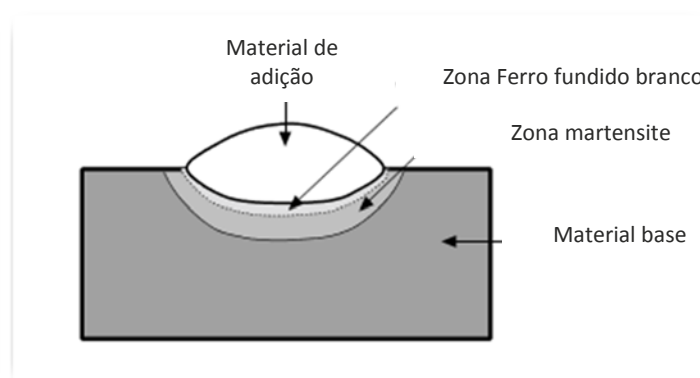


Figura 32 - Estruturas que ocorrem na junta soldada de um ferro fundido cinzento e nodular [34]

Ambas estas zonas são caracterizadas pela elevada dureza e natureza frágil. Com isto, a ZTA pode fissurar espontaneamente, ou sob um ciclo de serviço. Estes aquecimentos e arrefecimentos locais, vão também originar tensões térmicas na junta soldada: expansão térmica devido ao calor, e contração devido ao arrefecimento [26].

Quando se atingem temperaturas elevadas no metal base, durante a soldadura, os nódulos de grafite começam a dissolver-se na austenite, produzindo um gradiente de carbono desde os nódulos até à austenite. O teor de cementite e de martensite, depende da temperatura máxima atingida no ciclo térmico (figura 33) [20, 27,38].

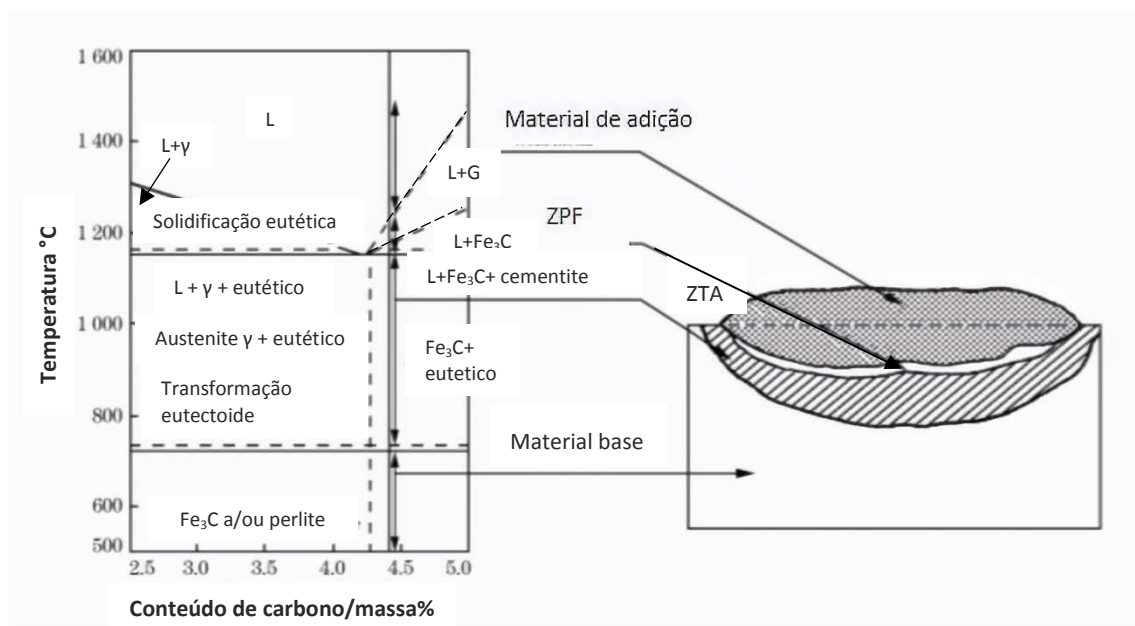


Figura 33 – Ciclo térmico na soldadura de ferro fundido nodular [28]

As zonas características de uma junta soldada no ferro fundido nodular, podem ser descritas da seguinte forma [39,40]:

- **Zona Parcialmente Fundida (ZPF):** Zona em que existiu fusão por aquecimento acima do ponto eutético. A taxa de arrefecimento neste material é elevada, o que origina ledeburite. A soldadura com a utilização de elétrodos à base de níquel, dá origem a uma matriz austenítica com nódulos de grafite.
- **Zona Termicamente Afetada (ZTA):** nesta zona a temperatura sobe acima da temperatura de austenitização. Não existe fusão, mas sim transformação da matriz em austenite. Durante o arrefecimento, uma variedade de produtos de transformação é obtida, como martensite, cementite e bainite, responsáveis por fissuras na parte da raiz do cordão de soldadura durante o arrefecimento.

A formação de martensite na junta soldada é muito comum, mas pode ser parcialmente eliminada por [4]:

- Pré-aquecimento, de modo a diminuir a velocidade de arrefecimento;
- Tratamento de revenido após soldadura.

Na ZTA podem aparecer agulhas isoladas de martensite, rodeadas por cementite, devido à diluição parcial do metal base que fundiu durante a soldadura, e solidificou sob a forma de ferro fundido branco, como consequência do seu alto teor de carbono e velocidade de arrefecimento. Apesar da zona de carbonetos ser dominada pela cementite, nela podem ser encontrados pequenos nódulos de grafite [4]. Estes pequenos nódulos de grafite denominam-se por grafite secundária. Esta fase ocorre devido à decomposição da martensite, geralmente quando o ferro é pós-aquecido a partir da gama de temperaturas de 690°C, ou quando sofre um pré-aquecimento insuficiente.

A formação de cementite/ledeburite, contudo, é um problema de difícil solução. Esta estrutura resulta da rápida difusão do carbono dos nódulos de grafite para a matriz, originando uma diminuição do ponto de fusão desta, e provocando o começo da liquefação à volta de cada nódulo. Esse líquido vai solidificar sob a forma de cementite ou ledeburite, devido às elevadas velocidades de arrefecimento da soldadura. A austenite à volta do líquido origina martensite [4,25].

Concluindo, a resistência ao impacto das juntas soldadas em ferro fundido nodular depende da quantidade e distribuição de martensite, e da quantidade de cementite na ZTA e na linha de fusão [27]. O grau de fissuração depende da quantidade de carbonetos de ferro e de martensite formada, que, em troca, depende da composição química do ferro fundido e tratamento térmico [4,25].

Pré-Aquecimento

A dureza da ZTA pode ser limitada pelo uso do pré-aquecimento, seguido por um arrefecimento lento após a soldadura. O pré-aquecimento reduz a velocidade de arrefecimento do metal depositado e da ZTA, o que, conseqüentemente, diminui a quantidade de martensite e cementite, criadoras da dureza nessas zonas [25].

O pré-aquecimento é normalmente aconselhável pelas seguintes razões [4]:

- Evita a fissuração a frio;
- Reduz a dureza na ZTA;
- Reduz as tensões residuais;
- Reduz a distorção;
- Melhora a fluidez do material.

A temperatura mínima de pré-aquecimento necessário para evitar a formação de martensite deve ser acima da temperatura da formação desta (M_s), ou seja, 230°C , e também depende da espessura das peças, bem como da energia térmica do processo [4]. Abaixo poderão ser observadas algumas das temperaturas a que o pré-aquecimento pode ser efetuado, e as suas principais modificações na microestrutura [4,29,30].

- 250°C e 400°C - temperaturas de pré-aquecimento adequadas para ferros fundidos cuja percentagem de carbono é igual ou superior a 3%;
- 300°C – pode ocorrer a transformação de austenite para perlite fina, e não para martensite. Em soldadura com dois passes, aumenta a quantidade de perlite no passe de raiz e após o segundo passe. A estrutura será quase exclusivamente perlítica;
- 425°C - pode ser usada para prevenir a formação de martensite, mas não é aconselhável, visto que pode vir a originar cementite na ZTA;
- 500°C – provoca formação de uma rede contínua de cementite nas linhas de fusão;
- 600°C e 650°C - temperatura adequada para quando ocorre muita dissipação de calor na peça;
- 760°C – é a temperatura máxima aconselhável para pré-aquecimento, visto que temperaturas superiores estão próximas da temperatura crítica do ferro fundido (790°C).

As temperaturas de pré-aquecimento também variam de acordo com o material de adição usado. A tabela 22 mostra as temperaturas de pré-aquecimento adequadas para cada um deles.

Tabela 22 – Temperaturas de pré-aquecimento para diferentes materiais de adição [26]

Material de adição	Temperatura de Pré-Aquecimento ($^{\circ}\text{C}$)
ENi-CI	100-300
ENiFe-CI	150-350
Est	350-400

Pós-Aquecimento

Os tratamentos térmicos após soldadura baixam a dureza da ZTA, mas não conseguem restaurar totalmente a ductilidade e tenacidade originais, devido à formação de uma fina dispersão de grafite secundária que acompanha a decomposição da martensite. A martensite na ZTA pode ser temperada para uma estrutura com menor dureza, ou pode ser totalmente eliminada, ao assegurar taxas de arrefecimento muito baixas após soldadura [4].

O pós-aquecimento é normalmente aconselhável pelas seguintes razões [26,34]:

- Melhora a ductilidade da ZTA;
- Melhora a maquinabilidade da ZTA e da junta;
- Decompõe a cementite formada durante a soldadura;
- Transforma a martensite numa estrutura menos frágil;
- Alivia as tensões residuais.

A tabela 23 possui os diferentes tratamentos térmicos de pós-aquecimento que se devem aplicar para diferentes tipos de ferro fundido nodular.

Tabela 23 – Temperaturas de pós-aquecimento para ferros fundidos nodulares [29]

Arrefecimento no forno a)					
		Temperatura °C	Tempo h/25 mm de espessura	Temperatura °C	Taxa de arrefecimento °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 total		870-900	1	343	56
Normalização		900-950	2 (mínimo)	c)	

(a) após arrefecimento no forno, arrefecer ao ar livre até à temperatura ambiente.

(b) arrefecer no forno até 690°C; manter nesta temperatura até 5 h mais 1 h para cada 25 mm de espessura; arrefecer no forno até 316°C a uma taxa de 56°C/h; arrefecer ao ar livre até à temperatura ambiente.

(c) arrefecer ao ar livre até 540 a 650°C; arrefecer no forno até 340°C a taxa de 56°C/h; arrefecer até à temperatura ambiente.

O recozido subcrítico ou de alívio de tensões (figura 34), pode ser usado com sucesso para reduzir a dureza máxima da ZTA de uma soldadura em ferro fundido [4]:

- Diminuição da dureza de 650/700 HV para os 400/500 HV;
- Ferritização da martensite, perlite e bainite na ZTA, e grafitização parcial dos carbonetos na linha de fusão;
- Se existir uma rede contínua de carbonetos na linha de fusão, o tratamento provocará a formação de cadeias de grafite de recozido. Este fenómeno é bastante prejudicial para as propriedades mecânicas da ZTA.

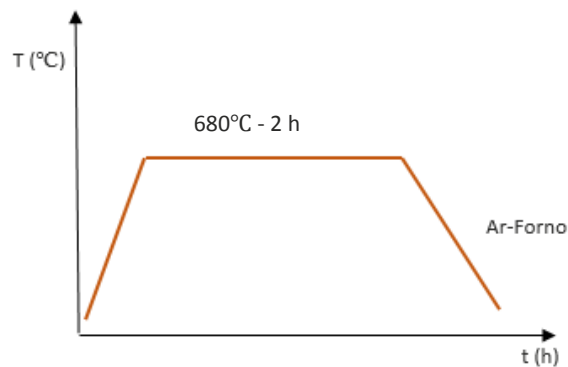
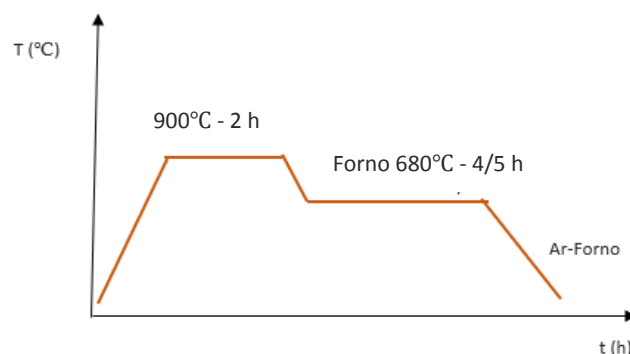


Figura 34 – Ciclo de recozido subcrítico [4]

O tratamento térmico de recozido total (figura 35), é normalmente usado para amaciar a ZTA. Isto é feito para assegurar a maquinabilidade e restaurar a tenacidade e ductilidade da junta [4]:

- A dureza e a resistência do metal base são totalmente recuperadas;
- A tenacidade e a ductilidade não o são;
- O recozido total provoca grafitização completa na linha de fusão, ao contrário do recozido subcrítico, onde continua a existir uma percentagem elevada de carbonetos



após o tratamento.

Figura 35 – Ciclo de recozido total [4]

DESENVOLVIMENTO

3.1 Materiais e métodos

3.1.1 Materiais e equipamentos

3.1.2 Métodos

3.2 Análise e discussão dos resultados

3.2.1 Influência do número de passes no cordão de soldadura

3.2.2 Influência de diferentes temperaturas de pós-aquecimento

3.2.3 Influência da junção do pré e pós-aquecimento

3.2.4 Influência da temperatura de 300°C

3.2.5 Sibodur® 450 (2P0W2) vs melhores resultados

3. DESENVOLVIMENTO

3.1 Materiais e métodos

3.1.1 Materiais e equipamentos

Material de base

A empresa Georg Fischer cedeu tarugos de ferro fundido nodular da marca Sibodur® 450, cujas características estão presentes nas tabelas 14 e 15, no formato observado na figura 36, o qual é apresentado preso aos mordentes do torno.

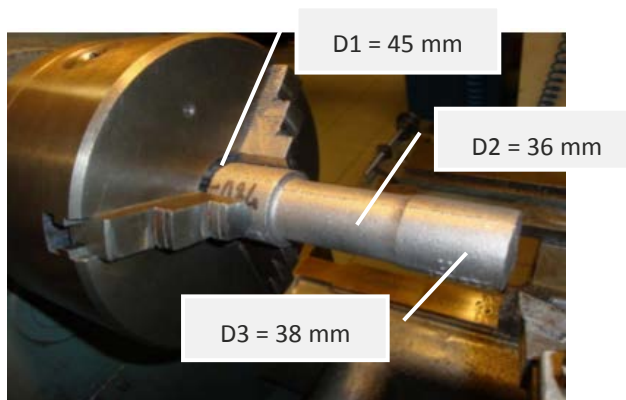


Figura 36 – Tarugo preso nos mordentes

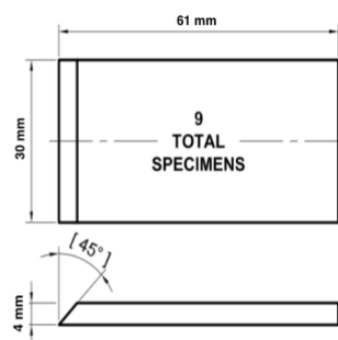


Figura 37 – Dimensões dos provetes

Com 190 mm de comprimento, este tarugo apresentava três diâmetros distintos. O primeiro diâmetro (D1), correspondente à parte do material preso aos mordentes, o qual media 45 mm. A zona intermédia possuía um diâmetro (D2) de 36 mm. A outra extremidade tinha um diâmetro de 38 mm (D3). Com a maquinagem e corte destes tarugos foi possível obter 9 provetes de cada um, com as dimensões ilustradas na figura 37.

Material de adição

O material de adição usado foi o eletrodo FN10 (designação do fornecedor Electro Portugal), pertencente à família dos eletrodos de níquel. A sua composição química está presente na tabela 24 [43].

Tabela 24 - Composição química do eletrodo revestido com a referência FN10 [43]

Composição química (%)	Ni	C	Fe	Outros elementos
	98%	0,2%	1,3%	0,5%

Este eletrodo, com base em trabalhos de investigação anteriores, é dos que possui melhores características para soldar ferro fundido nodular, visto que consegue captar o carbono do material base e precipitá-lo sob formas não prejudiciais à junta, como a grafite vermicular. Além disso, origina um depósito maquinável e possui uma taxa de libertação de calor baixa o que auxilia num processo de arrefecimento lento, diminuindo a tendência para o aparecimento de estruturas prejudiciais na junta.

Equipamentos

A soldadura por eletrodo revestido é o processo de soldadura usado em cerca de 80% dos casos em ferro fundido, 50% dos casos para reparar novas fundições, 40% para reparar peças já em ciclo de vida que apresentem desgaste ou que requerem algum tipo de modificação e 10% para a ligação de componentes de ferro fundido com ferro fundido, ou ferro fundido com aço. Deste modo, nesta dissertação usou-se o equipamento OERLIKON SAXOTIG 1600 para soldar a eletrodo revestido (figura 38).



Figura 38 - Equipamento utilizado - OERLIKON SAXOTIG 1600

De modo a que os provetes não sofressem flexão durante o processo de soldadura, estes foram colocados num gabari, apoiados por barras de aço ao carbono nas laterais, como observado na figura 39.

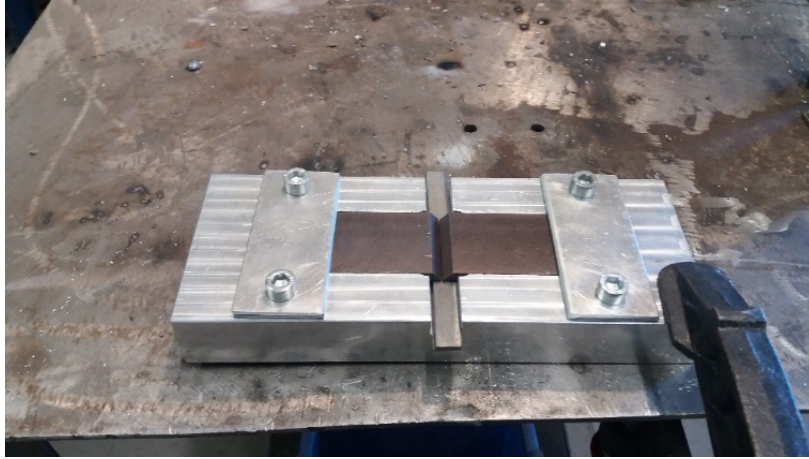


Figura 39 - Provetes fixos no gabari

Para se realizar os diferentes tratamentos térmicos no material de base e na junta soldada, foi utilizada a mufla, *Nabertherm N 11/H* (figura 40).



Figura 40 - Mufla NABERTHERM N 11/H

Para se minimizar o arrefecimento dos provetes pré-aquecidos, foi utilizada durante o transporte destes até serem colocados no gabari e serem soldados, uma caixa de aço refratário com tampa, forrada a carvão (figura 41), imediatamente após o pré-aquecimento.



Figura 41 - Caixa de aço refratário forrada a carvão

3.1.2 Métodos

Os métodos utilizados neste estudo estão representados na figura 42. Estes métodos foram divididos em três grupos: execução dos provetes, soldadura dos provetes e caracterização das amostras.

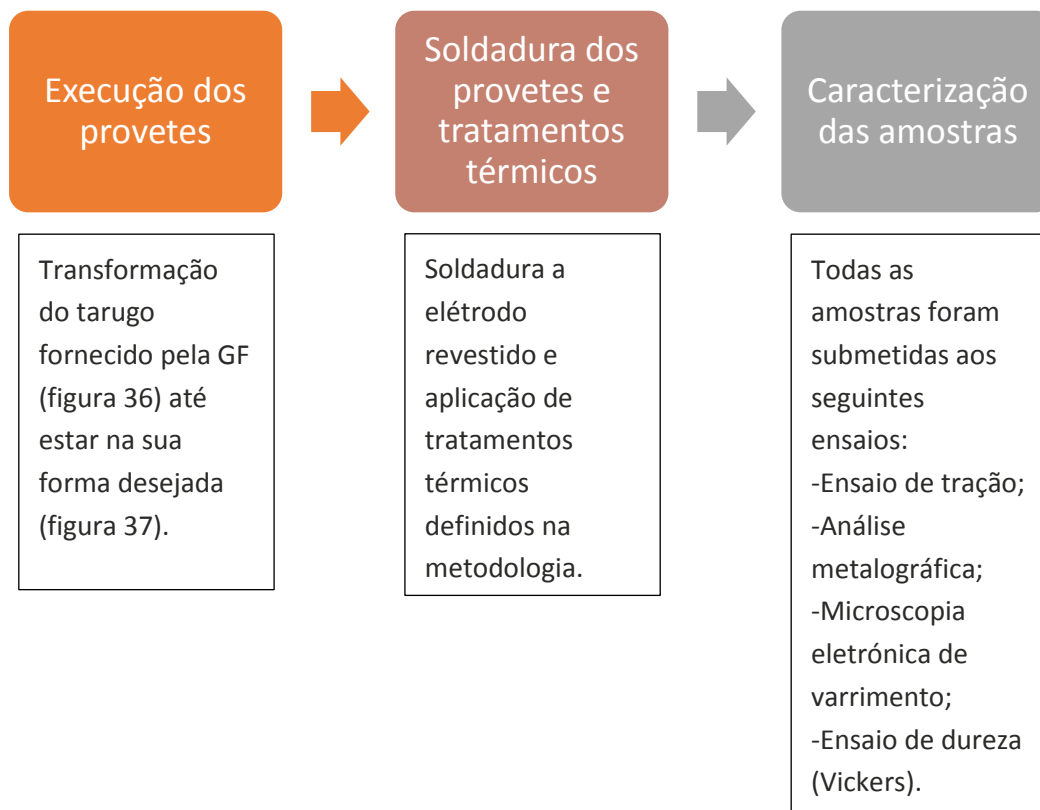


Figura 42 – Métodos usados na dissertação

Execução dos provetes

Para a obtenção dos provetes, foram utilizados três processos de maquinagem: torneamento, corte com a utilização da serra e fresamento. Estas operações estão descritas detalhadamente na tabela 25.

Tabela 25 - Procedimento experimental de maquinagem

1. Procedeu-se ao torneamento dos diâmetros D2 e D3, prendendo-se D1 aos mordentes, de modo a se obter um único diâmetro de 35 mm (D4) (figura 43).
2. Facejou-se D4.



Figura 43 - Torneamento D2 e D3

3. Prendeu-se D4 nos mordentes e torneou-se D1 (figura 44).

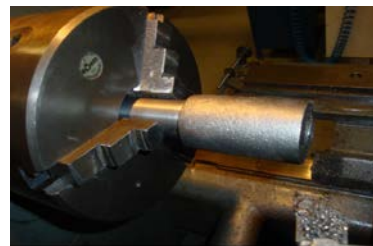


Figura 44 - Torneamento D1

4. Cortou-se os tarugos com uma serra de fita horizontal, para se obter um comprimento de 61 mm (figura 45).



Figura 45 - Corte dos tarugos

5. Após o corte, o tarugo foi submetido a um outro torneamento, de modo a ficar com um único diâmetro (D4) (figura 35).
6. Após o torneamento, o tarugo foi cortado de modo a se obter dois cilindros com 61 mm de comprimento (figura 46).



Figura 46 – Tarugo com diâmetro final (D4=30mm)

7. O facejamento foi efetuado no centro de maquinagem CNC com eixo vertical HAAS VF-2, para garantir que os provetes estivessem perfeitamente planos (figura 47).



Figura 47 - Centro de maquinagem com eixo vertical CNC HAAS VF-2

8. Facejou-se o tarugo de modo a obter a largura necessária para o provete, 30 mm (figura 48).



Figura 48 - Facejamento

9. Foi efetuado o corte com a serra de fita para se retirar as zonas côncavas laterais (figura 49).



Figura 49 - Corte das zonas côncavas na serra de disco

10. Facejou-se o tarugo (figura 50).



Figura 50 – Facejamento no centro de maquinagem

11. Efetuou-se novamente o passo 9 para separar os diferentes provetes. Depois os provetes foram novamente facejados. Seguidamente realizou-se o chanfro numa das extremidades no centro de maquinagem (figura 51).



Figura 51 - Realização do chanfro.

Soldadura dos provetes e tratamentos térmicos

Soldadura a frio

Estes provetes foram soldados apenas com o intuito de se obter valores de referência.

- 1- Colocou-se os provetes no gabari, colocou-se as barras de aço ao carbono, e apertou-se os parafusos para que estes permanecessem fixos (figura 39);
- 2- Soldou-se os provetes com elétrodos revestidos FN 10, com 2 passes a uma intensidade de corrente de 80 A e 25 V de tensão em vazio, com elétrodo ligado ao polo positivo.
- 3- No fim de cada passe, o cordão foi martelado e escovado de modo a se retirar a escória e diminuir as tensões residuais na zona de fusão;
- 4- Retirou-se os provetes do gabari com o auxílio de uma pinça e chave;
Retirou-se as barras de aço ao carbono fixos aos provetes com uma rebarbadora;
Identificou-se as amostras conforme apresentado na tabela 26.

Tabela 26 - Identificação das amostras

<u>Tipo de Soldadura</u>	<u>Exemplo</u>	N-Nº da amostra
A frio	<u>NP0W2P0</u>	1º P – Temperatura de pré-aquecimento
Com Pré-aquecimento	<u>NP300W2P0</u>	W – Nº de passes
Com Pós-aquecimento	<u>NP0W2P400</u>	2ºP – Temperatura de pós-aquecimento
Com Pré e Pós-aquecimento	<u>NP300W2P400</u>	

Soldadura com dois passes e pré-aquecimento

Estes provetes foram soldados após pré-aquecimento.

- 5- Pré aqueceu-se as amostras a 300°C por 2 horas na mufla;
Retirou-se um par de amostras para uma caixa de aço refratário forrada a carvão;
repetiu-se o passo 1;
- 6- Durante a soldadura de um dos provetes, os restantes ficaram na mufla, até serem colocados na caixa de aço e serem transportados até ao posto de soldadura (figura 41);
- 7- Soldou-se os provetes com elétrodo revestido FN10 com intensidade de corrente de 70 A, com dois passes.

Repetiu-se os passos 3 e 4;

Soldadura a frio com dois passes, seguida de pós-aquecimento

Estes provetes foram soldados a frio, arrefecidos à temperatura ambiente, e submetidos a pós-aquecimento.

- 8- Repetiu-se os passos 1-4;
- 9- Procedeu-se ao pós-aquecimento a 400°C, 500°C, 700°C, respetivamente, para cada conjunto de provetes durante 2 horas na mufla;

Soldadura a frio com quatro passes, seguida de pós-aquecimento

Estes provetes foram soldados a frio, arrefecidos à temperatura ambiente, e submetidos a pós-aquecimento.

- 10- Repetiu-se o passo 1;
Soldou-se com 4 passes cada provete. O primeiro passe foi feito na raiz com intensidade de 80 A; os três passes posteriores foram realizados no chanfro (um no centro, um no lado esquerdo e outro no lado direito) com uma intensidade de 50 A.
- 11- Repetiu-se o passo 9 e pós aqueceu-se cada conjunto a 400°C e 500°C, respetivamente, durante 2 horas na mufla;

Soldadura com pré-aquecimento e pós-aquecimento

Estes provetes foram pré-aquecidos, mantidos na caixa de aço refratário até serem soldados, e submetidos a pós-aquecimento.

- 12- Efetuou-se pré-aquecimento a 300°C com duração de 1 hora. Repetiu-se o procedimento de 5 a 7 e de 3 a 4.
Deixou-se arrefecer ao ar livre.
- 13- Procedeu-se ao pós-aquecimento dos provetes na mufla por 2 horas, às temperaturas de 300°C, 400°C e 500°C, respetivamente.

Caracterização das amostras

Ensaio de Tração

Através dos ensaios de tração pretende-se, essencialmente, garantir que as propriedades de resistência à tração oferecidas pela junta sejam iguais, ou excedem mesmo os valores patenteados pelo material base [44].

Dependendo da forma como os provetes são preparados e o ensaio que é executado, os mesmos deverão cumprir com as normas internacionais em vigor, nomeadamente EN ISO 5178 (longitudinal) e EN ISO 4136 (perpendicular) e EN ISO 9018 (juntas sobrepostas ou cruzadas) [45]. Neste trabalho, as amostras foram testadas apenas no sentido perpendicular.

A tabela 27 mostra os parâmetros utilizados para os ensaios de tração.

Tabela 27 - Parâmetros dos ensaios de tração

Equipamento	Norma	Dados ensaio	Propriedades
Shimadzu Autograph AGS-X-100 kN com a célula de carga de 100 kN e aquisição de dados pelo software Trapezium	ISO 4136 (2012)	L = 120 mm L0: 75 mm Velocidade: 2 mm/min	Resistência mecânica máxima e extensão após rutura.

Análise Metalográfica

A observação metalográfica permite uma análise bastante pormenorizada da estrutura, do material de base, material de adição e possíveis transformações dos materiais de base provocadas pelo ciclo térmico imposto na soldadura.

Os ensaios da análise macroscópica e microscópica são regulados pela norma EN ISO 17639. O procedimento experimental utilizado está apresentado na tabela 29 [46].

Tabela 28 – Procedimento experimental para análise metalográfica

Operação

1. O corte das amostras foi realizado na máquina DISCOTOM 2, a qual utiliza um disco de carbonetos de silício para o corte a uma velocidade de 45 m/s (figura 52).
2. As amostras foram cortadas com uma secção transversal de 15 mm e com uma altura de 15 mm.



Figura 52 - DISCOTOM 2

3. As amostras seguiram para a prensa STRUERS PREDOPRESS (figura 53) de montagem a quente, onde foram embutidas em resina fenólica (baquelite) com diâmetro de aproximadamente 30 mm.



Figura 53 - STRUERS PREDOPRESS

4. A força colocada na montagem foi de 20 kN.
5. As amostras foram aquecidas a 180°C por um período de 8 minutos;
6. Após a fusão e a compactação, aguardou-se 4 minutos para que a amostra arrefecesse (figura 54).



Figura 54 – Amostra final

7. O desbaste foi efetuado na lixadeira STRUERS ROTOPOL 1 (figura 60) com lixas de diferentes granulometrias: 220, 500 e 1000 MESH (grãos/polegada²) (figura 55);
8. A lubrificação foi feita com água;
9. Velocidade de rotação: 150 rpm; Pressão exercida: moderada;
10. A amostra foi rodada 90° entre granulometrias de lixa.



Figura 55- STRUERS ROTOPOL 1

11. O polimento ocorreu igualmente na polideira STRUERS ROTOPOL. (figura 56);
12. Durante o polimento, a direção da amostra foi permanentemente alterada e polida à volta do pano de veludo, impregnado com lubrificante e abrasivo de diamante, com granulometria de 3 μm ;
13. Posteriormente, lavou-se a amostra com água corrente, álcool etílico e secou-se com ar comprimido;
14. Iniciou-se um novo processo de polimento, utilizando lubrificante e um abrasivo com granulometria de 1 μm .



Figura 56 - STRUERS ROTOPOL para polimento

15. O ataque químico foi efetuado com o reagente líquido denominado Nital, que possui uma concentração de 4% (mistura 4% de ácido nítrico concentrado e 96% de álcool etílico em volume);
16. A amostra foi imersa no reagente durante 15 segundos;
17. Após o ataque químico, as amostras foram observadas ao microscópio OLYMPUS BX51M, onde se analisou e fotografou os seus microconstituintes.

Microscopia de Varrimento eletrónico (SEM)

A microscopia eletrónica de varrimento permite obter imagens semelhantes às que se podem obter por microscopia ótica de reflexão, mas numa gama de ampliação extraordinariamente superior (desde 10x até mais de 250000x), com uma profundidade de campo elevada. A esta técnica está geralmente associada à Microanálise por Raios-X (EDS), que permite uma análise semi-quantitativa dos elementos químicos na superfície dos materiais. Neste estudo, foi utilizado o microscópio modelo FEI QUANTA 400, e a microanálise por raio-x foi efetuada com recurso a uma sonda EDAX (figura 57) [47].

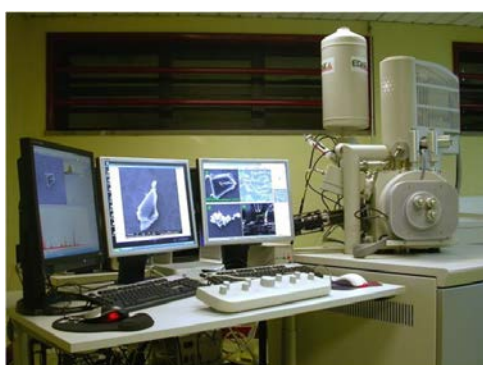


Figura 57 - Microscópio de análise a raio-x FEI QUANTA 400 provido de sonda EDAX [48]

Ensaio de dureza

A realização de ensaios de dureza sobre juntas soldadas tem por objetivo permitir avaliar quais as modificações, em termos de estrutura, que se verificaram ao longo da secção transversal do cordão. Para a determinação da dureza, foi escolhido o método de dureza *Vickers*.

O ensaio foi realizado pela norma EN ISO 9015-1 e 9015-2. Este processo ocorre através da aplicação de uma carga com um penetrador com ponta de diamante (no formato de pirâmide de base quadrada, com ângulos entre faces de 136°) na superfície da peça (figura 58) [49].



Figura 58 - Ensaio de dureza - Durómetro EMCO – TEST M4U 025G3

A dureza é medida relacionando a força aplicada pelo penetrador e a área projetada da indentação (de acordo com a medida das duas diagonais), deixada no material. O ensaio foi realizado no durómetro EMCO – TEST M4U 025G3 (figura 58). A carga aplicada pelo indentador foi de 5 kgf e o tempo de aplicação desta carga foi de 15 segundos.

Foi analisada a dureza desde a fratura resultante do ensaio de tração passando pelo metal de base, ZTA e metal de adição. As indentações foram feitas horizontalmente (no centro do provete) e distando 0,7 mm umas das outras.

3.2 Análise e discussão dos resultados

Neste subcapítulo, serão abordados e discutidos os resultados obtidos nesta dissertação. Como já abordado no subcapítulo da metodologia, vários tratamentos térmicos foram implementados de modo a se conseguir obter uma resistência mecânica de no mínimo 360 MPa.

A figura 59 mostra um gráfico com os parâmetros utilizados de temperatura e nº de passes (ver designação das amostras) com os respectivos valores médios, de modo a se obter uma percepção de quais os grupos de amostras que alcançaram o objetivo, ou não.



Figura 59 – Resultados por grupo de amostras vs objetivo

Na tabela 29 é possível verificar todos os resultados obtidos nos ensaios de tração, inclusive a percentagem de melhoria que os tratamentos térmicos obtiveram, sob o valor da resistência mecânica da junta soldada a frio, e sem tratamentos pós soldadura.

No anexo A, estão presentes os resultados de todas as amostras com os respectivos parâmetros resumidos.

Tabela 29 – Resultados dos ensaios de tração

Amostra	Rm (MPa)	Rm (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Rm/RSibodur® ¹ (%)
1P0W2	261,6			
2P0W2	255,0	259,9	4,4	57,8
3P0W2	263,2			
1P300W2	356,8			
2P300W2	349,7	354,3	4,0	78,7
3P300W2	356,4			
1P0W2P400	390,0			
2P0W2P400	369,0	381,0	10,8	84,7
3P0W2P400	384,0			
1P0W2P500	375,1			
2P0W2P500	360,6	370,1	8,3	82,2
3P0W2P500	374,6			
1P0W2P700	335,1			
2P0W2P700	356,4	346,2	10,6	76,9
3P0W2P700	347,0			
1P0W4P400	394,0			
2P0W4P400	354,0	382,7	25,0	85,0
3P0W4P400	400,0			
1P0W4P500	337,5			
2P0W4P500	359,9	360,2	22,9	80,1
3P0W4P500	383,3			
1P0W2P300	357,0			
2P0W2P300	380,0	375,4	16,6	83,4
3P0W2P300	389,3			
1P300W2P300	361,3			
2P300W2P300	394,2	380,6	17,2	84,6
3P300W2P300	386,2			
1P300W2P400	334,9			
2P300W2P400	330,1	319,5	22,7	71,0
3P300W2P400	293,5			
1P300W2P500	343,5			
2P300W2P500	275,0	311,0	34,4	69,1
3P300W2P500	314,6			

Legenda: Valores de referência 1ªFase 2ªFase 3ªFase

Analisando os resultados da tabela 29 é possível retirar algumas conclusões:

- É de facto necessário proceder a algum tipo de tratamento térmico no que toca à soldabilidade deste ferro, visto que o valor médio deste ensaio para os provetes soldados a frio e sem qualquer tratamento após soldadura foi de 259,9 MPa, ou seja, 28% abaixo do valor alvo (360 MPa);
- Não se conseguiu atingir o objetivo para as amostras com pré-aquecimento a 300°C (P300W2);
- As amostras com pós-aquecimento a 400°C (P0W2P400) e 500°C (P0W2P500) foram as que obtiveram melhores resultados na 1ª fase, obtendo valores médios acima do objetivo;
- As amostras com pós-aquecimento a 700°C (P0W2P700) foram as que obtiveram os piores resultados na 1ª fase (346,2 MPa);
- A 2ª fase de amostras, com quatro passes e pós-aquecimento de 400°C (P0W4P400) e 500°C (P0W4P500), respetivamente, obtiveram resultados acima do objetivo. Estes resultados são parecidos com os resultados obtidos para as mesmas temperaturas de pós-aquecimento, nas amostras soldadas com dois passes;
- Na 3ª fase de amostras, pode-se verificar que a temperatura de 300°C apresenta uma influência positiva, tanto como pós-aquecimento (P0W2P300 - 375,4 MPa), como quando conjugada com um pré-aquecimento (P300W2P300 - 380,6 MPa), possuindo um melhor resultado do que quando realizado um único pré-aquecimento (P300W2 - 354,3 MPa);
- O grupo de amostras com pré-aquecimento a 300°C, com conjugação de pós-aquecimento de 400°C (P300W2P400) e 500°C (P300W2P500), foram os que obtiveram os piores resultados de todo o conjunto de experiências;
- Pode-se também verificar que a média dos resultados das amostras com pré e pós aquecimento a 300°C (P300W2P300), é próxima à obtida nas amostras de pós-aquecimento a 400°C com dois passes (P0W2P400) e com quatro passes (P0W4P400).

De modo a se proceder a uma análise de resultados mais pormenorizada, nos conjuntos acima citados, foram consideradas as amostras que obtiveram melhores resultados (nos grupos com valores médios acima do objetivo), e as que obtiveram piores resultados (nos grupos com valores médios abaixo do objetivo), nos diferentes parâmetros.

Para se conseguir delinear alguns padrões, foi necessário agrupar as amostras em diferentes parâmetros:

- Influência do número de passes no cordão;
- Influência de diferentes temperaturas de pós-aquecimento;
- Influência da junção de pré e pós aquecimentos;
- Influência da temperatura de 300°C;
- Valores de referência vs melhores resultados.

3.2.1 Influência do número de passes no cordão

A figura 60 mostra a relação existente a nível de resistência mecânica e de dureza, entre as amostras que foram soldadas com dois passes e quatro passes. As amostras com dois passes foram soldadas com intensidade de 80 A, as restantes foram soldadas com intensidade de 50 A no chanfro e 80 A na raiz.

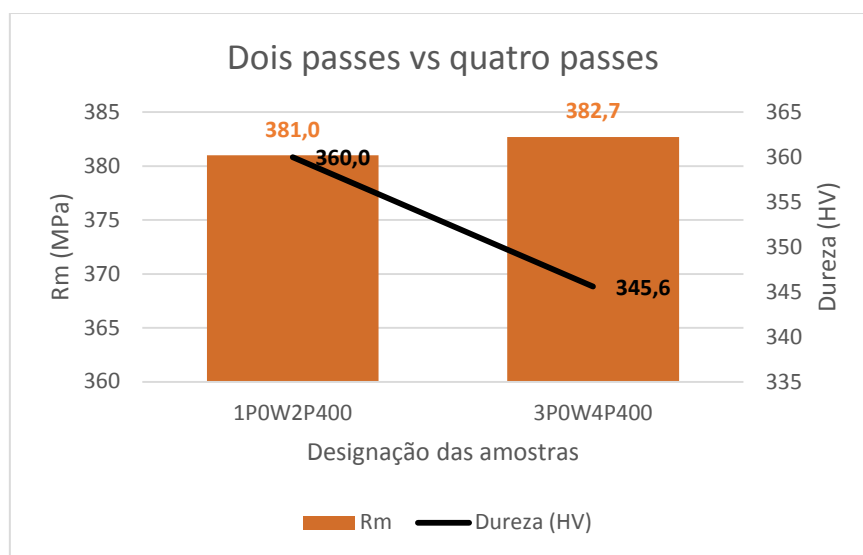


Figura 60 – Relação de Rm com dureza para dois e quatro passes

- É possível verificar que a resistência mecânica possui um valor quase semelhante na amostra 3P0W4P400 (ANEXO B) com quatro passes e na amostra 1P0W2P400 (ANEXO C) com dois passes. O oposto corre com a dureza na ZTA, a amostra 1P0W2P400 possui um valor médio superior (360 HV) do que a amostra 3P0W4P400.

As figuras seguintes, mostram as diferenças na microestrutura que ocorrem nas amostras citadas na figura 60. Para facilitar a interpretação dos resultados, foi realizada a seguinte simbologia: MA (material de adição), ZPF (zona parcial de fusão), ZTA (zona termicamente afetada), MB (material base).

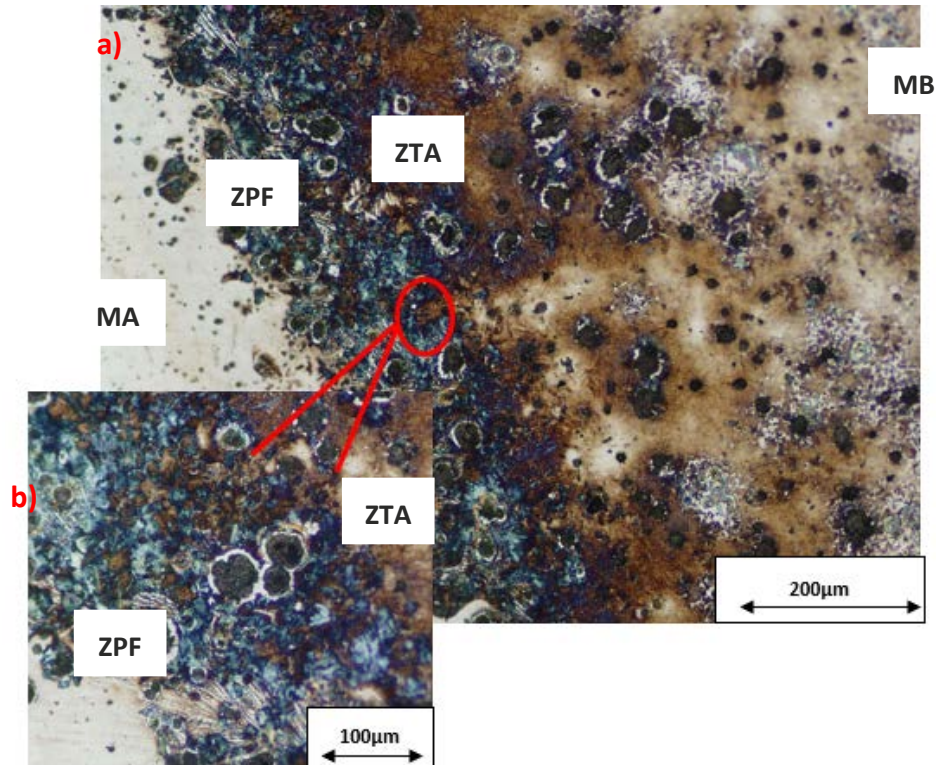


Figura 61 – a) Microestrutura de 1P0W2P400; Ataque com Nital 4%; Ampliação: 100x; b) Microestrutura de 1P0W2P400; Ataque com Nital 4%; Ampliação: 200x;

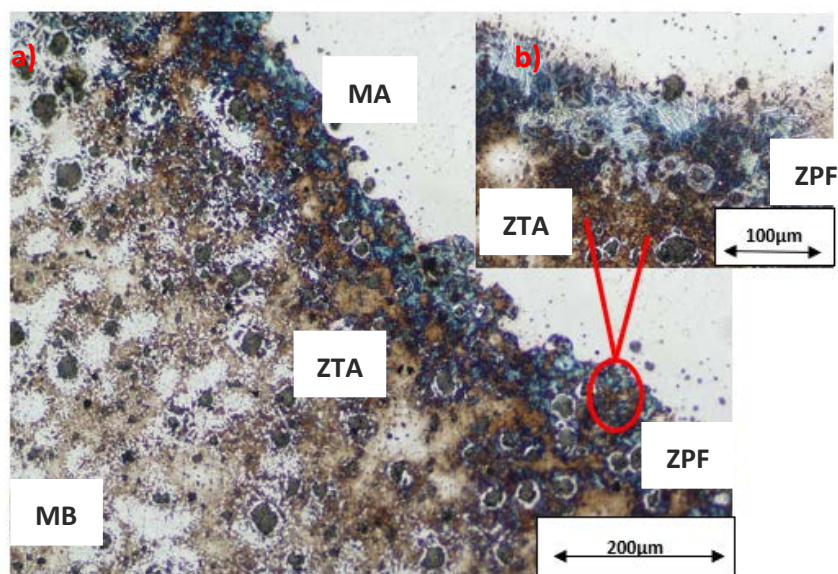


Figura 62 – a) Microestrutura de 3P0W4P400; Ataque com Nital 4%; Ampliação: 100x; b) Microestrutura de 3P0W4P400; Ataque com Nital 4%; Ampliação: 200x

- Nas duas amostras, é possível verificar que a zona composta pelo material de adição, é caracterizada pela presença de grafite vermicular. Isto deve-se ao facto de o eléctrodo de níquel conseguir captar o carbono existente no material base, e precipitar-se sob a forma de grafite;
- Na ZPF, é possível verificar a existência de ledeburite eutética e de martensite, resultante de um arrefecimento rápido que ocorre após o contacto com o arco eléctrico. Os nódulos de grafite encontram-se rodeados de anéis de ferrite, originando a estrutura “olho-de-boi”. A presença do anel de ferrite à volta do nódulo, comprova que ambas as amostras foram submetidas a uma velocidade de arrefecimento elevada;
- No material base ocorre o fenómeno de difusão de carbono nos nódulos de grafite, que diminui as propriedades mecânicas.
- O único parâmetro mais relevante é a extensão da ZTA. Esta é inferior na amostra 3P0W4P400 (figura 62) do que na amostra 1P0W2P400 (figura 61), o que possivelmente contribuiu para um melhor resultado desta. Isto deve-se, provavelmente, ao facto de existir um pós-aquecimento secundário causado pela sobreposição dos cordões. Este pós-aquecimento é superior nas amostras soldadas a quatro passes do que nas de dois passes, devido à quantidade de cordões sobrepostos que possuem um efeito de reaquecimento e arrefecimento mais lento, devido à quantidade de calor acumulado, que previne o aparecimento da martensite e forma perlite. Além disso, a amostra 1P0W2P400 possui um maior teor de martensite e ledeburite que a 3P0W4P400, o que justifica o seu valor de dureza.

3.2.2 Influência de diferentes temperaturas de pós-aquecimento

É possível verificar na figura 63, a relação entre a dureza e a resistência mecânica das amostras que foram soldadas com a mesma intensidade (80 A), e que sofreram pós-aquecimentos nas seguintes temperaturas: 300°C, 400°C, 500°C e 700°C:

- Os melhores resultados foram obtidos para as amostras com pós-aquecimento de 400°C (1P0W2P400);
- À medida que a temperatura de pós-aquecimento aumenta (a partir da amostra 1P0W2P400), a resistência mecânica e a dureza diminuem;

- A amostra 3P0W2P300 (ANEXO H) possui um valor de resistência mecânica e de dureza inferior à 3P0W2P400.

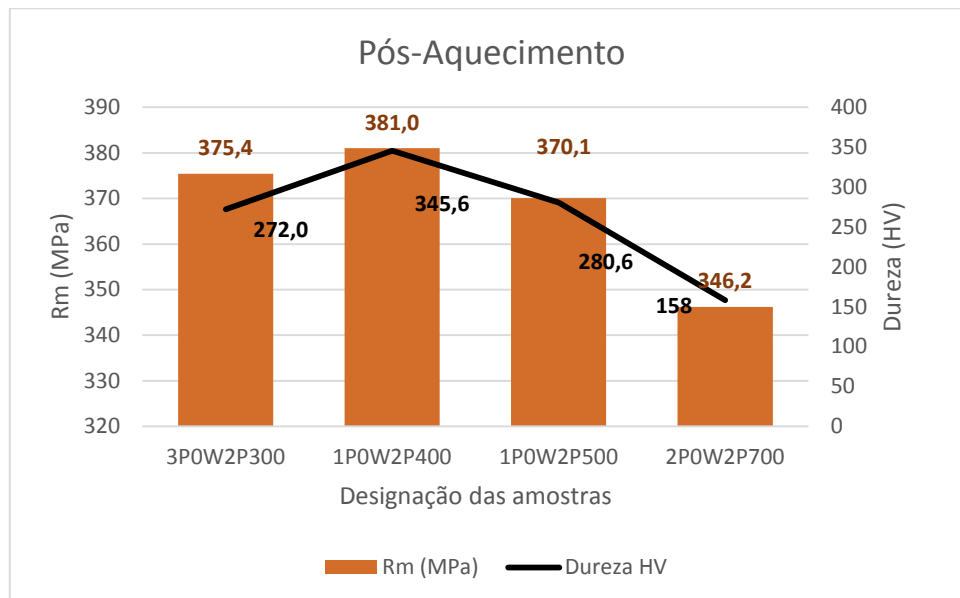


Figura 63 – Relação entre Rm e dureza para pós-aquecimentos de 300°C, 400°C, 500°C e 700 °C

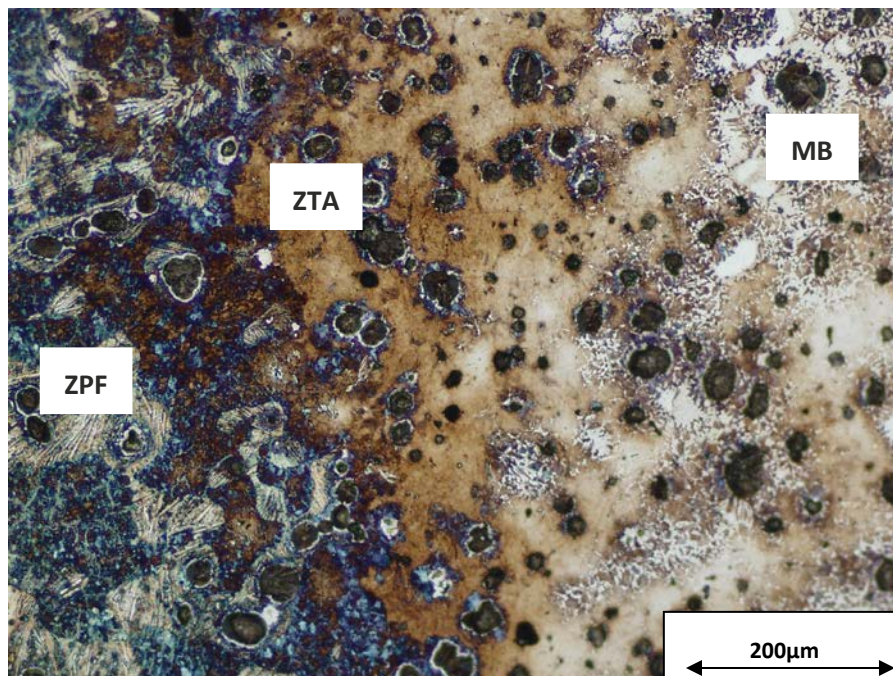


Figura 64 – Microestrutura de 3P0W2P300; Ataque com Nital 4%; Ampliação: 100x

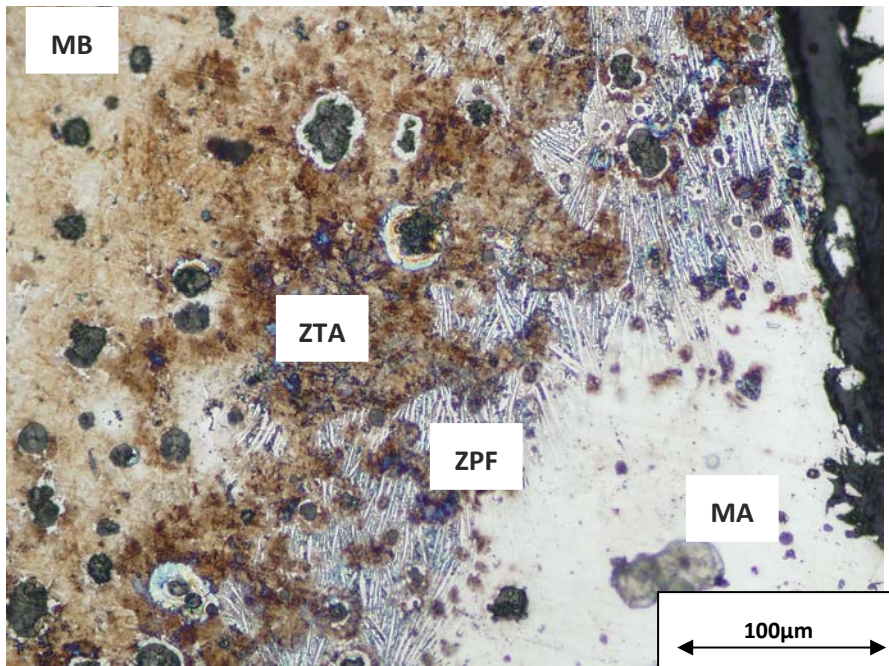


Figura 65 – Microestrutura de 1P0W2P400; Ataque com Nital 4%; Ampliação: 200x

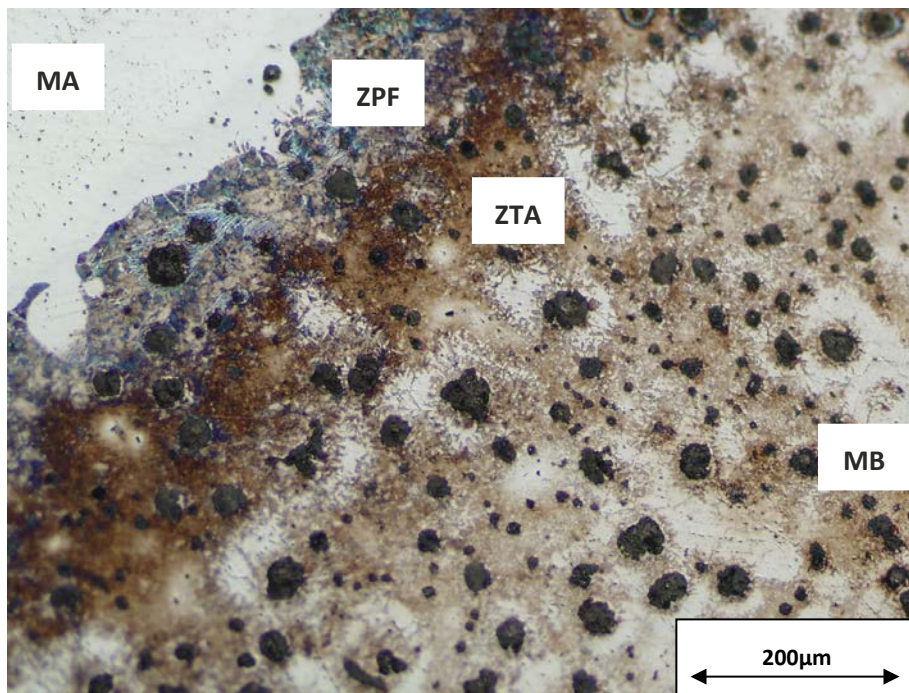
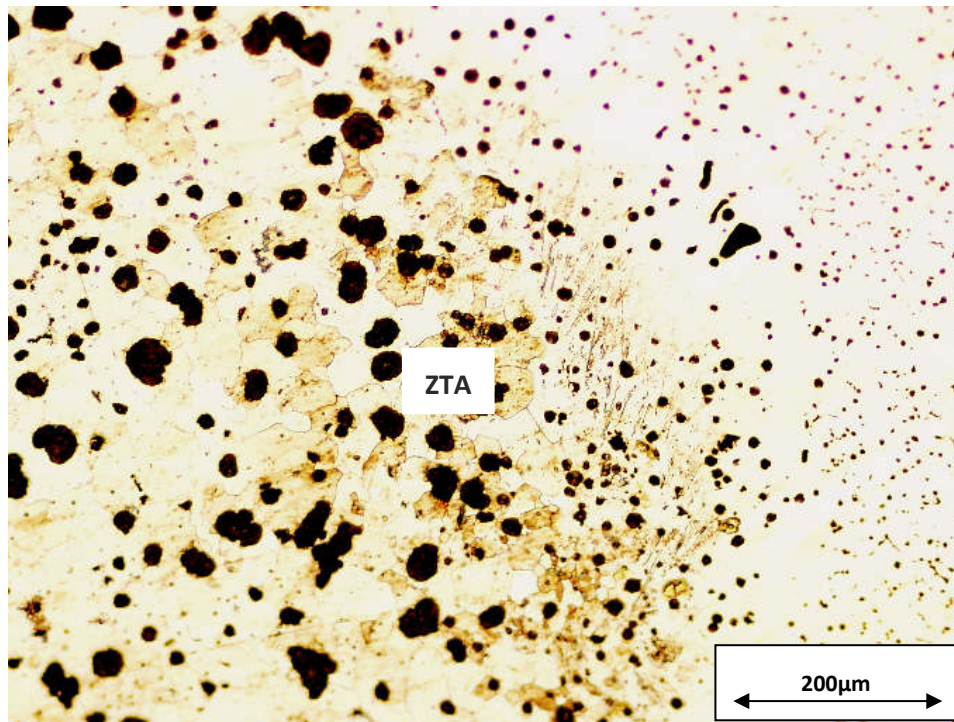


Figura 66 – Microestrutura de 1P0W2P500; Nital 4%; Ampliação: 100x



MB

Figura 67 – Microestrutura de 1P0W2P700; Nital 4%; Ampliação: 100x

MA

- Verifica-se que a amostra 3P0W2P300 (ANEXO D) (figura 64) possui uma quantidade relevante de ledeburite na ZPF, e que esta ZPF possui a estrutura de “olho-de-boi” rodeada por martensite. A ZTA é constituída essencialmente por alguma martensite e perlite numa matriz austenitica. Em comparação com a amostra 1P0W2P400 (figura 65), esta possui um valor de resistência mecânica inferior, devido ao facto de possuir uma ZPF e ZTA com extensões superiores. A baixa dureza na ZTA em relação a 1P0W2P400, deve-se ao facto de esta zona possuir uma menor quantidade de martensite;
- Na amostra 1P0W2P400, é possível verificar a existência de ledeburite na ZPF e de martensite na ZTA. A difusão de carbono não está presente na ZTA, mas sim no material base (figura 62);
- A amostra 1P0W2P500 (ANEXO E) (figura 66), possui uma maior extensão de ledeburite e martensite que a amostra 3P0W2P400, o que contribui para um decréscimo da sua resistência mecânica;
- A amostra 2P0W2P700 (ANEXO F) (figura 67), possui uma matriz ferrítico-perlitica. Esta amostra foi pós-aquecida a 700°C, o que se encontra relativamente perto da

temperatura máxima aconselhável para pré-aquecimento de ferro fundidos (760°C). Apesar desta ter sofrido um amaciamento que diminuiu a sua dureza, é possível verificar a presença de ledeburite na ZPF. A diminuição da resistência mecânica desta amostra deve-se também ao aparecimento de grafite secundária, desde a ZTA até à ZPF. Esta grafite secundária é proveniente da decomposição da martensite, mais comum na gama de temperaturas de 690°C. Este tipo de grafite é prejudicial do ponto de vista das propriedades mecânicas;

- Em todas as amostras o material de adição encontra-se na mesma situação, a grafite difundiu-se para a zona do cordão (MA).

3.2.3 Influência da junção do Pré e Pós-Aquecimento

O gráfico da figura 68 mostra a relação entre a resistência mecânica e a dureza para as amostras que foram pré-aquecidas a 300°C por uma hora, e pós-aquecidas a 300°C e 400°C e 500°C, respetivamente, durante duas horas. Todas estas amostras foram soldadas a uma intensidade de corrente de 70 A.

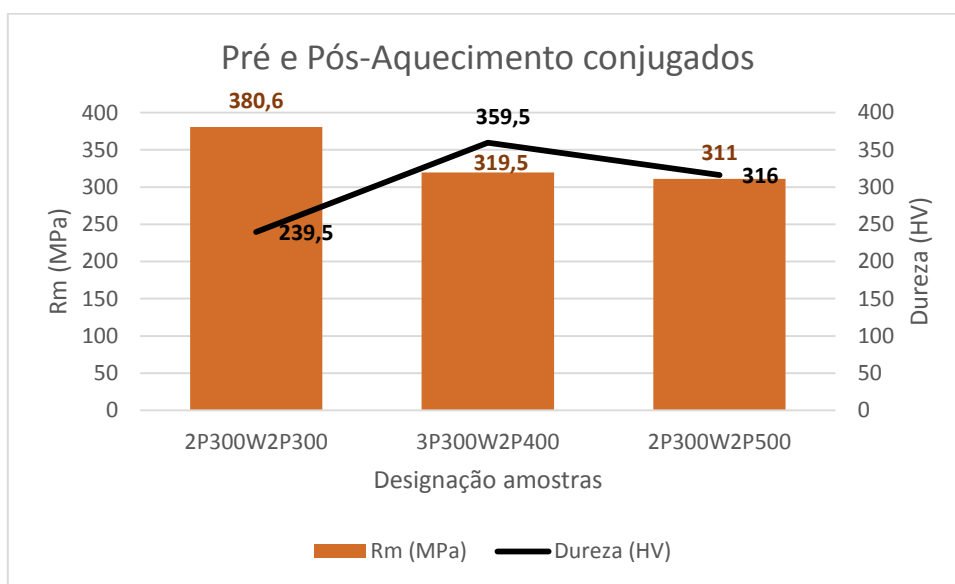


Figura 68 – Relação entre Rm e dureza para pré-aquecimentos de 300°C conjugados com pós-aquecimentos de 300°C, 400°C e 500°C

Analisando os resultados apresentados na figura 68:

- Verifica-se que à medida que a temperatura de pós-aquecimento aumenta, a resistência mecânica diminui.
- Os valores médios de dureza sofrem um pico na amostra 3P300W2P400 (ANEXO G).

As figuras 69 a 72 demonstram o porquê desta proporcionalidade.

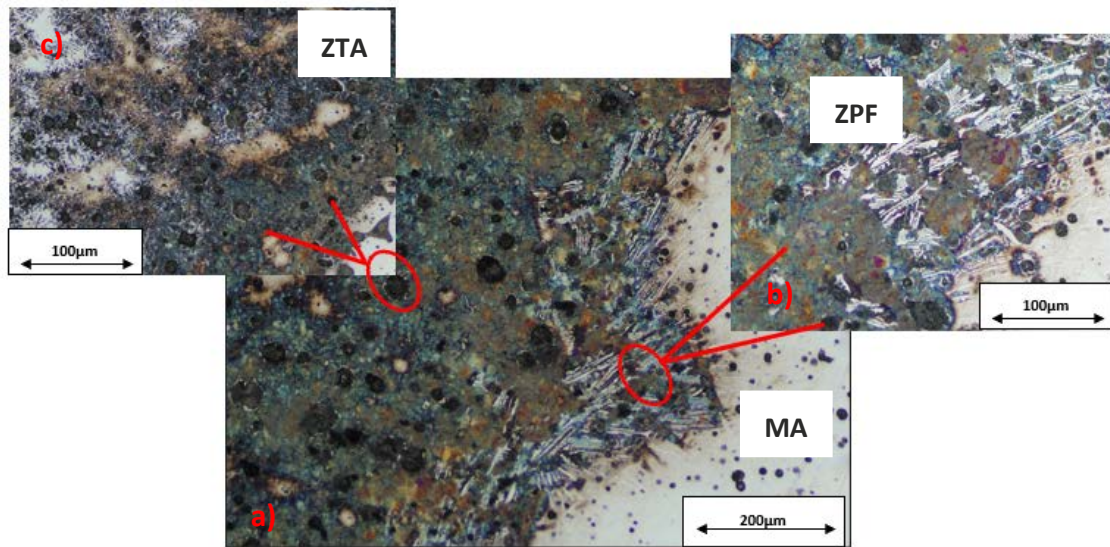


Figura 69 a) Microestrutura de 2P300W2P300; Ataque com Nital 4%; Ampliação: 100x; b) Microestrutura de 2P300W2P300 - Martensite; Ataque com Nital 4%; Ampliação: 200x; c) Microestrutura de 2P300W2P300 - Ledeburite; Ataque com Nital 4%; Ampliação: 200x;

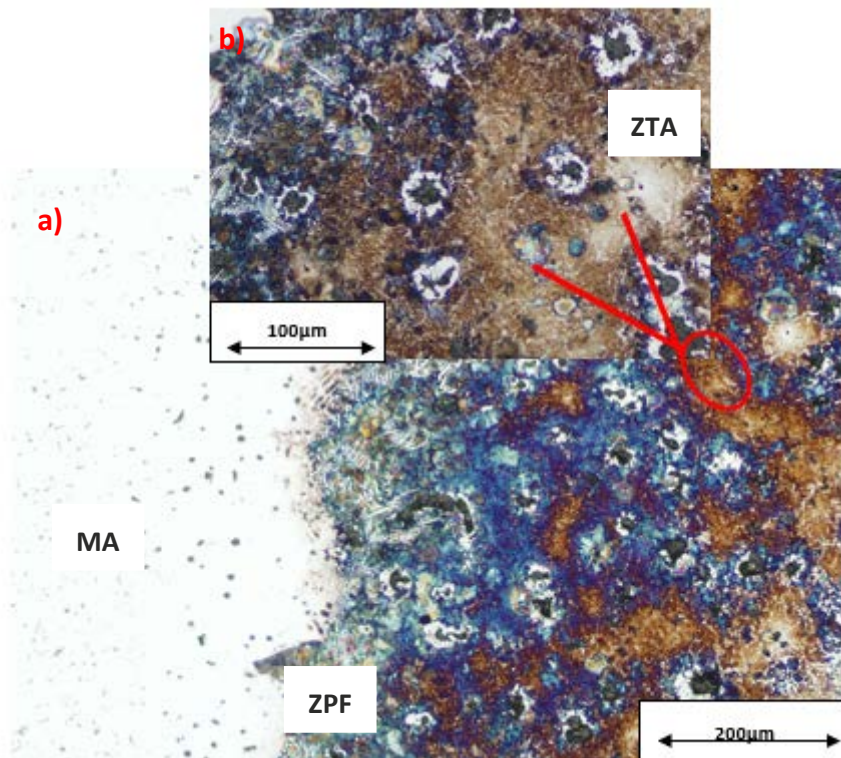


Figura 70 – a) Microestrutura de 3P300W2P400; Ataque com Nital 4%; Ampliação: 100x; b) Microestrutura de 3P300W2P400 – Martensite, ledeburite; Ataque com Nital 4%; Ampliação: 200x;

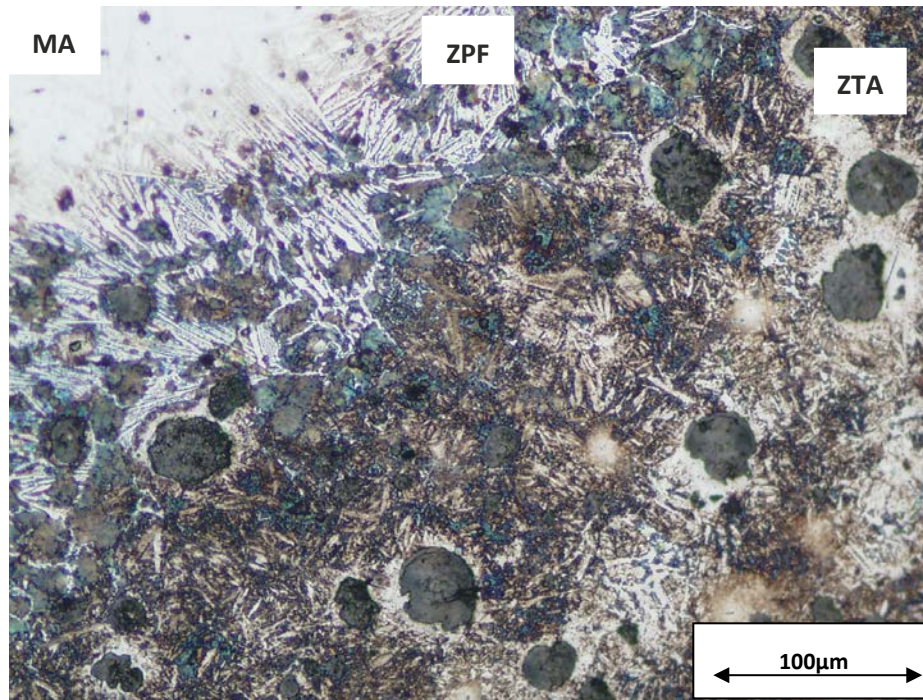


Figura 71 – Microestrutura de 3P300W2P500; Ataque com Nital 4%; Ampliação: 100x;

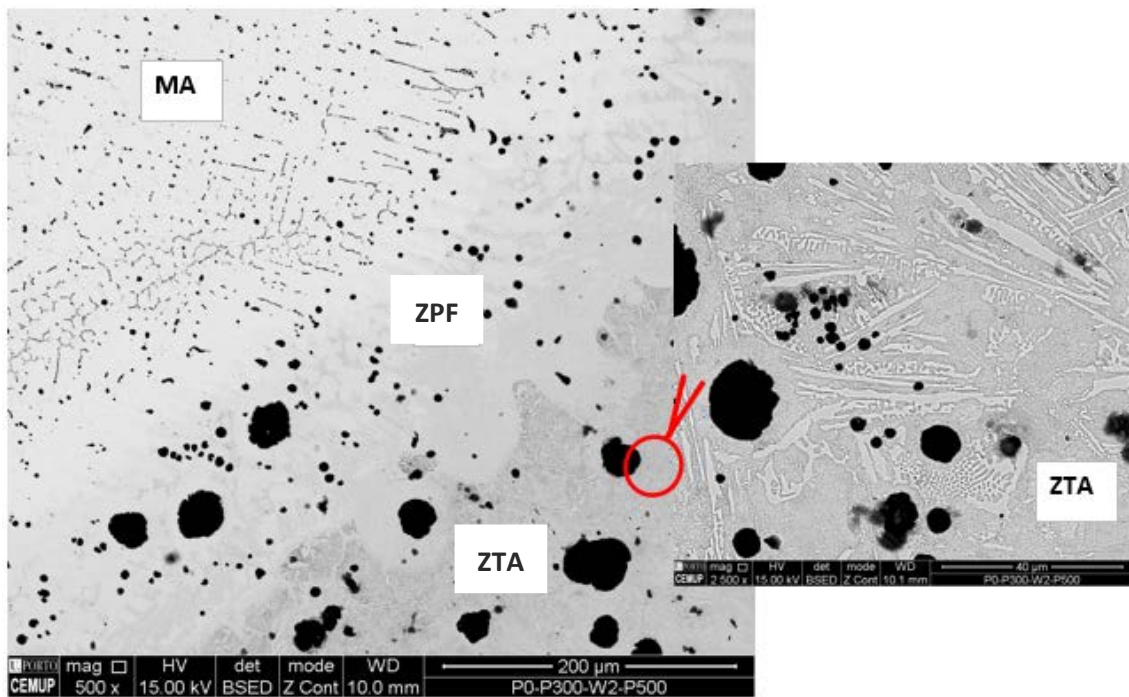


Figura 72 – ZPF e ZTA observadas por SEM; 3P300W2P500; Nital 4%;

- É possível verificar que nos três conjuntos de parâmetros, a ZPF é constituída essencialmente por ledeburite eutética;

- As microestruturas das amostras 3P300W2P400 (figura 70) e 3P300W2P500 (ANEXO I) (figura 71 e 72) mostram uma elevada quantidade de martensite na ZTA, o que não acontece na amostra 2P300W2P300 (ANEXO H) (figura 69);
- Na amostra 3P300W2P300 é possível verificar que na zona de material de adição (MA), ocorre a migração do carbono para a zona do cordão de soldadura (figura 72 a)). A existência de ledeburite e cementite na ZTA está patente na figura 72 b);
- A martensite e a cementite são estruturas que aumentam a dureza e diminuem a resistência mecânica na junta soldada, o que justifica os valores das amostras 3P300W2P400 e 3P300W2P500.

3.2.4 Influência da temperatura de 300°C

A figura 73 mostra a relação entre as amostras que foram submetidas a tratamentos térmicos com a temperatura de 300°C, ou seja, pré-aquecimento a 300°C, pós-aquecimento a 300°C e pré e pós aquecimentos conjugados a 300°C.

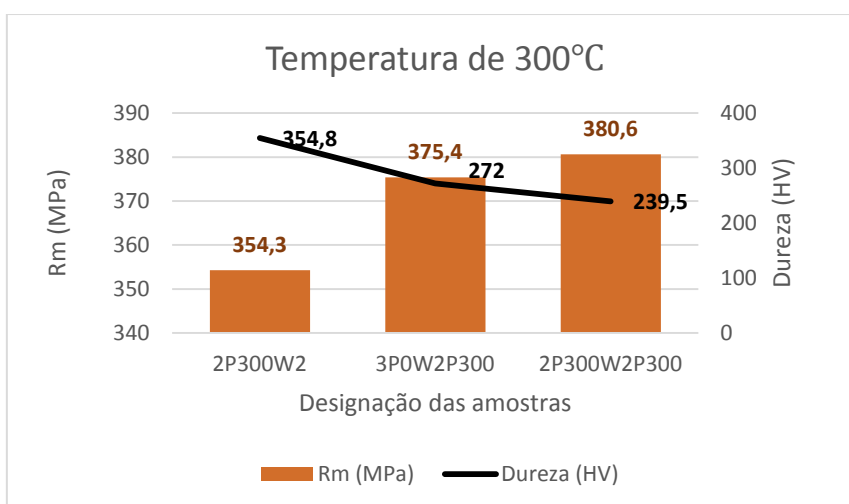


Figura 73 – Relação entre Rm e dureza para amostras que foram submetidas a tratamentos térmicos a 300°C

- Verifica-se que o pré-aquecimento a 300°C é o que possui menor valor de resistência mecânica e maior valor de dureza na ZTA.
- A realização dos pós-aquecimentos a 300°C originam um efeito de alívio de tensões benéfico para o desempenho mecânico das soldaduras.
- À medida que a resistência mecânica aumenta, o valor da dureza na ZTA diminui

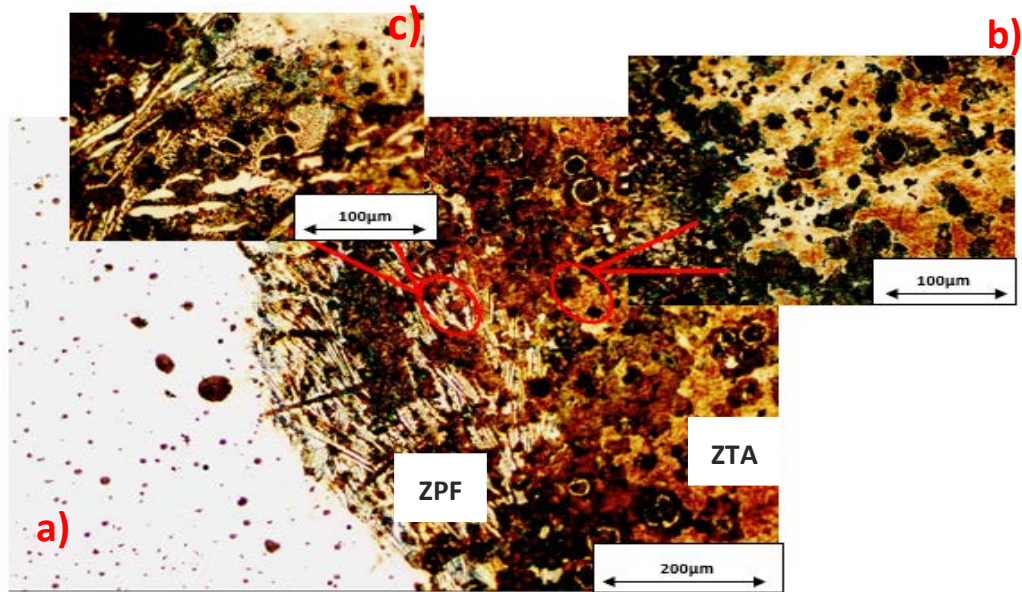


Figura 74 - a) Microestrutura de 2P300W2; Ataque com Nital 4%; Ampliação: 100x; b) Microestrutura de 2P300W2–Martensite; Ataque com Nital 4%; Ampliação: 200x; c) Microestrutura de 2P0W2P300 – Ledeburite; Ataque com Nital 4%; Ampliação: 200x.

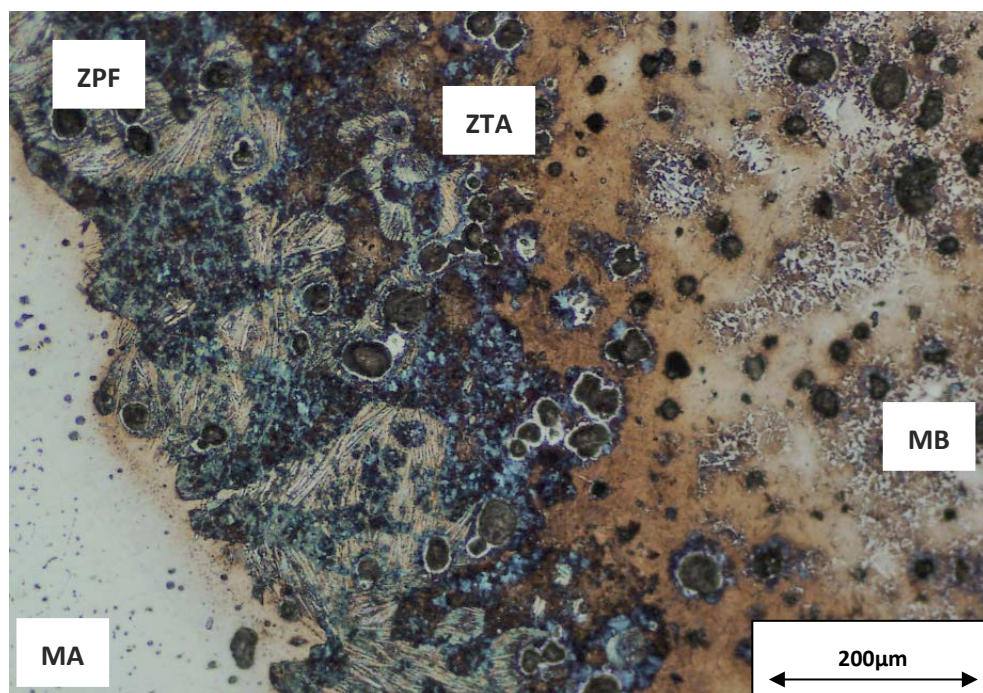


Figura 75 – Microestrutura de 3P0W2P300; Ataque com Nital 4%; Ampliação: 100x;

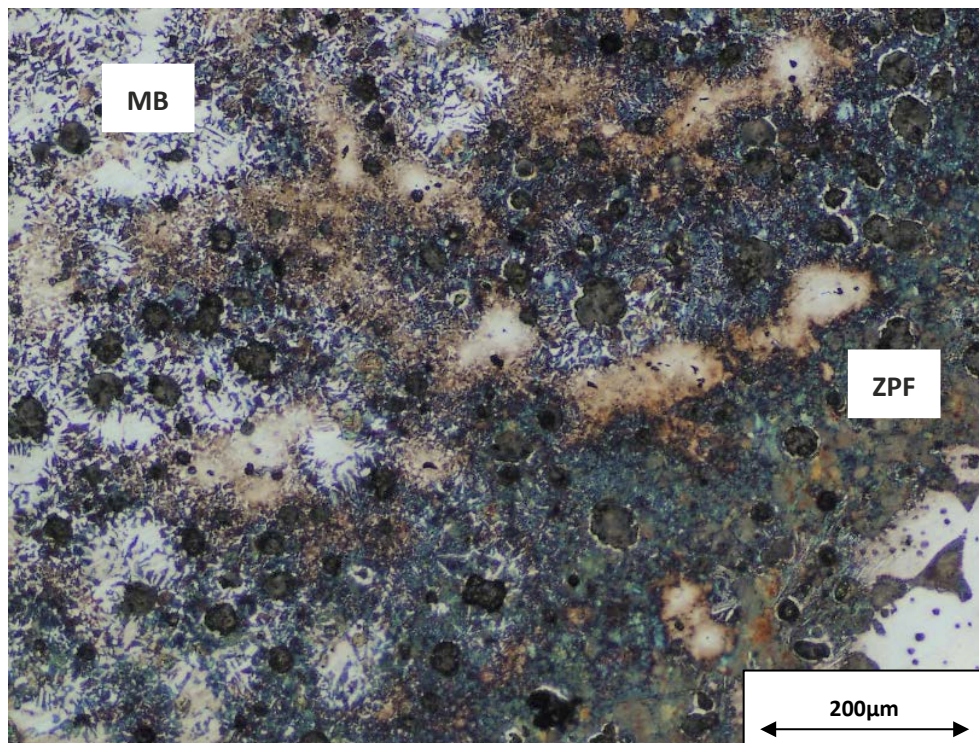


Figura 76 – Microestrutura de 2P300W2P300; Ataque com Nital 4%; Ampliação: 100x;

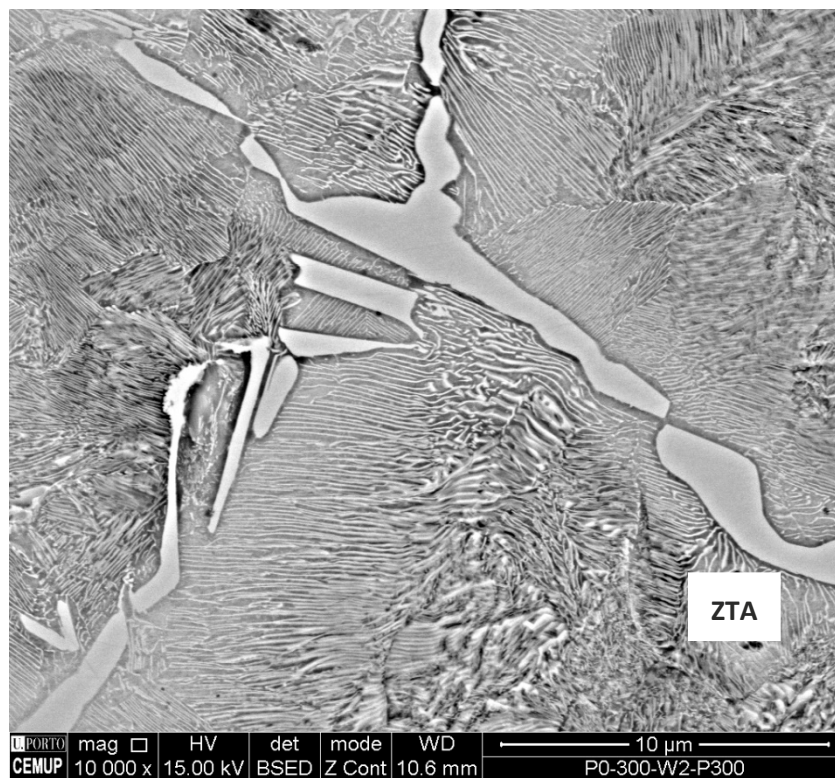


Figura 77 – Martensite e cementite observada em SEM; 2P300W2P300

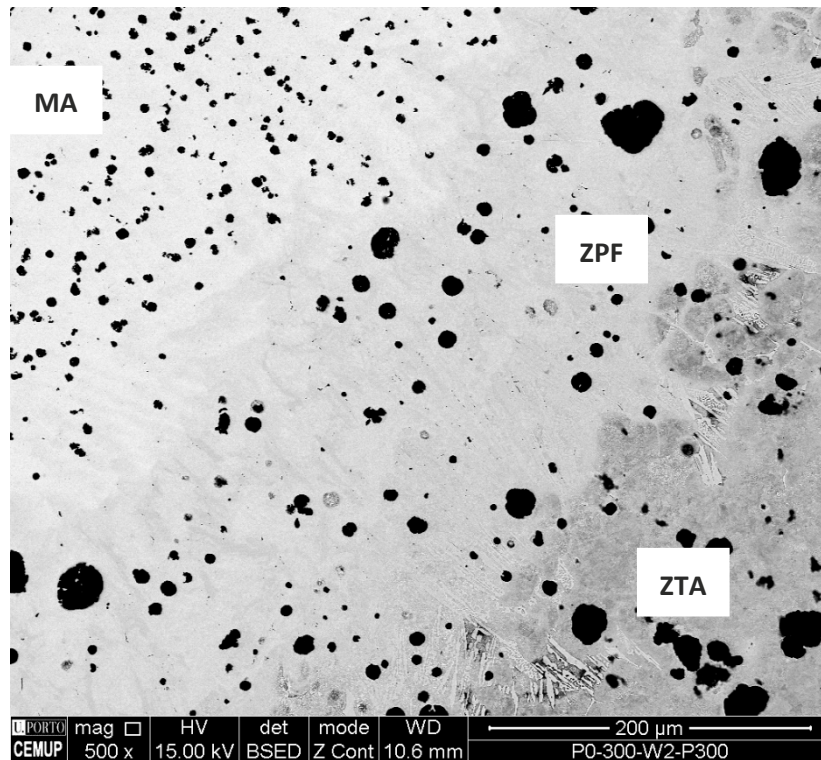


Figura 78 – ZPF e ZTA observadas em SEM; Amostra 2P300W2P300

- A amostra 2P300W2 (ANEXO J) (figura 74) é a que possui maior extensão nas ZPF e ZTA. Possui uma elevada quantidade de ledeburite na ZPF e uma ZTA constituída essencialmente por martensite. É possível também verificar a existência da estrutura de “olho-de-boi”;
- A amostra 3P0W2P300 (figura 75), possui uma extensão da ZTA menor do que a amostra 2P300W2 (figura 76);
- Apesar de ser visível a existência de cementite, a amostra 2P300W2P300 (figura 76, 77 e 78) possui um melhor resultado de resistência mecânica e de dureza, devido ao facto de esta apresentar pouca ledeburite e martensite na ZTA, e uma menor extensão desta.

3.2.5 Sibodur® 450 (2P0W2) vs melhores resultados

Na figura 79 são demonstradas as principais diferenças em relação aos valores de resistência mecânica e de dureza, entre o Sibodur® 450 soldado a frio (2P0W2), e as amostras com melhores resultados obtidos, nomeadamente 1P0W2P400, 3P0W4P400, 2P300W2P300.

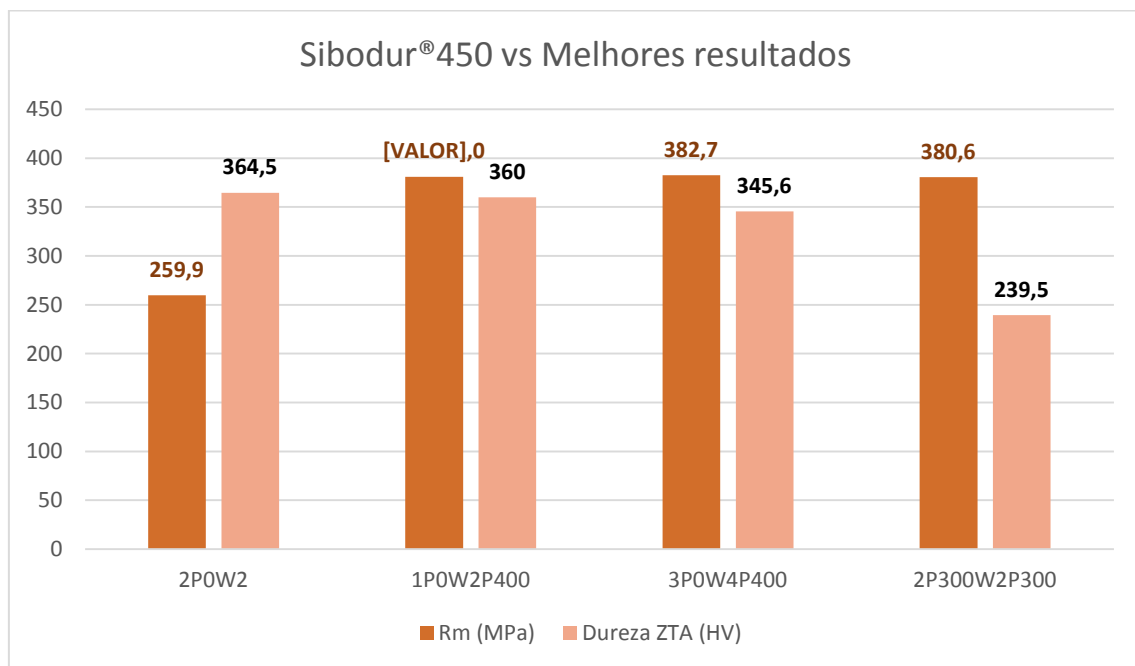


Figura 79 - Comparação dos resultados das melhores amostras com os valores soldados a frio de Sibodur® 450

É possível verificar que existem elevadas diferenças entre a amostra 2P0W2 e as restantes, nomeadamente nos valores de resistência mecânica e de dureza na ZTA.

Estas diferenças de valores podem ser justificadas com auxílio da figura 80. Pode-se verificar que na amostra 2P0W2, existe uma elevada quantidade de ledeburite na ZPF e de martensite na ZTA, quando comparadas com as restantes amostras (figuras 81 a 84).

- O pós-aquecimento a 400°C (figura 81 e 82) fez com que a martensite na ZTA e a ledeburite na ZPF, diminuíssem significativamente, aumentando a resistência mecânica desta junta soldada de 259,93 MPa para 381 MPa, que está acima do

objetivo proposto 5,8%. A sua dureza na ZTA diminui de um valor de 364,5 HV para 360HV;

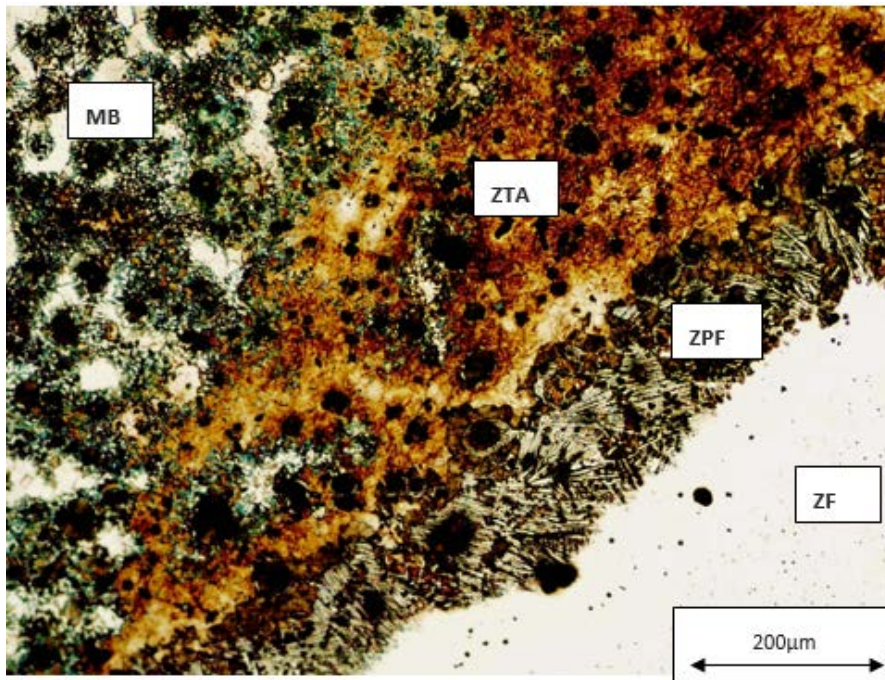


Figura 80 – Microestrutura de 2P0W2; Ataque com Nital 4%; Ampliação: 100x

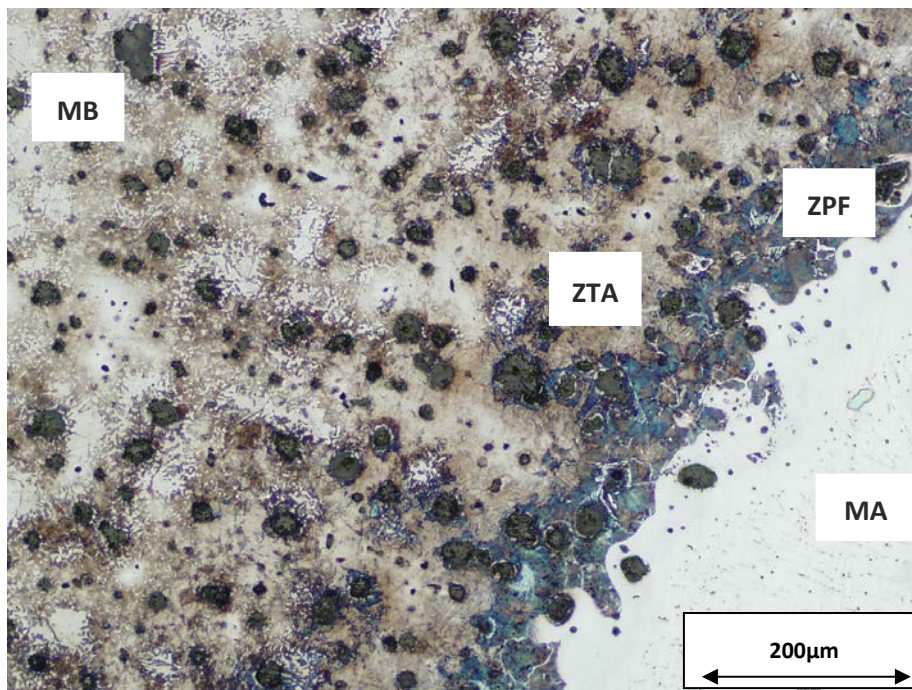


Figura 81 – Microestrutura de 1P0W2P400; Ataque com Nital 4%; Ampliação: 100x

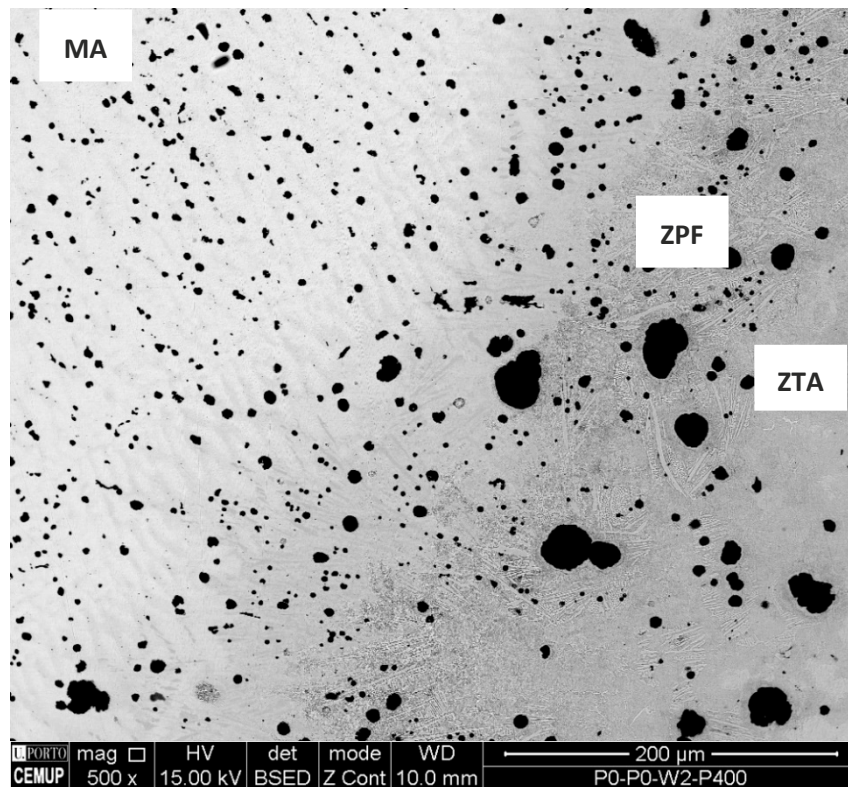


Figura 82 – SEM - Análise da amostra 1P0W2P400

- Apesar de ainda possuir ledeburite na ZPF e martensite na ZTA, a amostra 3P0W4P300 (figura 83) tal como na amostra 1P0W4P400, evidencia uma diminuição da extensão da ZTA e dos seus constituintes, como a martensite. Esta mudança originou um aumento da resistência mecânica de 259,93 MPa para 382,7 MPa (6,1% acima do objetivo) e uma diminuição de dureza de 364,5 HV para 345,6 HV.

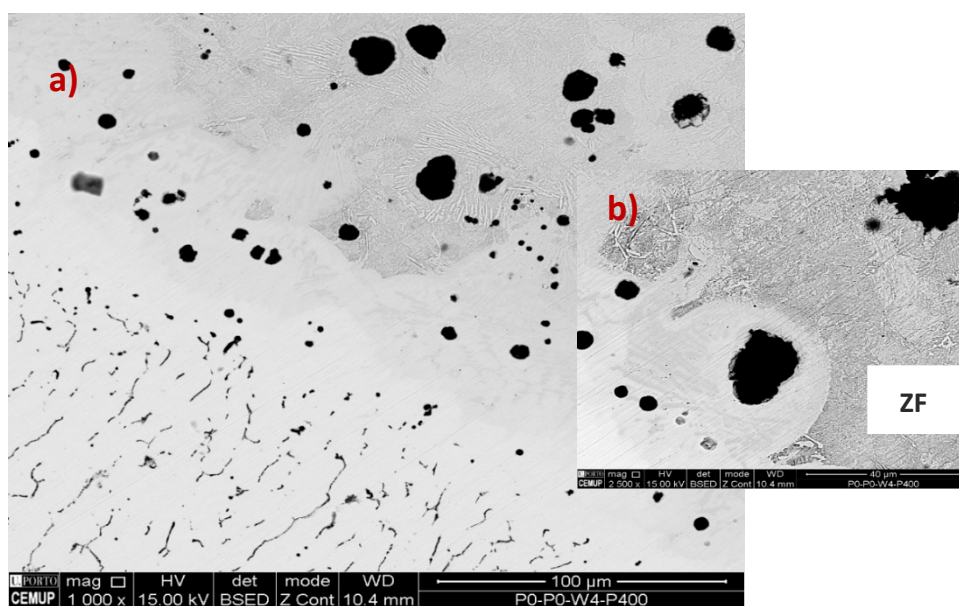


Figura 83 – a) SEM - Análise da amostra 3P0W4P400; Ataque 4% Nital; b) SEM - Análise da amostra 3P0W4P400; ZTA; Ataque 4%

- As amostras 3P0W4P400 e 1P0W2P400 possuem valores muito aproximados, como tal, é de se referir, que em termos ambientais, é mais sustentável uma solução que passe apenas por dois passes, do que por quatro, devido ao facto de este método contribuir para uma menor poluição do ambiente e menor gasto de energia.
- Apesar da existência de ledeburite na ZPF (figura 84), verifica-se que esta diminuiu drasticamente quando comparada com a amostra 2P0W2. A resistência mecânica da junta aumentou de 259,9 MPa para 380,6 MPa, e a sua dureza na ZTA diminuiu drasticamente de 364,5 HV para 239,5 HV, cerca de 34%, devido à diminuição do teor de martensite.

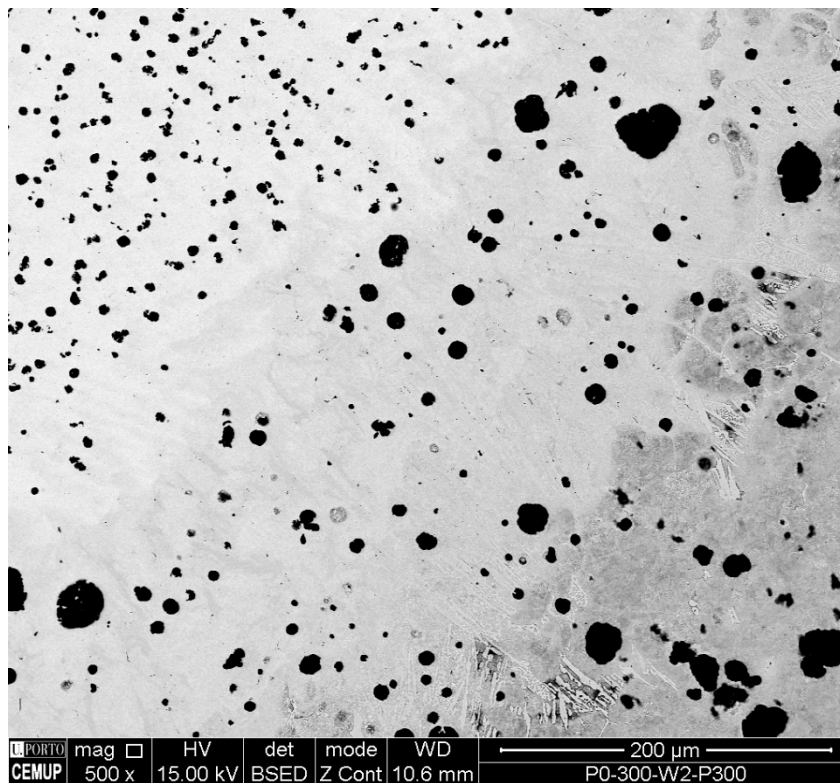


Figura 84 -SEM - Análise da amostra 2P300W2P300; Ataque 4% Nital.

CONCLUSÕES

4.1 Conclusões

4.2 Propostas para trabalhos futuros

4. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 Conclusões

Através dos resultados obtidos, foi possível concluir nesta dissertação que é possível obter valores de resistência mecânica na junta soldada do Sibodur® 450, acima dos 80% (360 MPa), do valor Rm do material de base. No entanto, pode-se verificar que existem tratamentos térmicos menos e mais eficazes. Um resumo dos resultados obtidos para cada tratamento está presente na tabela 30.

Tabela 30 – Quadro – resumo de resultados vs objetivo

Designação	Objetivo (MPa)	Resultado (MPa)	Estado
2P300W2	360	354,3	↓
1P0W2P400	360	381,0	↑
3P0W2P300	360	375,4	↓
1P0W2P500	360	370,1	↑
2P0W2P700	360	346,2	↓
3P0W4P400	360	382,7	↑
2P300W2P300	360	380,6	↑
3P300W2P400	360	319,5	↓
2P300W2P500	360	311,0	↓

Legenda:	
Abaixo do objetivo	↓
Acima do objetivo	↑

Os tratamentos térmicos menos eficazes foram:

- Os pré-aquecimentos a 300°C com pós-aquecimentos de 400°C e 500°C. Isto deve-se ao facto de existir uma elevada quantidade de martensite e de cementite na ZTA, que contribui para a elevada dureza e baixa resistência mecânica;
- Pós-aquecimento a 700°C que originou um amaciamento da matriz, reduzindo a sua dureza, mas também promoveu a diminuição da sua resistência mecânica.

Os tratamentos mais eficazes foram:

- Os pós-aquecimentos a 400°C (P0W2P400), nas amostras soldadas com dois passes, em que se obteve um valor acima do objetivo;
- Os pós-aquecimento de 400°C (P0W4P400), nas amostras soldadas com quatro passes, que também obtiveram resultados acima do objetivo. Embora estes resultados sejam favoráveis, a diferença de valores médios existente entre este grupo de amostras e o grupo de dois passes, com temperaturas de pós-aquecimento semelhantes, é quase nula. A complexidade da soldadura de quatro passes, não é justificável para a correção e manutenção de peças, quando o método de dois passes é mais simples e se obtém valores equivalentes;
- Pode-se também verificar, que os resultados das amostras com pré e pós aquecimento a 300°C e dois passes (P300W2P300), é quase semelhante ao obtido nas amostras de pós-aquecimento a 400°C (P0W4P400), com dois passes. No que toca à realidade industrial, o primeiro método é dispendioso a nível de energia, porque exige mais uma hora do material no forno. Além disso, o próprio processo de soldadura é mais complexo, e exige uma maior perícia por da parte do operador, visto que o material está mais maleável o que o torna difícil de soldar.

Concluindo, para a realidade industrial, o tratamento que se verifica mais exequível e com melhores resultados é o pós-aquecimento a 400°C, com dois passes e intensidade de 80 A. Este tratamento possui como valor médio 381,0 MPa, o que corresponde a 84% do valor de Rm do Sibodur®450 do original.

4.2 Propostas para trabalhos futuros

Dado que este ferro fundido ainda é novo no mercado, ainda existem alguns estudos para se realizar. Apesar de se ter conseguido alcançar o objetivo, ainda não foi possível chegar ao valor original de resistência mecânica do Sibodur®450 (450 MPa). Como tal, é possível destacar como trabalhos futuros, os seguintes tópicos:

- Soldar o Sibodur® 450 com eletrodo revestido usando Inconel LR 82 ou eletrodo de aço macio, com 2 passes, e proceder a um pós-aquecimento de 400 °C;
- Soldar o Sibodur® 450 com FN10 e LR 82 usando outras intensidades, como 90, 100 e 120 A, e proceder a um pós-aquecimento a 400°C;
- Experimentar um tratamento de recozimento total ou subcritico nas amostras de Sibodur® 450 soldadas com eletrodo revestido FN10;

- Tendo em vista que o processo de soldadura MIG/MAG é mais produtivo e mais usado na indústria, estudar a soldabilidade do Sibodur® 450, quando soldado com este método.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- [1] Callister, W.D. and D.G. Rethwisch, *Materials science and engineering*. Vol. 5. 2011: John Wiley & Sons NY.
- [2] Berns, H. and W. Theisen, *Ferrous materials: steel and cast iron*. 2008: Springer Science & Business Media.
- [3] Consulta Online : <https://igcse2016.wordpress.com/2016/04/09/5-4-describe-and-explain-the-main-reactions-involved-in-the-extraction-of-iron-from-iron-ore-haematite-using-coke-limestone-and-air-in-a-blast-furnace/> no dia 6 de Março de 2018
- [4] Amaral, H.M.F.M., Soldadura dos ferros fundidos cinzentos, nodulares e bainíticos. Dissertação de mestrado. FEUP 1989.
- [5] Pereira, L.A., Estudo da soldabilidade do ferro fundido dúctil SiboDur® 700. Dissertação de mestrado. ISEP. 2016.
- [6] Silva, L.G.R., Estudo da soldabilidade do ferro fundido SiboDur® 450. Dissertação de mestrado. ISEP. 2016.
- [7] Brown, J., *Foseco non-ferrous foundryman's handbook*. 1999: Butterworth-Heinemann.
- [8] Queirós, A. Materiais metálicos, Apontamentos de Ciência e Engenharia dos materiais, Escola Superior de Estudos Industriais e de Gestão, 2010
- [9] Brito G. et al, *Tecnologia Naval – Materiais metálicos Parte II*, pp. 6-12, 2004. Consulta online a 14 de Abril de 2018. Disponível em: <http://www.mar.ist.utl.pt/jgordo/tecnave/TN-C1.pdf>
- [10] Aggen, G. and M. Allen, *ASM Handbook Volume I Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. 2018: ASM International: The Materials Information Company.
- [11] Teixeira, R.P.O., Inoculação de banhos de ferro fundido nodular na Funfrap-grupo Teksid. Dissertação de mestrado. FEUP 2012.
- [12] Zeemann A. A soldagem por fusão para reconstrução de componentes de ferro fundido, 2003
- [13] LINCOLN ELECTRIC; AU: IPRM 2007; Section 8; Consumables, 2007
- [14] Berezuk, M. E. Curso sobre a ciência dos materiais, UTFPR, 2015
- [15] Vilela F. Uma visão sobre a produção de ferro nodular, *Fundição: revista da associação de fundição portuguesa*, nº 266. pp. 12-20

- [16] Machado, F. Apostila introdução à Manufatura Mecânica – Tratamentos Térmicos e de Superfície, Universidade de São Paulo Escola de Engenharia de São Carlos instituto de FÍSICA, pp. 1–18, 2002. Consulta online a 21 de junho de 2018. Disponível em: http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/Tratamento_termico_e_superficial.pdf
- [17] Guessser, W.L., Propriedades mecânicas dos ferros fundidos. 2009: Blucher.
- [18] Pieskel, A., L. Chaves Filho, and A. Grul, As variáveis metalúrgicas e o controle da estrutura de ferros fundidos cinzentos. *Metalurgia ABM*, 1975. 31(215): p. 693-699.
- [19] Vidal, D.F., Análise de estrutura e propriedades mecânicas de um ferro fundido nodular em processo de fundição produzido pela técnica de imersão de sino. Dissertação de mestrado. 2013.
- [20] Sun, D., et al., *Welding consumable research for austempered ductile iron (ADI)*. *Materials Science and Engineering: A*, 2005. 402(1-2): p. 9-15.
- [21] GEORG FISCHER AUTOMOTIVE, *Lightweight Material*, 2016. Consulta online a 20 de Setembro de 2018. Disponível em: <https://www.georgfischer.com/content/gfau/com/en/competences/research-and-development/leichtbau-im-material.html>
- [22] FISCHER, G. *Automotive Material Data Sheets: Sibodur® and GJS family*, 2015
- [23] GEORG FISCHER AUTOMOTIVE, *Passenger Cars*, 2016. Consulta online a 20 de Setembro de 2018. Disponível em: <http://www.gfau.com/content/gfau/com/en/productsandsolutions/passengercar.html>
- [24] Silva, F., *Tecnologia da soldadura: Uma abordagem técnico-didática*. Publindustria, Edições Técnicas, Porto 2014.
- [25] Indura, *Manual de soldadura*, pp. 13–14, 2013
- [26] Yamamoto, S., *Arc welding of specific steels and cast irons*. Shinko Welding Service, Japan, 2008: p. 4-18.
- [27] Pouranvari, M., *AN INVESTIGATION ON THE WELDABILITY OF GREY CAST IRON USING NICKEL FILLER METAL*.
- [28] Kelly, T., R. Bishel, and R. Wilson, *Welding of ductile iron with Ni-Fe-Mn filler metal*. *Weld J*, 1985. 64: p. 79-85.
- [29] Pascual, M., et al., *Analysis of the weldability of ductile iron*. *Materials Letters*, 2008. 62(8-9): p. 1359-1362.
- [30] Modenesi, P.J., P.V. Marques, and A.Q. Bracarense, *Soldagem-fundamentos e tecnologia*. 2005: Editora UFMG.
- [31] Datta, G., *Metallurgical Considerations in Fusion Welding of Cast Irons*. *Indian Foundry Journal*, 1978.

- [32] Elliott, R., *Cast iron technology*. 1988: Butterworth-Heinemann.
- [33] El-Banna, E., *Effect of preheat on welding of ductile cast iron*. *Materials Letters*, 1999. 41(1): p. 20-26.
- [34] Kumar, R., et al, *Evaluation of Mechanical and Microstructural Properties of Cast Iron with Effect Of Pre Heat and Post Weld Heat Treatment*, 2017
- [35] Loper, C. and R. Heine, *The effect of processing variables on ductile iron quality*. AFS Transactions, 1965. 73: p. 488-496.
- [36] Kiser, S. and B. Irving, *Unraveling the mysteries of welding cast iron*. *Welding journal*, 1993. 72(8): p. 39-44.
- [37] Voigt, R. and C. Loper Jr, *Study of heat-affected zone structures in ductile cast iron*. *WELDING J.*, 1983. 62(3): p. 82.
- [38] Askari-Paykani, M., M. Shayan, and M. Shamanian, *Weldability of ferritic ductile cast iron using full factorial design of experiment*. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2014. 21(2): p. 252-263.
- [39] Bhatnagar, R.K. and G. Gupta, *A review on weldability of cast iron*. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2016: p. 126-131.
- [40] Flannery, J., *Welding ductile iron-part one*. *Welding Engineer*, 1968. 11.
- [41] Sachin B. S. *Analysis of Mechanical Properties for Welded Cast Iron*, 2015
- [42] Metals and fabrication, *Introduction to metallurgy*, 2007, pp. 11-2
- [43] Consulta Online: <http://www.electroportugal.com/index.php?id=34> no dia 15 de Março de 2018
- [44] Davim, J., A. Magalhães, and F. de Oliveira, *Ensaaios mecânicos e tecnológicos*. 1992
- [45] ISO, T., 4136. *Destructive Tests on Welds in Metallic Materials—Transverse Tensile Test*, 2012.
- [46] ISO, B.S.E., 17639, *Destructive tests on welds in metallic materials. Macroscopic and microscopic examination of welds*. BSI, 2013.
- [47] Sá, C., *A microscopia electrónica de varrimento e a micro análise por raios-x. Apontamentos teóricos*, CEMUP, Porto, 2010.
- [48] Consulta online : <http://www.cemup.up.pt/webcemup/IMICROS/imicros5.htm> no dia 15 de Setembro de 2018
- [49] ISO, E., 9015-1: 2011 *Destructive tests on welds in metallic materials-Hardness testing-Part 1: Hardness test on arc welded joints*
- [50] Modenesi, P.J., P.V. Marques, and D.B. Santos, *Introdução à metalurgia da soldagem*. Belo Horizonte: UFMG, 2012.

ANEXOS

ANEXO - A

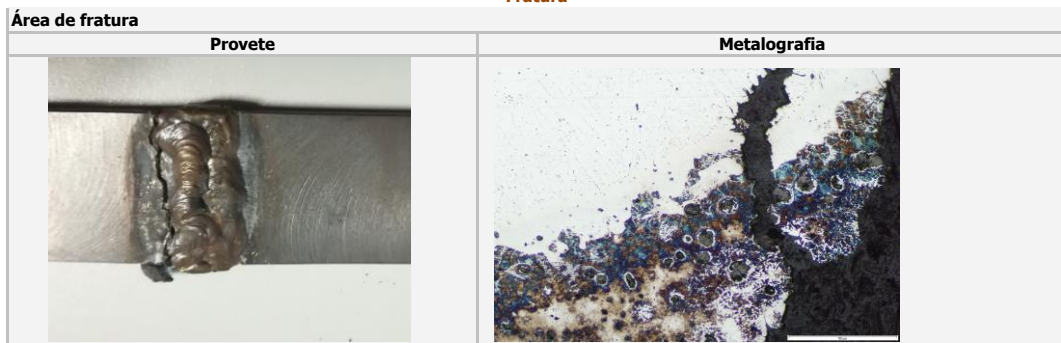
Amostra	Rm (MPa)	Rm (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Rm/Rsibodur ¹ (%)	Temperatura Pré-Aquecimento (°C)	Tempo (h)	Temperatura Pós-Aquecimento (°C)	Tempo	Nº Passes	Intensidade (A)
1P0W2	261,6	259,9	4,4	57,8					2	80
2P0W2	255,0									
3P0W2*	263,2									
1P300W2	356,8	354,3	4,0	78,7	300	2			2	70
2P300W2	349,7									
3P300W2*	356,4									
1P0W2P400	390,0	381,0	10,8	84,7			400	2	2	80
2P0W2P400	369,0									
3P0W2P400	384,0									
1P0W2P500	375,1	370,1	8,3	82,2			500	2	2	80
2P0W2P500	360,6									
3P0W2P500	374,6									
1P0W2P700	335,1	346,2	10,6	76,9			700	2	2	80
2P0W2P700	356,4									
3P0W2P700	347,0									
1P0W4P400	394,0	382,7	25,0	85,0			400	2	4	60
2P0W4P400	354,0									
3P0W4P400	400,0									
1P0W4P500	337,5	360,2	22,9	80,1			500	2	4	60
2P0W4P500	359,9									
3P0W4P500	383,3									
1P0W2P300	357,0	375,4	16,6	83,4			300	2	2	80
3P0W2P300	380,0									
4P0W2P300	389,3									
1P300W2P300	361,3	380,6	17,2	84,6	300	1	300	2	2	70
2P300W2P300	394,2									
3P300W2P300	386,2									
1P300W2P400	334,9	319,5	22,7	71,0	300	1	400	2	2	70
2P300W2P400	330,1									
3P300W2P400	293,5									
1P300W2P500	343,5	311,0	34,4	69,1	300	1	500	2	2	70
2P300W2P500	275,0									
3P300W2P500	314,6									

ANEXO B- REGISTO DE EXPERIÊNCIA

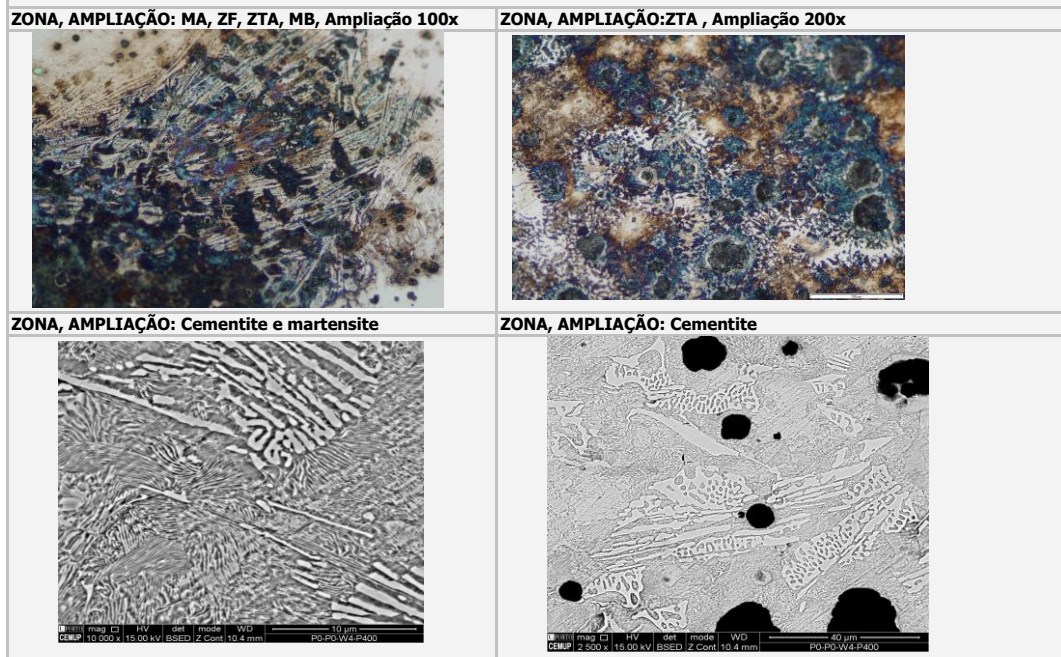
DADOS GERAIS

MATERIAL DE BASE	SIBODUR 450		CODIGO DA AMOSTRA	3P0W4P400	Nº PASSES	4
ELÉCTRODOS	SOLDADURA	FN10	DESIGNAÇÃO ELÉTRODO	Eléctrodo Revestido		
TEMPERATURAS	PRÉ-AQUECIMENTO (°C)		PÓS-AQUECIMENTO (°C)	400		
DURAÇÃO	PRÉ-AQUECIMENTO (H)		PÓS-AQUECIMENTO (H)	2		

Fratura

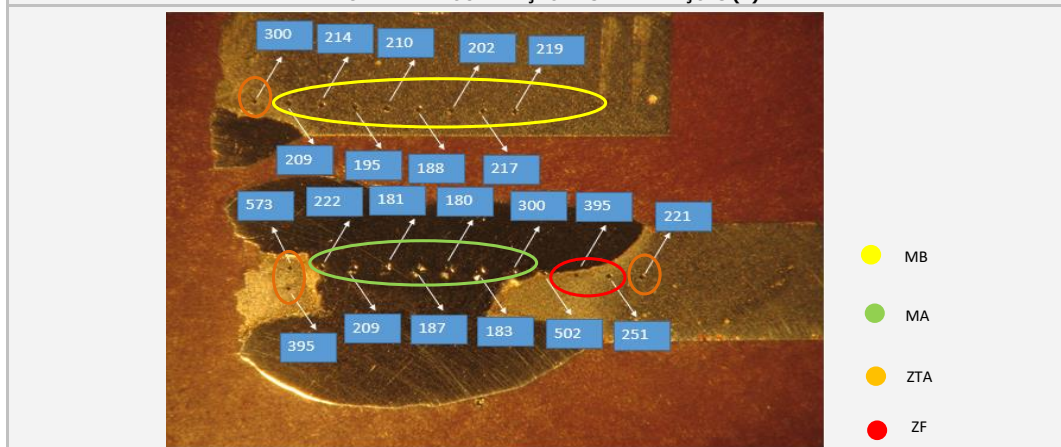


ASPECTO DAS MICRO-ESTRUTURAS



ANÁLISE DA DUREZA

DIAGRAMA DE LOCALIZAÇÃO DAS INDENTAÇÕES (A)

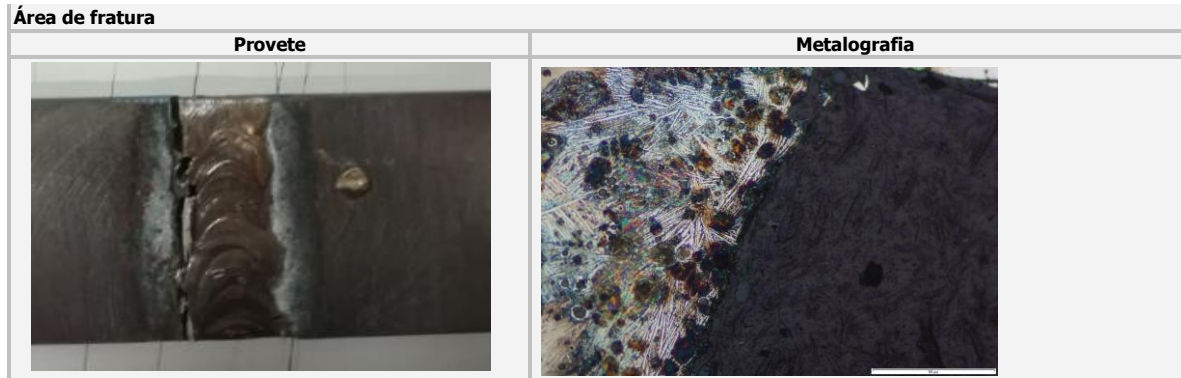


ANEXO C- REGISTO DE EXPERIÊNCIA

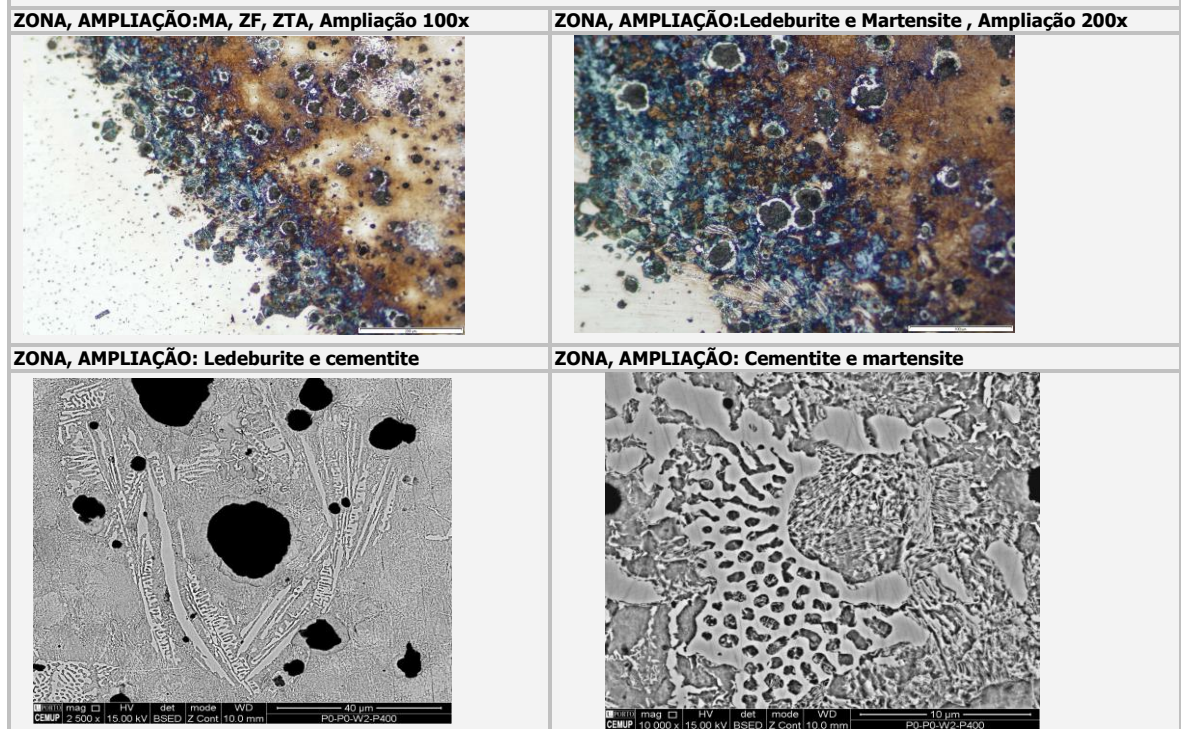
DADOS GERAIS

MATERIAL DE BASE	SIBODUR 450	CÓDIGO DA AMOSTRA	3P0W2P400	Nº PASSES	2
ELÉCTRODOS	SOLDADURA	Eléctrodo Revestido	DESIGNAÇÃO ELÉTRODO	FN10	
TEMPERATURAS	PRÉ-AQUECIMENTO (°C)		PÓS-AQUECIMENTO (°C)	400	
DURAÇÃO	PRÉ-AQUECIMENTO (H)		PÓS-AQUECIMENTO (H)	2	

Fratura

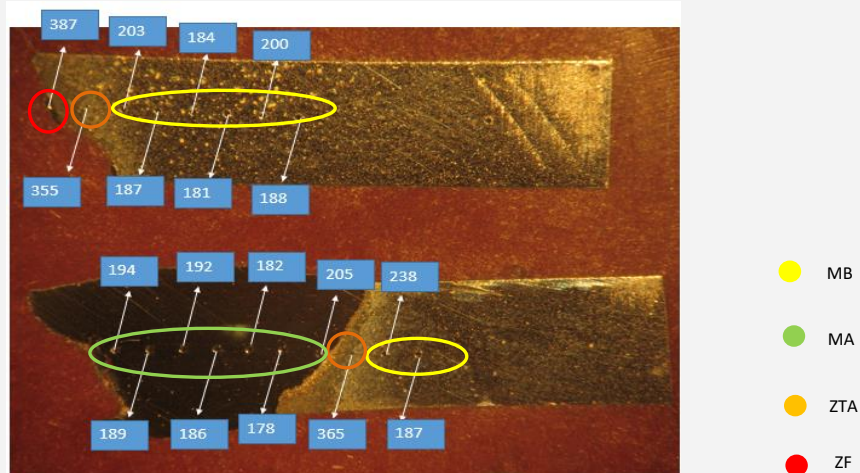


ASPECTO DAS MICRO-ESTRUTURAS



ANÁLISE DA DUREZA

DIAGRAMA DE LOCALIZAÇÃO DAS INDENTAÇÕES (A)

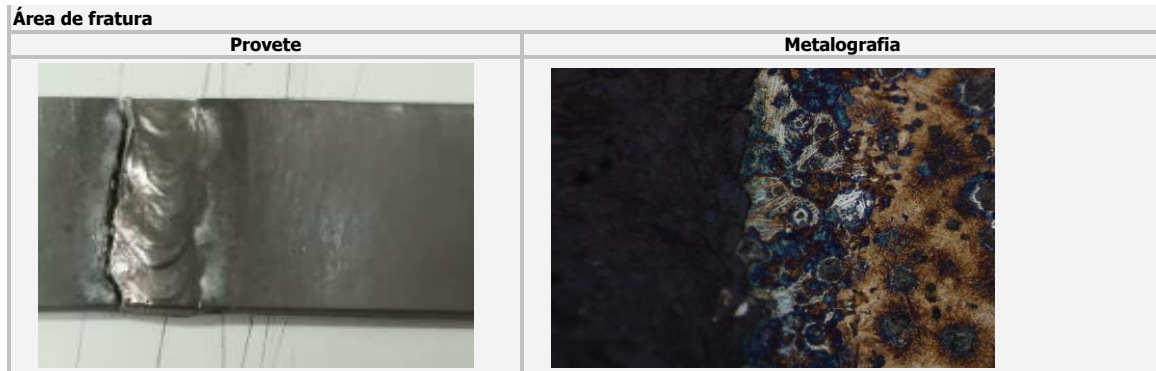


ANEXO D- REGISTO DE EXPERIÊNCIA

DADOS GERAIS

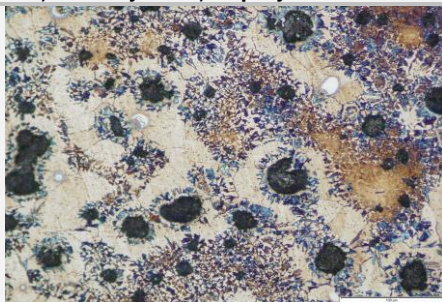
MATERIAL DE BASE	SIBODUR 450		CÓDIGO DA AMOSTRA	3P0W2P300	Nº PASSES	2
ELÉCTRODOS	SOLDADURA	FN10	DESIGNAÇÃO ELÉTRODO	Elétrodo Revestido		
TEMPERATURAS	PRÉ-AQUECIMENTO (°C)		PÓS-AQUECIMENTO (°C)	300		
DURAÇÃO	PRÉ-AQUECIMENTO (H)		PÓS-AQUECIMENTO (H)	2		

Fratura

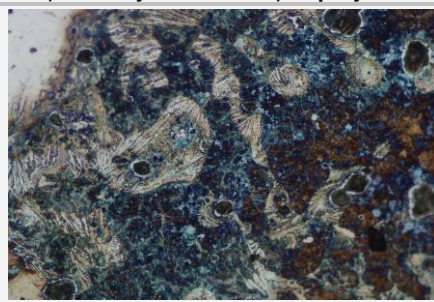


ASPECTO DAS MICRO-ESTRUTURAS

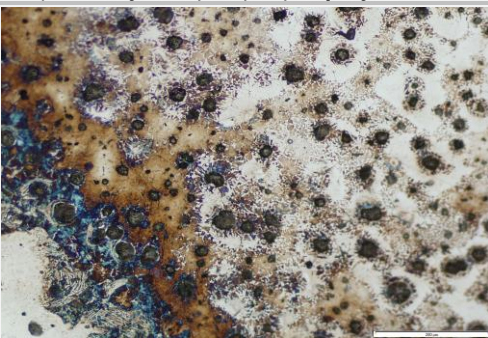
ZONA, AMPLIAÇÃO: MB, Ampliação 100x



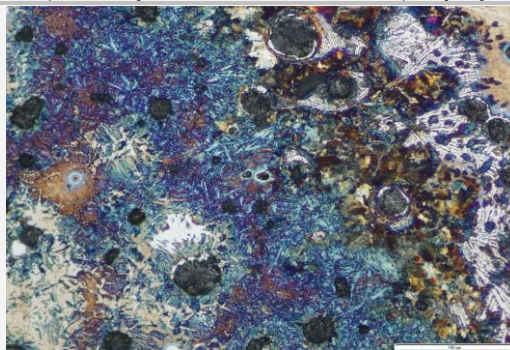
ZONA, AMPLIAÇÃO: Ledeburite, Ampliação 200x



ZONA, AMPLIAÇÃO: ZF, ZTA, MB, Ampliação 100x

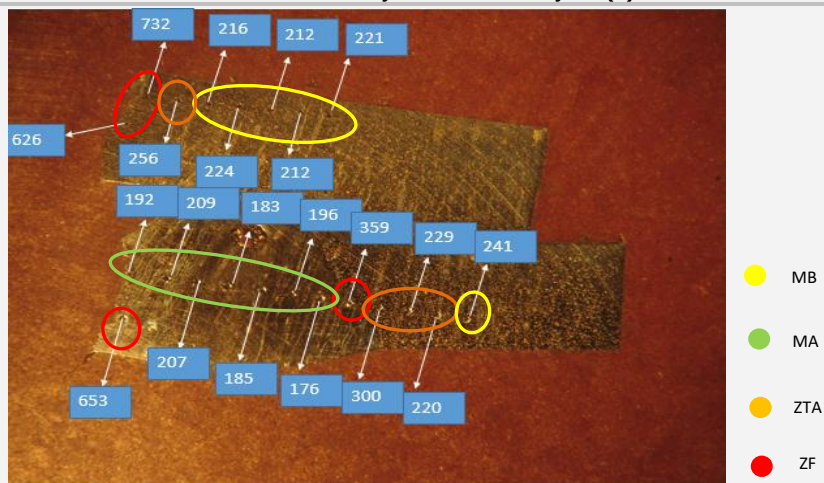


ZONA, AMPLIAÇÃO: Martensite e Ledeburite, Ampliação 200x



ANÁLISE DA DUREZA

DIAGRAMA DE LOCALIZAÇÃO DAS INDENTAÇÕES (A)



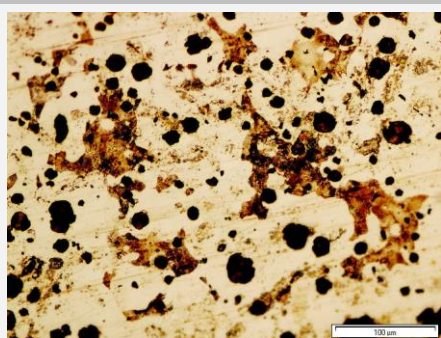
ANEXO E- REGISTO DE EXPERIÊNCIA

DADOS GERAIS

MATERIAL DE BASE	SIBODUR 450		CODIGO DA AMOSTRA	1P0W2P500	Nº PASSES	2
ELÉCTRODOS	SOLDADURA	FN10	DESIGNAÇÃO ELÉTRODO	Elétrodo Revestido		
TEMPERATURAS	PRÉ-AQUECIMENTO (°C)		PÓS-AQUECIMENTO (°C)	500		
DURAÇÃO	PRÉ-AQUECIMENTO (H)		PÓS-AQUECIMENTO (H)	2		

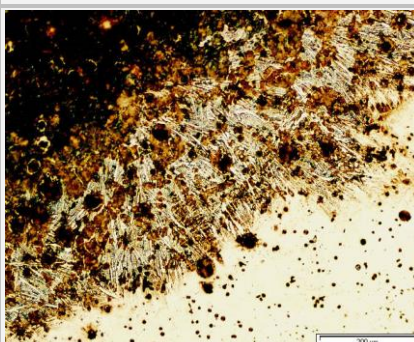
ASPECTO DAS MICRO-ESTRUTURAS

ZONA, AMPLIAÇÃO: Material base (matriz ferrítico-perlita), Ampliação 100x

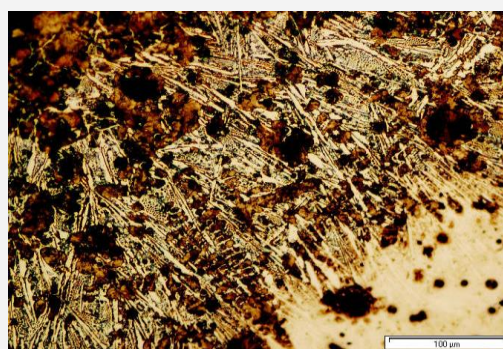
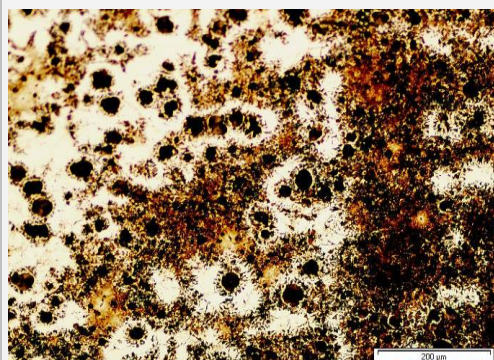


ZONA, AMPLIAÇÃO: Difusão de carbono, Ampliação 100x

ZONA, AMPLIAÇÃO: ZPF, Ampliação 100x



ZONA, AMPLIAÇÃO: Ledeburite, Ampliação 200x



ANÁLISE DA DUREZA

DIAGRAMA DE LOCALIZAÇÃO DAS INDENTAÇÕES (A)



- MB
- MA
- ZTA
- ZF

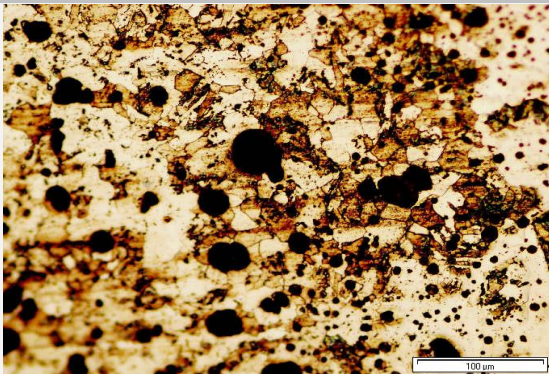
ANEXO F- REGISTO DE EXPERIÊNCIA

DADOS GERAIS

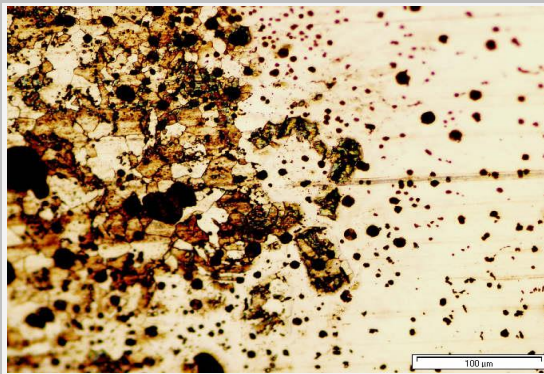
MATERIAL DE BASE	SIBODUR 450		CÓDIGO DA AMOSTRA	1P0W2P700	Nº PASSES	2
ELÉCTRODOS	SOLDADURA	FN10	DESIGNAÇÃO ELÉTRODO	Eléctrodo Revestido		
TEMPERATURAS	PRÉ-AQUECIMENTO (°C)		PÓS-AQUECIMENTO (°C)	700		
DURAÇÃO	PRÉ-AQUECIMENTO (H)		PÓS-AQUECIMENTO (H)	2		

ASPECTO DAS MICRO-ESTRUTURAS

ZONA, AMPLIAÇÃO:ZTA, Ampliação 100x

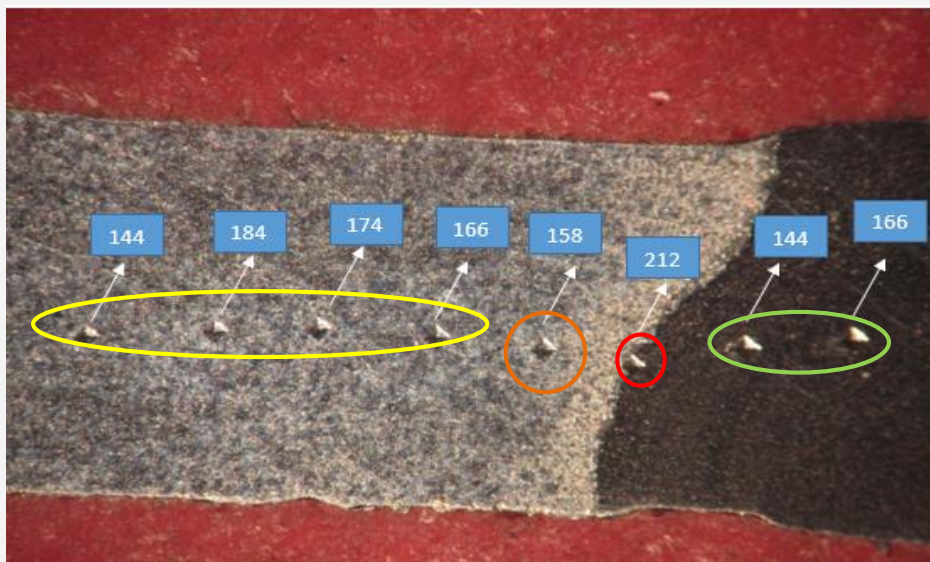


ZONA, AMPLIAÇÃO:ZTA e MA, Ampliação 100x



ANÁLISE DA DUREZA

DIAGRAMA DE LOCALIZAÇÃO DAS INDENTAÇÕES (A)



- MB
- MA
- ZTA
- ZF

ANEXO G- REGISTO DE EXPERIÊNCIA

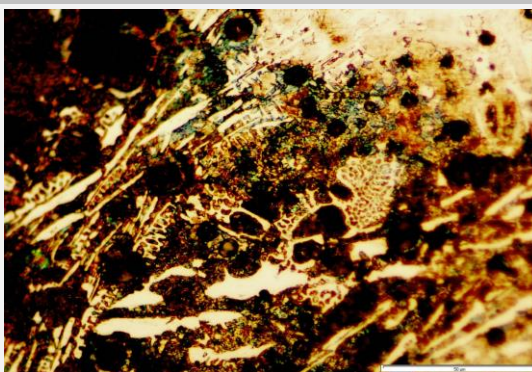
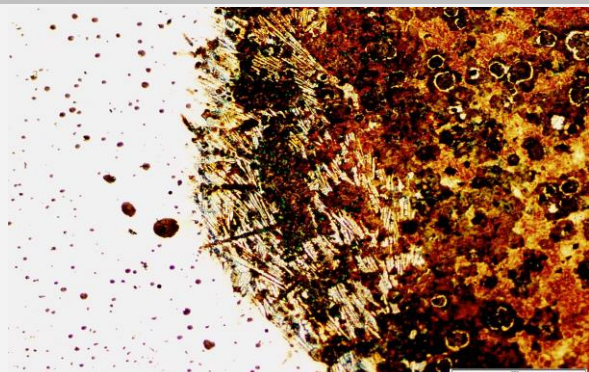
DADOS GERAIS

MATERIAL DE BASE	SIBODUR 450		CÓDIGO DA AMOSTRA	2P300W2	Nº PASSES	2
ELÉCTRODOS	SOLDADURA	FN10	DESIGNAÇÃO ELÉTRODO	Eléctrodo Revestido		
TEMPERATURAS	PRÉ-AQUECIMENTO (°C)	300	PÓS-AQUECIMENTO (°C)			
DURAÇÃO	PRÉ-AQUECIMENTO (H)	2	PÓS-AQUECIMENTO (H)			

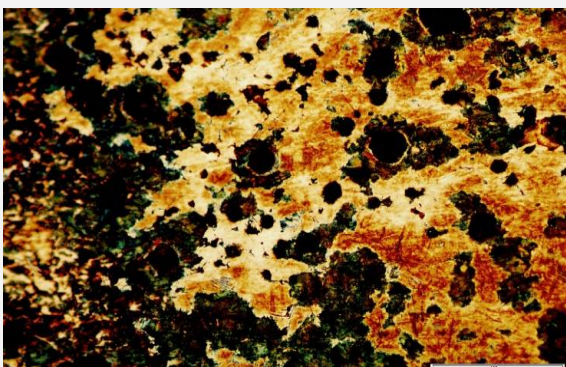
ASPECTO DAS MICRO-ESTRUTURAS

ZONA, AMPLIAÇÃO: Interface, Ampliação 100x

ZONA, AMPLIAÇÃO: Ledeburite, Ampliação 500x

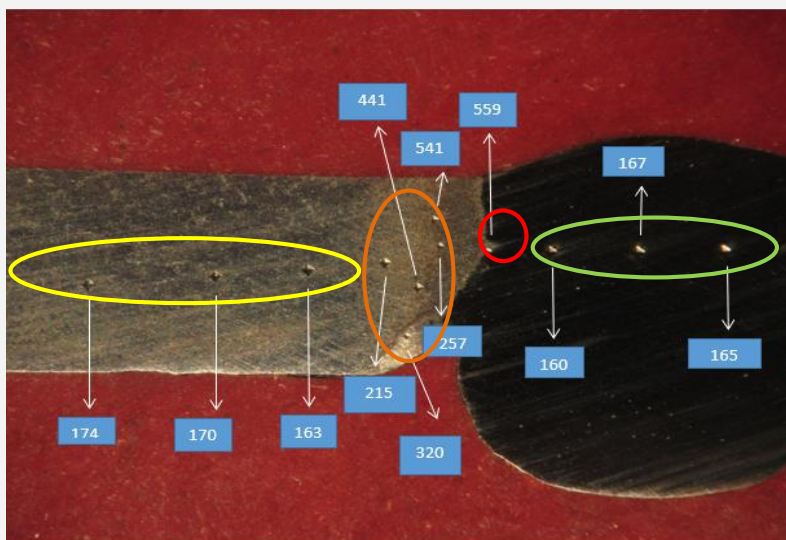


ZONA, AMPLIAÇÃO: Martensite, Ampliação 500x



ANÁLISE DA DUREZA

DIAGRAMA DE LOCALIZAÇÃO DAS INDENTAÇÕES (A)




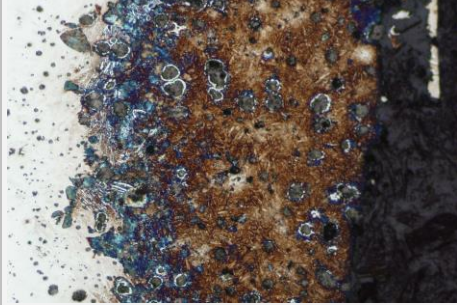
- MB
- MA
- ZTA
- ZF

ANEXO H- REGISTO DE EXPERIÊNCIA

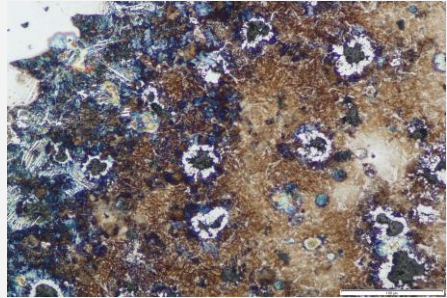
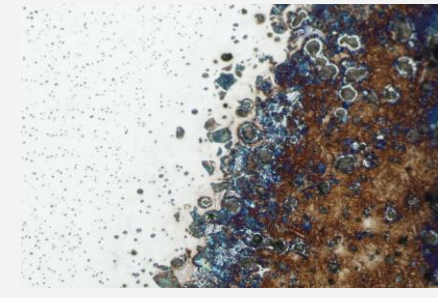
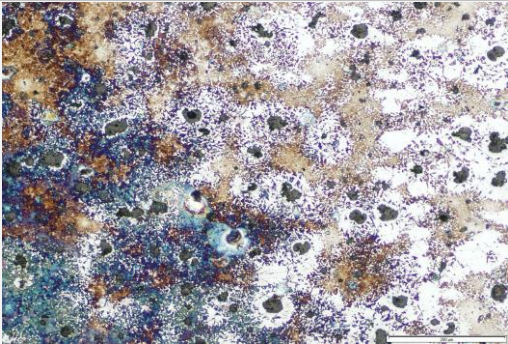
DADOS GERAIS

MATERIAL DE BASE	SIBODUR 450		CODIGO DA AMOSTRA	3P300W2P400	Nº PASSES	2
ELÉCTRODOS	SOLDADURA	FN10	DESIGNAÇÃO ELÉTRODO	Elétrodo Revestido		
TEMPERATURAS	PRÉ-AQUECIMENTO (°C)	300	PÓS-AQUECIMENTO (°C)	400		
DURAÇÃO	PRÉ-AQUECIMENTO (H)	1	PÓS-AQUECIMENTO (H)	2		

Fratura

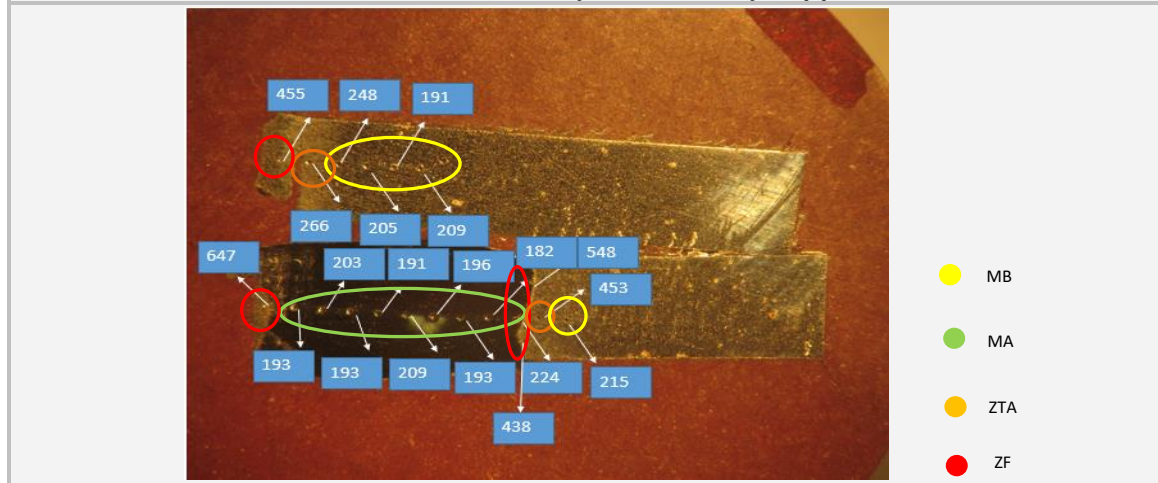
Área de fratura	
Provete	Metalografia
	

ASPECTO DAS MICRO-ESTRUTURAS

ZONA, AMPLIAÇÃO: ZPF, ZTA, Ampliação 200x	ZONA, AMPLIAÇÃO: MA, ZPF, ZTA, Ampliação 100x
	
ZONA, AMPLIAÇÃO: MB (DIFUSÃO DE CARBONO), Ampliação 200x	
	

ANÁLISE DA DUREZA

DIAGRAMA DE LOCALIZAÇÃO DAS INDENTAÇÕES (A)

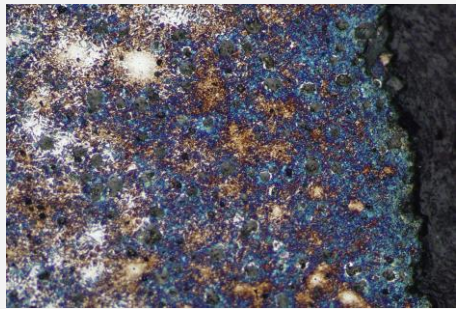


ANEXO I- REGISTO DE EXPERIÊNCIA

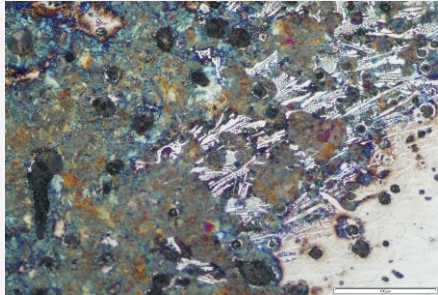
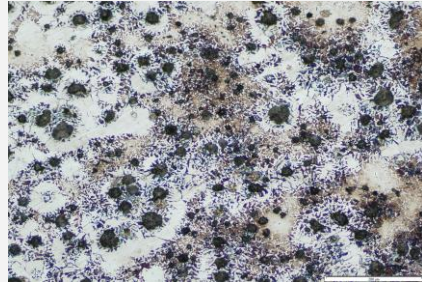
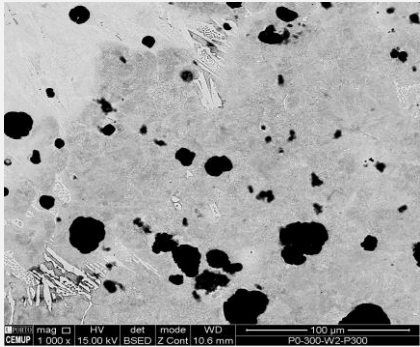
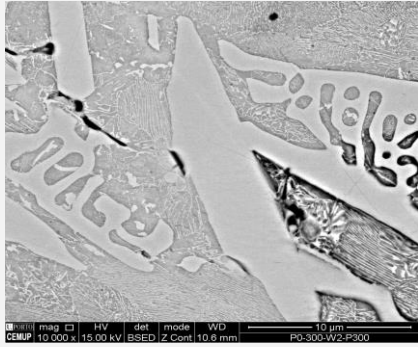
DADOS GERAIS

MATERIAL DE BASE	SIBODUR 450	CODIGO DA AMOSTRA	2P300W2P300	Nº PASSES	2
ELÉCTRODOS	SOLDADURA	FN10	DESIGNAÇÃO ELÉTRODO	Elétrodo Revestido	
TEMPERATURAS	PRÉ-AQUECIMENTO (°C)	300	PÓS-AQUECIMENTO (°C)	300	
DURAÇÃO	PRÉ-AQUECIMENTO (H)	1	PÓS-AQUECIMENTO (H)	2	

Fratura

Área de fratura	Provete	Metalografia
		

ASPECTO DAS MICRO-ESTRUTURAS

ZONA, AMPLIAÇÃO: Ledeburite, Ampliação 200x	ZONA, AMPLIAÇÃO: MB (Difusão de carbono e ferrite), Ampliação 100x
	
ZONA, AMPLIAÇÃO: ZPF e ZTA (Ledeburite)	ZONA, AMPLIAÇÃO: Cementite
	

ANÁLISE DA DUREZA

DIAGRAMA DE LOCALIZAÇÃO DAS INDENTAÇÕES (A)

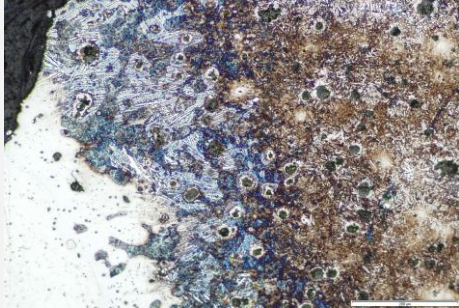


ANEXO J- REGISTO DE EXPERIÊNCIA

DADOS GERAIS

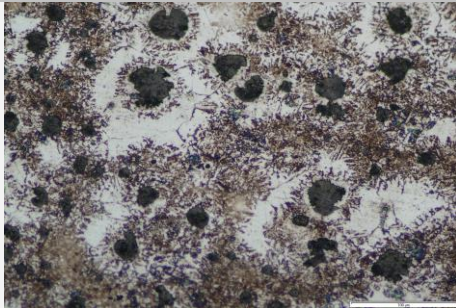
MATERIAL DE BASE	SIBODUR 450	CÓDIGO DA AMOSTRA	2P300W2P500	Nº PASSES	2
ELÉCTRODOS	SOLDADURA	FN10	DESIGNAÇÃO ELÉTRODO	Eléctrodo Revestido	
TEMPERATURAS	PRÉ-AQUECIMENTO (°C)	300	PÓS-AQUECIMENTO (°C)	500	
DURAÇÃO	PRÉ-AQUECIMENTO (H)	1	PÓS-AQUECIMENTO (H)	2	

Fratura

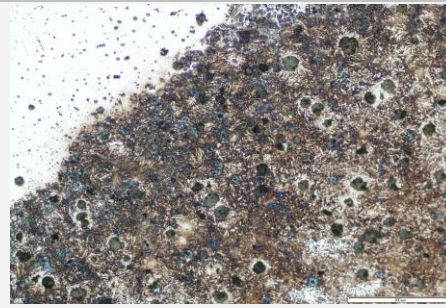
Área de fratura	Provete	Metalografia
		

ASPECTO DAS MICRO-ESTRUTURAS

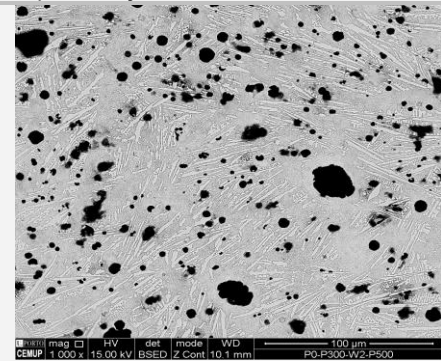
ZONA, AMPLIAÇÃO: Martensite, Ampliação 200x



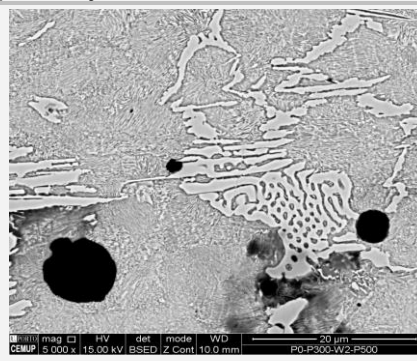
ZONA, AMPLIAÇÃO: MA, ZPF, ZTA, Ampliação 100x



ZONA, AMPLIAÇÃO: Ledeburite



ZONA, AMPLIAÇÃO: Cementite



ANÁLISE DA DUREZA

DIAGRAMA DE LOCALIZAÇÃO DAS INDENTAÇÕES (A)

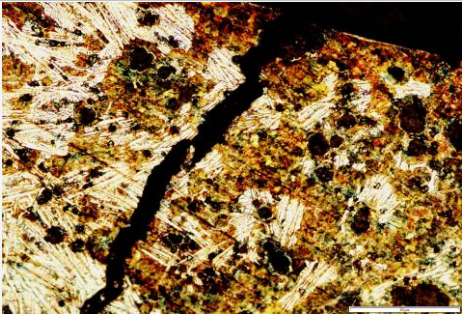


- MB
- MA
- ZTA
- ZF

ANEXO K- REGISTO DE EXPERIÊNCIA

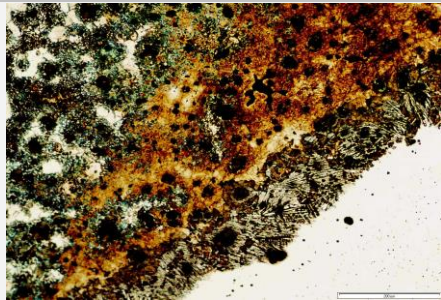
DADOS GERAIS

MATERIAL DE BASE	SIBODUR 450	CODIGO DA AMOSTRA	2P0W2	Nº PASSES	2
ELÉCTRODOS	SOLDADURA	Eléctrodo Revestido	DESIGNAÇÃO ELÉTRODO	FN10	

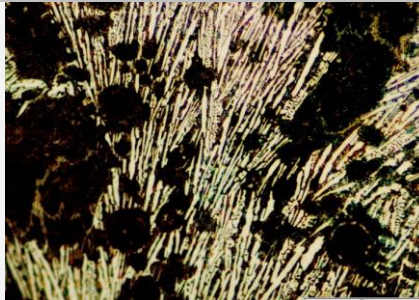
Metalografia	Fratura
	

ASPECTO DAS MICRO-ESTRUTURAS

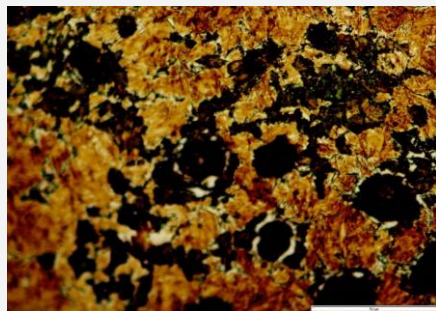
ZONA, AMPLIAÇÃO: Interface, Ampliação 100x



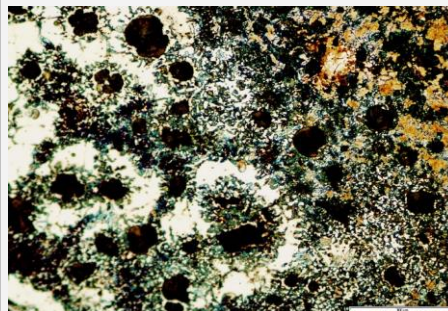
ZONA, AMPLIAÇÃO: Ledeburite, Ampliação 500x



ZONA, AMPLIAÇÃO: Martensite, Ampliação 500x



ZONA, AMPLIAÇÃO: Difusão de carbono, Ampliação 200x



ANÁLISE DA DUREZA

DIAGRAMA DE LOCALIZAÇÃO DAS INDENTAÇÕES (A)

