

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA**  
**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA**  
**PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**

**CARLOS HENRIQUE REIS DOS SANTOS**

**ESTRUTURAÇÃO DE UM PROCEDIMENTO PARA REPARO EM  
TUBULAÇÕES DE FERRO FUNDIDO E AÇO, UTILIZANDO  
SOLDAGEM COM ELETRODO ESPECIAL**

**VOLTA REDONDA**

**2019**

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA**  
**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA**  
**PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**

**ESTRUTURAÇÃO DE UM PROCEDIMENTO PARA REPARO EM TUBULAÇÕES  
DE FERRO FUNDIDO E AÇO, UTILIZANDO SOLDAGEM COM ELETRODO  
ESPECIAL**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Materiais, sob a orientação do prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe e co-orientação do prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago na área de concentração de processamento e caracterização de materiais metálicos, Cerâmicos e Poliméricos, linha de pesquisa em materiais Metálicos.

Aluno:

Carlos Henrique Reis dos Santos

Orientador:

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

Co-Orientador:

Roberto de Oliveira Magnago,

**VOLTA REDONDA**

**2019**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tação Wagner - CRB 7/RJ 4316

S237e Santos, Carlos Henrique Reis dos.  
Estruturação de um procedimento para reparo em tubulações de ferro fundido e aço, utilizando soldagem com eletrodo especial. / Carlos Henrique Reis dos Santos. - Volta Redonda: UniFOA, 2019. 121 p. : Il

Orientador (a): Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em Materiais, 2019

1. Materiais - dissertação. 2. Ferros-fundido cinzento. 3. Chumbo. 4. Aço carbono. I. Habibe, Alexandre Fernandes. II. Centro Universitário de Volta Redonda. III. Título.

CDD – 620.1

## FOLHA DE APROVAÇÃO

---

**Aluno: Carlos Henrique Reis dos Santos**

**ESTRUTURAÇÃO DE UM PROCEDIMENTO PARA REPARO EM  
TUBULAÇÕES DE FERRO FUNDIDO E AÇO, UTILIZANDO SOLDAGEM  
COM ELETRODO ESPECIAL**

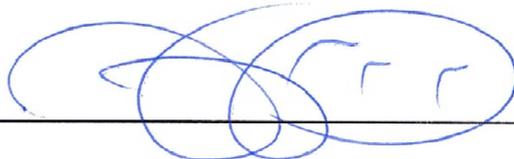
Orientador:

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

Coorientador:

Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago

Banca Examinadora



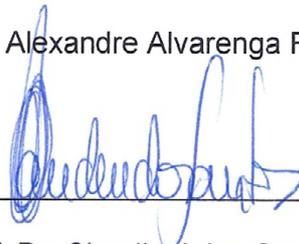
---

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe



---

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira



---

Prof. Dr. Claudinei dos Santos

## Dedicatória

Dedico esta dissertação a meu filho José e minha esposa Cenir, pelo apoio incondicional e constante incentivo.

Dedico também ao meu Orientador Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe e ao meu Co-Orientador Roberto de Oliveira Magnago, pela confiança, paciência, incentivo, amizade e excelente orientação.

Sem o apoio de ambos, este trabalho não teria sido realizado. A eles, meu muito, muito obrigado.

## AGRADECIMENTOS

Agradecer a DEUS, senhor de todas as honras. E dedicar a meu pai que se sentiria honrado de me ver mestre, a minha família que deixou o exemplo do estudo.

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, deram sua colaboração para que este trabalho fosse concluído.

Agradeço ao meu orientador e co-orientador professores Dr. Alexandre Fernandes Habibe e Roberto de Oliveira Magnago pela orientação deste trabalho, feita com dedicação e interesse na conduta do mesmo.

## RESUMO

O processo muito utilizado no reparo de tubulações subterrâneas em Ferro Fundido, usando-se o chumbo como principal elemento, motivou este estudo na busca de alternativas otimizadas para estes reparos em campo. O objetivo deste trabalho é desenvolver um procedimento operacional, como ferramenta para promover o aprendizado acerca da soldagem em ferros fundidos. No presente trabalho foi estruturado, estudos com eletrodos de aço carbono e elementos de liga como o Níquel, para avaliar as propriedades da ZTA antes e depois de aplicados os procedimentos de soldagem em amostras de ferro fundido e aço carbono, correlacionando a eficiência da fusão destes elementos de liga com o aço e o ferro fundido. Os procedimentos e ensaios mostraram de forma objetiva e prática, as técnicas de recuperação de tubulações em ferros fundido ilustrados com tabelas e gráficos. É apresentada a metodologia e consumíveis apropriados para a aplicação de soldagem em ferro fundido. De acordo com os resultados obtidos na medição de microdureza Vickers nas soldas realizadas com eletrodo a base de ferro e com eletrodo a base de níquel utilizando procedimento adequado, foi possível verificar que os mesmos se mantiveram compatíveis com os encontrados na literatura para a ZTA e metal de adição. As análises de suas microestruturas através das imagens obtidas no MEV, mostraram que a utilização do procedimento juntamente com o eletrodo a base de níquel, inibiram o aparecimento de microconstituintes como a martensita. Conclui-se então que as ações tomadas acima, garantem a eficiência do processo de soldagem entre estes elementos, otimizam os custos de reparos, as trocas destas tubulações e extinguem o fluxo de vapor de chumbo juntamente com seu descarte na natureza, que ocasiona doença e contaminação do solo respectivamente.

**Palavras chave:** ferros-fundido cinzento, chumbo, aço-carbono, soldagem e tubulação.

## ABSTRACT

The process most used to repair down pipes in Cast Iron, using lead like as the main element, motivated this job in the search optimized for these repairs. The principal goal of this document/report is to develop a operational procedure as a tooling to promote knowledges about welding in cast iron. In this document/report, is being showed studies and procedures with carbon electrodes and alloying elements such as Nickel, to analyse the Thermically Affect Zone (TAZ) property before and after the application of welding procedures in prototypes of cast iron and carbon steel relating the fusion efficiency of these alloying elements with carbon steel and cast iron. The procedures and essays show clearly, all the techniques to recovery of cast iron pipes illustrated in graphic charts. This way is being showed the methodology and consumables used to application of welding in cast iron. In according with the results obtained, using the procedure Vickers in weld bead realized with iron base electrode and nickel base electrode, was possible to check that the both was compatible with the results round in the TAZ literature and filler metal. The analyses of micro structure showed that the procedure used with nickel base electrode, decrease the appearance of martensite. This way the actions realized, assure the efficiency of welding process between this elements, optimize the stream plumb flow together with the natural environment respectively.

**Keywords:** gray cast iron, lead, carbon steel, welding, gray and tubing, Thermically Affect Zone (TAZ).

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tubulação em ferro fundido enterrada e rompida. ....	16
Figura 2: Dispositivos necessários para o reparo. ....	17
Figura 3: Montagem da bolsa nas tubulações. ....	18
Figura 4: Inserção de chumbo derretido na bolsa. ....	18
Figura 5: Rebatimento do chumbo derretido na bolsa. ....	19
Figura 6: Diagrama Fe-C dos aços e TTT. ....	24
Figura 7: Microestrutura do aço x velocidade de resfriamento pós austenitização. ....	26
Figura 8: Esquema de soldagem e parâmetros envolvidos na determinação da energia de soldagem. ....	28
Figura 9: Ciclo térmico de soldagem. ....	28
Figura 10: Curvas obtidas com diferentes energias de soldagem (H1 e H2). ....	30
Figura 11: Escoamento do calor nas junções (a) de topo (b) em ângulo ou T. ....	31
Figura 12: Região de uma solda por fusão. ....	32
Figura 13: ZF de uma solda no aço de baixo carbono. ....	33
Figura 14: Diluição na seção transversal, (a) depositado sobre chapa e (b) solda topo. ....	34
Figura 15: Capacidade dissolução do hidrogênio no ferro líquido e sólido. ....	35
Figura 16: Área de uma peça fundida, com três regiões características. ....	36
Figura 17: Metalografia entre a ZTA e ZF no aço inoxidável ferrítico (100X). ....	37
Figura 18: Macrografia na solda de vários passes no aço de baixo carbono. ....	38
Figura 19: ZTA aço baixo carbono: A-Crescimento grão, B-Refino grão, C-Intercrítica ....	39
Figura 20: Diagrama de equilíbrio do Fe – C. ....	43
Figura 21: Exemplo solidificação ferro fundido apresentando 3,4% C. ....	44
Figura 22: Forma do grafite nos ferros fundidos cinzentos. ....	46
Figura 23: Tipos e distribuição veios de grafite em ferros fundidos. ....	48
Figura 24: Ensaio de tração em barras de ferro fundido cinzento. ....	52
Figura 25: Espessura peças e suas resistências à tração X carbono equivalente. ....	53
Figura 26: Amortecimento do ferro fundido comparado com a do aço. ....	55
Figura 27: Evolução processos de soldagem ao longo do tempo. ....	57
Figura 28: Arco voltaico entre eletrodo tungstênio e bloco de cobre atmosfera de argônio. ....	58
Figura 29: Local de um arco de solda. ....	59
Figura 30: Curvas eletrodo tungstênio e anodo cobre para diferentes comprimentos arco. ....	60
Figura 31: Desenho soldagem usando arco elétrico em eletrodo revestido. ....	61
Figura 32: Esquema elétrico básico do equipamento de soldagem ....	62
Figura 33: Diagrama esquemático de um motor-gerador. ....	64
Figura 34: Curva característica da fonte e a comparação gradiente temperatura. ....	64
Figura 35: Tensões residuais longitudinais longo direção transversal (y) solda topo por fusão. ....	70
Figura 36: Distorção soldagem: (a) transversal; (b) longitudinal; (c) distorção angular e (d) flexão ....	71
Figura 37 : Local e sentido da retirada das amostras nas tubulações. ....	74
Figura 38: Amostras para ensaios em laboratório. ....	75
Figura 39: Amostras das soldaduras conforme procedimento. ....	77
Figura 40: Fluxograma apresentando o passo a passo do método utilizado para a soldagem das amostras. ....	79
Figura 41: Amostras das soldagens. ....	81

Figura 42: Microdureza nas amostras das Tubulações. ....	84
Figura 43: Microdureza nas Soldas das Amostras das Tubulações. ....	86
Figura 44: MEV na amostra a1(aço carbono) de 1500x e 5000x .....	89
Figura 45: MEV na amostra a2 (ferro fundido cinzento) de 500x e 1000x. ....	90
Figura 46: MEV na amostra a3 (ferro fundido cinzento) 500x e de 1000x. ....	91
Figura 47: MEV na amostra b1 (aço carbono) 1500x e de 3000x. ....	91
Figura 48: MEV na amostra b2 (ferro fundido) 250x e de 1500x.....	92
Figura 49: MEV na amostra b3 (ferro fundido) 500x e de 3000x.....	92
Figura 50: MEV na amostra a1Xa2 (aço carbono e ferro fundido cinzento); Visão Geral 25x.....	93
Figura 51: MEV na amostra a1Xa2(aço carbono e ferro fundido cinzento); Metal Base2000x.....	93
Figura 52: MEV na amostra a1Xa2(aço carbono e ferro fundido cinzento); Metal Adição 500x.....	94
Figura 53: MEV na amostra a1Xa2(aço carbono e ferro fundido cinzento); Metal Base + ZTA + Metal Adição 500x.....	94
Figura 54: MEV na amostra a1Xa2(aço carbono e ferro fundido cinzento); ZTA 2000x.....	95
Figura 55: MEV na amostra a2Xa3 (entre ferros fundidos); Visão Geral; 25x. ....	96
Figura 56: MEV na amostra a2Xa3 (entre ferros fundidos); Metal Base; 500x.....	96
Figura 57: MEV na amostra a2Xa3 (entre ferros fundidos); Metal Adição; 500x. ....	97
Figura 58:MEV na amostra a2Xa3 (entre ferros fundidos); ZTA + Metal Adição; 500x. ....	97
Figura 59: MEV na amostra a2Xa3 (entre ferros fundidos); ZTA; 1000x.....	98
Figura 60: MEV na amostra b1Xb2 (aço carbono e ferro fundido cinzento); visão geral; 25x. ....	98
Figura 61: MEV na amostra b1Xb2 (aço carbono e ferro fundido cinzento);; Metal Base; 2000x.....	99
Figura 62: MEV na amostra b1Xb2 (aço carbono e ferro fundido cinzento);; Metal Adição; 2000x. ....	99
Figura 63: MEV na amostra b1Xb2 (aço carbono e ferro fundido cinzento); ZTA 2000x.....	100
Figura 64: MEV na amostra b2Xb3 (entre ferros fundidos cinzentos); visão geral; 25x.....	100
Figura 65: MEV na amostra b2 Xb3 (entre ferros fundidos cinzentos); Metal Base; 500x. ....	101
Figura 66: MEV na amostra b2 Xb3 (entre ferros fundidos cinzentos); Metal Adição; 1000x.....	101
Figura 67: MEV na amostra b2 Xb3 (entre ferros fundidos cinzentos); ZTA 1000x.....	102

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características do ferro fundido Cinzento.....	23
Tabela 2: Faixa composição de ferros fundidos típicos comuns.....	42
Tabela 3: Agrupamento e a composição química ferros fundidos cinzentos / ASTM. ....	49
Tabela 4: Classes dos ferros fundidos segundo a norma da ASTM.....	49
Tabela 5: Propriedades mecânicas dos ferros fundidos / ASTM.....	50
Tabela 6: Características mecânicas ferros fundidos cinzentos conforme norma DIN.....	54
Tabela 7: Aplicações dos ferros fundidos conforme as classes ASTM. ....	56
Tabela 8: Métodos aliviar tensões residuais. ....	72
Tabela 9: Separação e identificação das amostras. ....	76
Tabela 10: Parâmetros utilizados na soldagem. ....	76
<i>Tabela 11: Ensaios de Microdureza Vickers nas amostras de ferro fundido e aço carbono. ....</i>	<i>83</i>
<i>Tabela 12: Ensaios Microdureza Vickers nas amostras das soldas em ferro fundido e aço carbono. ..</i>	<i>85</i>
Tabela 13: Características do ferro fundido Cinzento.....	87
Tabela 14: Dureza nos eletrodos E8018.....	88

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Fe-C	Ferro Carbono
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Cúbica de Face Centrada
TTT	Tempo – Temperatura – Transformação
TRC	Transformações com Resfriamento Contínuo
ZF	Zona Fundida
ZTA	Zona Térmica Afetada
ZAC	Zona Afetada pelo Calor
MB	Metal Base
ASTM	American Society for the Testing of Materials
DIN	Deutsches Institute for Normung E.V
HRB	Dureza Rockwell
HB	Dureza Brinell
HV	Dureza Vickers
CE	Carbono Equivalente

## LISTA DE EQUAÇÕES

<i>Equação 1: Energia da Solda = <math>H = \eta \cdot V \cdot I_v</math>.....</i>	27
<i>Equação 2: Temperatura de Pico = <math>1 T_p - T_0 = 4,133 \rho c h H + 1 T_f - T_0</math> .....</i>	29
<i>Equação 3: Variação Temperatura = <math>\Delta t = H 2 \pi k ( 1500 - T_0 - 1800 - T_0 )</math> .....</i>	31
<i>Equação 4: Coeficiente de Diluição <math>\delta =</math> Massa fundida do metal base / Massa total do cordão de solda x 100 %.....</i>	34
<i>Equação 5: Carbono Equivalente % = <math>C_t + \%Si + \%P_3</math> .....</i>	52
<i>Equação 6: Voltagem no eletrodo <math>V = V_a + V_c + E_{ia}</math> .....</i>	59
<i>Equação 7: Energia no arco elétrico <math>Q = V I t</math>.....</i>	60
<i>Equação 8: Dilatação em um metal <math>\Delta l = l - l_0 = l_0 \cdot \alpha (T - T_0)</math>.....</i>	69

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>1.1 Contexto</b> .....	19
<b>1.2 Descrição do Problema</b> .....	20
<b>1.3 Relevância</b> .....	20
<b>1.4 Objetivos</b> .....	21
<b>1.4.1 Geral</b> .....	21
<b>1.4.2 Específicos</b> .....	21
<b>1.5 Delimitação do Trabalho</b> .....	21
<b>2 REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA</b> .....	22
<b>2.1 Fundamentos da Metalurgia da Soldagem</b> .....	22
<b>2.1.1 Metalurgia Física dos Aços</b> .....	22
<b>2.1.2 Fluxo de Calor</b> .....	27
<b>2.1.3 Macroestrutura de Soldas por Fusão</b> .....	32
<b>2.1.4 Características da Zona Fundida</b> .....	33
<b>2.1.5 Características da Zona Termicamente Afetada</b> .....	39
<b>2.2 Os Ferros Fundidos</b> .....	40
<b>2.2.1 Metalurgia dos Ferros Fundidos</b> .....	40
<b>2.2.2 Ferro fundido cinzento</b> .....	46
<b>2.2.3 Grafite Livre</b> .....	48
<b>2.2.4 SiboDur</b> .....	57
<b>2.3 SOLDAGEM</b> .....	57
<b>2.3.1 Soldagem</b> .....	57
<b>2.3.2 Arco Elétrico de Soldagem</b> .....	58
<b>2.3.3 Processo de Soldagem com Eletrodo Revestido</b> .....	61
<b>2.3.4 Tensões Residuais e Distorções em Soldagem</b> .....	69
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	74
<b>3.1 Materiais</b> .....	74
<b>3.1.1 As Amostras de Ferro Fundido e Aço Carbono</b> .....	74
<b>3.1.2 O Eletrodo de Níquel e E8018 Baixa Liga</b> .....	77
<b>3.2 Métodos</b> .....	78
<b>3.2.1 Cortadora Metalográfica</b> .....	81
<b>3.2.2 Embutimento das Amostras</b> .....	81
<b>3.2.3 Identificação das Amostras</b> .....	82

3.2.4 Lixamento e Polimento das Amostras .....	82
3.2.5 Microdureza das Amostras .....	82
3.2.6 Microscopia Eletrônica de Varredura nas Amostras .....	82
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	83
4.1 Ensaios de Microdureza Vickers nas amostras .....	83
4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura nas amostras .....	88
5 CONCLUSÕES.....	103
6 TRABALHOS FUTUROS .....	104
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	105
8 APÊNDICE 01.....	109

## 1. INTRODUÇÃO

As soldas realizadas em ferros fundidos podem ser aceitas num grau satisfatório, apesar das dificuldades encontradas para este processo. O trabalho encaminha a possibilidade de substituição do sistema atual de reparo de tubulações em ferro fundido, que se baseia em utilizar adequadamente o chumbo como junção entre o ferro fundido e o aço carbono, por reparo utilizando soldagem com arco elétrico e consumível em eletrodo revestido [1], adequadamente dimensionado para o tipo de tubulação e características encontradas.

Determinada Indústria Siderúrgica situada em Volta Redonda, foi utilizada neste estudo como “case”, possui aproximadamente sete quilômetros de extensão. Em seu parque industrial, estima-se que do total de tubulação instalada, a maior parte seja de tubulações em ferro fundido. A maioria destas tubulações é subterrânea dificultando ainda mais esses reparos quando aparecem trincas. Possui tubulações instaladas com mais de 50 anos de funcionamento e com suas estruturas degradadas.

O procedimento de reparo consiste na identificação do local com vazamento e escavação do local até que a tubulação e o vazamento estejam devidamente identificados. Em seguida é realizada uma escavação maior de forma que o espaço disponível seja suficiente para o acesso de trabalhadores. A figura 01 representa esta condição após escavação ao redor de uma tubulação em ferro fundido com trinca em sua parede, provocando o vazamento de água.



Figura 1: Tubulação em ferro fundido enterrada e rompida.

Fonte: Siderúrgica de Volta Redonda (2016).

Uma equipe Técnica verifica o tipo de tubulação que compõe a rede de água e as suas dimensões. De posse destas informações, a equipe precisa montar dispositivos que servirão para recuperação deste trecho de tubo danificado. Vale ressaltar que para efetuar o reparo, é retirado um trecho deste tubo em ferro fundido e instalado outro tubo de aço carbono [2] no lugar para se efetuar a emenda. Enquanto acontece a preparação em campo no local de reparo, é medido o diâmetro da tubulação e na oficina prepara-se o material para instalação de uma bolsa de chumbo onde servirá de emenda da tubulação de ferro fundido com aço carbono ou ferro fundido com ferro fundido. A figura 02 apresenta os materiais necessários utilizados para este tipo de reparo nestas tubulações de ferro fundido.



Figura 2: Dispositivos necessários para o reparo.

Fonte: Siderúrgica de Volta Redonda (2016).

Para realizar o reparo nestas tubulações em ferro fundido, é necessária a preparação da tubulação de ferro fundido e a de aço carbono. Logo após, a bolsa utilizada para emenda da tubulação é soldada ao aço carbono [3] quando este reparo é aço carbono com ferro fundido. Em seguida a bolsa e os dispositivos utilizados para o reparo, são montados na tubulação de ferro fundido conforme figura 03.



Figura 3: Montagem da bolsa nas tubulações.

Fonte: Siderúrgica de Volta Redonda (2016).

Depois de preparadas às tubulações e a bolsa, começa o trabalho artesanal de reparo destas tubulações em ferro fundido. A equipe funde com um maçarico a barra de chumbo, conforme ilustrado na figura 04, utilizando a panela apresentada na figura 02, este chumbo é inserido na bolsa e esta é vedada com barro vermelho de forma a não haver vazamento.



Figura 4: Inserção de chumbo derretido na bolsa.

Fonte: Siderúrgica de Volta Redonda (2016).

Ao término do acabamento da vedação desta junta, com a bolsa repleta de chumbo, inicia-se os ajustes finais mostrados na figura 5 para que este possa aderir completamente à parte periférica da tubulação evitando vazamento. A figura 05 apresenta estas atividades.



Figura 5: Rebatimento do chumbo derretido na bolsa.

Fonte: Siderúrgica de Volta Redonda (2016).

### 1.1 Contexto

No final das análises desta operação de reparo, foram detectados os seguintes problemas abaixo relacionados:

- a) A inalação de vapor de chumbo [4] pelas pessoas envolvidas no reparo;
- b) Vazamento da tubulação durante o período de assentamento necessitando de novo reparo;
- c) Vazamento da tubulação após o período de assentamento e já recoberto por terra devido ao assentamento da tubulação no local.
- d) Tentativas de soldagem com eletrodos não apropriados para o metal base destas tubulações, não obtendo sucesso neste processo.

Dessa forma, pode-se classificar o processo atual mostrado anteriormente como atividade insalubre e seu desempenho de risco.

## **1.2 Descrição do Problema**

O chumbo utilizado no reparo das tubulações de ferro fundido, é conhecido como um metal pesado muito encontrado em nossa crosta terrestre. A inalação prolongada ocasiona intoxicação e é conhecida como plumbismo ou saturnismo e hoje considerada como risco ocupacional. Desta forma torna-se necessário reduzir sua utilização no processo de reparo destas tubulações tendo em vista a quantidade de tubulações em ferro fundido existente na planta siderúrgica. Conforme afirma Sanhueza [5], as empresas que produzem chumbo não estão de acordo com as exigências dos órgãos de controle ambiental no Brasil. Segundo Valverde [6] a inalação do chumbo, é uma das mais importantes vias de contaminação. O chumbo quando no organismo, vai diretamente para o sangue e também para os ossos. Como não gera sintomas de intoxicação, segundo Després [7], tem-se como indício de inalação de chumbo o gosto metálico na boca, a insônia, grau de irritabilidade e dores nos músculos e articulações. Entretanto, afirma ser em efeitos específicos os que aparecem entre outros [8], nos sistemas nervoso, cardiovascular e reprodutor. Porém, Rastogi [4], afirma, que o nosso organismo suporta o limite máximo de chumbo entre 10 a 15 hg/dl de sangue, sem danos ao organismo. Quanto ao descarte de chumbo [9], constatou ser a contaminação do solo em áreas habitadas um gerador de problemas em cadeias alimentares. Além dos fatores citados, temos igualmente de mesma relevância, o tempo de reparo, o custo envolvido neste processo, custo com retrabalho na bolsa de chumbo e que será visto neste trabalho posteriormente.

## **1.3 Relevância**

A situação crítica encontrada para o reparo com chumbo nas tubulações subterrâneas de Ferro Fundido e o tempo demasiadamente longo para se efetuar estas técnicas de brasagens com estes materiais, levou-se acreditar que estes serviços de manutenção devem ser realizados utilizando técnicas de soldagem em Ferro Fundido Cinzento, de forma, a eliminar o contaminante chumbo destas atividades e mostrar que usando o eletrodo correto se permite a solda neste tipo de metal base, otimizando o tempo realizado nestes reparos.

## **1.4 Objetivos**

Elaboração de um Procedimento para soldagem em tubulações de Ferro Fundido, sendo este, mais especificamente voltado ao Ferro Fundido Cinzento.

### **1.4.1 Geral**

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um procedimento operacional, como ferramenta para modificar o processo atual existente para reparo de tubulações de ferros fundidos de forma a aumentar a confiabilidade no reparo, reduzir os custos com o retrabalho nas bolsas de chumbo e finalmente eliminar a condição de inalação do chumbo nestas atividades.

### **1.4.2 Específicos**

Apresentar conceitos da estrutura e propriedades do ferro fundido, especificamente do cinzento, usado das tubulações da planta siderúrgica estudada, voltados para a soldagem deste tipo de material.

Desenvolver o fluxograma do processo de soldagem utilizando consumível apropriado na soldagem de forma a termos excelência neste processo de reparo. Caracterizar as soldas entre ferro fundido com ferro fundido e entre ferro fundido com aço, através Difração de Raios X, Microscopia Eletrônica de Varredura e Microdureza Vickers das amostras de soldas produzidas e processadas. Comparar estes resultados obtidos com as necessidades existentes para garantir a qualidade nos reparos das tubulações.

## **1.5 Delimitação do Trabalho**

Este procedimento deverá ser capaz de conduzir o soldador a efetuar soldas de manutenção em Ferro Fundido Cinzento de forma a obter uma união, onde a circulação de água não provoque vazamentos ou falhas no local da soldagem.

## **2 REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA**

### **2.1 Fundamentos da Metalurgia da Soldagem**

O calor utilizado na soldagem é proveniente de uma aplicação local na peça, tendo como resultado algumas modificações nas propriedades deste material que passou por uma soldagem, entre essas, podemos citar a resistência à deformação (Ductilidade) e a resistência a tração (Tenacidade). Segundo Infosolda [2] essas alterações que ocorrem na região da junta nem sempre são desejáveis ou aceitáveis para o procedimento. Grande parte das modificações que ocorrem no cordão de solda e na microestrutura é oriunda de reações que acontecem na solidificação e resfriamento da soldagem, o entendimento destas reações é de grande importância no entendimento dos fenômenos metalúrgicos nos processos de soldagem. As propriedades mecânicas que variam na soldagem, se baseiam no aço, entretanto, todos os princípios básicos que serão revistos se aplicam aos outros metais e suas ligas. Então, podemos afirmar que de acordo com o manual de soldagem Castolin Eutectic [1] que o calor gerado na soldagem, a fusão do material depois de aquecido, posteriormente seu endurecimento e finalmente seu resfriamento, fazem parte do ciclo de soldagem e determina sua soldabilidade. Perspectiva online [3] apresenta também que a ausência da grafita decorre do excesso na lentidão de um resfriamento da peça soldada.

#### **2.1.1 Metalurgia Física dos Aços**

As relações da estrutura com as propriedades dos sólidos se caracterizam predominantemente pela enorme influência de sua estrutura em variar as propriedades, particularmente dos metais. Suas estruturas já são definidas quando fabricados e durante o processo de fabricação. Após realização da solda [10], estas operações causam variação na temperatura destas juntas e diferentes deformações plásticas. Obtendo como resultado a estrutura e as propriedades dos materiais soldados modificados em relação ao momento antes de se efetuar as soldas. Esta soldagem é similarmente vista como um tratamento térmico e mecânico em uma peça, deste modo, as suas características após estes tratamentos devem ser analisadas com detalhes. As modificações que aparecem na soldagem [11] prejudicam o desempenho das peças soldadas quando estas são aplicadas. As reduções destas alterações devem ser alcançadas através da monitoração do

processo de recuperação das peças através da soldagem ou pela inserção de material que tenha sensibilidade menor a estas alterações estruturais no processo de solda. Níveis estruturais nos trazem informações acerca da macroestrutura e distribuição dos átomos. Este arranjo é composto por várias fases de um metal e pelo arranjo destas fases como sua estrutura cristalina e sua microestrutura respectivamente. Na tabela 1 é possível observar estes diferentes níveis estruturais [12] para o ferro fundido cinzento.

Tabela 1: Características do ferro fundido Cinzento.

Nível Estrutural	Dimensões aproximadas	Exemplos de técnicas de estudo	Detalhes comuns
Macroestrutura	>100 $\mu\text{m}$	Macrografia, Radiografia	Segregação, trincas, camadas cementadas.
Microestrutura	100 a 0,1 $\mu\text{m}$	Microscopia ótica (MO), microconstituintes, microtrincas.	Tamanho de grão, microconstituintes, microtrincas.
	0,1 a 0,1 $\eta\text{m}$	Microscopia eletrônica de transmissão (MET).	Precipitados submicroscópicos.
Estrutura cristalina	1 $\eta\text{m}$ a 0,1 $\eta\text{m}$	Difração de raios-X	Células unitárias, parâmetros de rede, defeitos cristalinos.
Estrutura eletrônica	< 0,1 $\eta\text{m}$	Espectroscopia de emissão ótica	Níveis atômicos, defeitos eletrônicos.

Fonte: Adaptado Modenesi [13].

Sabemos que na composição inferior a 2,11% de carbono no aço e este quando possui elementos residuais ou elementos acrescentados no processo de fabricação, temos propriedades que se deseja para o aço fabricado. Os aços ligados são chamados assim porque em sua composição temos vários elementos de liga em teores acima do normal, do contrário quando este possui elementos de liga em teores considerados normais, este é dito como aço carbono [14]. Os aços ligados podem ser classificados em aço de baixa liga, de média liga ou de aços de alta liga. Sendo estes os mais usados devido a vários fatores, entre outros terem propriedades diversificadas com a inserção de vários elementos de liga, assim como o controle da sua estrutura através de tratamento térmico e mecânicos. Como exemplo pode citar o setor de estrutura metálica, onde estes aços são muito utilizados [15], fato que justifica ser extremamente importante conhecer suas microestruturas e como podem ser modificadas através de tratamentos térmicos.

Analisando o diagrama Fe-C da figura 6, é possível identificar as fases presentes aços, em diferentes teores de carbono. Este diagrama mostrado pode ser usado para estudo da estrutura, formação e variações das ligas de ferro. Neste gráfico pode-se observar o teor de carbono versus temperatura do aço, quando este se encontra em equilíbrio. Para se entender as grandes variedades destes aços-carbonos, aços de baixo, média e alta liga [16], são utilizadas variáveis fundamentais contidas no diagrama de equilíbrio Fe-C.

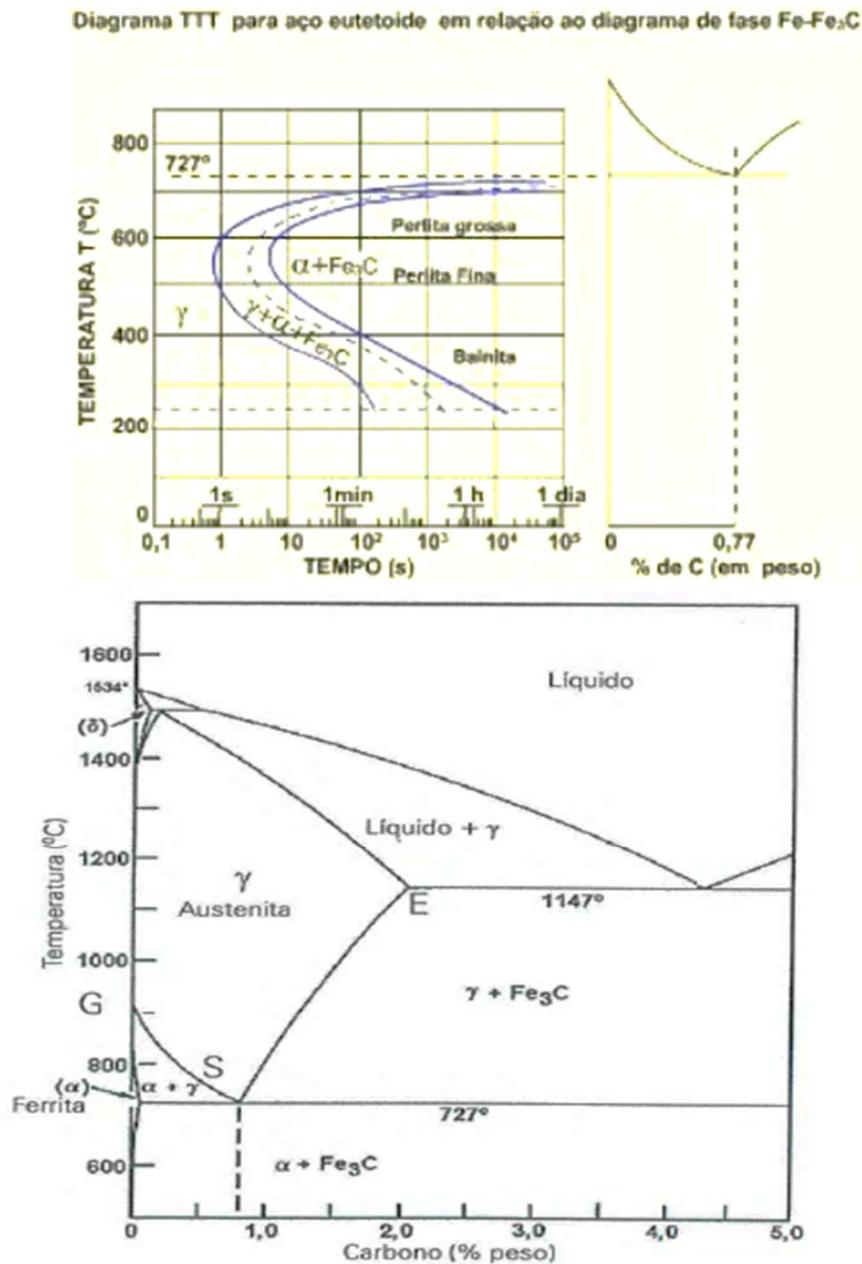


Figura 6: Diagrama Fe-C dos aços e TTT.

Fonte: Modenesi [13].

Observa-se no diagrama a fase líquida, a fase em que temos líquido mais austenita, a fase em que temos austenita mais ferrita e finalmente ferrita mais cementita, assim como, a composição de estrutura cristalina (CCC) que é a ferrita, contendo indícios de carbono endurecido. Superior a esta temperatura tem-se a austenita de composição FCC. A austenita em determinadas condições se transforma em ferrita e/ou cementita. Na avaliação das fases temos a ferrita macia e tenaz, no entanto se apresentado de extrema dureza e fragilidade temos a cementita. A perlita sendo a formação da ferrita com cementita possui uma dureza elevada e tenacidade baixa. É fácil concluir que aços que possuem mais teor de carbono têm constituintes duros como perlita e cementita, tendo como resultantes valores altos de dureza e resistência mecânica [12], porém apresentam menor ductilidade e tenacidade.

A capacidade de mudar em estágios menores dos átomos quando as temperaturas são pequenas de transformação, produzem um aumento da dificuldade de separação dos átomos de ferro do carbono para propiciar o surgimento da ferrita assim como do carboneto de ferro nas camadas características de perlita. Quando se observa a transformação na baixa temperatura próximo de 500°C, não é identificado surgimento de perlita, apenas aparecendo uma constituinte conhecida como bainita, mostrada na figura 6, com grãos alongados de ferrita e oferecendo uma enorme resistência mecânica no aço e com excelente tenacidade. Colocando velocidades altas de resfriamento aparece a martensita, constituinte não esperada no diagrama de Fe-C, assim como a impedição de uma reação eutetóide numa nova fase. A martensita possui enorme dureza ao se aumentar o teor de carbono, se tornando extremamente frágil com aparências de agulhas ou laminas. A figura 7 apresenta de forma simples a microestrutura e sua evolução no aço em função de sua velocidade de resfriamento partindo da condição austenítica. Ao diminuirmos a rapidez com que resfriamos a peça aplicando um pré-aquecimento nesta, temos a presença benéfica da martensita e temos em paralelo o aparecimento da combinação de átomos de carbono com o metal, chamado de carbonetos [17] que levam ao surgimento de inúmeros problemas em soldas nas peças.

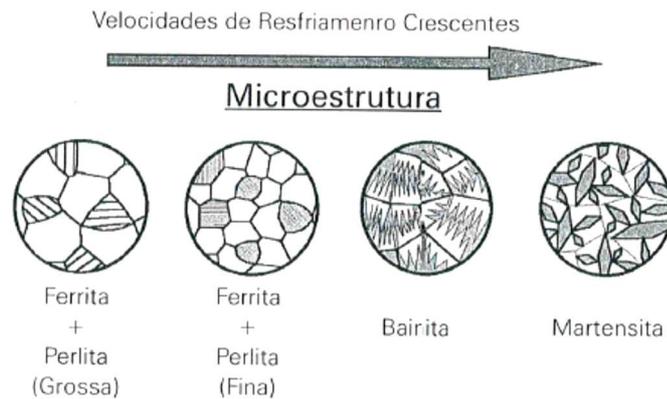


Figura 7: Microestrutura do aço x velocidade de resfriamento pós austenitização.

Fonte: Modenesi [13].

A microestrutura se torna mais frágil e dura à medida que aumenta o teor de carbono e decrescem as temperaturas de transformação. A rapidez de resfriamento quando se realiza a solda por fusão, é dependente da energia trocada no momento da solda em função da unidade do comprimento da mesma, temperatura da peça no início da soldagem, de sua geometria e espessura. A velocidade de resfriamento, assim como, a temperatura da transformação, determinam a formação de microestruturas que são fornecidos pelos diagramas de transformação destes aços. Os diagramas TTT conhecidos por transformações de temperaturas constantes e os diagramas TRC conhecidos por transformações durante resfriamento contínuo, são construídos de forma experimental, quando mostram o crescimento da microestrutura em função do tempo em que acontece o resfriamento e de sua temperatura. De forma original, estes diagramas foram criados para as modificações após a autenização, e em temperaturas relativamente baixas como o tratamento térmico convencional.

É possível ainda obter características diferentes no aço [18], realizando a inserção balanceada de componentes de ligas, como por exemplo a estabilidade da austenita e da ferrita com a variação de seu campo. Dentre as propriedades citadas acima destacamos as mecânicas, as químicas, as características magnéticas, as elétricas e finalmente as térmicas. Temos uma variedade muito grande de elementos de liga que diminuem a velocidade em que acontece a transformação de austenita, isso quer dizer um aumento em sua temperabilidade. Para os diversos constituintes este efeito pode ser diferente, o acréscimo de componentes de liga, pode indicar melhoras na formação de um constituinte e piorar outro. Um destes elementos de

liga pode modificar as propriedades desta fase se ela entrar em solução sólida em uma fase. De forma geral, pode-se observar a diminuição da ductilidade quando acontece o aumento da resistência mecânica.

Os itens que provocam o acréscimo da resistência mecânica nos aços [19], como por exemplo, a ductilidade e tenacidade podem variar de 200 até 2.000 MPa. Para obtermos estes valores devemos aplicar os diversos mecanismos de endurecimento dos aços, como a deformação a frio, obtenção de uma formação sólida, a criação de constituintes mais resistentes e obter o endurecimento do aço por laminação controlada (refino de grão) e por incremento de microligantes (precipitação). Todos os mecanismos citados, o refino de grão se coloca como o mais importante [20] por proporcionarem uma produção simultânea com a melhoria da tenacidade e ductilidade.

### 2.1.2 Fluxo de Calor

É de suma importância quando realizamos a soldagem, manter a junta soldada em temperatura adequada para a união das peças. O calor inserido na junta quando efetuamos a solda, pode ser mostrada de maneira bem simplificada, como a injeção de calor na junta e sua expansão nas peças soldadas. No primeiro momento para caracterizarmos a soldagem [21], avaliamos a energia gasta na solda estabelecida como a energia fornecida a junta soldada por unidade de comprimento (figura 8) e que é dada por:

$$\text{Equação 1: Energia da Solda} = H = \frac{\eta \cdot V \cdot I}{v}$$

H: energia de solda (J/mm),  $\eta$ : eficiência térmica do processo, V: tensão no arco (V), I: corrente de soldagem (A) e v: velocidade de soldagem (mm/s),

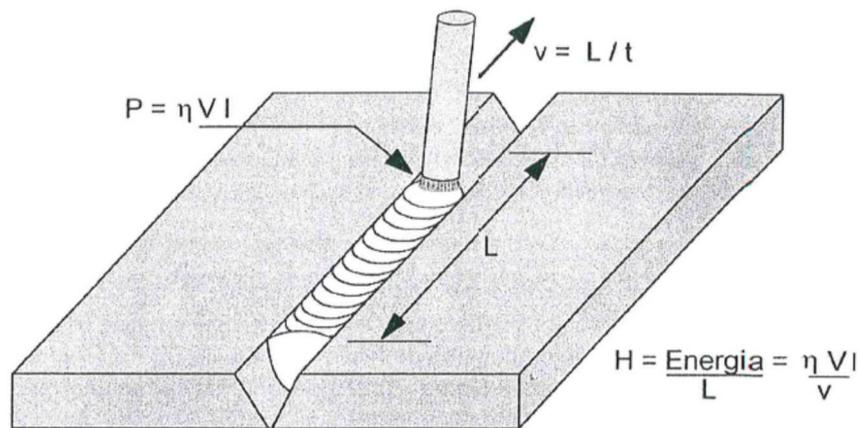


Figura 8: Esquema de soldagem e parâmetros envolvidos na determinação da energia de soldagem.

Fonte: Modenesi [13].

No segundo momento em que acontece a expansão do fluxo de calor na peça soldada, o calor produzido nela escapa para o resto do material. Através de cálculos teóricos é possível estimar as distribuições desta temperatura na soldagem. Se considerar um ponto próximo à junta de solda, definido assim por sua distância no centro da solda e por sua posição com relação à espessura, o calor da soldagem irá provocar neste ponto variações de temperaturas como consequência da aplicação deste calor, como mostra a figura 9. Chamamos de “tratamento térmico”, a variação de temperatura em função do tempo, e o período que este ponto mostrado na curva é denominado de “ciclo térmico de soldagem”.

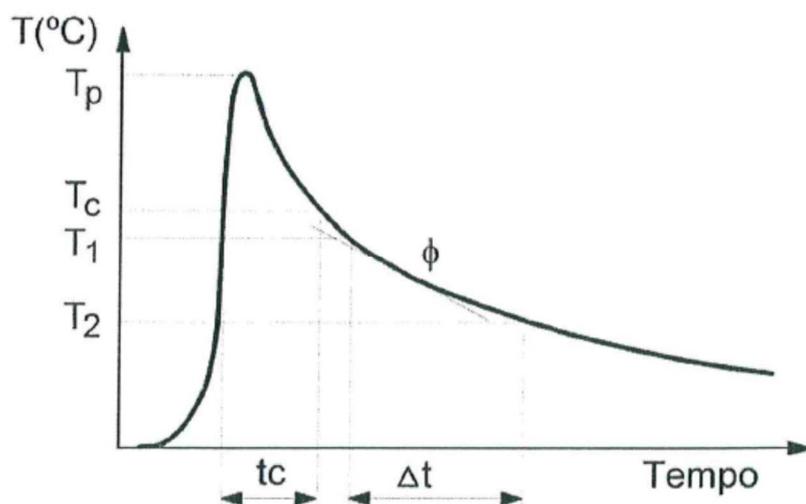


Figura 9: Ciclo térmico de soldagem.

Fonte: Modenesi [13].

Quando se realiza a soldagem, estes ciclos térmicos apresentam características muito relevantes nesta operação, conforme discussão a seguir:

- Temperatura de pico  $T_p$ : esta temperatura no tratamento térmico mostrado é a maior temperatura que a solda pode atingir no ciclo. Sua ocorrência pode indicar possibilidade de termos transformações micro estrutural, indicando comprimento da área que foi atingida pelo fluxo de calor gerado na operação de soldagem das peças. Admite-se o ponto  $T_p$  ao centro da solda e calcula-se esta temperatura de pico [22] com soldas de um passe e penetração total através da fórmula abaixo:

$$\text{Equação 2: Temperatura de Pico} = \frac{1}{T_p - T_0} = 4,133 \frac{\rho c h}{H} + \frac{1}{T_f - T_0}$$

Onde  $\rho$ : densidade do material;  $c$ : calor específico;  $h$ : espessura da peça;  $T_f$ : é a temperatura de fusão do material;  $T_0$ : temperatura inicial e  $H$ : energia de soldagem e 4,133 é uma constante adimensional igual a  $(2 \cdot \pi \cdot e)^{1/2}$ .

- Permanência  $t_c$  maior que temperatura crítica: Esta crista observada na figura 9 mostra o período em que este ponto permanece quente com valores acima da temperatura mínima de forma a ocorrer alteração microestrutural ou uma alteração expressiva nas propriedades do material aquecido.
- Velocidade de resfriamento  $\Phi$ : Se em um determinado ponto da curva de resfriamento na figura 9, localizado na temperatura  $T$ , obtermos sua inclinação, este ângulo mostrará a rapidez com que a peça é resfriada. Ao se calcular o tempo de resfriamento de  $T_1$  até  $T_2$ , obteremos uma caracterização da solda realizada. Para os aços em sua maioria, são consideradas temperaturas ideais de soldas com  $\Delta t$  entre 500 a 800 °C. Esta característica é importante quando se analisam as soldas praticadas em aço carbono. O fato dessas ligas serem levadas a temperaturas elevadas, favorecem a austenitização no local da região de soldagem e quando estão sendo resfriadas, a mudança da austenita fica muito dependente de outros fatores.

A figura 10 apresenta a variação da temperatura de pico versus à distância do ponto localizado no centro do cordão de solda.

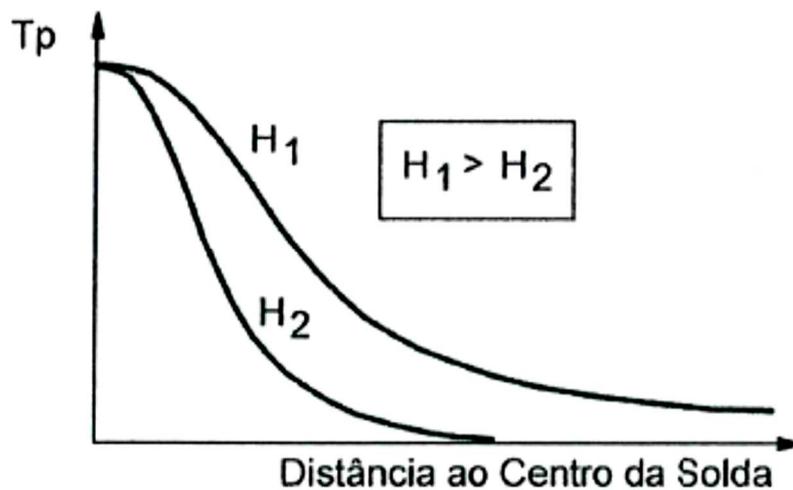


Figura 10: Curvas obtidas com diferentes energias de soldagem ( $H_1$  e  $H_2$ ).

Fonte: Modenesi [13].

Entretanto, as variáveis como o tipo de metal base, geometria da junta, espessura da junta, a energia de soldagem e a temperatura inicial da peça, entre outras, são aquelas que determinam os ciclos térmicos após a solda assim como sua distribuição na peça soldada.

Dos exemplos típicos de metal base conhecidos, podemos destacar o cobre e o alumínio como aqueles possuidores de altíssima condutividade térmica, desta forma, as dissipações do calor gerado na região de soldagem para o restante da peça, se tornam mais rápidas e eficientes, essa característica deixa mais difícil a poça de fusão se formar. Observa-se que ao contrário do cobre e do alumínio, em metais que possuem menor condutividade térmica seus gradientes térmicos são maiores na temperatura alta e suas velocidades de resfriamento são menores, isso faz com que estes materiais aproveitem mais esta temperatura gerada na solda em relação aos outros citados anteriormente, muito relevantes na soldagem.

Em relação à forma da junção [23], podem-se obter duas maneiras de escoar o fluxo de calor nas juntas de soldagem: junta de topo e junta em ângulo T. Levando em consideração de que todos os outros parâmetros são idênticos, observa-se na figura 11 que obtém-se três direções na junta T por onde escoar o fluxo de calor gerado nas soldas, de outra forma, é possível ver apenas dois caminhos na junta de topo, entretanto, as junções realizadas em ângulos possuem uma capacidade de resfriamento mais rápido do que as em T.

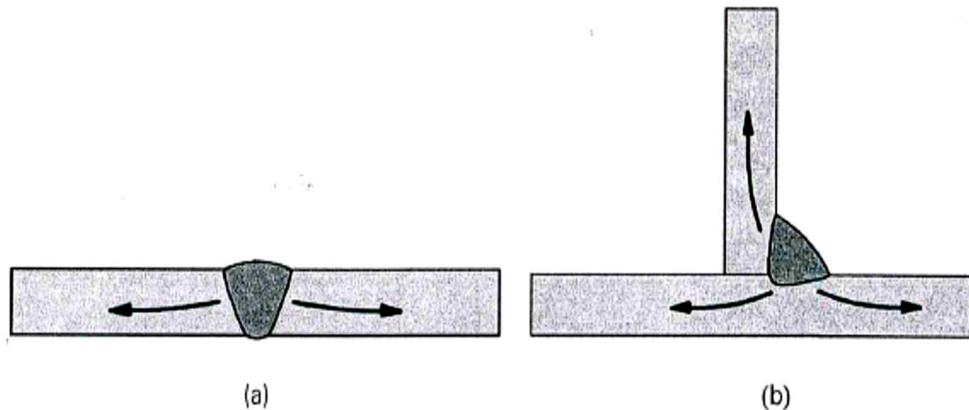


Figura 11: Escoamento do calor nas junções (a) de topo (b) em ângulo ou T.

Fonte: Modenesi [13].

Quando se refere à espessura destas juntas, mostramos a importância no escoamento do calor gerado quando na soldagem de peças, ou seja, se mantivermos todas as condições de soldagem idênticas, nota-se que quanto maior for esta região da junta, mais rápido se escoar o fluxo de calor gerado. Foi verificado que após determinada espessura da junta, esta não causa influência no resfriamento do fluxo de calor. Se for assumido que a peça soldada quando esfria não possui dependência de sua espessura e sendo essas temperaturas entre 800 e 500 °C ( $\Delta t$ ) é possível calcular a variação de temperatura pela expressão:

$$\text{Equação 3: Variação Temperatura} = \Delta t = \frac{H}{2\pi k} \left( \frac{1}{500-T_0} - \frac{1}{800-T_0} \right)$$

Onde  $k$ : condutividade térmica,  $T_0$ : temperatura inicial e  $H$  é a energia de soldagem.

Em relação à energia na solda e sua temperatura inicial, a redução da velocidade em que ocorre o arrefecimento, é estimulada pelo aumento da energia na soldagem e de  $T_0$  da peça, desta forma, a distribuição térmica se torna mais extensa. Considerando as variáveis possíveis de ser mudadas pelo operador, estes são considerados os mais fáceis de ser manipulados. Estes controles são de extrema importância tendo em vista que uma seleção adequada fornece permissão para se controlar a velocidade com que ocorre o resfriamento na soldadura, assim se controla também as microestruturas e demais propriedades.

### 2.1.3 Macroestrutura de Soldas por Fusão

Uma solda por fusão pode ser dividida pela curva de distribuição em três regiões básicas [24], conforme mostra a figura 12:

- Zona Fundida (ZF): Local onde acontece a fusão e solidificação do material na solda. São encontradas temperaturas muito altas e logo acima da temperatura de fusão ( $T_f$ ) da metal base.
- Zona Térmica Afetada (ZTA) ou Zona Afetada pelo Calor (ZAC): Local onde se localiza as alterações na microestrutura e ou suas propriedades devido ao ciclo térmico da solda e por consequência não teve metal base fundido. É observado que acima da temperatura crítica temos a temperatura de pico e está abaixo da temperatura de fusão.
- Metal de Base (MB): Esta zona se encontra longe do cordão de solda e onde a soldagem na peça não pode afetá-la. Possuindo temperaturas de pico abaixo daquela crítica da peça soldada.

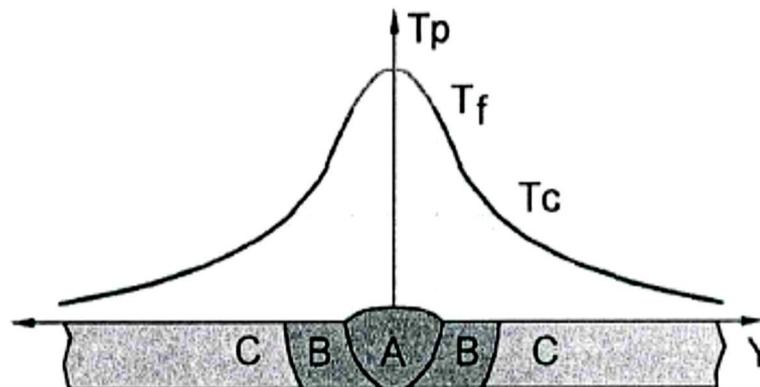


Figura 12: Região de uma solda por fusão.

Fonte: Modenesi [13].

Existe ainda uma quarta região localizada entre a ZF e a ZTA, conhecida como Zona de Ligação. Esta região apresenta as características químicas, mecânicas e físicas destes metais que ficaram envolvidos para formar a junta soldada. O ciclo térmico desenvolvido na soldagem de um material promove importantes reações e alterações estruturais. A figura 13 mostra estas mudanças esquemáticas aguardadas quando se efetua a solda a arco de um material de aço-baixo carbono em um dado ponto que se encontra na ZF – Zona Fundida.

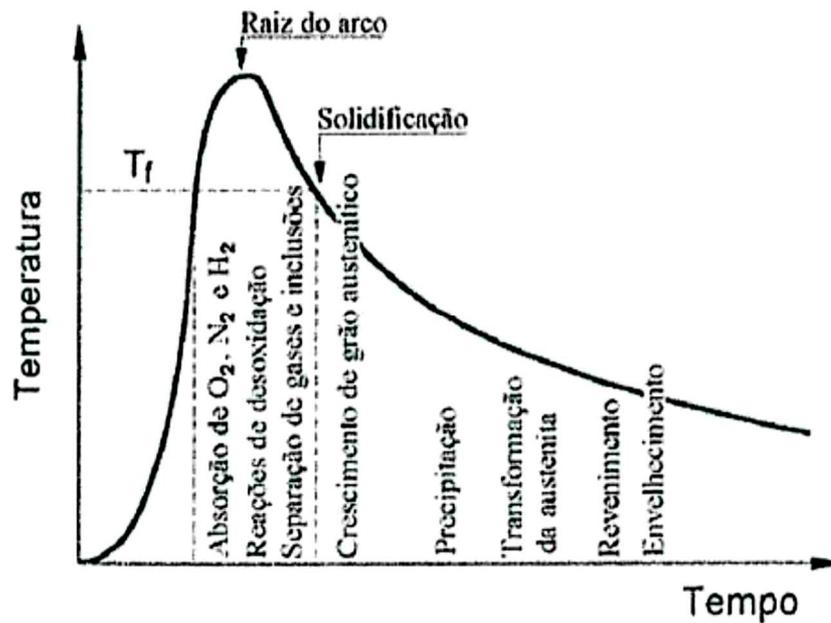


Figura 13: ZF de uma solda no aço de baixo carbono.

Fonte: Modenesi [13].

#### 2.1.4 Características da Zona Fundida

Na análise da zona fundida podemos conferir entre outros três itens importantes: a característica da poça de fusão, o endurecimento desta e o aparecimento da estrutura secundária.

Observando-se a zona fundida, é possível ver que quando se opera a soldagem utilizando o processo por fusão, pode-se criar esta zona que possui uma diversidade muito grande em relação às condições que estão sendo criada. No método de soldagem em que se utiliza eletrodo consumível, verifica-se uma transferência do metal de adição fundido para a poça de fusão. Nas regiões da poça de fusão que estão em temperaturas mais elevadas e localizadas debaixo do arco, observa-se que existe uma agitação extremamente grande no qual ocorre a liga no metal de adição com o metal base, contudo, na parte traseira da poça tem-se a ocorrência de solidificação pelo fato de decair a temperatura. Entretanto em regiões da poça de fusão que estão superaquecidas, tem-se uma intensa interação entre o metal fundido e os gases com presença de escórias existentes no local do arco. Existe uma interdependência da zona fundida com as intensidades destas interações, assim como das ligações químicas entre metal base com o metal de adição. Essa relatividade da participação destas composições químicas é também

chamada de “coeficiente de diluição” ou simplesmente “diluição” ( $\delta$ ) [25] e pode ser definida como mostrado abaixo:

$$\text{Equação 4: Coeficiente de Diluição } \delta = \frac{\text{Massa fundida do metal base}}{\text{Massa total do cordão de solda}} \times 100 \%$$

É possível realizar a medição de diluição de metal base na solda, através da macrografias tirada da seção transversal das soldas, o exemplo é mostrado na figura 14. A variação de seu percentual é um indicativo de que existe uma brasagem (0%) ou soldas sem metal de adição (100%).

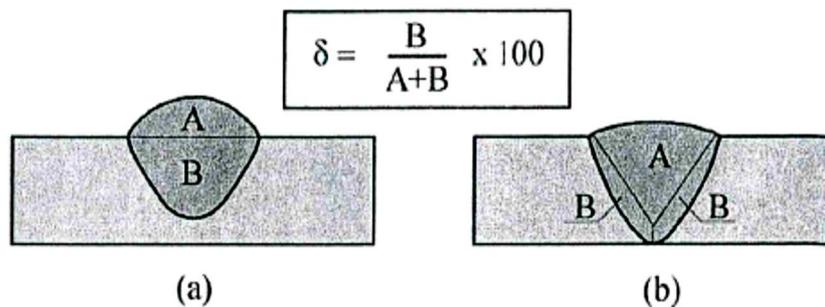


Figura 14: Diluição na seção transversal, (a) depositado sobre chapa e (b) solda topo.

Fonte: Modenesi [13].

O coeficiente de diluição é importante nas seguintes condições: na soldagem de metais com diferentes propriedades, superficialmente em metais onde ocorre um revestimento especial, no momento em que metais diferentes quimicamente são soldados, na ocorrência de soldagem para manutenção e finalmente quando ocorre a solda de peças com teores altos de elementos que contaminam o local fundido, como carbono mais enxofre. A queda de temperatura na poça de fusão inicializa a solidificação na parte traseira desta, de outra forma, em locais com temperaturas mais elevadas, inúmeras reações acontecem, mas neste momento contrário ao outro sentido. Neste material com excesso de concentração de gases como hidrogênio e nitrogênio, pelo fato de ter reduzido sua solubilidade, conforme mostra a figura 15, pode-se ter a ocorrência da formação de porosidade na solda.

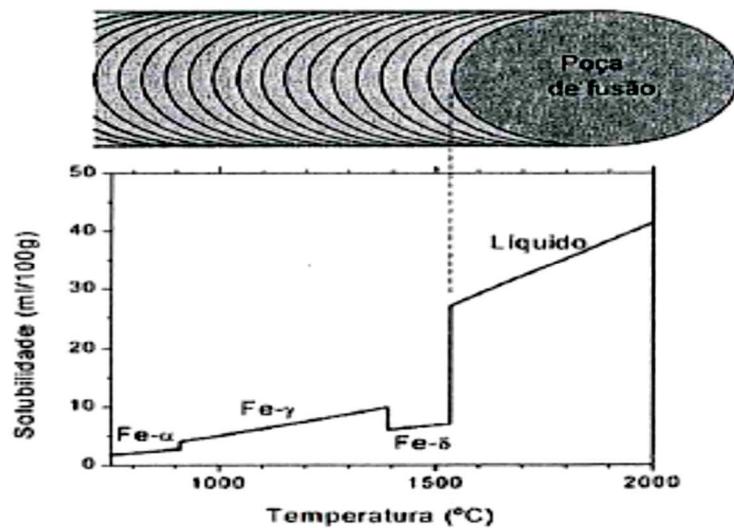


Figura 15: Capacidade dissolução do hidrogênio no ferro líquido e sólido.

Fonte: Modenesi [13].

Quando a escória é usada na solda, suas características químicas quando permanece junto com metal líquido, provocam grandes mudanças no local da fusão e o tamanho destas reações dependente também destas características.

A solidificação da poça de fusão origina o que chamamos de cordão de solda e se localiza atrás do local onde se solidifica o metal líquido. Essa solidificação determina características diversas macro e micro estruturais no cordão, com isso possuem importante efeito nas propriedades e no comportamento da solda. Em vários aspectos o passe de solda pode ser visto como uma leve peça que foi fundida na soldagem. Este material produzido tem sua própria característica que determinam significativas diferenças na estrutura de solidificação e em suas propriedades.

A figura 16 apresenta uma estrutura típica de solidificação de um metal fundido em formato apropriado que chamamos de lingote.

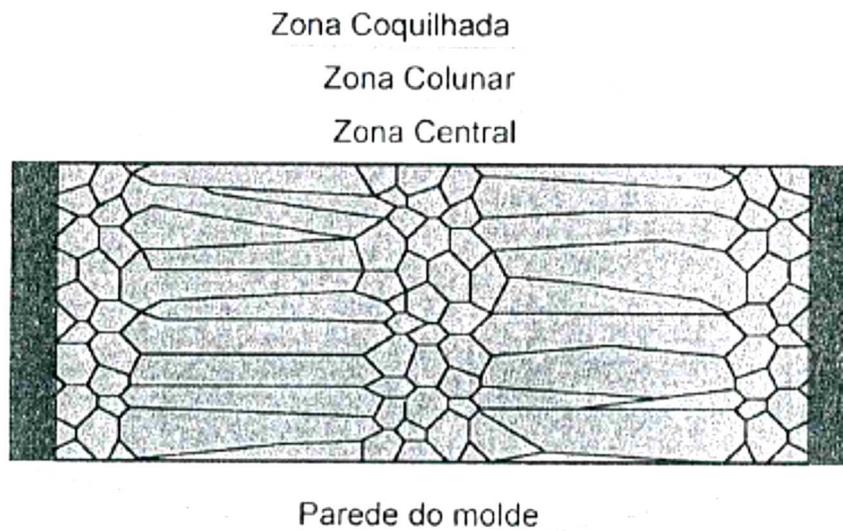


Figura 16: Área de uma peça fundida, com três regiões características.

Fonte: Modenesi [13].

No início da solidificação da peça é formado a zona coquilhada em uma região mais externa [26], onde existe um enorme gradiente de temperatura entre o molde e o metal líquido. Um forte resfriamento do líquido, causado pela diferença citada acima, assim, sua parede juntamente com a com a parede do molde se tocando, favorece a disposição de núcleos em grande quantidade de grãos que formam neste território. Ao término do aparecimento da superfície coquilhada, se forma a zona colunar, local que libera o calor de transformação de solidificação que, ao distanciar-se do meio sólido líquido que se encontra na parede do molde, percebe-se que o líquido se encontra com temperatura próxima deste meio, e tem valor próximo da temperatura de fusão do metal. A consequência é a redução fortemente do número de grãos nucleados, passando este sólido formado pelo aumento dos grãos contidos na direção do líquido. O formato colunar que os grãos assumem é característico desta zona. A causa da incidência de inclusões, assim como de vários pontos que propiciam a ocorrência de grãos nucleados, está nas etapas finais da solidificação, as impurezas e rejeição de substâncias que dissolvem neste meio líquido, recorrentes da totalização da solidificação. O calor é extraído de forma aproximadamente igual em todas as direções contidas no meio da peça onde desenvolve o endurecimento final. Assim o crescimento de formato equiaxial dos novos grãos que tendem a crescer, resulta na zona central.

Na solda efetuada, o material líquido contido na poça de fusão junto com material base, não se apresenta super-resfriado, pois este material sendo metal base, está quente até a sua temperatura de fusão pela fonte de calor. Desta forma, a região coquilhada não é criada devido a não formação de um grande número de novos grãos e o cordão de solda fica construído quase totalmente por uma região colunar.

Na limitada formação de novos grãos, o início do endurecimento na poça de fusão acontece em sua totalidade devido ao crescimento dos grãos de metal base existente na pista de fusão [27], que é o limite entre a ZF e ZTA, que garante o seguimento metalúrgico entre a ZF e ZTA, conforme a figura 17.

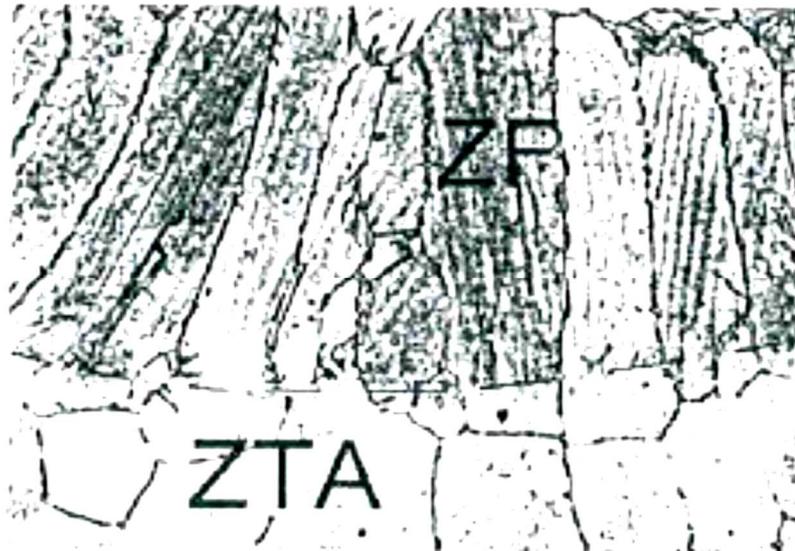


Figura 17: Metalografia entre a ZTA e ZF no aço inoxidável ferrítico (100X).

Fonte: Chiaverini [28].

A segregação (assim chamada pelo fato de que, entre vários pontos da peça, uma variedade da composição ocorreu devido ao endurecimento deste) têm ocorrência de menor intensidade em lingote ou em peça fundida, pelo fato de termos a solidificação em grandes velocidades no exercício da solda. A ocorrência de segregação, é considerada item básico para ocasionar as variações que se encontram na microestrutura, nas propriedades e até mesmo em problemas de fissuração, no ponto central do cordão de solda. A zona fundida pode ser reconhecida através de uma estrutura primária, com grãos colunares e grandes

encontrados nas peças fundidas em sua maioria. Desta forma, podemos encontrar valores menores de tenacidade nestas estruturas.

A formação da estrutura secundária acontece após a zona fundida sofrer ainda alterações até o resfriamento final à temperatura ambiente após sua solidificação. Observa-se algumas alterações até o resfriamento da peça, dentre elas pode-se citar o aumento do grão, o aparecimento de carbonetos, nitretos e várias outras fases. Os vários passes destes aços na soldagem deixam a microestrutura ainda mais desordenada, a cada momento existe a possibilidade de afetar os passes imediatamente abaixo. Este fato ocasionaria reaustenização e subsequente modificação dela no resfriamento, assim, modificando sua microestrutura parcialmente através do refinamento. Na figura 18 é possível observar o efeito ocasionado na solda com vários passes de um material de aço carbono.

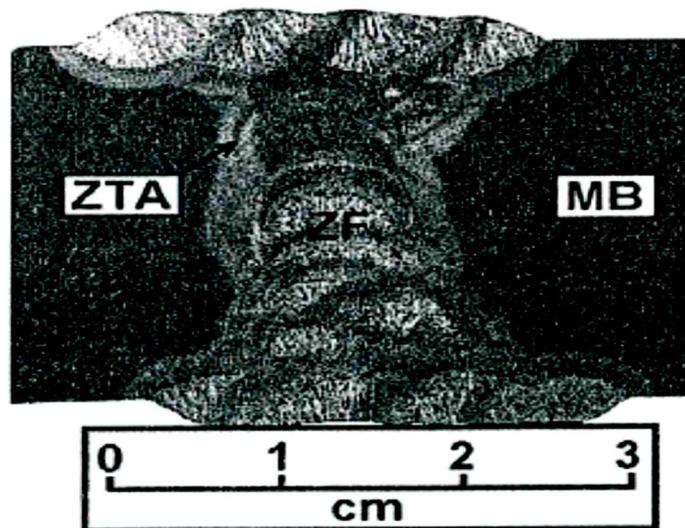


Figura 18: Macrografia na solda de vários passes no aço de baixo carbono.

Fonte: Chiaverini [28].

Em uma zona fundida, tem-se suas características dependentes não somente de uma estrutura final [29], mas também das microestruturas de solidificação e as estruturas secundárias.

### 2.1.5 Características da Zona Termicamente Afetada

Na figura 9 foram apresentados os ciclos térmicos e suas respectivas repartições, dos quais dependem as propriedades da ZTA, isto é, dependem fundamentalmente do tipo de metal de base, do processo e do procedimento de soldagem. Estas características são observadas no local onde crescem o grão, onde acontece o refino deste e em sua região intercrítica. Os efeitos do ciclo térmico ocasionarão efeitos variados de acordo com o tipo do metal utilizado na solda. Tem-se os metais não transformáveis e os metais transformáveis, no primeiro tipo encontra-se o alumínio e o cobre no estado recozido onde acontece uma mudança estrutural mais marcante que será o crescimento do grão, se este estiver encruado. Entretanto, esta ZTA aparece com uma região de crescimento de um grão adjacente à zona fundida, com recristalização em local um pouco mais longe. No segundo tipo a ZTA será mais complexa, como no caso dos aços carbonos e aços de baixa liga que apresentarão diversas regiões com características ilustradas abaixo.

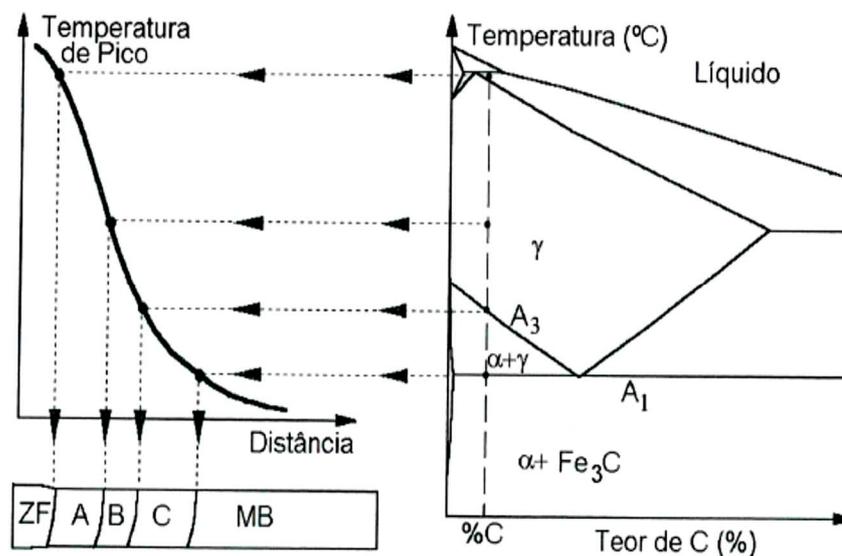


Figura 19: ZTA aço baixo carbono: A-Crescimento grão, B-Refino grão, C-Intercrítica

Fonte: Chiaverini [28].

Mostrado na figura 19 a região de crescimento do grão A, que é a região de crescimento de grão, este local foi submetido a uma temperatura entre 1.200 °C e a temperatura de fusão, por compreender a região do metal de base mais próxima da solda, onde sofre um grande crescimento de grão a estrutura austenítica. De modo geral, esta região é caracterizada por uma estrutura grosseira [30], sendo apresentada pela ferrita uma morfologia em placas e caracterizada pela presença de

bainita. Uma velocidade maior de resfriamento em determinadas condições da soldagem, particularmente em aços ligados ou com maior teor de carbono, resultam nesta região, numa estrutura completamente martensítica. A região acima costuma a mais crítica da ZTA em um aço, mostrando baixa tenacidade e sendo local de preferência na formação de trincas. No caso de determinada peça, tipo de junta e espessura, suas condições no resfriamento, assim como, a microestrutura apresentada nesta região, pode-se manipulá-las com ajustes adequados da condição de soldagem, com prioridade na energia da soldagem e seu calor de pré-aquecimento na sua junção.

Esta região do refino de grão de parte quente nestas juntas, tem temperaturas normalmente encontradas nos aços de 900 a 1200 °C.

A região intercrítica acontece em temperaturas de 727 °C, com características de mudança parcial em sua estrutura original do metal base. Algumas das características da ZTA são microestruturas de valor alto de dureza, porém frágeis, que hora chamamos de martensita, formada nesta zona acima citada. Técnicas para soldagem evitam a criação desta microestrutura, como por exemplo, o pré-aquecimento da peça e um lento resfriamento posteriormente [31]. Entretanto, os intervalos adotados para pré-aquecimento são variáveis da microestrutura do material fundido [15], somado é claro, com o tamanho também da peça soldada e finalmente do metal de adição usado.

Após o incremento da temperatura na peça soldada, no qual denominamos pré-aquecimento e no entorno de 190° [32], observou-se a diminuição do aparecimento de martensita.

## **2.2 Os Ferros Fundidos**

### **2.2.1 Metalurgia dos Ferros Fundidos**

Os ferros fundidos possuem características próprias, entretanto, as suas propriedades mecânicas os deixam diferenciados dos aços carbonos. O total conhecimento de como obtém-se as variadas formações que suas microestruturas podem apresentar, leva-se a conhecer e entender de que forma as variáveis de processos, já apresentadas anteriormente, e as composições químicas podem modificar essas microestruturas, de forma a termos condições de obter destes materiais determinadas propriedades físicas [33] e compreender suas respectivas

limitações de uso. A observação acerca das transformações de fases que acontecem no resfriamento do ferro fundido pode ser realizada com o esfriamento de uma liga líquida até que ela atinja a temperatura ambiente, este procedimento permite que possamos fazer um paralelo destas observações com as peças fundidas que são moldadas a quente até atingirem o resfriamento na temperatura ambiente.

A série de ligas ferrosas contendo em sua composição química, teor de carbono superior a 2,19%, 1 a 3% de silício, ainda na mistura o enxofre e fósforo, possui o nome de ferro fundido. Para se obter certas propriedades do aço como dureza, resistência e temperabilidade, entre outras existentes, estes ferros fundidos podem conter outros elementos adicionados intencionalmente.

Em sua totalidade, o ponto de fusão dos ferros fundidos comparando com a dos aços, são inferiores e possuindo enorme fluidez em seu estado líquido e durante sua solidificação e arrefecimento no estado sólido, sofrem pequena contração. Comparando os aços com os ferros fundidos, estes possuem menores tenacidade e ductilidade limitando assim as suas aplicações industriais. As propriedades mecânicas dos ferros fundidos dependem predominantemente de suas microestruturas, formas na qual são construídas estas microestruturas e finalmente sua distribuição. Dentre todas as constituintes, ressalta-se a grafita. A forma, seu tamanho e sua quantidade, determinam a resistência e a ductilidade deste material, desta forma, o ferro fundido pode ser classificado conforme as propriedades em que a grafita pode apresentar na amostra, quando certa seção é polida.

Foi demonstrada em um ferro fundido, que sua matriz é de um aço basicamente, esta microestrutura contida na matriz e que rodeia a grafita, influência diretamente em suas características mecânicas [34], essas matrizes podem ser encontradas na forma ferrítica, perlítica, bainítica, martensítica ou austenítica. De acordo com a composição química de um ferro fundido, sua velocidade com que ocorre a perda de calor e finalmente o tratamento térmico aplicado a este, teremos os vários tipos de matrizes encontradas neste material. Além dos ferros fundidos possuírem teor de carbono bem mais elevado que os aços contêm também altos teores de silício, agindo na precipitação deste carbono sob a forma de grafita. A distribuição do grafita na matriz em várias formas geométricas como lamelas e

nódulos, por exemplo, aliados ao tamanho e sua forma afetam tanto as propriedades mecânicas do ferro fundido como também suas propriedades físicas.

Controlar o balanço de grau na inoculação, como está sua composição química, velocidade de solidificação e arrefecimento são fatores predominantes para se termos determinadas matrizes e grafitas em um ferro fundido. Foi observado que a espessura das peças e a velocidade com que extraem calor no ato da soldagem afetam diretamente as velocidades de solidificação e de resfriamento. Logo depois da fabricação, é possível ter propriedades nos ferros fundidos efetuando tratamentos térmicos adequados, como o recozimento, o revenimento e a têmpera para se obter a microestrutura desejada.

A definição de ferro fundido é:

“Ferro fundido, liga de ferro-carbono-silício, com teores de carbono acima de 2,0%, em quantidade acima à que é retida em solução sólida na austenita [35], resultando em carbono parcialmente livre, de forma em veios ou lamelas de grafita”. São cinco as principais famílias de ferros fundidos: Ferro fundido Cinzento, Ferro Fundido Nodular, Ferro fundido Maleável, Ferro fundido Vermicular e Ferro fundido Branco.

Apresentamos na tabela 2 a composição dos principais ferros fundidos, na qual faltam elementos de liga:

Tabela 2: Faixa composição de ferros fundidos típicos comuns.

Tipo	Composição química, % peso				
	C	Si	Mn	S	P
Branco	1,8 / 3,6	0,5 / 1,9	0,25 / 0,80	0,06 / 0,20	0,06 / 0,20
Maleável	2,2 / 2,9	0,9 / 1,9	0,15 / 1,20	0,02 / 0,20	0,02 / 0,20
Cinzento	2,5 / 4,0	1,0 / 3,0	0,20 / 1,00	0,02 / 0,25	0,02 / 1,00
Nodular	3,0 / 4,0	1,8 / 2,8	0,10 / 1,00	0,01 / 0,03	0,01 / 0,10
Grafita compactada	2,5 / 4,0	1,0 / 3,0	0,20 / 1,00	0,01 / 0,03	0,01 / 0,10

A figura 20 apresenta um diagrama de equilíbrio relativo à faixa dos ferros fundidos. Nele observa-se apenas a relação de uma liga binária Fe-C [36], sendo o carbono o principal elemento desta liga. É possível exemplificar um ponto de equilíbrio em um ferro fundido cinzento caracterizando-o no diagrama como sendo 3,4% C à temperatura de 1.400 °C [37], podemos então interpretar estes dados observando o diagrama como sendo a fase de equilíbrio o líquido.

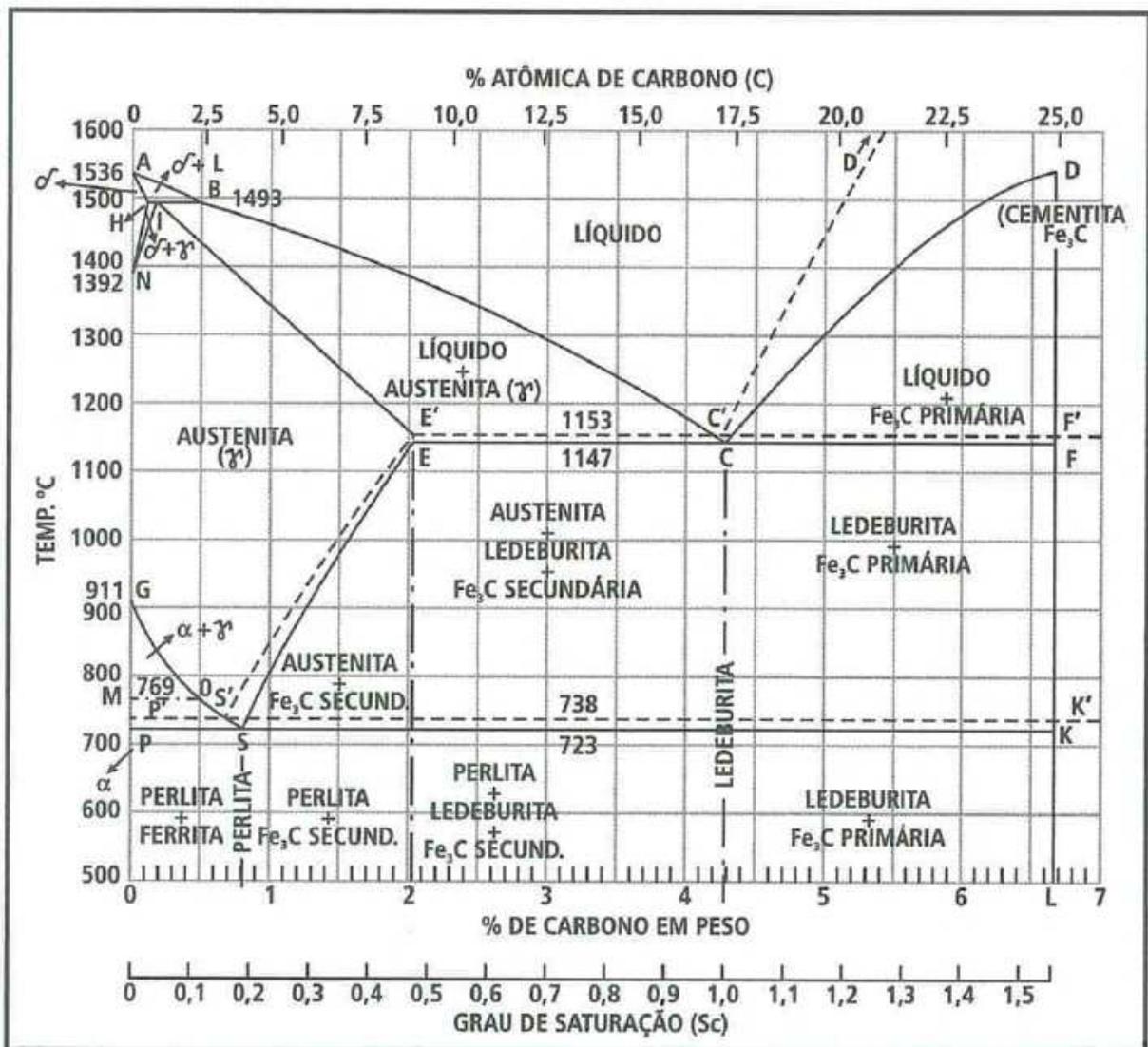


Figura 20: Diagrama de equilíbrio do Fe – C.

Fonte: Guesser [33].

Prosseguindo o processo de resfriamento do líquido, é fácil observar que na temperatura de 1.260 °C a solidificação se inicia com as primeiras austenitas com 1,5% de carbono conforme mostrado na figura 20. Resfriando-se ainda mais o

líquido temos o aumento da austenitas e sua composição percorrendo a direção de E', entretanto, a composição do líquido vai em direção ao ponto C' apresentado na mesma figura 21. Ao atingirmos a marca de 1.153 °C encontram-se para a austenitas o percentual de 2,0% C [28] enquanto o líquido envolvido apresenta um valor superior de carbono, 4,3%C. Ainda com o estudo, é fácil observar que abaixo desta temperatura, denominada eutética, tem-se o líquido se formando em dois sólidos, sendo a austenita e a Grafita, de forma a continuar o processo até quando todo líquido esteja solidificado. As figuras 20 e 21 apresentam o resfriamento após a completa solidificação do líquido causa uma diminuição no teor de carbono da austenitas. Desta forma, quando obtemos 723 °C, a austenita se apresenta agora com 0,7%C dissolvido. Da literatura sabemos que nesta temperatura obtemos a transformação chamada de eutetóide, que se baseia na divisão do sólido em outros dois sólidos, o que no ferro fundido poderemos ter austenita composta de ferrita mais grafita ou a austenita composta de ferrita mais cementita [36] que por sua vez é chamada também de perlita.

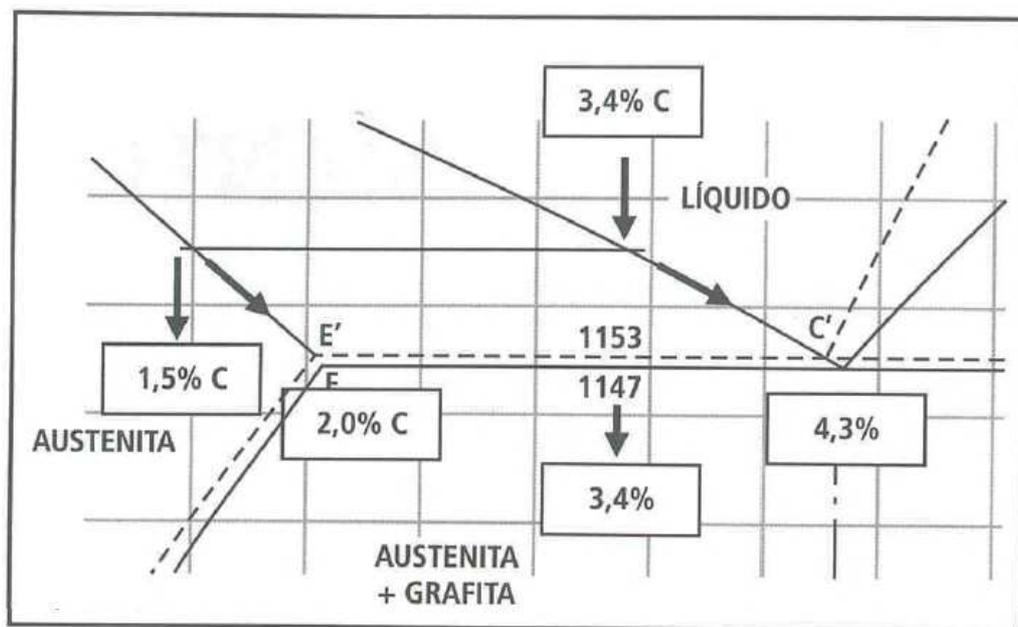


Figura 21: Exemplo solidificação ferro fundido apresentando 3,4% C.

Fonte: Guessier [33].

Tem-se entre outras variáveis, algumas que determinam se o tipo de matriz será ferrítica ou perlítica, como o tempo de resfriamento, quantidade de nódulos e a quantidade de ramificação lamelar que encontramos nestes materiais, sendo as velocidades mais baixas de resfriamento favorecendo a uma reação eutetóide

estável e os nódulos e as ramificações responsáveis pelas distâncias de difusão para que ocorra a reação eutetóide estável. É observado desta forma que, para se obter determinadas matrizes, seja necessário variar sua composição química, seu tempo de resfriamento e finalmente as posições da grafita. O conjunto destes fatores citados permite o arranjo de classes de ferros fundidos com propriedades bem distintas variando assim a formação de sua matriz metálica.

Os ferros fundidos apresentam em suas estruturas, constituintes que são merecidos seus destaques tendo suas importâncias em grau relevantes [38], entre elas é possível citar:

- ✓ **Grafita**= este constituinte se apresenta como a forma mais estável do carbono puro em ferro fundido, com características de baixa densidade, baixa dureza e com alta condução térmica. Sua forma é de veios lamelares, esferoidal ou até nodular, sendo a forma lamelar aquela que aparece como trincas em matriz de ferro e a nodular aquela que inibe as trincas.
- ✓ **Carboneto de Ferro**= também conhecido como Cementita, este constituinte é um composto intermetálico cuja fórmula química é  $Fe_3C$  se apresenta de forma dura e frágil na microestrutura. Pode aparecer também através de elementos formadores como, vanádio, cromo ou molibdênio, por este motivo são peças de difícil usinagem e frágeis.
- ✓ **Ferrita**= encontrada no ferro fundido na fase  $\alpha$ , responsável na diminuição da resistência mecânica e dureza do ferro.
- ✓ **Perlita**= esta constituinte tem sua criação imediatamente após a eutetóide, onde temos a formação da cementita. Uma das características é sua alta resistência com uma leve redução na ductilidade.
- ✓ **Martensita**= esta constituinte tem sua aparição quando altas taxas de resfriamento são aplicadas ao material. Seu revenimento tem a finalidade de obtenção de uma estrutura com alta resistência mecânica e ao desgaste. Na ausência deste processo esta constituinte possui alta dureza e uma fragilidade.
- ✓ **Austenita**= tem sua formação em elevadas temperaturas consistindo no carbono dissolvido em ferro.

- ✓ **Bainita**= composta por ferrita e carbonetos. Tem sua formação com a mistura de elementos de liga e também em tratamento térmico.
- ✓ **Ausferrita**= obtém-se misturando a ferrita acicular e austenita com carbono estabilizado.
- ✓ **Steadita**= a formação do carboneto de ferro e fosfeto de ferro se devem a mistura do fósforo com o ferro e o carbono. Suas imagens apresentam a cor branca com furos em sua extensão, esta constituinte é chamada de Steadita. Sua microestrutura apresenta-se dura e frágil nos contornos celulares. Possui como característica a diminuição da ductilidade e quando em grande quantidade e distribuição, pode diminuir o limite de resistência à tração e a dificuldade na usinagem das peças. Sua aparição se dá quando o fósforo é presente na quantidade acima de 0,15%.

### 2.2.2 Ferro fundido cinzento

A liga que apresenta uma cor escura em sua superfície de fratura justifica a sua denominação de ferro cinzento. A mesma possui a grafite na forma de lamelas em matriz perlítica [39], como se observa na figura 22.



Figura 22: Forma do grafite nos ferros fundidos cinzentos.

Fonte: Arquivo FOA, ataque 400X Nital3%

A resistência a tração, a microestrutura e a dureza das peças de ferro fundido são influenciadas pela velocidade de resfriamento, pela sua forma geométrica e pela composição química. Pode-se usar com a finalidade de controle da formação de grafite assim como de sua estrutura em matriz, o incremento de níquel, cobre cromo e o molibdênio. Este aumento na resistência à corrosão em alguns meios se consegue através das composições encontradas nestas adições.

Através dos tratamentos térmicos efetuados nas peças fundidas podem-se obter propriedades mecânicas modificadas e desejadas em determinados ensaios. O ferro fundido cinzento apresenta uma característica de aumentar sua tenacidade realizando sua tempera [39], porém é necessário fazer logo após seu revenimento.

A grafita livre aparece como conjunto de filamentos muito tênues, também conhecido como flocos, e que age como pequenas trincas internas na peça, o que torna este material sem um escoamento perceptível e frágil. Da mesma maneira, a ductilidade e o potencial de deformação sem haver fratura, tendem a ser limitados pelo alto teor de carbono, silício e sujeiras dentro da liga. Os dois itens associados, ou seja, a interrupção da continuidade através de trinca e a limitação da ductilidade neste metal justificam suas fragilidades como características. Como boa característica pode-se citar sua facilidade em ser usinada, excelente absorção de vibrações e resistência ao desgaste.

### 2.2.3 Grafite Livre

As cinco categorias dos veios de grafita [28] são designadas pelas letras “A” até “E” conforme a norma ASTM A247, em relação aos sete tipos de flocos classificados por esta mesma norma. A figura 23 apresenta estas categorias de veios de grafita.

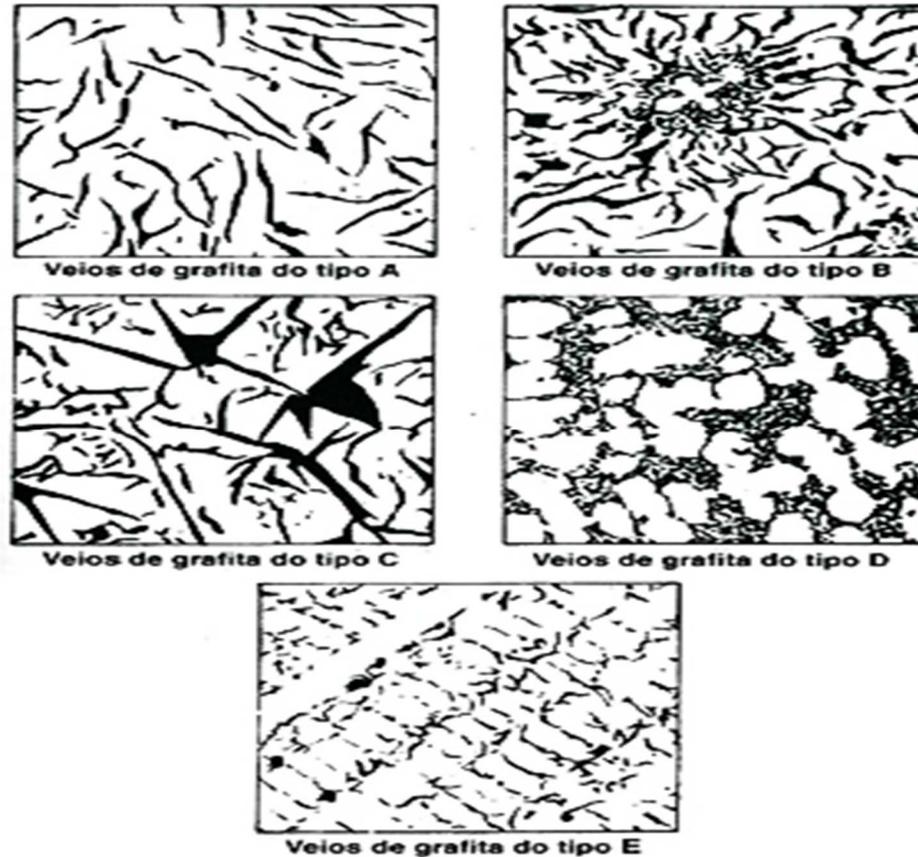


Figura 23: Tipos e distribuição veios de grafite em ferros fundidos.

Fonte: Chiaverini [28].

Para obtenção de diferentes tipos e distribuições de grafita, podemos efetuar a variação de velocidade do resfriamento e de sua espessura da amostra de ferro fundido.

A tabela 3 mostra o agrupamento [36] e como podemos compor quimicamente os ferros fundidos cinzentos em sete tipos.

Tabela 3: Agrupamento e a composição química ferros fundidos cinzentos / ASTM.

Classe ASTM	Composição Química (%)				
	C	Si	Mn	P	S
20	3,10 / 3,8	2,20 / 2,60	0,50 / 0,80	0,20 / 0,80	0,08 / 0,13
25	3,00 / 3,50	1,90 / 2,40	0,50 / 0,80	0,15 / 0,50	0,08 / 0,13
30	2,90 / 3,40	1,70 / 2,30	0,45 / 0,80	0,15 / 0,30	0,08 / 0,12
35	2,80 / 3,30	1,60 / 2,20	0,45 / 0,70	0,10 / 0,30	0,06 / 0,12
40	2,75 / 3,20	1,50 / 2,20	0,45 / 0,70	0,07 / 0,25	0,05 / 0,12
50	2,55 / 3,10	1,40 / 2,10	0,50 / 0,80	0,07 / 0,20	0,06 / 0,12
60	2,50 / 3,00	1,20 / 2,20	0,50 / 1,00	0,05 / 0,20	0,05 / 0,12

Fonte: Chiaverini [28].

As classes ASTM são denominadas por números de 20 a 60, correspondentes aos máximos valores de resistência a tração, a média aproximada destes números para o limite de resistência a tração é indicado na tabela 4.

Tabela 4: Classes dos ferros fundidos segundo a norma da ASTM.

	Classe 20	Classe 25	Classe 30	Classe 35	Classe 40	Classe 50	Classe 60
kgf/mm <sup>2</sup>	14,0	17,5	21	24,5	28,9	35	42
MPa	140	175	210	245	270	340	410

Fonte: Adaptado de Chiaverini [28].

A variação das propriedades mecânicas destas classes, de acordo com os diâmetros das peças de prova [36] é apresentada na tabela 5.

Tabela 5: Propriedades mecânicas dos ferros fundidos / ASTM.

Classe	Diâmetro do corpo de prova (mm)	Limite de resistência à tração kgf/mm <sup>2</sup> (MPa)	Dureza Brinell	Observações
20	22,2	15,5 / 18,3 (155 / 183)	160 / 220	Peças finas: espessura até 13 mm C – 3,50 a 3,80 % Si – 2,40 a 2,60 %
	30,5	12,9 / 16,9 (129 / 169)	160 / 180	Peças médias: espessura de 13 a 25 mm C – 3,40 a 3,60 % Si – 2,20 a 2,40 %
	50,8	12,7 / 15,5 (127 / 155)	130 / 180	Peças grossas: espessura sup. a 25 mm C – 3,10 a 3,30 % Si – 2,20 a 2,40 %
25	22,2	18,3 / 20,4 (183 / 204)	160 / 180	Peças finas: espessura até 13 mm C – 3,30 a 3,50 % Si – 2,20 a 2,40 %
	30,5	18,3 / 20,4 (183 / 204)	179 / 207	Peças médias: espessura de 13 a 25 mm C – 3,20 a 3,40 % Si – 2,20 a 2,40 %
	50,8	18,3 / 21,4 (183 / 214)	179 / 217	Peças grossas: espessura sup. a 25 mm C – 3,00 a 3,30 % Si – 1,90 a 2,20 %
30	22,2	21,1 / 24,3 (211 / 243)	179 / 288	Peças finas: espessura até 13 mm C – 3,20 a 3,40 % Si – 2,20 a 2,40 %
	30,5			Peças médias: espessura de 13 a 25 mm C – 3,10 a 3,30 % Si – 2,10 a 2,30 %
	50,8	21,1 / 24,3 (211 / 243)	207 / 228	Peças grossas: espessura sup. a 25 mm C – 2,90 a 3,20 % Si – 1,70 a 2,30 %
35	22,2	25,3 / 28,1 (253 / 271)	179 / 228	Peças finas: espessura até 13 mm C – 3,10 a 3,30 % Si – 2,00 a 2,20 %
	30,5	124,6 / 27,4 (246 / 264)	207 / 228	Peças médias: espessura de 13 a 25 mm C – 3,00 a 3,25 % Si – 1,80 a 2,10 %
	50,8	24,6 / 26,7 (246 / 260)	183 / 217	Peças grossas: espessura sup. a 25 mm C – 2,80 a 3,10 % Si – 1,60 a 2,00 %
40	22,2	29,5 / 32,3 (285 / 313)	207 / 241	Peças finas: espessura até 13 mm C – 3,00 a 3,20 % Si – 1,90 a 2,20 %
	30,5	28,1 / 33,0 (271 / 320)	212 / 241	Peças médias: espessura de 13 a 25 mm C – 2,95 a 3,15 % Si – 1,70 a 2,00 %
	50,8	28,8 / 31,6 (2786 / 306)	180 / 217	Peças grossas: espessura sup. a 25 mm C – 2,75 a 3,00 % Si – 1,50 a 1,90 %
50	22,2	35,9 / 38,7 (344 / 377)	228 / 269	Peças finas: espessura até 13 mm C – 2,90 a 3,10 % Si – 1,70 a 2,10 %

	30,5	35,2 / 40,1 (342 / 391)	228 / 269	Peças médias: espessura de 13 a 25 mm C – 2,70 a 3,00 % Si – 1,70 a 2,00 %
	50,8	35,2 / 38,0 (3426 / 370)	207 / 241	Peças grossas: espessura sup. a 25 mm C – 2,55 a 2,85 % Si – 1,40 a 1,70 %
60	22,2	42,2 / 45,7 (412 / 447)	228 / 272	Peças finas: espessura até 13 mm C – 2,70 a 3,00 % Si – 1,40 a 1,70 %
	30,5	42,2 / 45,7 (412 / 447)	248 / 290	Peças médias: espessura de 13 a 25 mm C – 2,50 a 2,85 % Si – 1,90 a 2,10 %
	50,8	42,2 / 45,0 (412 / 440)	212 / 248	Peças grossas: espessura sup. a 25 mm C – 2,50 a 2,80 % Si – 1,20 a 1,50 %

Fonte: Adaptado de Chiaverini [28].

Os três fatores que predominam para determinar as propriedades de metais como ferros fundidos cinzentos são: suas microestruturas, composição química e suas seções transversais.

Quando a microestrutura do material apresenta uma grande quantidade de carbono livre ou grafita, temos então mais maleável e menos resistência este material. Em se tratando de fator microestrutural, esta presença de grafita é predominante para definir a resistência do ferro fundido, assim como sua forma, dimensão dos veios e distribuição na matriz.

Como os ferros fundidos apresentam matriz metálica, ela possui ferrita e perlita; porém, com a quantidade maior de ferrita o material deverá ficar com uma usinabilidade melhor e com sua resistência mecânica e ao desgaste prejudicadas. Mas se a perlita for a constituinte predominante, estes terão uma resistência mecânica melhor. De outra forma, se este material contiver ferrita e perlita praticamente iguais, então sua dureza e resistência mecânica serão intermediárias.

As influências nas propriedades destes materiais são basicamente através da introdução do carbono e o silício e com menos expressão o fósforo. Como o maior responsável pela formação de grafita é o silício, ele assume a posição de principal elemento entre os três citados acima.

O carbono equivalente leva em consideração não somente os valores de elementos químicos no material, também o seu poder grafitizante. O silício e o fósforo têm influência direta no ponto eutético com seu deslocamento para as laterais. O valor do carbono equivalente mostra o quanto uma liga está perto do eutético. Se

considerarmos que o carbono equivalente = 4,3% seja do ponto eutético, as ligas que possuírem carbono equivalente abaixo de 4,3% serão chamadas de Hipoeutéticas e as ligas acima de 4,3% Hipereutéticas. Para o ferro fundido cinzento, conforme mostra a sua composição na tabela 3, o carbono equivalente pode variar entre 2,84% para ligas Hipoeutéticas a 5,33% para ligas Hipereutéticas. Esta liga se comporta como estrutura Perlítica + Ledeburítica + Fe<sub>3</sub> C secundário ou Ledeburítica + Fe<sub>3</sub> C primário.

A fórmula do “carbono equivalente” mostrado abaixo [40] é definida através da reação no mesmo momento do carbono, silício e fósforo:

$$\text{Equação 5: Carbono Equivalente\%} = C_t + \frac{\%Si + \%P}{3}$$

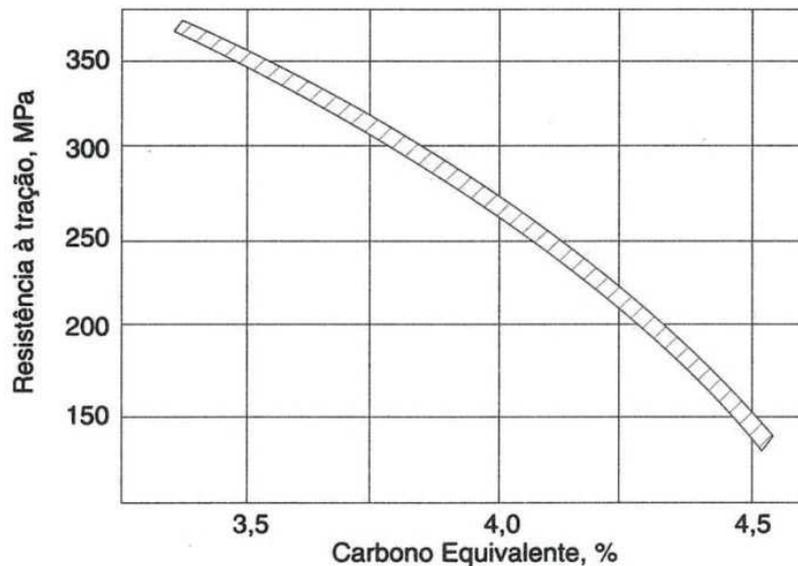


Figura 24: Ensaio de tração em barras de ferro fundido cinzento.

Fonte: Chiaverini [28].

Conforme verificamos na fórmula da equação 5, os carbonos totais juntamente com uma taxa de silício e fósforo modificam as propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento, entretanto, o teor de silício misturado com fósforo, afeta em apenas um terço em relação ao carbono total. A figura 24 acima mostra os ensaios em amostras de ferro fundido cinzento com medidas de 30 mm de diâmetro e variando sua resistência a tração com variação de percentual de carbono equivalente destas peças, observou-se que sendo maior o percentual do carbono equivalente menor o valor encontrado para a resistência de tração. O tamanho da grafita e suas quantidades influenciam diretamente no aumento de teor de carbono

equivalente e a redução direta do seu limite de resistência. O gráfico nos mostra a Resistência em função do carbono equivalente.

A influência significativa nas propriedades mecânicas devido à seção das amostras de ferros fundidos foi um dos fatores relevantes. Na variação das medidas das amostras pode-se aplicar o conceito de carbono equivalente, nota-se na figura 25 as funções entre a espessura da seção das peças e suas resistências a tração em relação ao carbono equivalente. Nela, é visível que os ferros fundidos cinzentos de menor carbono equivalente, possuem uma variação menor na espessura da seção com o aumento da resistência a tração.

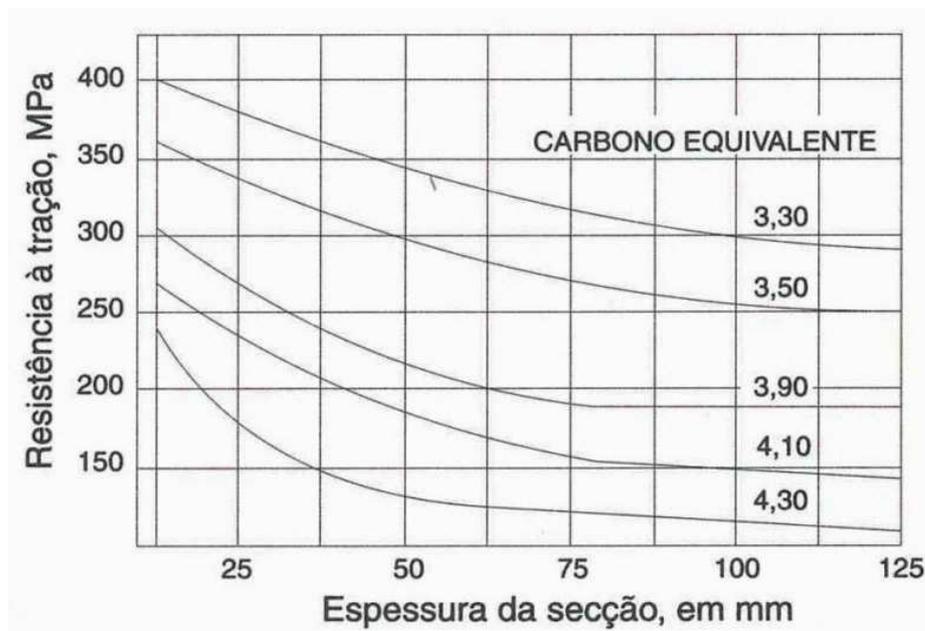


Figura 25: Espessura peças e suas resistências à tração X carbono equivalente.

Fonte: Chiaverini [28].

A tabela 6 apresenta as características mecânicas dos ferros fundidos cinzentos segundo a norma DIN.

As tabelas apresentadas nesta revisão bibliográfica, mostram que as propriedades mais importantes a serem avaliadas nos ferros fundidos cinzentos são a resistência a tração, à compressão e dureza.

Dentre as propriedades citadas, a resistência a tração é a mais importante para os ferros fundidos cinzentos, se baseando nela as várias normas existentes agrupam em classes esses tipos de materiais.

Na maioria dos ferros fundidos, a Dureza oscila desde 100 Brinell para os de grande usinabilidade, o cinzento até 600 Brinell para os ferros fundidos coquilhados.

A dureza no ferro fundido cinzento variou em valor médio de 89 HRB (Rockwell) nas peças ensaiadas.

Outra propriedade citada de grande importância é a resistência à compressão, esta é considerada apenas de importância comercial. A variação é de 3 a 4,5 vezes o medido na resistência a tração. Nos ferros fundidos cinzentos estes valores são encontrados entre 50 kgf/mm<sup>2</sup> (490 MPa) até 140 kgf/mm<sup>2</sup> (1380 MPa).

Tabela 6: Características mecânicas ferros fundidos cinzentos conforme norma DIN.

	CG - 10	CG - 15	CG - 20	CG - 25	CG - 30	CG - 35	CG - 40
Limite de resistência à tração, kgf/mm <sup>2</sup> (MPa)	10 (100) 20 / 31	15(150) 23 / 37	20(200) 29 / 43	25(250) 35 / 44	30(390) 41 / 55	35(340) 47 / 61	40(390) 53 / 67
Limite de resistência à flexão, kgf/mm <sup>2</sup> (MPa)	(200 / 300) 50 / 50	(230 / 360) 57 / 70	(280 / 420) 60 / 83	(340 / 430) 70/100	(400 / 540) 82 / 120	(460 / 600) 95 / 140	(520 / 660) 110 / 140
Resistência à compressão, kgf/mm <sup>2</sup> (MPa)	490 / 590	580 / 690	590 / 810	690 / 980	800 / 1000	930 / 1370	1080 / 1370
Módulo de elasticidade 10 <sup>3</sup> kgf/mm <sup>2</sup>	7,5 / 10	8 / 10	9 / 11,5	10,5 / 12	11 / 14	12,5 / 14,5	12,5 / 15,5
Limite de fadiga kgf/mm <sup>2</sup> (MPa)	0,35 a 0,5 do limite de resistência à tração						
Estrutura	Ferrítica ← ————— → Perlítica						

Fonte: Adaptado de Chiaverini [28].

Nos ferros fundidos, outra propriedade não muito importante como as três citadas, mas muito típica, é sua capacidade de amortecimento. Ela determina como o metal absorve as vibrações, estas que são o resultado das tensões cíclicas, por fricção interna, que transforma a energia mecânica em calor. A figura 26 mostra os gráficos de um impulso vibratório torcional em amostras de ferro fundido e de aço. Essa propriedade expressa a grande importância de sua utilização em máquinas-ferramentas, principalmente em suas bases. Em tubulações de ferro fundido, esta capacidade pode evitar trincas em junções e soldas.

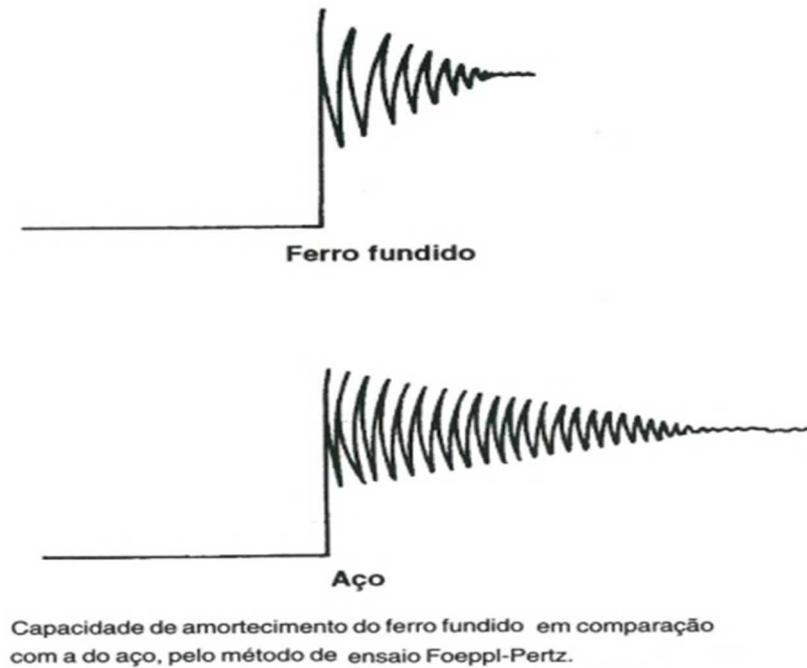


Figura 26: Amortecimento do ferro fundido comparado com a do aço.

Fonte: Chiaverini [28].

A tabela 7 relaciona algumas das aplicações mais importantes encontradas para o ferro fundido cinzento. Das classes vistas, podemos observar as classes 20 e 25, que possuem espessuras até 13 mm denominadas finas, de 13 a 25 mm denominadas média e finalmente para espessuras acima de 25 mm chamadas de grossas [41] e são utilizadas em tubos e conexões.

Tabela 7: Aplicações dos ferros fundidos conforme as classes ASTM.

Classe	Espessura das peças	Aplicações
20	Fina: até 13 mm	Utensílios domésticos: anéis de pistão produtos sanitários, etc..
	Média: de 13 a 25 mm	Bases de máquinas: fundidos ornamentais, carcaças metálicas, tampas de poços de inspeção, etc...
	Grossa: acima de 25 mm	Certos tipos de tubos, conexões, bases de máquinas pesadas, etc...
25	Fina: até 13 mm	Aplicações idênticas às da classe 20, quando se necessita de maior resistência mecânica.
	Média: de 13 a 25 mm	
	Grossa: acima de 25 mm	
30	Fina: até 13 mm	Elementos construtivos: pequenos tambores de freio, placas de embreagem, carters, blocos de motor, cabeçotes, buchas, grades de filtro, rotores, carcaças de compressor, tubos, conexões, pistões hidráulicos, barramentos e componentes diversos usados em conjuntos elétricos, mecânicos e automotivos.
	Média: de 13 a 25 mm	
	Grossa: acima de 25 mm	
35	Fina: até 13 mm	Aplicações idênticas às da classe 30
	Média: de 13 a 25 mm	
	Grossa: acima de 25 mm	
40	Fina: até 13 mm	Aplicações de maior responsabilidade, de maiores dureza e resistência à tração, para o que se pode usar inoculação ou elementos de liga em baixos teores: engrenagens, eixo de comando de válvulas, pequenos virabrequins, grandes blocos de motor, cabeçotes, buchas, bombas, compressores, rotores, válvulas, munhões, cilindros e anéis de locomotivas, bigornas, pistões hidráulicos e etc...
	Média: de 13 a 25 mm	
	Grossa: acima de 25 mm	
50	Fina: até 13 mm	Aplicações idênticas às da classe 40
	Média: de 13 a 25 mm	
	Grossa: acima de 25 mm	
60	Fina: até 13 mm	É a classe de maior resistência mecânica usando-se normalmente pequenos teores de Ni, Cr e Mo. Tambores de freio especiais, virabrequins, bielas, cabeçotes, corpos de máquina diesel, peças de bombas de alta pressão, carcaça de britadores, matrizes para forjar a quente, cilindros hidráulicos e etc...
	Média: de 13 a 25 mm	
	Grossa: acima de 25 mm	

Fonte: Adaptado de Chiaverini [28].

Cinquenta por cento das peças de máquinas são produzidas principalmente de ferro fundido cinzento e de Ferro fundido de baixa liga. Na operação e sob reparo, os desgastes de uniões são acompanhados pelo aparecimento de falhas de emergência, especialmente em peças de motores, nomeadamente, trincas, quebras, cavacos em cabeçotes e blocos de cilindros, paredes de tela de água e matriz de cilindros.

## 2.2.4 SiboDur

Dentre as famílias existentes de ferros fundidos, o ferro fundido SiboDur [38], material desenvolvido pela empresa Georg Fisher possui características estruturais interessantes tais como: baixíssimo peso, ótimos valores de tenacidade e ductilidade, com alongamentos que variam de 6 a 23 %.

Este tipo de material no mercado possui inúmero e variadas aplicações nas fabricas automobilísticas que vai desde rolamento longitudinal até cubos de rodas.

## 2.3 SOLDAGEM

### 2.3.1 Soldagem

Na união de duas partes metálicas e utilizando o calor para mantê-las unidas na pressão ou sem ela, é o que denominamos de soldagem. O que obtemos nesse processo chamou de solda.

O arco voltaico foi verificado e desenvolvido no século XIX, mas sua grande disseminação foi na II Guerra Mundial [42] com a grande fabricação de navios e aviões soldados. Ao longo do tempo obtivemos a evolução deste processo mostrado na figura 27.

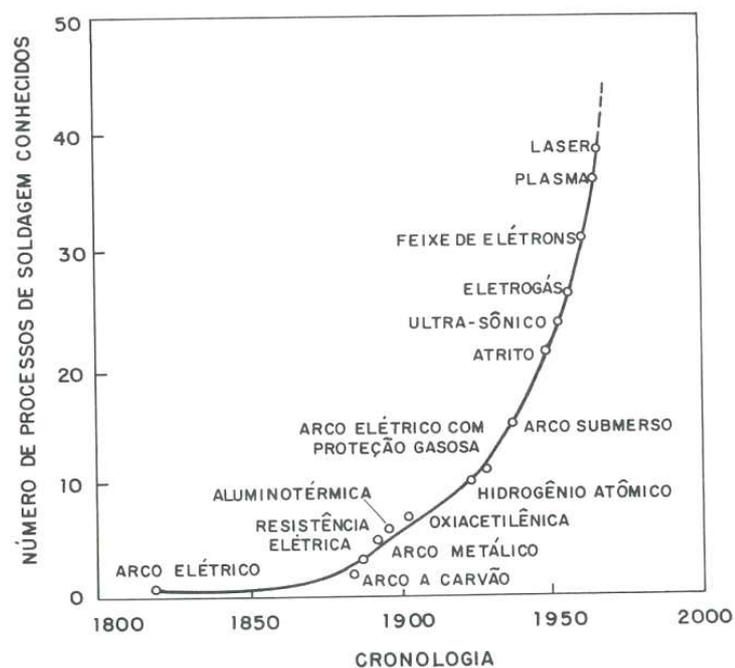


Figura 27: Evolução processos de soldagem ao longo do tempo.

Fonte: Wainer [43].

### 2.3.2 Arco Elétrico de Soldagem

Na união de materiais metálicos por fusão, tem-se como fonte de calor mais encontrada, o arco elétrico, que é o mais utilizado, pois possui uma combinação excelente de características, entre elas encontramos o direcionamento correto da energia utilizada nesta fusão localizada do metal base, possui baixo custo na aquisição do equipamento, seu controle é fácil e finalmente para a saúde ocupacional tem um nível aceitável de riscos.

A descarga elétrica que aparece em um gás ionizado em alta temperatura, é chamado de arco elétrico e conhecido como plasma. Esta energia em forma de calor é considerada já boa de forma a ser usada na soldagem de peças metálicas. No processo de soldagem, entre um eletrodo plano a peça e outro localizado no extremo de um arame, vareta ou eletrodo de solda opera-se o arco elétrico, esta área geralmente é muito menor que a do plano citado primeiro. Quase que na sua totalidade, os arcos têm forma cônica ou “de sino”, observa-se que o diâmetro formado junto à peça é maior que o diâmetro que aparece próximo ao eletrodo [44], conforme mostra a figura 28.



Figura 28: Arco voltaico entre eletrodo tungstênio e bloco de cobre atmosfera de argônio.

Fonte: Modenesi [13].

#### 2.3.2.1 Características Elétricas do Arco

A voltagem no trecho do arco voltaico não é uniforme e apresenta-se em três regiões distintas, de acordo com a figura 29.

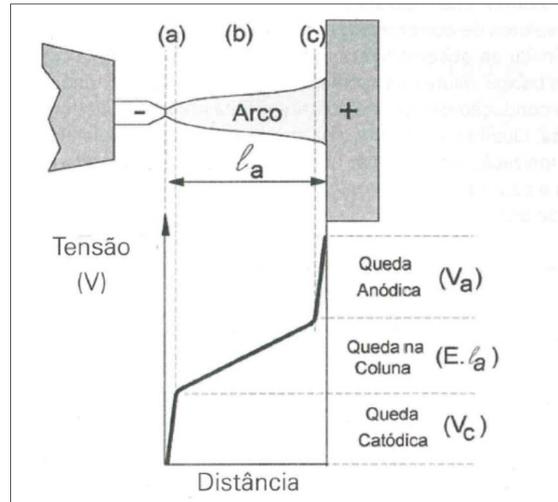


Figura 29:Local de um arco de solda.

Fonte: Modenesi [13].

Para realizar a solda a arco, efetuando a fusão entre as partes a serem soldadas, é necessário criar um arco elétrico entre estas, aplicando uma diferença de potencial entre estas peças e a corrente que circula por elas quando estabelece o arco de soldagem. Uma primeira aproximação, para termos um valor de corrente na soldagem, esta voltagem aplicada entre o eletrodo e a peça soldada, pode ser calculada pela fórmula:

$$\text{Equação 6: Voltagem no eletrodo (V)} = (V_a + V_c) + E_a l_a$$

A voltagem estabelecida nos extremos do arco para manter a descarga elétrica, é uma variação da distância entre os eletrodos, o que chamamos de comprimento do arco ( $l_a$ ), com a forma, o tamanho e o tipo de material dos eletrodos, a composição e pressão do gás de plasma e a corrente estabelecida no arco.

A curva que mostra a variação da tensão no arco voltaico em função da corrente de solda, para diferentes comprimentos de arco, mantendo alguns parâmetros fixos como a composição do gás de proteção é chamada de “Curva Característica Estática do Arco” e apresentada na figura 30. As três curvas mostradas com diferentes comprimentos de arcos servem somente para soldas entre um eletrodo de Tungstênio e um anodo do cobre. A curva do arco mostra a

tensão aplicada passando por um valor mínimo e aumentando com o aumento da corrente da solda, o comportamento analisado se assemelha a um visto em uma resistência comum. Porém, o comportamento da tensão encontrado em baixos níveis de corrente é o característico do arco elétrico e se explica pela corrente elétrica que é conduzida pelos íons e elétrons gerados na ionização térmica. A baixa energia disponível devido ao nível baixo de corrente impede o aquecimento e a ionização ideal do ambiente em que se estabelece o arco, isso dificulta a passagem da corrente [45] e por consequência o aumento da voltagem elétrica do arco.

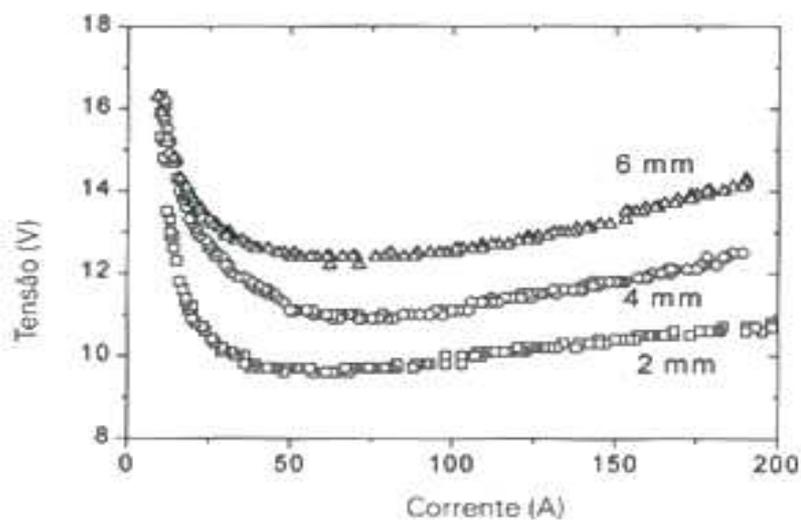


Figura 30: Curvas eletrodo tungstênio e anodo cobre para diferentes comprimentos arco.

Fonte: Modenesi [13].

### 2.3.2.2 Características Térmicas do Arco

A equação apresentada abaixo é usada para estimar o valor da energia ou calor gerado num arco voltaico [46] utilizando os seus parâmetros elétricos:

$$\text{Equação 7: Energia no arco elétrico } Q = VIt$$

O arco de soldagem em questão é possuidor de alta eficiência na transformação da energia proveniente da eletricidade em energia térmica gerado por ela para sua adequada transferência e a peça ser soldada. Na formulação [47],  $Q$  é igual à energia térmica gerada dada em Joules (J),  $V$  será a voltagem (V) encontrada no arco,  $I$  é a corrente elétrica responsável pela criação do arco dada em Amperes (A) e finalmente “ $t$ ” será o tempo de aplicação desta corrente em segundos (s).

### 2.3.3 Processo de Soldagem com Eletrodo Revestido

Denominamos de soldagem a correta utilização do calor oriundo de uma fonte para união de partes metálicas, obtendo assim a solda como produto final deste processo. O arco elétrico utilizado como fonte de calor é suficiente para ser usado em soldagem com eletrodos revestidos e a peça a ser soldada. O processo inicial de soldagem era totalmente rudimentar, o produto obtido neste processo instável de soldagem era soldas de péssima qualidade. A figura 31 mostra o esquema básico do funcionamento da soldagem com eletrodo revestido.

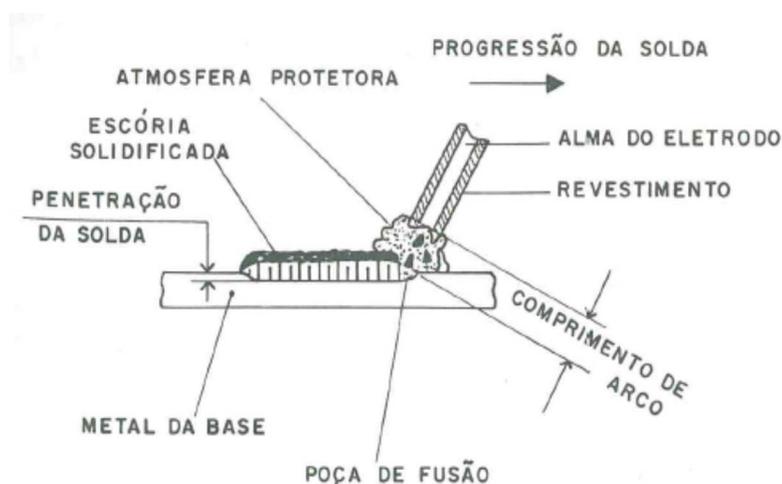


Figura 31: Desenho soldagem usando arco elétrico em eletrodo revestido.

Fonte: Wainer [43].

Algumas observações neste processo de soldagem foram realizadas no decorrer do século dezanove, onde culminou com as melhorias desenvolvidas nos eletrodos revestidos. Todas as modificações desenvolvidas em seus revestimentos visavam a melhoria na estabilidade do arco elétrico [43] produzindo assim depósitos de soldas com menor contaminação em sua poção de fusão.

Ainda hoje, a soldagem com arco usando eletrodo revestido, ainda continua sendo a mais utilizada. Os principais motivos que levam este processo a ser o preferido entre os inúmeros processos existentes são a simplicidade em se realizar as soldas e principalmente pelo fato de ser este o mais barato das opções que temos no mercado, atualmente este motivo é de fator relevante e muito importante diante da real necessidade em ser reduzir custos de produção. A realização da soldagem é manual, sendo controladas pelo soldador as variáveis: comprimento do

arco, poça de fusão assim como o movimento do eletrodo em toda direção da junta. É extremamente importante o revestimento do eletrodo, pois exerce várias funções importantes no momento em que se executa a solda propriamente dita. Entre essas funções está a estabilização do arco voltaico e a proteção do metal fundido através da criação de escória na poça de fusão da solda.

### 2.3.3.1 Equipamento Utilizado na Soldagem a Arco Voltaico

Para operação de soldagem utilizando eletrodo revestido, é necessário equipamento adequado para se reproduzir um arco voltaico e conseqüentemente o calor necessário para a solda. Os mesmos equipamentos, usados nesta soldagem comparando aos outros equipamentos de outros processos é de construção muito simples e econômica conforme mostra a figura 32, ela apresenta o diagrama de interligação com o detalhamento necessário para o entendimento das partes que compõe este tipo de equipamento.

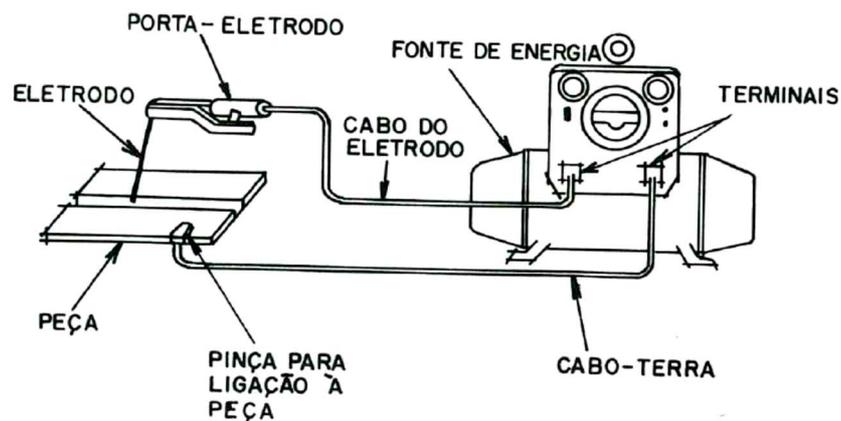


Figura 32: Esquema elétrico básico do equipamento de soldagem

Fonte: Wainer [43].

A fonte de energia mostrada na figura 32 pode operar o eletrodo revestido em corrente contínua ou corrente alternada. Podemos identificar na operação que utiliza a corrente contínua para criar arco voltaico, dois tipos de configuração para soldagem: a configuração com o eletrodo positivo ou com o eletrodo negativo, ambas as configurações podem ser utilizadas sem comprometer a qualidade da solda. Quando se compara a utilização de corrente alternada para efetuar a soldagem em relação ao revestimento do eletrodo, temos algumas vantagens e algumas desvantagens quando se utiliza corrente contínua. Algumas das vantagens

encontradas no uso da corrente alternada para soldagem é a diminuição da sensibilidade ao sopro magnético e queda na tensão dos cabos devido à passagem desta corrente elétrica. Este fato favorece ao uso do ponto de solda em distâncias maiores, o que não seria possível com o uso da corrente contínua, porém, a propriedade que determina o ponto de ignição e estabiliza o arco voltaico é inferior ao ponto determinado pelo uso da corrente contínua, o que caracterizam suas desvantagens.

### **2.3.3.2 Fonte de Energia**

A soldagem pode ser realizada fornecendo ao sistema uma voltagem entre 10 a 40V com correntes de 10 a 1.200 A. Este equipamento é chamado de fonte de energia [48] e podem ser do tipo convencional ou eletrônico. Encontramos no mercado alguns modelos muito simples com baixíssimo custo de aquisição utilizando apenas um transformador com fonte de corrente, entretanto, se consideram extremamente importantes, os itens abaixo a serem observados:

- Dependendo da soldagem, utilizar valores adequados de corrente e tensão.
- Possuir ajustes de tensão e corrente adequados.
- Os níveis de corrente e tensão devem ser controlados durante a soldagem das peças atendendo as especificações do processo e aplicação.

Das fontes tradicionais utilizando a corrente contínua, destacamos as estáticas rotativas (Geradora) que possuem motor utilizando a energia elétrica, gasolina, óleo diesel ou outro acionador qualquer, essa energia mecânica gerada na ponta de eixo do motor através do eixo acoplado, correias ou polias são enviadas diretamente ao gerador de energia elétrica que transforma esta energia mecânica em energia elétrica (Figura 33). Particularmente ideal para locais onde não se possui a energia elétrica disponível.

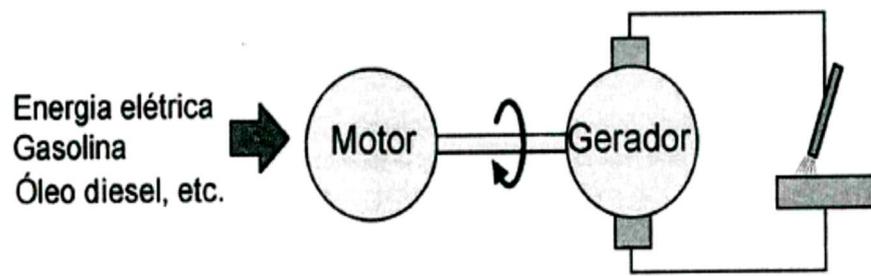


Figura 33: Diagrama esquemático de um motor-gerador.

Fonte: Modenesi [13].

A figura 34 mostra as curvas características das fontes de energia usadas na realização das soldas com arco elétrico, comparando com o gradiente de temperatura criado por pelo arco no momento da soldagem.

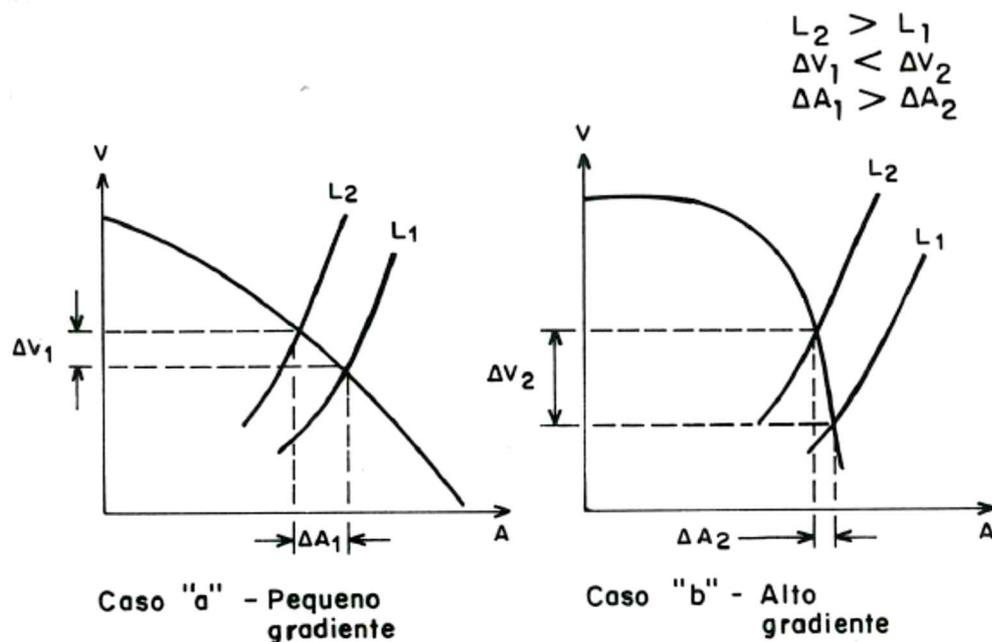


Figura 34: Curva característica da fonte e a comparação gradiente temperatura.

Fonte: Modenesi [13].

$\Delta V$  é a variação da tensão de arco,  $\Delta A$  significa a variação da corrente de arco e finalmente  $L1$  e  $L2$  representa o comprimento dos arcos. Nota-se que obtemos gradiente de temperatura maior no caso "b" da figura 34, ela apresenta a curva relativamente mais usada, pois verificamos que a variação da corrente ( $\Delta A$ ) é bem menor com uma alta variação de tensão ( $\Delta V$ ), esse fator de estabilidade da corrente neste caso, tem independência igualmente do comprimento do arco, estes

fatores associados a uma maior tensão com o circuito aberto, favorecem a repetição a abertura de arcos elétricos [49] para desenvolvimento da soldagem.

### **2.3.3.3 Variáveis Elétricas na Soldagem**

Para se obter a qualidade de soldagem, precisamos considerar as seguintes variáveis de processo:

- A Tensão de Arco;
- A corrente de soldagem;
- A velocidade de avanço;
- A oscilação do eletrodo;
- As dimensões do eletrodo;
- O ângulo do eletrodo em relação à peça;

### **2.3.3.4 Tensão de Arco**

Dessas variáveis, a voltagem usada no arco, apesar de ser muito importante e diferenciadora em relação aos outros processos, não é uma variável controlada no processo. Os motivos que justificam essa afirmativa, entre outros, se baseiam no fato de que ao efetuarmos a soldagem não conseguimos manipular com exatidão a distância que obtemos entre o consumível e a peça que se encontra em soldagem; quando há incremento de corrente de soldagem se faz necessário que se aumente também a tensão de arco considerando a condição de solda normalizada.

### **2.3.3.5 Corrente de Soldagem**

A corrente da solda é a variável mais importante no processo de soldagem, ela é responsável pelo cordão de solda formado e por consequência responsável pela propriedade da junta formada. Ao efetuar a solda, necessitamos de uma temperatura adequada e com uma corrente existente no arco elétrico. Esta corrente elétrica é a também responsável pela criação desta energia térmica e pelos inúmeros fenômenos existentes nesse processo. A variável discutida tem seu valor especificado pelos fabricantes, à falta de observação nestas recomendações pode provocar um aquecimento excessivo nos eletrodos e seu revestimento o que causaria sua destruição. Sua relação com a velocidade de resfriamento se apresenta de forma contrária, ou seja, de proporção inversa, este fato é causador da

limitação ocasionado pela operação de soldagem, entretanto, esta velocidade deve ser equilibrada em sua velocidade alta e baixa, obtendo assim o ponto que satisfaz as duas condições.

### **2.3.3.6 Velocidade de Avanço**

Nos estudos realizados, foi identificado uma outra variável não mais importante que a citada anteriormente, mas de teor importantíssimo, a velocidade de avanço na soldagem. Igualmente a tensão de arco, ela é considerada imprecisa para soldas manuais. Mesmo com a aplicação de altas correntes, é possível a manutenção da energia térmica na solda variando a velocidade de avanço da soldagem, com este procedimento é possível alcançarmos altas taxas de deposição obtendo microestruturas adequadas na zona fundida ou na ZTA (zona termicamente afetada). Observa-se também que acerca da velocidade de avanço na soldagem em relação à altura e a largura do cordão de solda produzido, ao aumentarmos esta variável diminuimos as outras duas proporcionalmente.

### **2.3.3.7 Oscilação do eletrodo**

No processo de soldagem quando se imprime maior movimento oscilatório no eletrodo, a oscilação provoca a variação do arco voltaico, desta forma, quando obtemos a redução da velocidade de avanço reflexo do aumento desta oscilação temos o incremento do calor na poça de fusão. Contudo, essa prática é aplicada quando se deseja o controle total da energia imposta à solda, atuando na oscilação do eletrodo. Foi verificado que um movimento oscilatório mínimo se faz necessário para controlar o banho de fusão e limitar a inserção da escória no metal fundido.

### **2.3.3.8 Dimensões do eletrodo**

Os eletrodos no mercado são encontrados com suas dimensões normalizadas, esse padrão de fornecimento é oriundo de uma experiência adquirida pelos soldadores no exercício da soldagem e suas respectivas posições na soldagem. No eletrodo, de um lado encontramos um baixo nível de corrente, chamada de mínima, proveniente da instabilidade do arco, do outro lado temos um alto nível de corrente, chamada de máxima, quando acontece o aquecimento resistivo que também limita este nível aplicado de corrente. É notado que, para se obter propriedades adequadas do arco voltaico, necessitamos encontrar posturas favoráveis para soldagem, escolher de forma apropriada o chanfro para ser aplicado

na operação de soldagem e finalmente observar o revestimento no qual recobre o eletrodo, estas três variáveis determina o diâmetro ideal que poderemos utilizar na soldagem a ser realizada.

### **2.3.3.9 Ângulo do eletrodo versus peça a ser soldada**

Constatamos que outras variáveis são importantes quando é operado a solda elétrica em uma peça, o ângulo em que o consumível é aplicado em relação a peça que se encontra em solda. É de extrema importância o ajuste deste ângulo para se obter o fluxo térmico adequado de soldagem, para a construção de uma poça de fusão adequada e assim construir um cordão de solda sem defeitos. Diante de todas essas condições desejadas quando se realiza corretamente o ângulo de solda, destacamos a variável que obtemos na saída do chanfro denominada de molhabilidade do líquido. Sendo importante esta variável e se não observada pelo soldador, pode ocasionar entre outros problemas encontrados, aquele difícil de ser controlado e no qual denominamos de defeito de cordão de solda, ou seja, o surgimento ou não do defeito referido acima, este depende exclusivamente da habilidade e treinamento do soldador.

### **2.3.3.10. Consumíveis**

Para se compreender os fenômenos que acontecem no processo de soldagem, se faz necessário conhecer os eletrodos utilizados e sua fabricação. A extrusão ainda aparece como o processo para fabricação deste tipo de consumível, assim, através da pressão exercida no corpo do eletrodo, é depositado o revestimento. O corpo central do eletrodo é chamado de “alma”, a alma do eletrodo é geralmente formada de um arame colocado de forma a ficar bem encaixado e cortado em dimensão apropriada, após a inserção do revestimento o eletrodo passa por uma série de tratamentos para serem acabados para venda. Estes componentes geralmente classificados conforme sua utilização, ou seja, em serviços de pequena importância ou em serviços de grande importância. Aquele eletrodo em que o depósito é utilizado nos serviços em que consideramos de baixa importância, possui a ferrita em seu anel externo apresentando micro porosidades centralizadas, com o uso de silício, alumínio e desoxidantes para melhorar a estabilidade do arco voltaico. Porém, os consumíveis cujo depósito é utilizado em serviços de grande importância

possuem seu corpo formado por materiais de alta qualidade [50] tendo o enxofre e o fósforo abaixo de 0,04%.

### 2.3.3.11 Revestimentos

Os revestimentos possuem em sua constituição, vários constituintes que desempenham várias funções em sua composição. Os revestimentos são constituídos de misturas de compostos de minerais ou compostos orgânicos que no processo de soldagem, executam tarefas de extrema importância e de difícil contabilização. Entretanto, podemos enumerar as mais importantes e relevantes na solda elétrica a arco voltaico:

- Manter o arco elétrico estabilizado em operação de soldas – Os agentes que compõe os revestimentos se despregam deste arco fazendo ocorrerá geração de gases de baixo potencial de ionização;
- Formar gases que protegerão a poça de fusão – são potencialmente inertes ao metal líquido;
- Forma a escória – Este componente deposita no banho a camada líquida impermeável e que não reage com o banho de solda;
- Adicionar componentes e ligas metálicas no depósito;
- Dar condições de melhora do processamento quando na fabricação, reunindo os constituintes.
- Permitir a melhora do revestimento até sua ductilidade.

A literatura classifica os quatros tipos de grupos de revestimentos existentes e mais importantes utilizados em aços de baixa e média liga, destes, podemos citar o Celulósico, rutílico, ácido e básico.

- Eletrodos Celulósicos =São as coberturas de revestimento que possuem índices maiores que 20% de agentes celulósicos;
- Eletrodos Rutílicos = Revestimento com índice superior a 20% de óxido de titânio;
- Eletrodos Ácidos = Revestimento com base de óxidos de ferro, manganês e silicatos;
- Eletrodos Básicos =baseados nos carbonatos de cálcio, sua utilização proporciona poças de baixos teores de hidrogênio.

### 2.3.4 Tensões Residuais e Distorções em Soldagem

Em determinadas soldas como a de fusão, temos envolvimento de enormes aquecimentos localizados nestas peças a serem soldadas. As regiões afetadas por este aquecimento excessivo se dilatam e este alongamento é limitado pelas partes frias e que possuem um menor grau de temperaturas localizadas ao lado dos pontos quentes soldados. Estas deformações causam a chamadas tensões residuais e as mudanças permanentes chamadas de distorções, ambas afetam a qualidade da solda e seu conhecimento é primordial para se prevenir e fazer o controle a fim de termos uma solda com qualidade e sim, de excelente desempenho.

Quando submetemos determinado material ao processamento térmico ou ao esforço mecânico, observamos que ao retirarmos os esforços externos às forças que ainda atuam sobre essas peças são as tensões residuais causadas por fatores mencionados anteriormente. A soma de todas as tensões residuais na peça soldada, deverá ser nula e de forma que as forças estejam em equilíbrio. O desequilíbrio dessas forças provoca uma redistribuição das forças na busca da restauração do equilíbrio, esta operação pode causar na peça uma distorção adicional não desejada na forma da peça. É fácil concluir que estas distorções e tensões residuais provocam trincas nas peças soldadas, maior possibilidade de fadiga ou até mesmo a fratura desta solda.

#### 2.3.4.1 Tensões Residuais em Soldas

Sabemos que a dilatação de um metal aquecido pode ser calculada pela fórmula abaixo:

$$\text{Equação 8: Dilatação em um metal } \Delta l = l - l_0 = l_0 \cdot \alpha (T - T_0)$$

Onde  $\Delta l$  são a variação do comprimento e  $\alpha$  o coeficiente de dilatação térmica linear. O aquecimento e resfriamento uniforme de uma determinada peça não provocam distorções mecânicas relevantes, porém, se o aquecimento não for linear e uniforme [51], aparecerão tensões residuais e ou distorções desenvolvidas na peça soldada.

Em região do cordão de solda assim como em mais afastadas, onde encontramos o metal base, é observado um comportamento típico em relação às temperaturas imprimidas pela solda difusão, podemos ver na figura 35 que ao longo

da solda na direção transversal obtemos longitudinalmente tensões distribuídas. Em região soldada apresentada, observa-se que forças de tração ocorridas diminuem de valor atingindo índices negativos que são as compressões nas partes distantes da solda, assim como tensões residuais ao longo da solda.

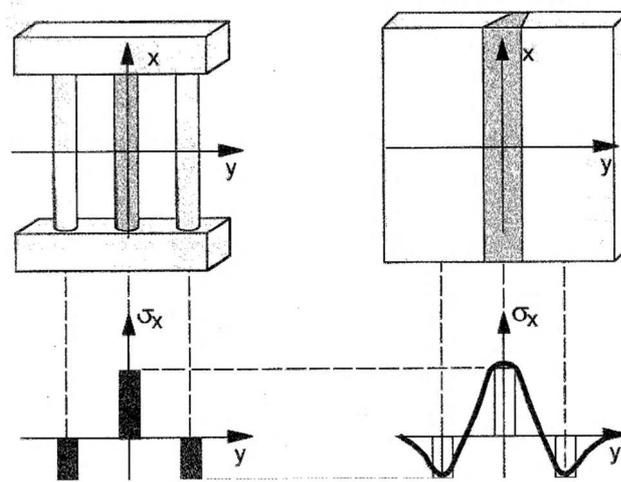


Figura 35: Tensões residuais longitudinais longo direção transversal (y) solda topo por fusão.

Fonte: Modenesi [13].

#### 2.3.4.2 Formação de trincas em soldas

Apesar das grandes possibilidades que o ferro fundido oferece combinando algumas das propriedades mecânicas dos aços com o baixo custo e simplicidade de fundição, seu uso é limitado por alguns fatores, incluindo a soldagem deste material, uma vez que esta operação precisa de cuidado na preparação e execução sendo muito difícil de manter as características mecânicas do metal base do material. Alterações na microestrutura pode sempre ser um problema quando na soldagem, mas estas alterações tornam-se grandiosos em ferro fundido devido à formação de martensita na zona afetada pelo calor (ZTA) e carbonetos de ferro na interface que permeiam o metal base e o rebordo. A seleção correta da composição dos consumíveis pode minimizar esses problemas e tem sido estudada em diferentes relatórios, mas as informações disponíveis ainda são bastante limitadas. Na soldagem, observa-se o aparecimento de trincas motivadas por dois fatores distintos, uma, é ação mecânica momentânea no material que devido a sua falta de capacidade de responder a tensão mecânica aplicada acomoda-se apresentando uma deformação plástica que chamamos de fragilização. Ao redor do grão é encontrado líquido, hidrogênio na peça soldada assim como crescimento próprio

destes grãos [52], estes se encontram presentes no momento da solda e logo depois de efetuada a soldagem.

### 2.3.4.3 Distorções

As deformações permanentes sofridas pelas juntas das peças após a soldagem são ocasionadas pelas tensões transientes ocorridas quando são efetuadas as soldas nas peças. Mostramos na figura 36 algumas distorções básicas ocorridas nas soldagens, o estudo destas forças residuais e suas respectivas deformações que aparecem durante e após uma soldagem real por fusão, é muito mais complexo que este estudo básico apresentado na figura citada, essas variáveis analisadas dependem de muitos fatores, dentre eles aparecem: o material utilizado, propriedade mecânica deste material e a dimensão de sua espessura soldada, em que grau de rigidez se encontra estas peças, as dimensões soldadas, posição, geometria e finalmente o número de soldas aplicadas na soldagem.

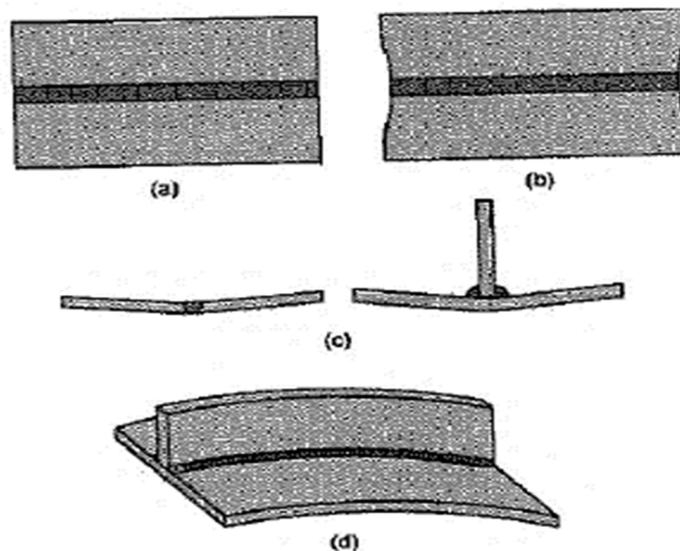


Figura 36: Distorção soldagem: (a) transversal; (b) longitudinal; (c) distorção angular e (d) flexão

Fonte: Modenesi [13].

### 2.3.4.4 Controle e alívio das tensões residuais

É sabido que estas tensões residuais criadas nas uniões de soldas por fusão têm-se seu valor diminuído quando se faz o decremento do calor depositado na junta no momento da solda e também quando se reduz o peso do metal que deposita na junta soldada. Esta operação tem significado na prática de diminuição do ângulo do chanfro e diminuição da quantidade de consumível utilizado usado na

solda [53], o que iria diminuir nas soldas de topo aqueles reforços na soldadura e ou diminuir o comprimento das soldas de filete. Através de técnicas utilizando os meios térmicos ou mecânicos, é possível minimizar as tensões residuais após as soldaduras, veja os resultados mostrados na tabela 8.

Tabela 8: Métodos aliviar tensões residuais.

Procedimento		Descrição	Características	Limitações
(a)	Martelamento	Martelamento do metal depositado e de suas adjacências durante ou após a soldagem.	Método simples pode causar refino de grão.	Inadequado para materiais de baixa ductilidade.
	Encruamento	A junta soldada é deformada plasticamente pela aplicação de cargas de tração.	Bastante eficiente para tanques esféricos e tubulações.	Inadequado para estruturas complicadas pela dificuldade de aplicar tensões uniformes.
	Vibração	Vibrações são aplicadas na estrutura causando uma ressonância de baixa frequência, o que ocasiona deformação plástica parcial da estrutura e alívio de tensões.	Operação simples.	Inadequado para chapas grossas ou grandes estruturas. O alívio de tensões não é uniforme.
(b)	Recozimento para alívio de tensões	Aquecimento a 600 – 700 °C (aços ferríticos) ou 900 °C (aços austenísticos) seguido de resfriamento lento. Pode ser local ou total.	Muito utilizado e bastante eficiente.	Inaplicável para grandes estruturas e difícil de ser executado no campo. Custo elevado.
	Recozimento a alta temperatura	Aquecimento a 900-950 °C (aços Ferríticos) seguido de resfriamento lento. Pode ser local e total.	Pode eliminar completamente as tensões residuais.	Inaplicável para grandes estruturas e difícil de ser executado no campo. Custo elevado.
	Alívio de tensões a baixas temperaturas	Aquecimento do local da solda a 150-200 °C em uma largura total de 60 a 130 mm.	Adequado para grandes estruturas.	O alívio de tensões é parcial.

Fonte: Adaptado de Modenesi [13].

#### **2.3.4.5 Controle e correção da distorção**

Algumas ações podem ser aplicadas para redução dos desvios permanentes quando se realiza uma soldagem, sendo estes recursos técnicos aplicados em diferentes etapas do processo:

- Durante o projeto das estruturas soldadas;
- Durante a fabricação das peças;
- A soldagem em que realiza a correção de distorções, esta técnica sendo realizada com as peças quentes ou frias.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1 As Amostras de Ferro Fundido e Aço Carbono

O material utilizado como base para fabricação das amostras foi retirado de uma tubulação avariada na planta Siderúrgica em questão. Era sabido por inspeção visual, que se tratava de uma tubulação de ferro fundido. Devido às variedades de ferro fundido encontrado nas literaturas, foi necessário efetuar a caracterização do tipo de ferro fundido no qual seria realizada a soldagem. Portanto foram retiradas várias amostras de tubulações conforme mostra figura 37. Além das amostras de ferro fundido, foi necessário colher amostras das tubulações de aço carbono utilizados nos reparos destas tubulações, de forma a termos a caracterização do aço a fim de saber qual o tipo e composição das peças que serão soldadas juntamente com o ferro fundido. As amostras apresentadas na figura 38 foram separadas e identificadas para os ensaios em laboratório.

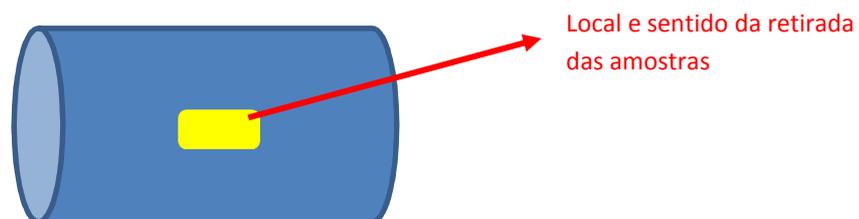


Figura 37 : Local e sentido da retirada das amostras nas tubulações

Fonte: Autor

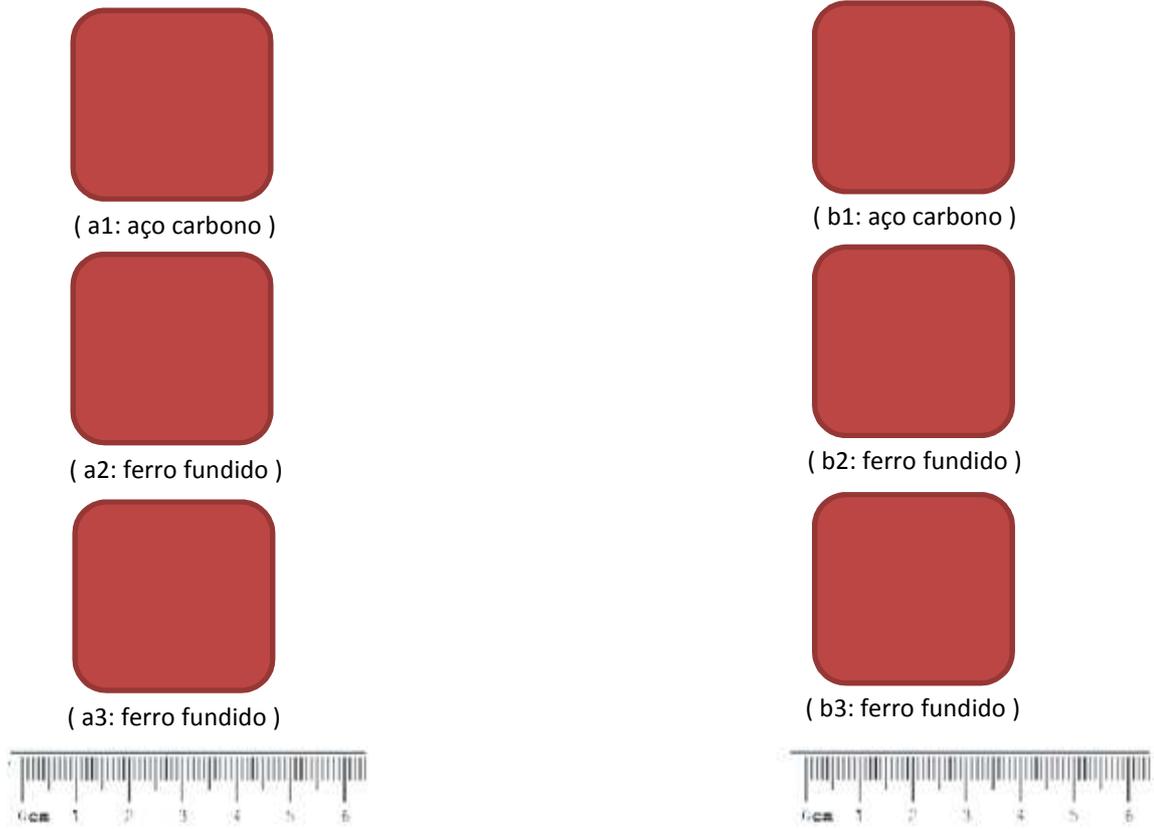


Figura 38: Amostras para ensaios em laboratório.

Fonte: Laboratório FOA (2017).

Para realização dos ensaios, estas amostras foram montadas e soldadas conforme tabela 9:

Tabela 9: Separação e identificação das amostras.

Identificação da amostra	Características Supostas	Observações
a1	Aço Carbono	Retirada das tubulações
a2	Ferro Fundido (FoFo)	Retirada das tubulações
a3	Ferro Fundido (FoFo)	Retirada das tubulações
b1	Aço Carbono	Retirada das tubulações
b2	Ferro Fundido (FoFo)	Retirada das tubulações
b3	Ferro Fundido (FoFo)	Retirada das tubulações
a1 X a2	União Aço Carbono com FoFo	Soldagem com Níquel Puro Xyron – 2224
a2 X a3	União Fofo com FoFo	Soldagem com Níquel Puro Xyron – 2224
b1 X b2	União Aço Carbono com FoFo	Soldagem com Eletrodo Aço Baixa Liga E 8018
b2 X b3	União Fofo com FoFo	Soldagem com Eletrodo Aço Baixa Liga E 8018

Fonte: O autor.

Depois de realizado as devidas caracterizações nas amostras, foram levadas para soldagens conforme procedimento descrito no anexo. Os parâmetros de soldagem que foram utilizados: Tensão de 10 volts, corrente de 90 Ampéres, com velocidade adequada de forma a não introduzir um alto aporte térmico na peça soldada e finalmente um eletrodo de 2,5mm.

A tabela 10 apresenta um resumo dos parâmetros de soldagem realizados.

Tabela 10: Parâmetros utilizados na soldagem.

Tensão (volts)	Corrente (ampéres)	Velocidade	Diâmetro Eletrodo (mm)
10	90	Adequada	2,5

Fonte: O autor.

A tensão de 10 volts foi consequência da escolha de uso da corrente em 90 ampéres para soldagem. A utilização de corrente em 90 ampéres foi devido a indicação do fornecedor do eletrodo a base de níquel utilizado. A velocidade de soldagem não foi medida, entretanto, utilizou-se uma velocidade em que não

inserir na peça um alto aporte térmico, finalmente o diâmetro do eletrodo foi escolhido devido a espessura das amostras serem de 3 mm.

Desta forma, foram obtidas as amostras das soldagens conforme figura 39.

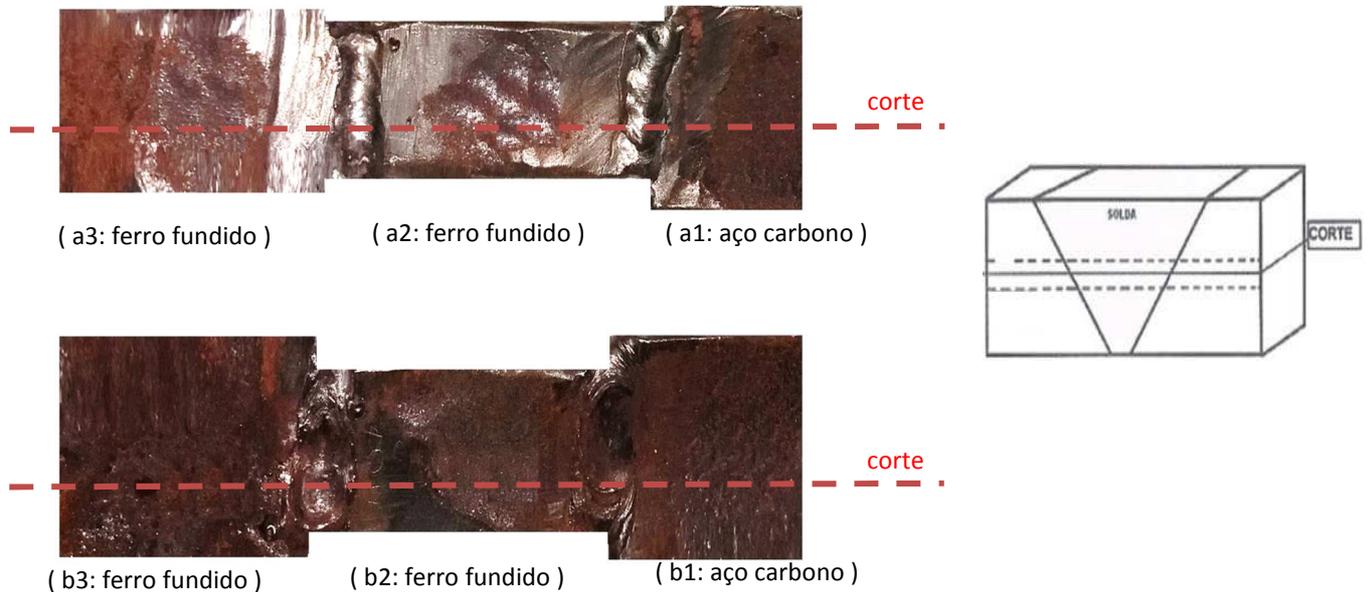


Figura 39: Amostras das soldaduras conforme procedimento.

Fonte: Laboratório FOA (2017).

### 3.1.2 O Eletrodo de Níquel e E8018 Baixa Liga

Um dos consumíveis utilizados nas soldagens experimentais foi o tipo Eletrodo com Alma de Níquel Puro Xyron – 2224, onde sua Dureza foi apresentada com 160 HB na segunda camada de solda, conforme observado no Folheto Técnico Castolin Eutectic (2017), com diâmetro de 2,4 mm (3/32”) e utilizando correntes de 60 a 90 Amperes. As composições químicas dos elementos revestidos são de C = 1,0 a 1,5; Si = 1,0; Mn = 1,0; P = 0,00 a 0,04; S = 0,00 a 0,02; Fe = 8,0 a 9,0 e finalmente Ni = Resto.

Estes consumíveis possuem uma tensão de ruptura aproximadamente de 344 MPa, este valor é considerado aquele em que se consegue usinar estes pontos de solda. Observa-se que o fósforo contido em grande quantidade nestas soldas pode colocá-las susceptíveis ao aparecimento de trincas nas mesmas.

O outro eletrodo utilizado é o de aço baixa liga E 8018, a composição química destes elementos revestidos são de C = 0,06; Si = 0,45; Mn = 0,7; Mo = 0,50 e

finalmente  $Cr = 1,0$  [54]. Foi comparado a Microdureza da solda quando utilizado os dois tipos de eletrodos revestidos.

A figura 41 apresenta algumas das amostras, já realizada as soldas, utilizadas para os ensaios em laboratório. Foram utilizadas fragmentos de tubulação de ferro fundido e aço carbono. Destas amostras foram retirados fragmentos de aço carbono e ferro fundido para realização dos ensaios metalográficos, caracterizando desta forma os tipos de materiais constituintes de cada fragmento. Após a caracterização destes materiais e identificado qual era aço carbono e qual era ferro fundido, realizaram-se as soldas entre aço carbono com ferro fundido e ferro fundido com ferro fundido, de forma a podermos realizar os novos ensaios metalográficos com a finalidade de analisar a ZTA obtida nas soldagens. A Solda realizada contemplou o método de Soldagem a Frio, ou seja, foram realizadas soldas com cordões curtos, martelados, alternados, assim como foi mantido a temperatura baixa nas laterais do metal base, sem correntes de ar e finalmente resfriado lentamente para que se iniciasse outro passe de solda.

### **3.2 Métodos**

O método descrito a seguir, teve como objetivo principal, a soldagem em ferro fundido cinzento, através da técnica de soldagem com arco elétrico em eletrodos revestidos a base de níquel.

O fluxograma mostrado na figura 40, apresenta de forma mais simplificada o método utilizado para as soldagens nestas amostras.

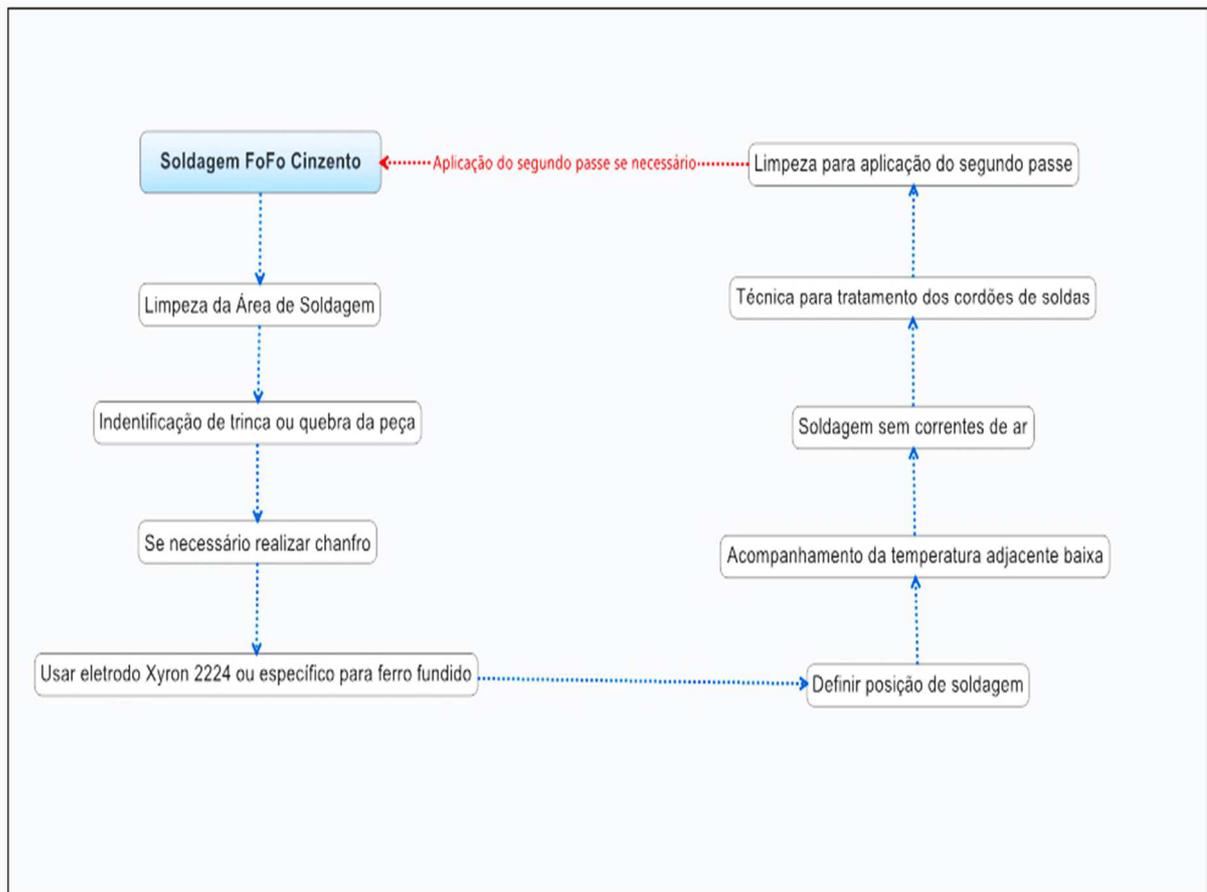


Figura 40: Fluxograma apresentando o passo a passo do método utilizado para a soldagem das amostras.

Fonte: O autor

Para executar a soldagem, visto que este material pode estar contaminado com óleo e líquidos, e estes tipos de contaminação afetam a soldabilidade. Foram retirados antes da soldagem do material. Foi utilizada uma solução clorada para retirada de graxa, vestígio de areia ou quaisquer outras impurezas. Outra opção também seria queimar o óleo através de um leve aquecimento da junta a ser soldada.

Foi utilizado a técnica de realizar chanfro nas amostras a serem soldadas. Uma das vantagens em se utilizar um método para realização deste chanfro, é a correta abertura deste, evitando assim a trituração das superfícies do chanfro.

O consumível utilizado foi o eletrodo Xyron 2224, aplicado na soldagem de blocos, camisas e cárter de motores, carcaças de bombas, polias e apoio de virabrequim, por exemplo. Do tipo eletrodo Ni, cujo depósito favorece a soldagens em ferros fundidos com baixo aporte de calor e possui excelente usinagem. Possui como

característica, uma resistência à tração de 350 MPa e um Dureza de 160HB na segunda camada de solda.

Houve o acompanhamento da temperatura adjacente do local de soldagem, através apenas de visualização, para que esta se mantivesse baixa, garantindo o baixo aporte térmico na soldagem.

Um cuidado especial no resfriamento das amostras nos pontos de soldagem de forma a não termos correntes de ar circulando pelo ponto de soldagem, proporcionando ao pós aquecimento um resfriamento bem lento. Este cuidado favorece ao não aparecimento de martensita na microestrutura.

Logo após foi efetuado o martelamento dos cordões de solda com uma ferramenta de ponta arredondada imediatamente após a soldagem, para que as tensões de contração do cordão de solda sejam aliviadas, neste caso o cordão sofre um escoamento fazendo com que a peça não apresente deformações indesejáveis. Estes cordões foram curtos, filetados entre 20 a 30 mm, de forma a termos baixo aporte térmico no ponto de soldagem e conseqüentemente a deformação.

Após o primeiro ciclo de soldagem a frio, foi limpo e removido toda a escória para que a região se mantivesse limpa sem contaminação, antes de abrir o arco de solda do segundo ciclo de soldagem.

Depois que as amostras foram limpas e cortadas em tamanhos apropriadas, estas foram embutidas para realização dos ensaios metalográficos, de acordo com que apresenta a figura 41.

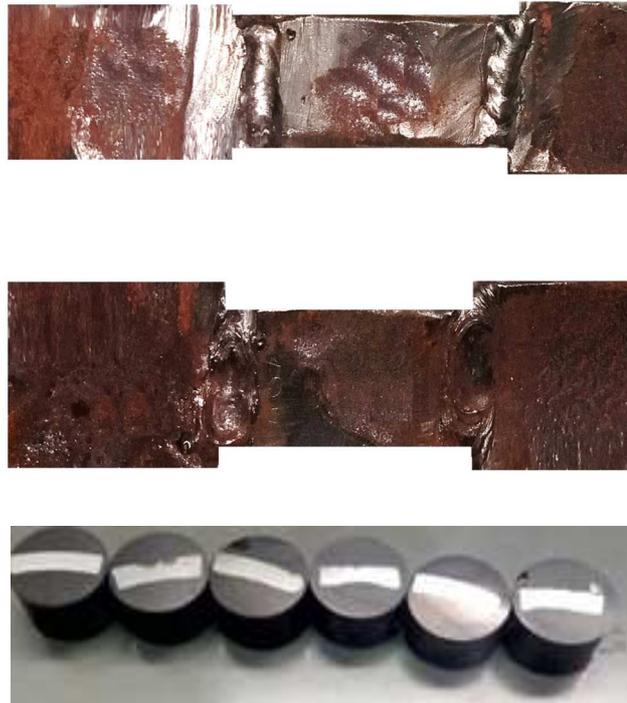


Figura 41: Amostras das soldagens.

Fonte: Laboratório FOA (2017).

Nas amostras foram realizadas análises através das técnicas por Microscopia Eletrônica de Varredura MEV e ensaios de Microdureza.

### **3.2.1 Cortadora Metalográfica**

#### **Preparação para realização das microscopias eletrônicas e óticas**

Foram cortadas barras quadradas de ferros fundidos e de aços carbono, utilizando uma Cortadora Metalográfica Teclago C M40 com disco abrasivo no laboratório da UniFoa.

### **3.2.2 Embutimento das Amostras**

As amostras tiveram seu embutimento a quente com baquelite, cuja composição foi resina fenólica, hexametileno, serragem, talco, estearato de cálcio e pigmento, foi utilizada a Embutidora Metalográfica Arotec PRE 30Mi, num processo de vinte e dois minutos de aquecimento até atingir 165°C com a pressão medida de trabalho de 130 Kgf/cm<sup>2</sup> e num outro processo de dezoito minutos de resfriamento até atingir 40°C. As atividades foram realizadas no laboratório da UniFoa.

### **3.2.3 Identificação das Amostras**

As amostras confeccionadas, foram identificadas conforme a tabela 11, na face oposta à que está o material, utilizando um pirógrafo para esta atividade.

### **3.2.4 Lixamento e Polimento das Amostras**

As amostras foram lixadas com um tempo estimado para cada lixa de 3 minutos, utilizando lixas de carbeto de silício com granulometrias distintas (220, 320, 400, 600, 1000, 1200 e 1500).

Feita a verificação e a avaliação da superfície lixada, foi realizado o polimento, utilizando a Politriz Arotec, um pano apropriado para polimento e alumina de 1 $\mu$ m, 0,3  $\mu$ m e 0,05  $\mu$ m com tempo estimado de 3 minutos por granulometria, a fim de obter uma superfície ideal para realizar o ataque químico.

Foi realizado de igual forma, o ataque químico mergulhando as amostras durante 3 segundos num recipiente contendo Nital sob a Capela Quimis, de forma a revelar as microestruturas típicas que os aços em questão apresentam. Todas as atividades apresentadas acima, foram realizadas no laboratório da UniFoa.

### **3.2.5 Microdureza das Amostras**

#### **Microdureza Vickers**

Utilizamos o Microdurômetro Time DHV-1000, um indentador piramidal de diamante de base quadrada com ângulo de 136° entre as faces e uma objetiva de 400x para endentar e visualizar os pontos de micro dureza Vickers. Para os ensaios foram utilizadas cargas de 0,300 Kgf no tempo de 15 segundos. As medições foram realizadas no laboratório da Unifoa.

### **3.2.6 Microscopia Eletrônica de Varredura nas Amostras**

#### **Caracterização Micro estrutural por Microscopia Eletrônica de Varredura**

Utilizamos o Microscópio Eletrônico de Varredura Hitachi TM3000 e um software TM-3000 para caracterizar microestrutura dos materiais. Observamos as microestruturas do ferro fundido e do aço carbono nas ampliações de 250, 500, 1000, 1500 e 5000X. Os ensaios foram realizados no laboratório da UniFoa.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Ensaio de Microdureza Vickers nas amostras

Realizamos várias endentações de Microdureza Vickers (HV) nos ferros fundidos e nos aços, medindo as diagonais da pirâmide, que é dada em  $\mu\text{m}$  no equipamento, obedecendo a uma distância de um mm de uma impressão a outra e em linha reta, utilizando uma carga de 0,300 Kgf durante um tempo de endentação de 15 segundos. Estes metais submetidos aos ensaios de Microdureza, foram utilizados como metais de base para realização das soldagens que apresentaremos nos itens posteriores.

Tabela 11: Ensaio de Microdureza Vickers nas amostras de ferro fundido e aço carbono.

Amostras	Micro Dureza Vickers (HV 0,3)		
	Medições Metal Base	Média	Desvio Padrão (DP)
a1 (aço carbono)	147,1	144,6	1,8
	143,3		
	143,3		
a2 (Ferro Fundido cinzento)	122,1	124,8	2,1
	124,9		
	127,3		
a3 (Ferro Fundido cinzento)	123,5	124,2	0,9
	125,4		
	123,7		
b1 (aço carbono)	143,9	145,8	1,4
	147,1		
	146,5		
b2 (Ferro Fundido cinzento)	122,8	125,1	0,9
	124,5		
	125,6		
b3 (Ferro Fundido cinzento)	124,1	125,2	1,0
	125,1		
	126,5		

Fonte: O Autor.

### *Micro Dureza Vickers nas Amostras - Metal Base*

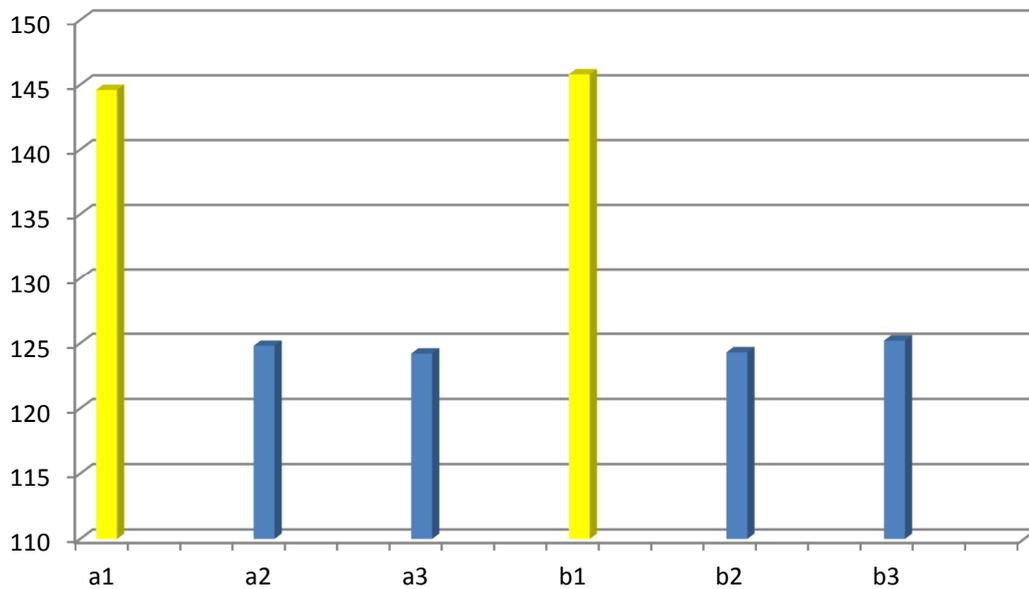


Figura 42: Microdureza nas amostras das Tubulações.

Fonte: O Autor.

Os valores de Microdureza encontrados nas amostras de Ferro Fundido Cinzento apresentados na tabela 11 [2], foram registrados entre 124,2 a 125,2 Vickers (HV). Os valores encontrados nas amostras de aço carbono variaram entre 144,6 a 145,8 Vickers (HV). Foi apresentado na figura 42 o gráfico com estes valores encontrados na tabela 11, é possível observar que as amostras de aço carbono apresentaram uma microdureza maior que as amostras de ferro fundido cinzento [55] devido seu teor de carbono e composição química do ferro fundido.

Tabela 12: Ensaios Microdureza Vickers nas amostras das soldas em ferro fundido e aço carbono.

Amostras das Soldas	Medições		Média		Desvio Padrão (DP)
a1 X a2 (aço x Ferro Fundido Cinzento)	Metal Adição	207,8	Metal Adição	205,5	2,9
	Metal Adição	201,4			
	Metal Adição	207,3			
	ZTA	186,9	ZTA	185	1,7
	ZTA	182,7			
	ZTA	185,5			
a2 X a3 (Entre Ferros Fundidos Cinzentos)	Metal Adição	156,5	Metal Adição	155,1	1,0
	Metal Adição	154,3			
	Metal Adição	154,6			
	ZTA	187,2	ZTA	182,7	3,2
	ZTA	180,7			
	ZTA	180,2			
<b>Eletrodo Níquel XYRON 2224</b>	<b>Micro Dureza Vickers (HV 0,3)</b>				
b1 X b2 (aço x Ferro Fundido Cinzento)	Metal Adição	628,6	Metal Adição	628,6	2,2
	Metal Adição	631,2			
	Metal Adição	625,9			
	ZTA	187,3	ZTA	184,1	2,3
	ZTA	183,1			
	ZTA	181,9			
b2 X b3 (Entre Ferros Fundidos Cinzentos)	Metal Adição	647,5	Metal Adição	650,3	2,3
	Metal Adição	653,1			
	Metal Adição	650,2			
	ZTA	189,4	ZTA	184,4	3,8
	ZTA	180,2			
	ZTA	183,5			
<b>Eletrodo E 8018</b>	<b>Micro Dureza Vickers (HV 0,3)</b>				

Fonte: O Autor.

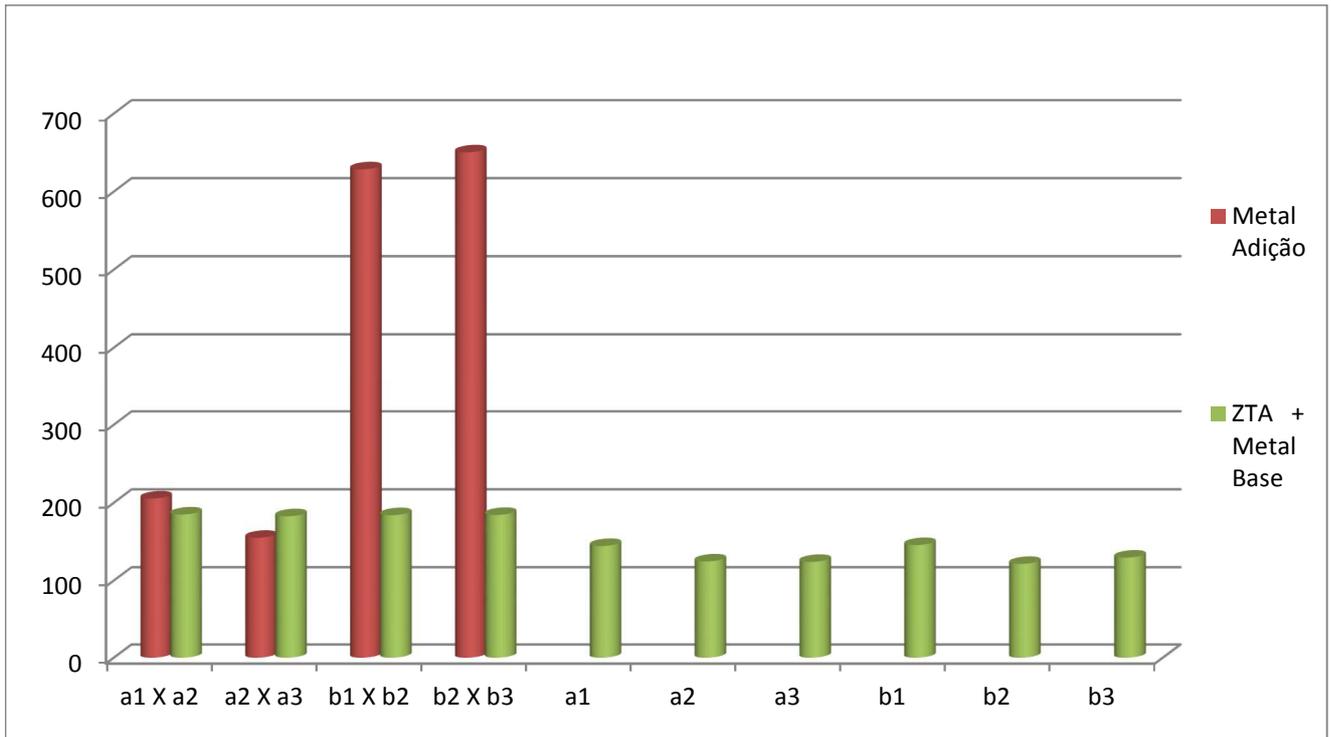


Figura 43: Microdureza nas Soldas das Amostras das Tubulações.

Fonte: O Autor.

As amostras apresentadas na figura 41 foram submetidas a soldagem e as suas durezas mostradas na tabela 12. Os serviços de soldagens realizaram a união de amostras de aço carbono com ferro fundido e união de amostras de ferro fundido com ferro fundido. Foi uma simulação das possibilidades que podem ser realizadas nos reparos destas tubulações e de acordo com a avaria destas. Estas uniões tiveram as partes do metal de adição e ZTA medidos para comparação das microdurezas utilizando diferentes eletrodos conforme mostra a tabela 12. Os valores encontrados nos ensaios mostraram claramente que ao utilizar eletrodos de aço nas uniões que continham amostras de ferro fundido, as microdurezas no metal de adição foram bem maiores do que quando utilizados eletrodos de Níquel XYRON 2224. A figura 43 apresenta a plotagem gráfica destes valores onde percebe-se claramente os altos valores de microdureza nos metais bases das uniões em que foram utilizados eletrodos de aço para soldagem. Vale ressaltar que por motivo de padronização, utiliza-se vários valores de carga para este tipo de ensaio, entre elas o valor de 30 kgf.

A tabela 13 apresenta valores de dureza Brinell no entorno de 100 a 150 HB para ferro fundido cinzento. Conforme apresenta o catálogo da AWS Eletrodos Revestidos [55], estes valores são os normalmente encontrados nestes tipos de

eletrodos para ferro fundido. De acordo com a tabela de conversão Dureza Brinell para Dureza Vickers [56], o valor Brinell nesta magnitude corresponde também ao valor de 100 a 150 HV. Foram realizadas as soldagens nas amostras utilizando dois tipos de eletrodos revestidos já discutidos anteriormente.

Na tabela 13, ainda temos apresentados as diferentes características encontradas na composição do ferro fundido cinzento e suas propriedades típicas conforme norma DIN 1691 / GG 10.

Tabela 13: Características do ferro fundido Cinzento.

Tipo de Ferro Fundido	Composição Química (% peso)					Propriedades Típicas		
	C	Si	Mn	P	S	Dureza (HB)	Limite de Resistência	Ductilidade
Cinzento	3,40 até 3,70	2,30 até 2,80	0,50 até 0,80	0,25 Max.	0,15 Max.	Máxima entre 100 e 150	20 a 60 ksi (130 a 410 MPa)	Muito baixa

Fonte: Autor.

Na Alemanha, os produtos industriais assim como os produtos científicos, possuem sua qualidade garantida pelas normas DIN, que nada mais são que padrões técnicos. Estes regulamentos preconizados por esta norma ditam sobre o comércio, sobre a indústria, a ciência e as instituições públicas que estão relacionadas diretamente com desenvolvimento dos produtos alemães. Seu acrônimo é “Deutsches Institut for Normung” ou “Instituto Alemão de Normalização”.

Podemos observar na tabela 13, os valores de referências para as microdurezas que podemos encontrar em ferros fundidos cinzentos adotados por esta norma.

A tabela 14 apresenta na última linha, os valores de dureza no eletrodo de aço E8018.

Tabela 14: Dureza nos eletrodos E8018.

CLASSIFICAÇÃO	AWS A5.5 ASME SFA-5.5 (Ed.2013)		DIN 8575		ELETRODO REVESTIDO		
	E8018-B2		E CrMo 1 B 26				
COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)	C	Mn	Si	Mo	Cr	P	S
	0,05-0,12	< 0,90	< 0,80	0,40-0,65	1,0 - 1,5	< 0,03	< 0,03
OBSERVAÇÕES	Temperatura de preaquecimento e interpasses: 160 a 190°C Dureza em uma camada sobre aço 1020: 180 - 220 HB Dureza em uma camada sobre aço 1045: 275 - 325 HB						

Fonte: Laboratório FOA (2017).

Os valores mostrados na tabela 14, mostram claramente que conforme a norma DIN e a norma AWS A5.5 estes eletrodos de aço E8018 apresentam valores de dureza entre 180 a 325 HB, conforme sua quantidade de camada sobre o aço.

Os valores obtidos nos ensaios de Microdureza em aços 1020 e 1060 [56], mostraram que estes valores variam entre 175 a 240 HV. Nas pesquisas realizadas, foi observado que o refinamento dos grãos das microestruturas dos aços carbonos, é o mecanismo utilizado para variar a resistência mecânica [57] juntamente com a sua tenacidade. Quando se efetua a soldagem, a escória produzida nesta e oriunda do revestimento do eletrodo, fica sobre a superfície encobrindo o material depositado. Assim, este material é protegido da contaminação atmosférica e sucessivamente controla a taxa que resfria a solda. O metal de adição é oriundo da alma do eletrodo revestido, se o eletrodo revestido tiver a composição de pó de ferro e liga [58], também teremos estes no metal de adição. A utilização de eletrodo de aço baixa liga contendo as composições citadas acima, proporcionou a elevação da microdureza no metal de adição e na Zona Termicamente Afetada (ZTA) conforme mostraram os ensaios da tabela 12. O eletrodo a base de Níquel propicia a criação de um depósito que favorece soldagens em ferro fundido utilizando baixo calor, o que é preventivo para criação de regiões com Microdureza elevadas.

#### 4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura nas amostras

Após preparadas as amostras, estas foram levadas ao microscópio eletrônico de varredura para realização das imagens microestrutural, de forma a se obter as caracterizações destes materiais usados nas amostras, utilizando apenas as análises comparativas destas imagens. Foram utilizadas várias imagens com

aproximações diferentes, para obtenção da melhor caracterização destas microestruturas.

A figura 44 apresenta as imagens da amostra “a1” de aço carbono, retirada do microscópio com aumento de 1500 e 5000X.

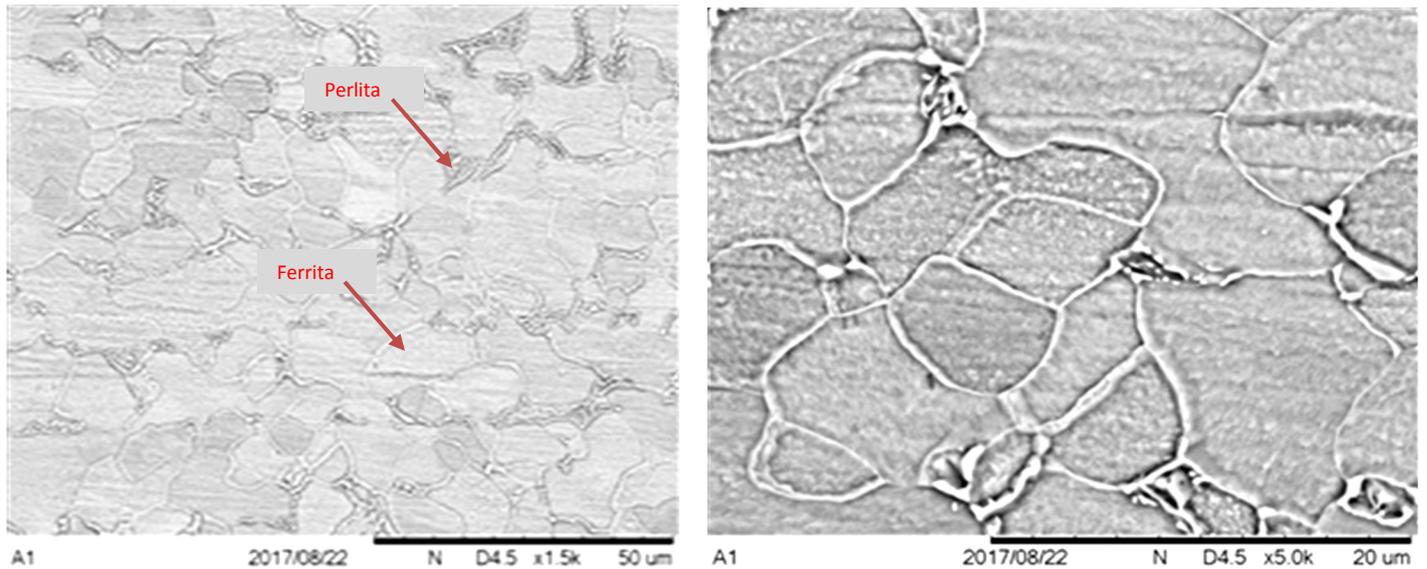


Figura 44: MEV na amostra a1(aço carbono) de 1500x e 5000x

Fonte: Laboratório FOA (2017).

As imagens anteriores mostram claramente se tratar de amostras com a microestrutura de aço carbono [35], de acordo com as microconstituintes ferrita e perlita encontradas. Sua microestrutura ferrítico-perlitica destes aços, possuem 0,1% C. A figura 45 apresenta as imagens obtidas do Microscópio Eletrônico de varredura das amostras “a2” de ferro fundido cinzento com aumento de 500 e 1000X.

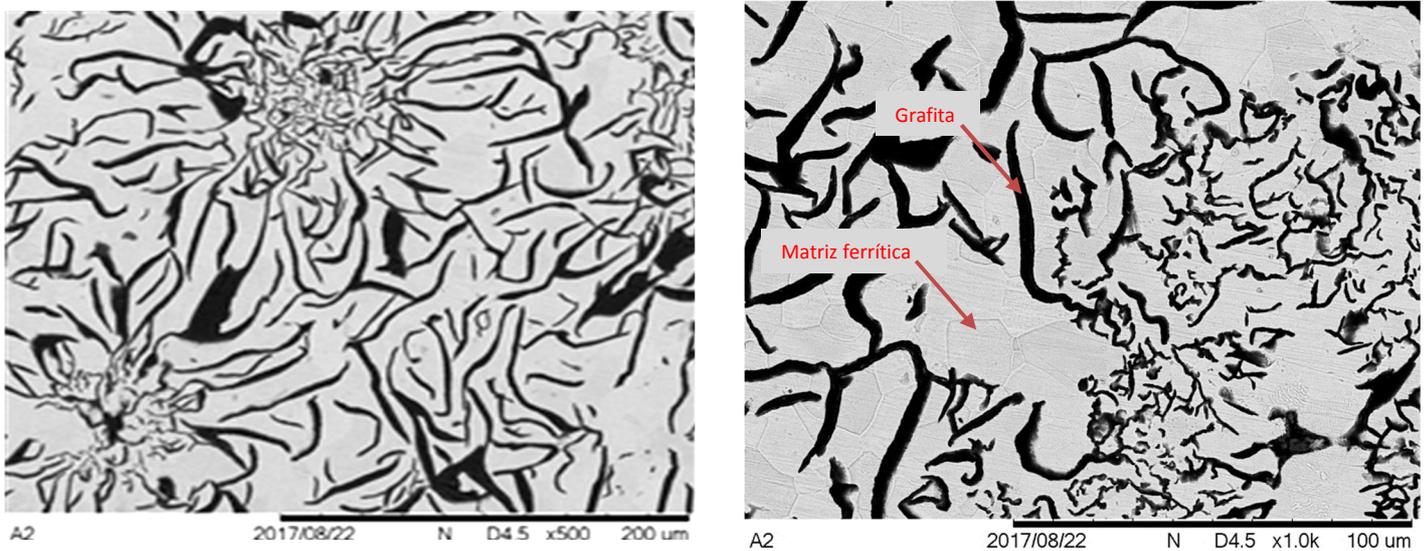


Figura 45: MEV na amostra a2 (ferro fundido cinzento) de 500x e 1000x.

Fonte: Laboratório FOA (2017).

Conforme observa-se na figura 45, as amostras referem-se a microestrutura de um Ferro Fundido Cinzento [36] [28] com matriz ferrítica.

Da mesma forma foram realizadas as imagens nas amostras “a3” de ferro fundido cinzento mostradas na figura 46, e os resultados foram equiparados aos das amostras “a2” também de ferro fundido cinzento com microestruturas típicas deste material.

Assim, na montagem das amostras para realização das soldagens, ficou garantido que as soldagens realizadas com as amostras “a1 e a2” seriam entre aço carbono e ferro fundido cinzento respectivamente, em matriz ferrítica. Entretanto, as soldas efetuadas entre as amostras “a2 e a3” seriam entre ferros fundidos cinzentos, ambos em matrizes ferrítica.

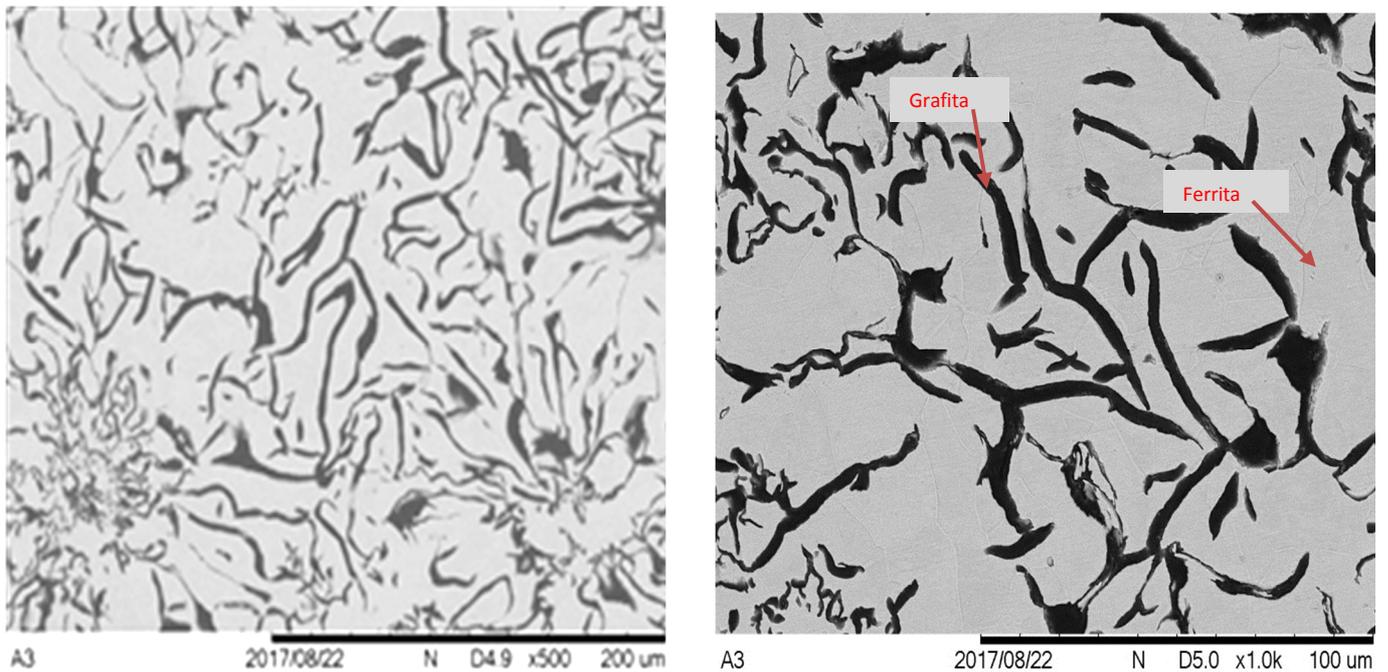


Figura 46: MEV na amostra a3 (ferro fundido cinzento) 500x e de 1000x.

Fonte: Laboratório FOA (2017).

Para obtenção de novas amostras “b1” aço carbono, “b2” ferro fundido cinzento e “b3” também de ferro fundido cinzento, adotou-se o mesmo sistema das amostras anteriores e foram obtidos os mesmos resultados e conclusões nestas amostras. O que se observa nas figuras 47, 48 e 49. A figura 47, apresentam as imagens com aumento de 1500 e 5000X.

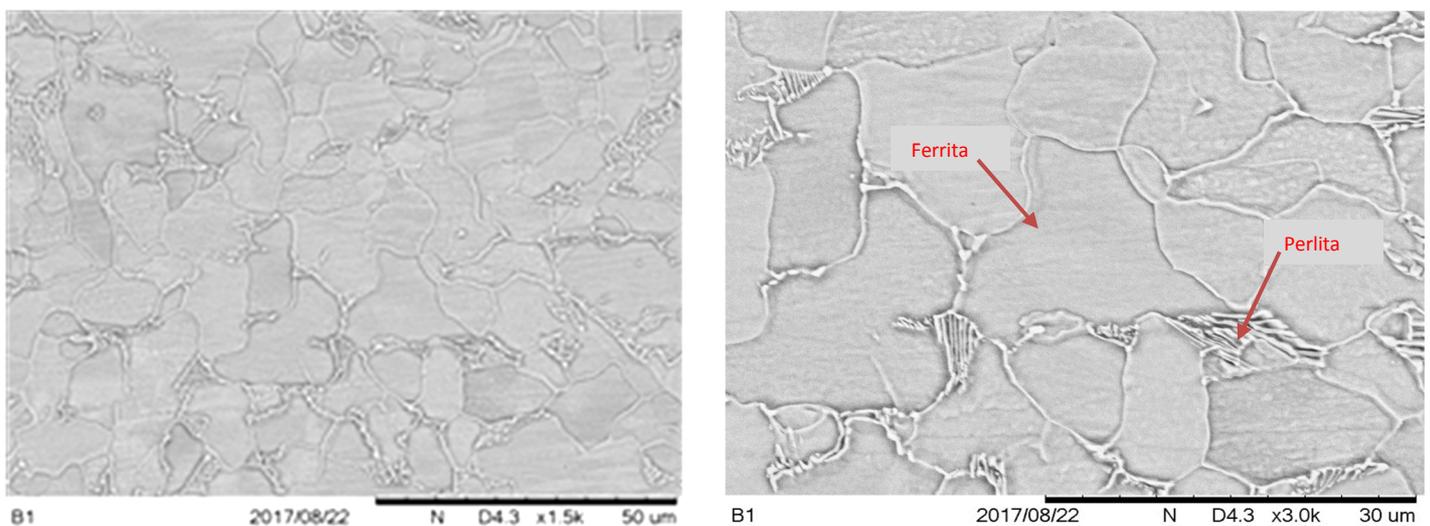


Figura 47: MEV na amostra b1 (aço carbono) 1500x e de 3000x.

Fonte: Laboratório FOA (2017).

Estas imagens da figura 47, apresentam microestrutura [33] de aço carbono e sua microestrutura ferrítico-perlítica com uma concentração de carbono 0,1%C.

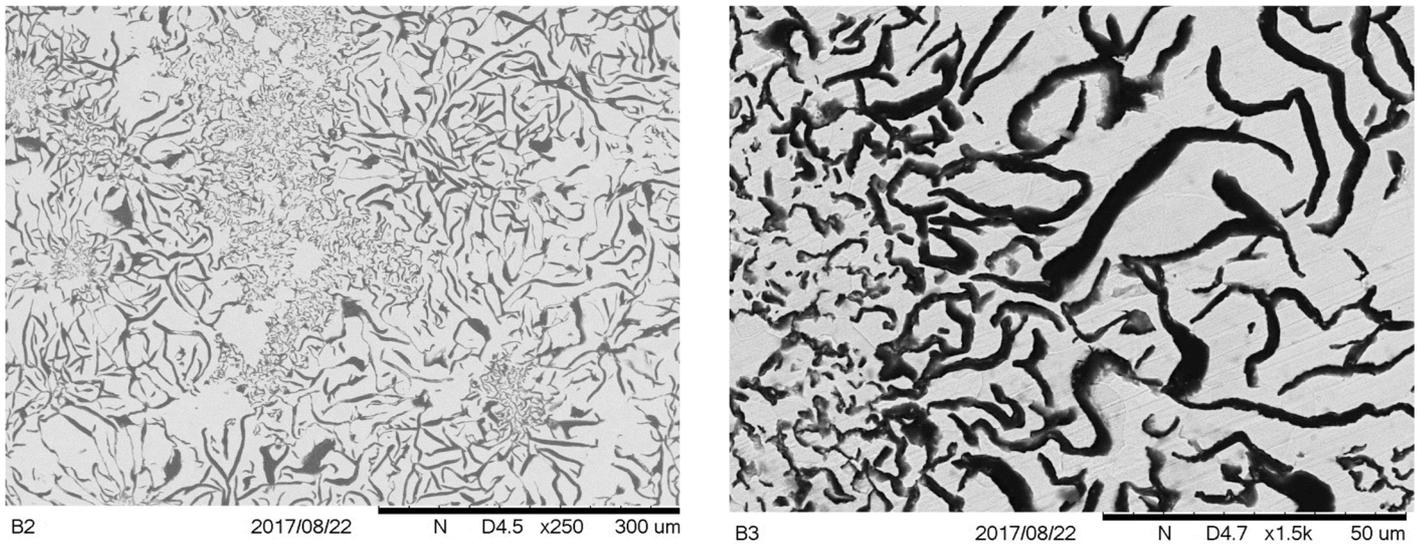


Figura 48: MEV na amostra b2 (ferro fundido) 250x e de 1500x.

Fonte: Laboratório FOA (2017).

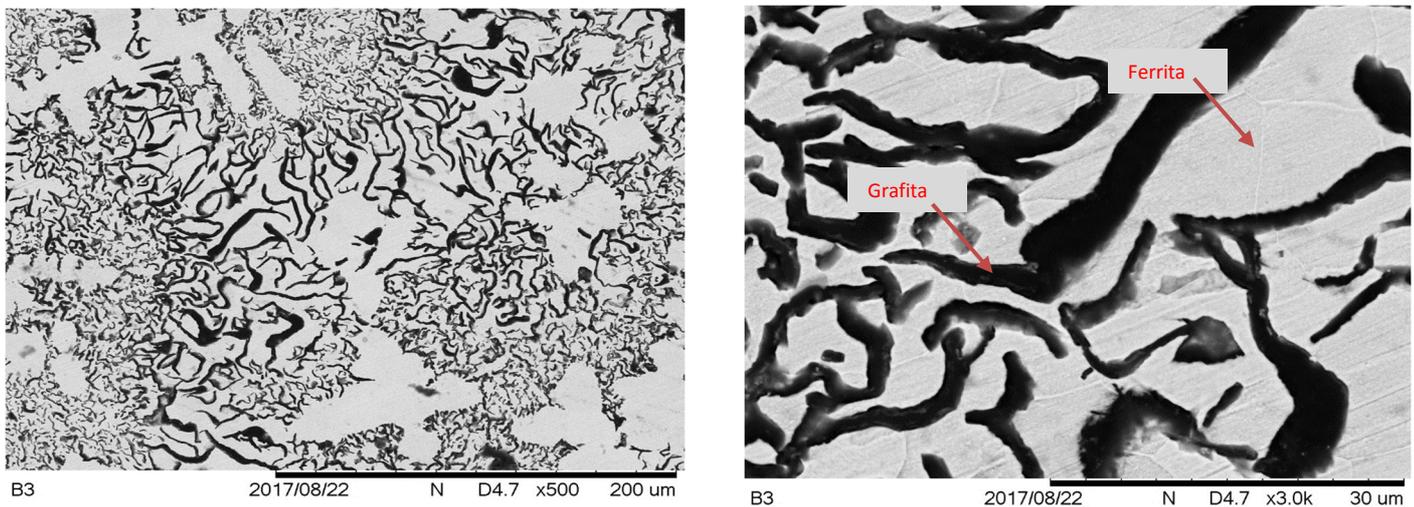


Figura 49: MEV na amostra b3 (ferro fundido) 500x e de 3000x.

Fonte: Laboratório FOA (2017).

Nas figuras 48 e 49, observa-se que as amostras se referem a microestrutura de um Ferro Fundido Cinzento [36] [28] com matriz ferrítica. Sua cor escura em sua superfície de fratura, mostra porque se chama ferro fundido cinzento. Possuindo seu grafite em forma de lamelas.

Após as análises das microestruturas dos metais de base, foram realizadas as imagens micro estruturais das soldas realizadas com o consumível de níquel XYRON 2224. Apresenta-se nas figuras 50 a 54, as imagens das amostras “a1Xa2” que foram as soldas realizadas entre aço carbono e ferro fundido cinzento respectivamente.

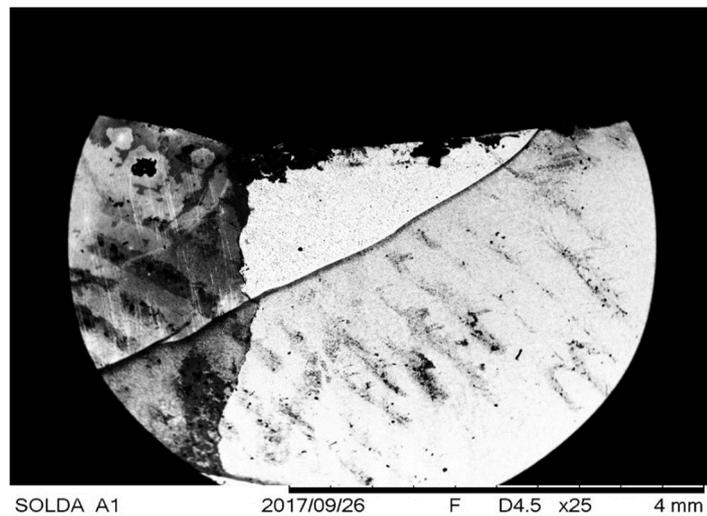


Figura 50: MEV na amostra a1Xa2 (aço carbono e ferro fundido cinzento); Visão Geral 25x.

Fonte: Laboratório FOA (2017).

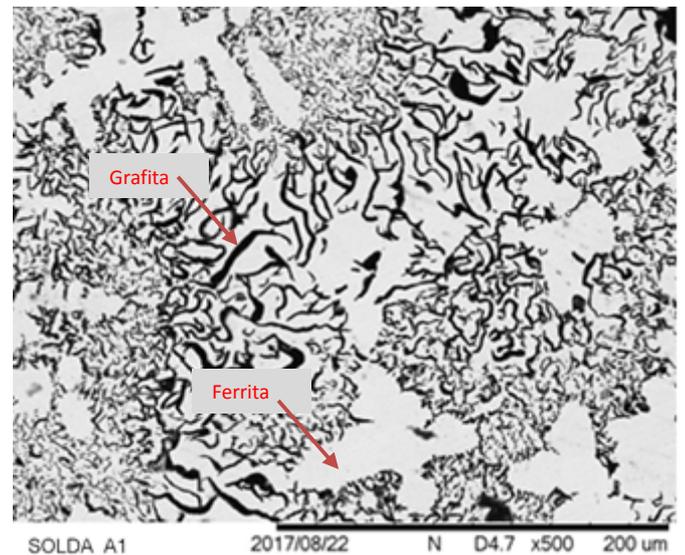
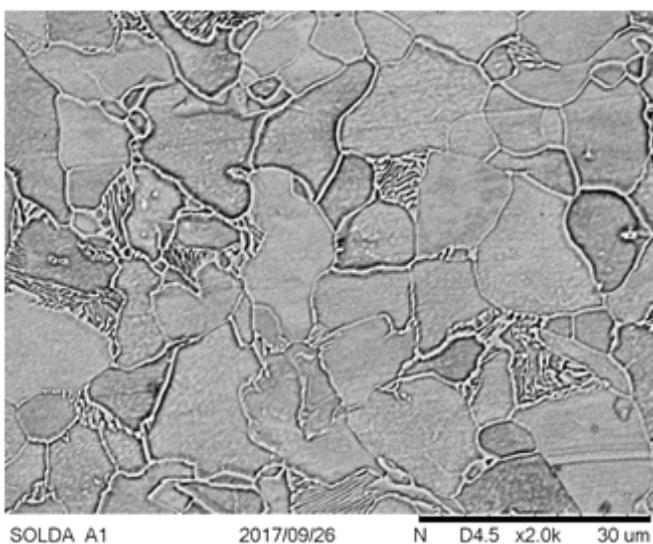


Figura 51: MEV na amostra a1Xa2(aço carbono e ferro fundido cinzento); Metal Base2000x.

Fonte: Laboratório FOA (2017).

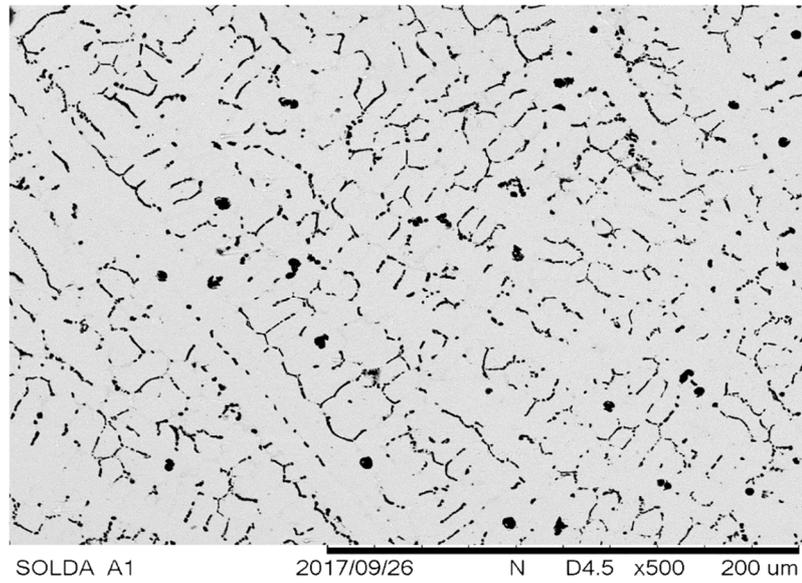


Figura 52: MEV na amostra a1Xa2(aço carbono e ferro fundido cinzento); Metal Adição 500x.

Fonte: Laboratório FOA (2017).

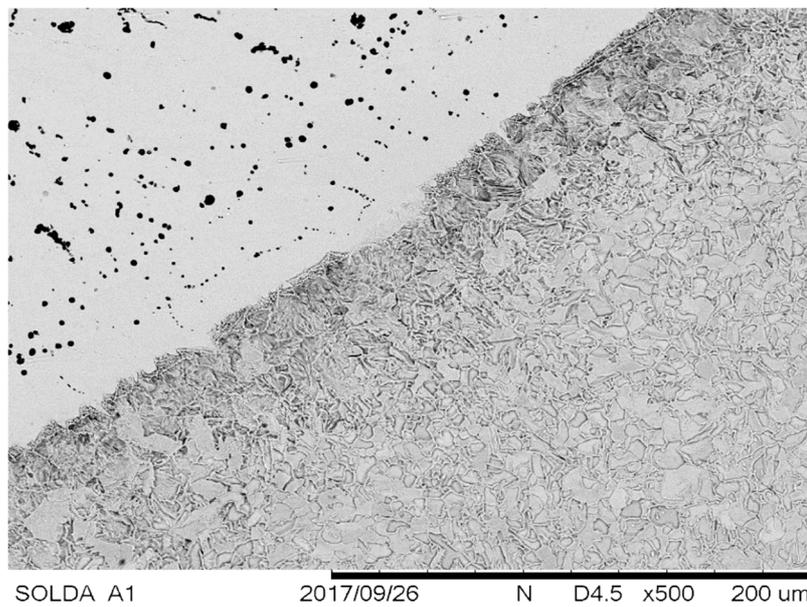


Figura 53: MEV na amostra a1Xa2(aço carbono e ferro fundido cinzento); Metal Base + ZTA + Metal Adição 500x.

Fonte: Laboratório FOA (2017).

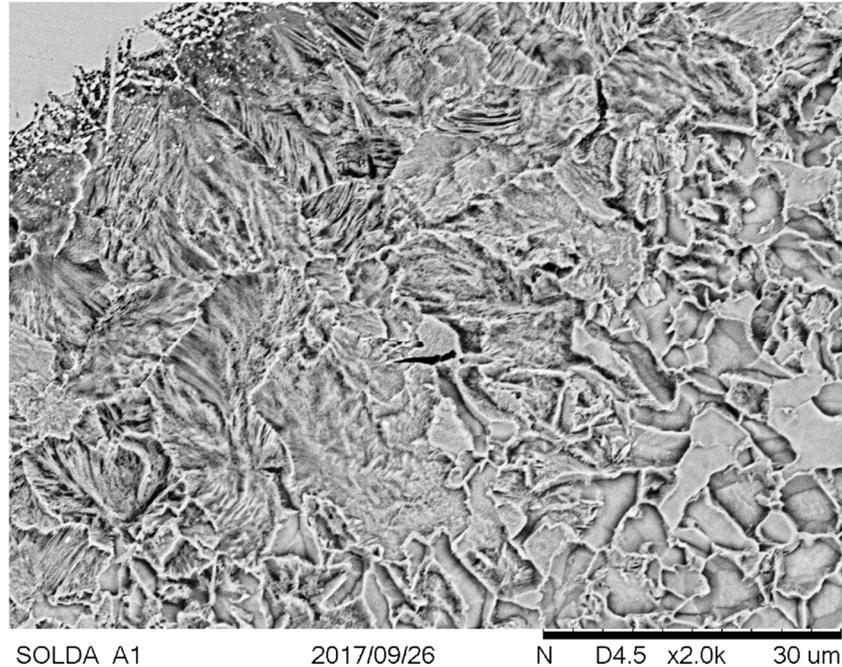


Figura 54: MEV na amostra a1Xa2(aço carbono e ferro fundido cinzento); ZTA 2000x.

Fonte: Laboratório FOA (2017).

Nas amostras das figuras 50 a 54 analisadas, verificou-se a existência das microestruturas dos metais bases já citados no item anterior, ferro fundido cinzento e Aço Carbono. A figura 54 contemplou a imagem do metal base, ZTA e o metal de adição, onde verifica-se a presença de grafita na forma vermicular acompanhada de alguns módulos em matriz ferrítica.

As figuras a seguir de 55 a 59 apresentam as imagens relativas a soldagem nas amostras “a2Xa3” que foram as soldas realizadas entre ferro fundido cinzento.

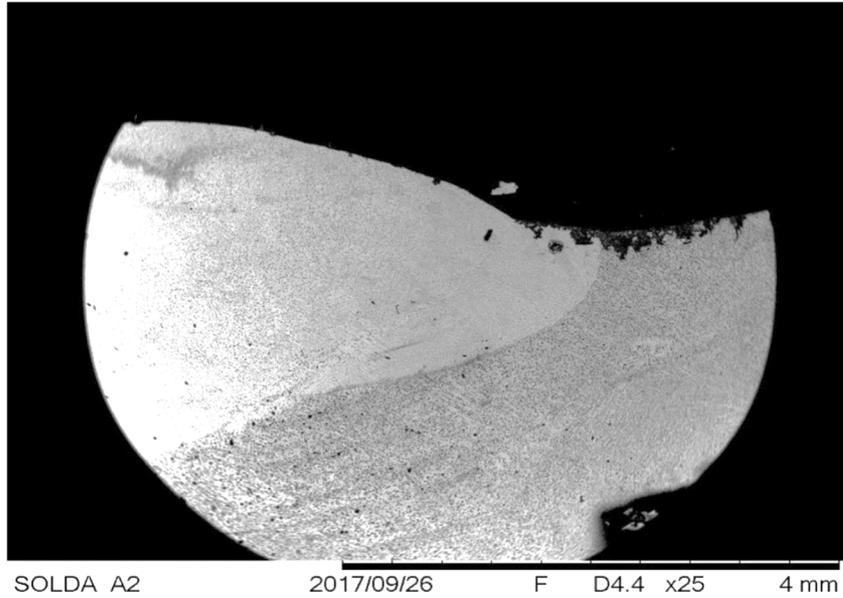


Figura 55: MEV na amostra a2Xa3 (entre ferros fundidos); Visão Geral; 25x.

Fonte: Laboratório FOA (2017).

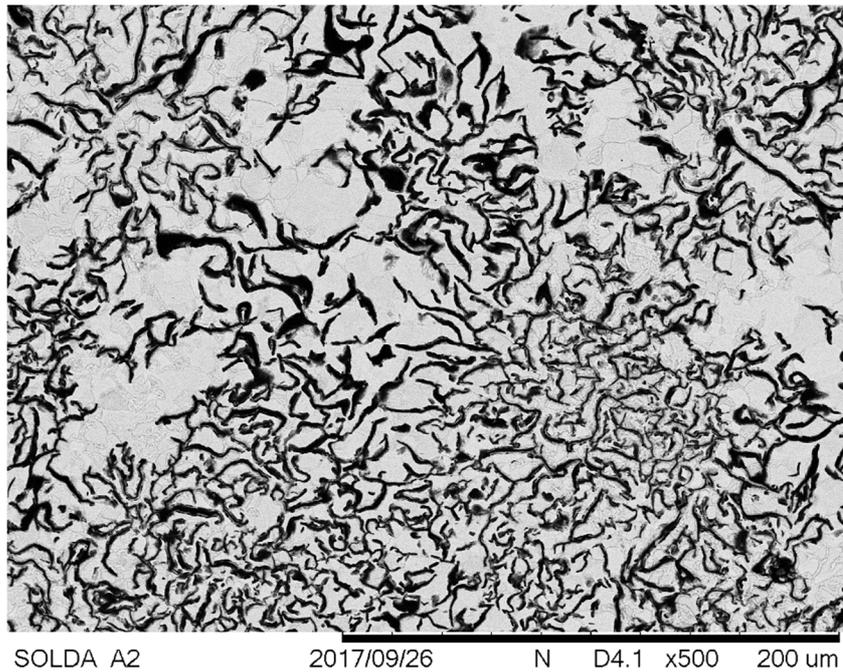


Figura 56: MEV na amostra a2Xa3 (entre ferros fundidos); Metal Base; 500x.

Fonte: Laboratório FOA (2017).

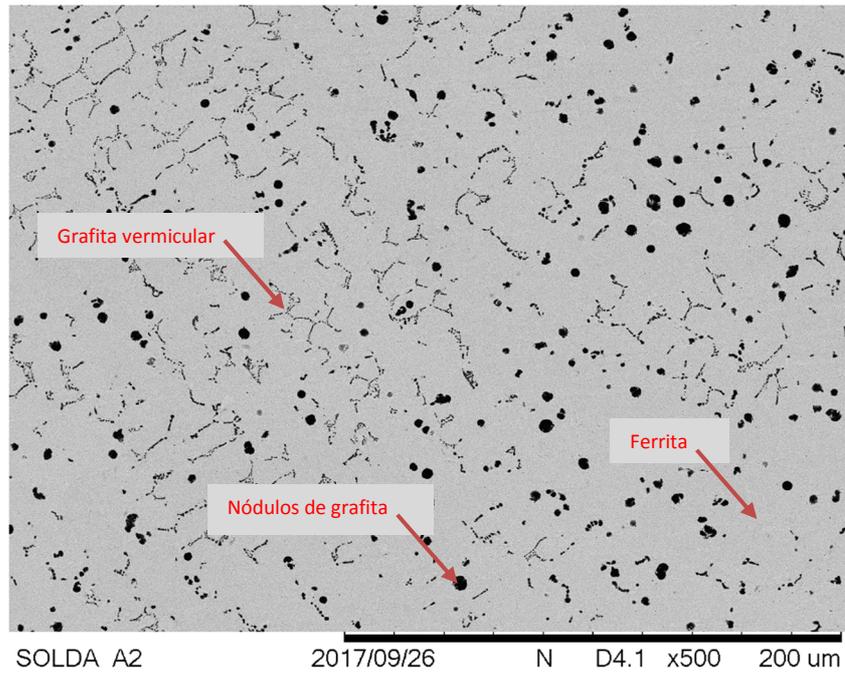


Figura 57: MEV na amostra a2Xa3 (entre ferros fundidos); Metal Adição; 500x.

Fonte: Laboratório FOA (2017).

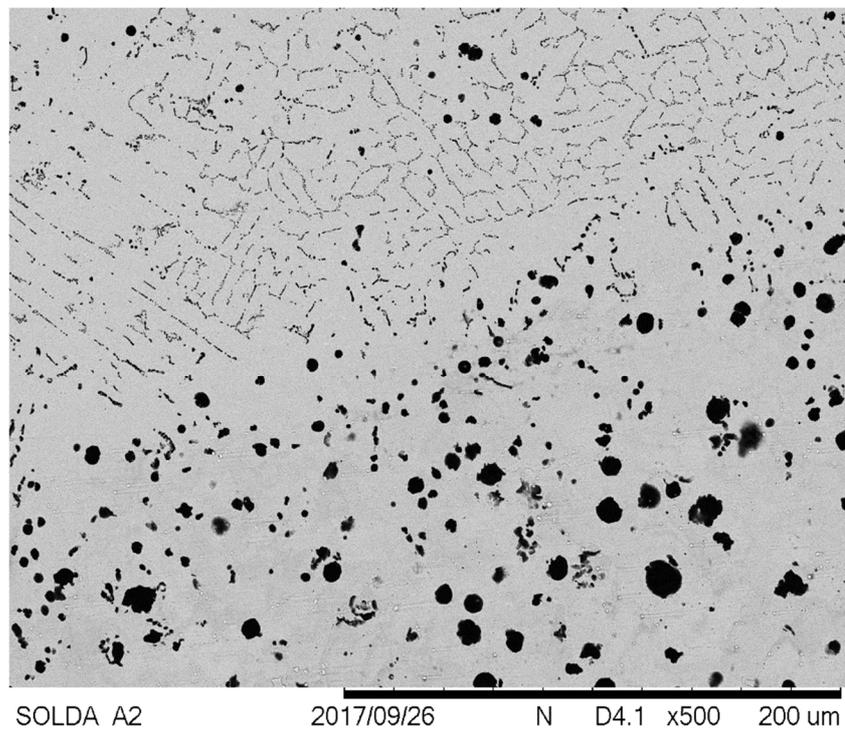


Figura 58:MEV na amostra a2Xa3 (entre ferros fundidos); ZTA + Metal Adição; 500x.

Fonte: Laboratório FOA (2017).

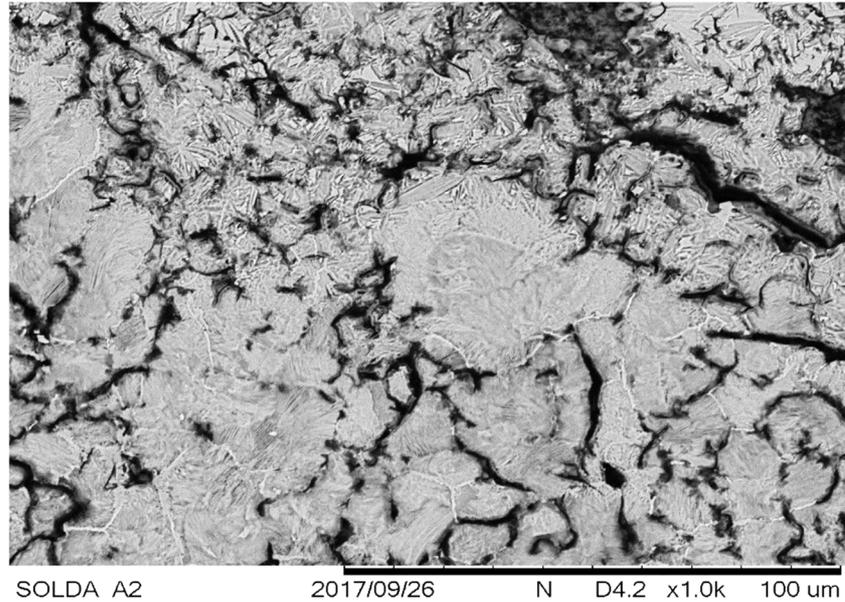


Figura 59: MEV na amostra a2Xa3 (entre ferros fundidos); ZTA; 1000x.

Fonte: Laboratório FOA (2017).

Novamente percebe-se na figura 57, o aparecimento da grafita na forma vermicular acompanhada de alguns módulos em matriz ferrítica.

Realizou-se após a soldagem das amostras “b1Xb2” relativas a soldagem entre aço carbono e ferro fundido cinzento utilizando consumível E 8018, de acordo com as figuras 60 a 63.

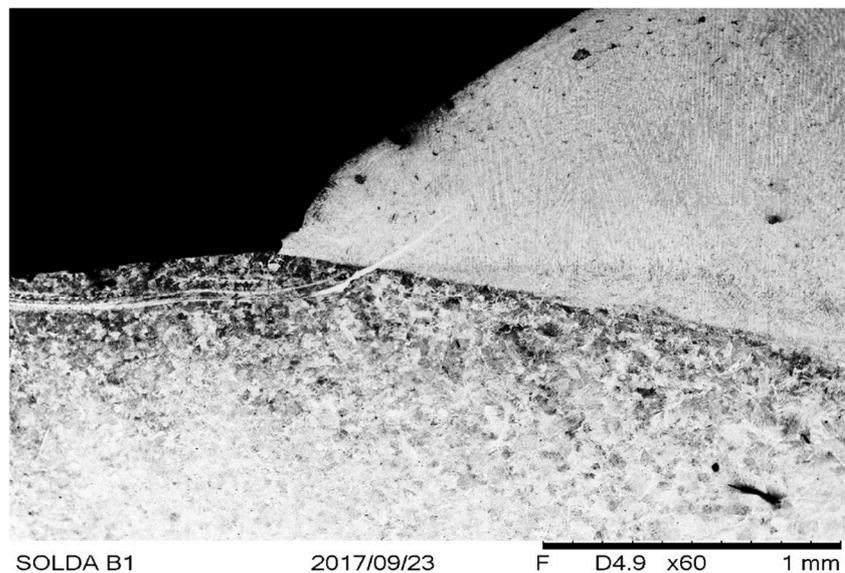


Figura 60: MEV na amostra b1Xb2 (aço carbono e ferro fundido cinzento); visão geral; 25x.

Fonte: Laboratório FOA (2017).

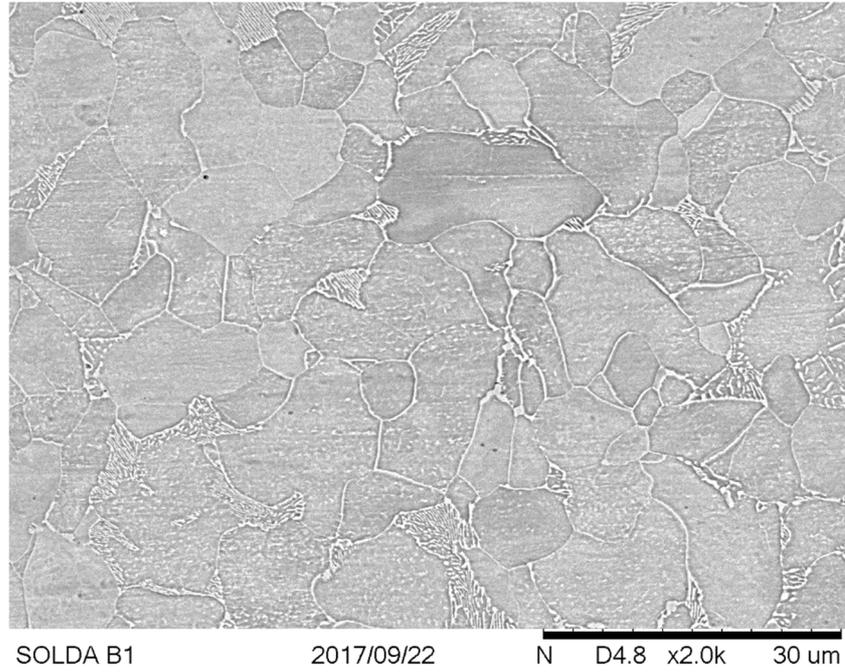


Figura 61: MEV na amostra b1Xb2 (aço carbono e ferro fundido cinzento);; Metal Base; 2000x.

Fonte: Laboratório FOA (2017).

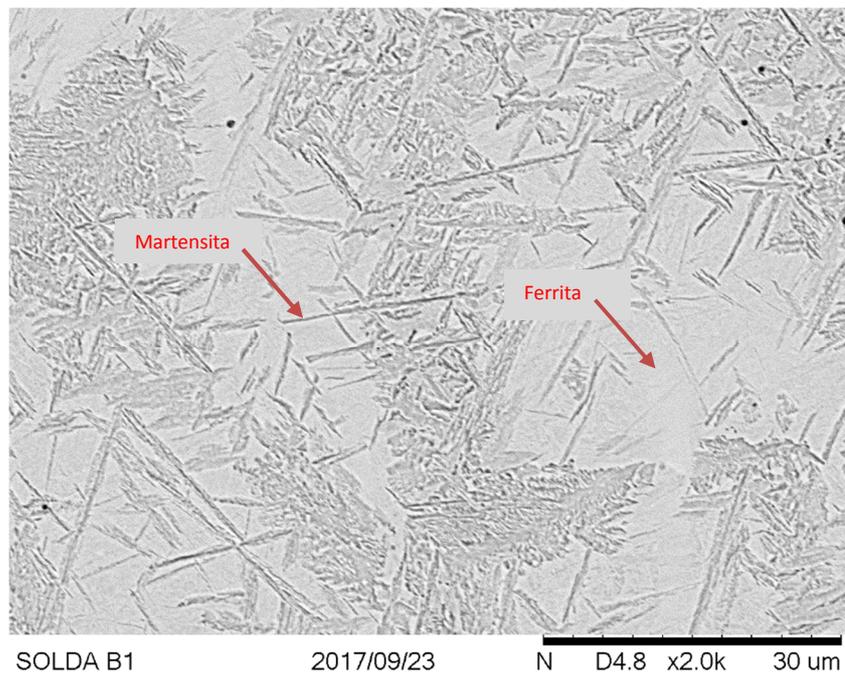


Figura 62: MEV na amostra b1Xb2 (aço carbono e ferro fundido cinzento);; Metal Adição; 2000x.

Fonte: Laboratório FOA (2017).



Figura 63: MEV na amostra b1Xb2 (aço carbono e ferro fundido cinzento); ZTA 2000x.

Fonte: Laboratório FOA (2017).

Observa-se que, ainda em matriz ferrítica na figura 62, houve o aparecimento de martensita na microestrutura do metal de adição. Esta constituinte tem como característica principal, elevar para altos valores de dureza e aumentar a fragilidade do material [59], propiciando um ambiente para aparecimento de porosidades e trincas nas soldas.

Para finalizar realizou-se a soldagem das amostras “b2Xb3” relativas a soldagem entre os ferros fundidos cinzentos, de acordo com as figuras 64 a 77.

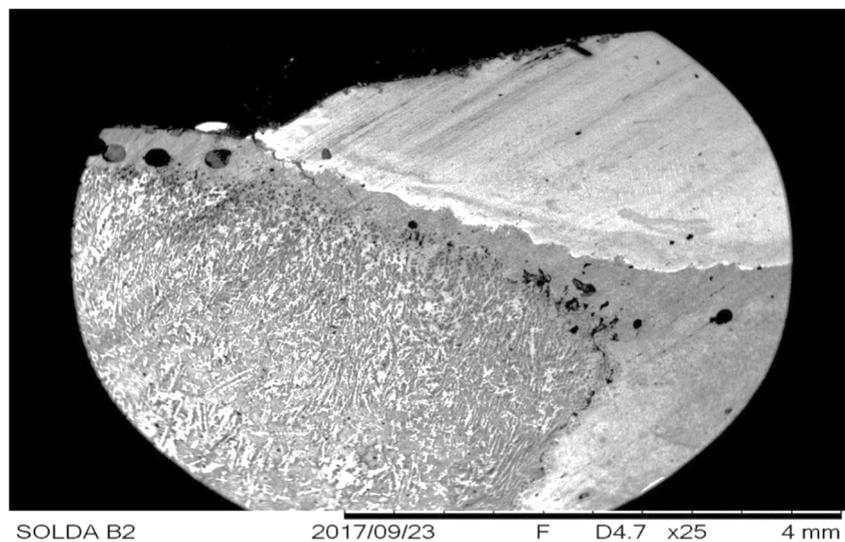


Figura 64: MEV na amostra b2Xb3 (entre ferros fundidos cinzentos); visão geral; 25x.

Fonte: Laboratório FOA (2017).

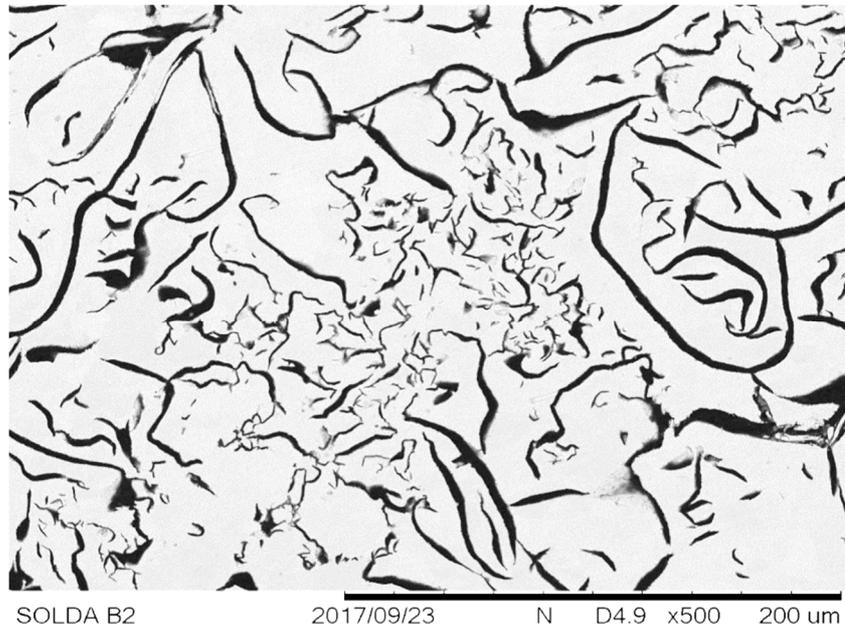


Figura 65: MEV na amostra b2 Xb3 (entre ferros fundidos cinzentos); Metal Base; 500x.

Fonte: Laboratório FOA (2017).

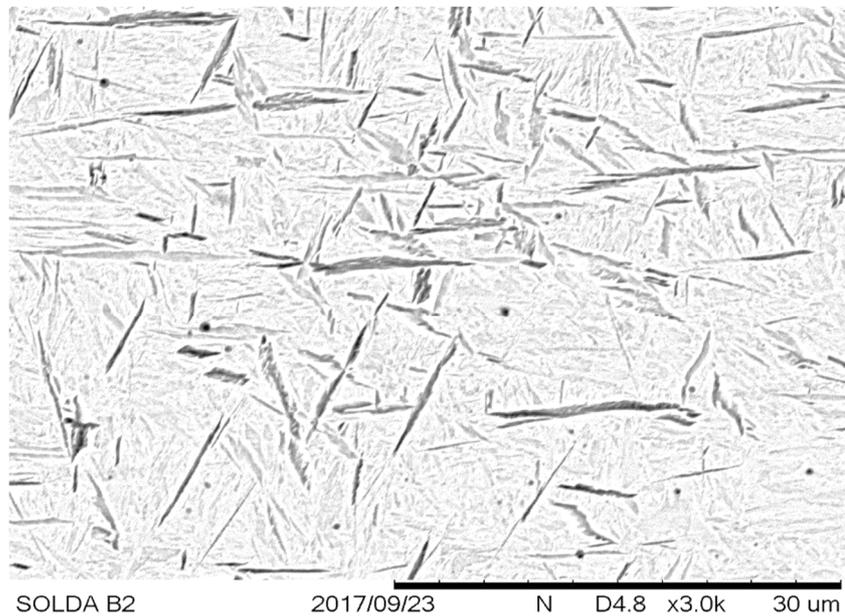


Figura 66: MEV na amostra b2 Xb3 (entre ferros fundidos cinzentos); Metal Adição; 1000x.

Fonte: Laboratório FOA (2017).

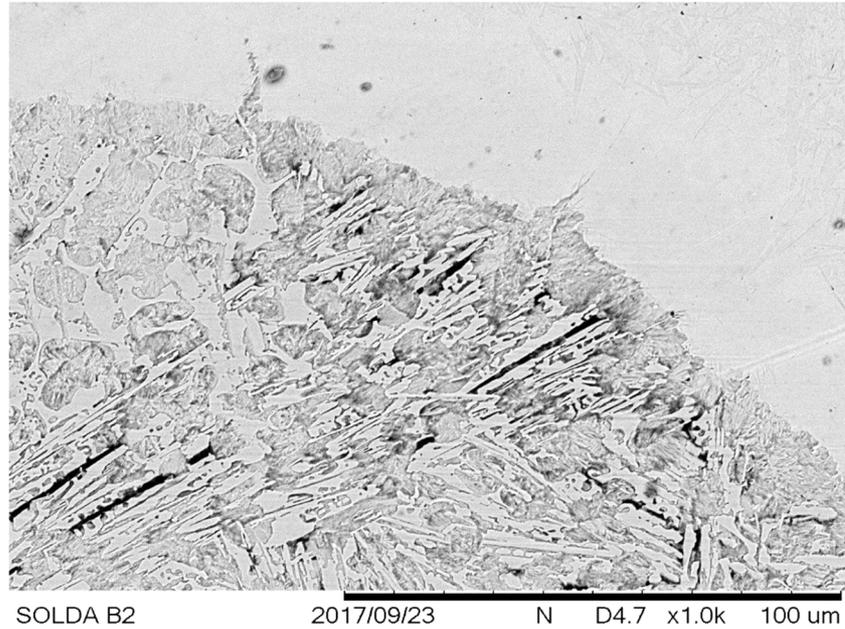


Figura 67: MEV na amostra b2 Xb3 (entre ferros fundidos cinzentos); ZTA 1000x.

Fonte: Laboratório FOA (2017).

Da mesma forma que nas amostras entre ferro fundido cinzento e aço carbono, se obteve ainda em matriz ferrítica, o aparecimento de martensita na microestrutura do metal de adição [60], microconstituente esta que ocasiona a dureza nas soldas. Constatando-se a ineficiência do eletrodo E8018 para este tipo de soldagem em ferros fundidos cinzentos.

## 5 CONCLUSÕES

Foi possível concluir após análises dos resultados na situação caso estudado: Emenda de Tubulação de Água em baixa pressão, que a soldagem do ferro fundido cinzento com eletrodo Xyron 2224 encaminha uma dureza no metal de adição e na zona térmica afetada equiparada às dos metais bases utilizadas e com propriedades equilibradas. Entretanto, a soldagem com eletrodo convencional AWS E8018, encaminhou uma dureza bem maior no metal de adição e de forma intermediária na zona térmica afetada. O estudo aponta para a utilização em ferro fundido cinzento, de eletrodos Xyron 2224, assim como o procedimento descrito no apêndice 01 de forma a garantir o resfriamento lento das junções a fim de evitar o surgimento de constituintes de martensita, ocasionando uma alta dureza no material e sua fragilidade. A zona térmica afetada apresenta estruturas compatíveis com o metal base mesmo com a presença de pequenas quantidades de martensita na microestrutura. No metal de adição, as durezas são semelhantes às do metal base quando no uso de eletrodos a base de níquel. Foi possível observar que existe a necessidade de manutenção da temperatura da solda em valores baixos com alto tempo de resfriamento através de procedimento descrito no apêndice 01. O eletrodo de aço demonstrou ser pouco adequado para a soldagem dos ferros fundidos, provocando durezas elevadas no metal de adição.

Um dos principais ganhos deste trabalho, além do ganho financeiro através da diminuição no tempo de reparo, é a situação encontrada no uso do metal de chumbo para reparo nestas tubulações e a retirada deste nestas atividades com a utilização de soldagem. Isto motivou a crença de que estes serviços devem ser efetuados com técnicas de soldagem descritas no procedimento aqui desenvolvido (vide apêndice 01), além de reduzir a contaminação do solo com este resíduo.

## 6 TRABALHOS FUTUROS

O trabalho experimental que foi desenvolvido para elaboração desta dissertação e deste procedimento para soldagem com eletrodo revestido permitiu verificar algumas limitações relativamente ao método experimental utilizado, assim como observar algumas questões que ficaram em aberto e que poderá constituir tema para futuros trabalhos de investigação nos reparos destas tubulações em ferro fundido. No que respeita a limitações do método experimental utilizado podemos referir:

A dificuldade em se realizar a análise do metal base, metal de adição e na zona térmica afetada com o DRX devido a sua indisponibilidade.

Realização de ensaios de tração a fim de verificar o alongamento nas soldas realizadas.

Realização de teste Charpy nas amostras a fim de determinar a resistência e sensibilidade destas, quando submetidas a uma certa carga de impacto e com o objetivo principal de medir a quantidade de energia absorvida pelas amostras de soldagem durante a fratura.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. EUTECTIC, C. **Manual de Aplicações em Soldagem**. 4ª. ed. São Paulo: Pedro Kitta, 2017.
2. INFOSOLDA. Infosolda - O Portal Brasileiro da Soldagem. **Site da Infosolda**, 2003. Disponível em: <[http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/processos\\_solda/2013-09-12-soldagem-por-fuso-para-reconstruo-de-ferro-fundido.pdf](http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/processos_solda/2013-09-12-soldagem-por-fuso-para-reconstruo-de-ferro-fundido.pdf)>. Acesso em: 08 mar. 2018.
3. ONLINE, P. Perspectivas online - ciências exatas e engenharia. **Perspectivas online**, 2014. Disponível em: <[http://seer.perspectivasonline.com.br/index.php/exatas\\_e\\_engenharia/article/view/454/497](http://seer.perspectivasonline.com.br/index.php/exatas_e_engenharia/article/view/454/497)>. Acesso em: 09 mar. 2018.
4. RASTOGI, S. Renal effects of environmental and occupational lead exposure. **Environmental, Regional Source**, December 2008. Volume 12, pp. 103-106.
5. SANHUEZA, A. E. C. "Sistemas Innovadores de Producción de Plomo". In: **International Conference On Clean Technologies For The Mining Industry, VI CTMI**, Chile, 2004.
6. VALVERDE, et al. Genotoxicity induced in **Cd - 1 mice by inhaled lead: differential organ response**, *Mutagenesis*, 2002. 17(1):55-61.
7. DESPRÉS, C. et al. Neuromotor functions in Inuit preschool children exposed to Pb, PCBs, and Hg. **Neurotoxicol Teratol**, Março 2005. 245-257.
8. FARMAND, F. et al. Lead-induced dysregulation of superoxide dismutases, catalase, glutathione peroxidase, and guanylate cyclase. **Environmental Research**, p. 33-39, May 2005.
9. SAMPAIO, R. A.; COSTA, A. Caracterização qualitativa e quantitativa de metais pesados em alfazema adubada com composto de lixo urbano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, 2009. v. 13, (Suplemento), p. 948-954.
10. LYALYAKIN, V. P. et al. CAST IRONS. **ADVANCEMENT OF THE PROCESS OF COLD WELDING OF CAST IRON**, Russian, 08 August 2014. 04.
11. M. P. M.; , J. C.; , F. S. Analysis of the weldability of ductile iron. **Analysis of the weldability of ductile iron**, 30 August 2007. 04.
12. SOUSA, L. D. et al. Avaliação da microestrutura e da microdureza do ferro fundido cinzento. **Avaliação da microestrutura e da microdureza do ferro fundido cinzento**, Volta Redonda, 28 Agosto 2015.
13. MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q.; MARQUES, P. V. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. 3ª Edição. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2011.
14. PORTAL Metálica - Construção Civil. **Site da Portal Metálica - Construção Civil**. Disponível em:

- <<http://www.metalica.com.br/o-que-e-aco-carbono/>>. Acesso em: 14 março 2018.
15. EL-BANNA. Effect of preheat on welding of ductile cast iron. **Materials Letters**, Cairo, v. 41, p. 20-26, 19 Outubro 1999. Disponível em: <[www.elsevier.com/locate/matlet](http://www.elsevier.com/locate/matlet)>. Acesso em: 29 abr. 2019.
  16. HENRIQUE, R.; , A. Tratamento Térmico de Alívio. **Efeitos do Tratamento Térmico de Alívio de Tensões em Soldas realizadas com Eletrodos Revestidos Rutílicos em Aços de Alta Resistência e Baixa Liga**, Anhanguera de Campo Grande, 2017. 06.
  17. ISHIDA, T. Local melting of nodular cast iron by plasma arc, 20 Setembro 1982. 12.
  18. PINEDO, C. E. Tratamento Térmico e superficial do aço inoxidável martensítico AISI 420 Destinado a moldes para injeção de polímeros, São Paulo, 23 Setembro 2008. 12.
  19. GORNI, A. A. Estudo para traçar relações entre microestrutura e propriedades mecânicas em aços estruturais. **Corte & Conformação de Metais**, São Paulo, Março 2008. 11.
  20. GORNI, A. A. Aços avançados de alta resistênxia: Microestrutura e propriedades mecânicas. **Corte e Conformação de Metais e Plástico Industrial**, São Paulo, Outubro 2009. 20.
  21. MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 209. 2012.
  22. SILVA, G. G. D. Análise da influência da temperatura de pré-aquecimento na formação de microfases em cordão de solda obtido pelo processo de soldagem à arco elétrico com proteção gasosa e arame consumível, Bauru/São Paulo, 2007. 11.
  23. FONSECA, et al. Efeito do insumo de calor na microestrutura da solda do aço NTU - SAR 50 pelo processo a arco submerso, Belo Horizonte, 18 Dezembro 2017. 06.
  24. GHAINI, F. M.; EBRAHIMNIA, ; GHOLIZADE, S. Characteristics of cracks in heat affected zone of ductile cast iron in powder welding process, Tehran, 09 Março 2011. 05.
  25. CAROLINO. **Análise microestrutural e mecânica das juntas soldadas multipasse do aço A516 70 pelos processos eletrodo revestido e arame tubular utilizadas em vaso de pressão**. UNIFOA. Volta Redonda, p. 74. 2013.
  26. JUNIOR, J. C. S.; ROCHA, D. B.; BRANDI, S. D. Uma breve revisão histórica do desenvolvimento da soldagem dos aços API para tubulações, São Paulo, 07 mar. 2013. 20.
  27. MARTINS, W. D. P. et al. Influência dos Parâmetros de Soldagem no Comportamento Microestrutural e nas Propriedades Mecânicas de Juntas Soldadas em Aços ARBL, Caxias do Sul, 11 Abril 2011. 10.
  28. CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos e principais**

- tipos. 7. ed. de 1996. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.
29. FARNESE, H. N.; JORGE, J. C. F.; SOUZA, L. F. G. Estudo comparativo de metais de solda de aço de alta resistência obtido pelos processos eletrodo revestido e arame tubular para aplicação em equipamentos de amarração offshore, Rio de Janeiro, 11 Maio 2008. 10.
  30. ALBUQUERQUE, F. et al. Avaliação da Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Metais de Solda Obtidos por Processos de Soldagem Manual e Automatizado utilizado na Soldagem de Aço API 5L X80., Minas Gerais, 10 nov. 2011. 11.
  31. PARIS, A. A. F. **Tecnologia da Soldagem de Ferros Fundidos**. 1ª. ed. Santa Marcia: Ed. da UFSM, 2003. 140 p. Acesso em: 10 Abril 2017.
  32. BOND, D. **Microestrutura e Variáveis de Soldagem em Ferro Fundido Cinzento**. Dissertação (Dissertação em materiais) - UFSC. Santa Catarina, p. 154. 1999.
  33. GUESSER, W. L. **Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos**. 1ª. ed. São Paulo: Blucher, 2009.
  34. FRANCKLIN,. Um Breve Estudo Sobre Ferro Fundido Nodular, Rio de Janeiro, Julho 2009. 30.
  35. COLPAERT, H. **Metalurgia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1969.
  36. CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais**. 5ª. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2002.
  37. GUESSER, W. L. et al. Ferros Fundidos Empregados para Discos e Tambores de Freio, Gramado, 2003. 6.
  38. SILVA, L. G. R. G. **Estudo da Soldabilidade do Ferro Fundido SIBODUR® 450**. Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto - Portugal, p. 156. 2016.
  39. QUEIROZ, A. A. **Usinabilidade do Ferro Fundido Cinzento e Avaliação da Temperatura e Força de Corte como Sensores de Desgaste**. UFSC. Florianópolis, p. 149. 1976.
  40. PANNONI,. Aços Estruturais, 2001. 07. Disponível em:  
<[www.acominas.com.br/upload/produtos/perfis/caracteristicatecnicapf/artigostecnicos/geral\\_1](http://www.acominas.com.br/upload/produtos/perfis/caracteristicatecnicapf/artigostecnicos/geral_1)>. Acesso em: 10 Maio 2018.
  41. MARYA, B. M.; GAYDEN, X. Q. Development of Requirements for Resistance Spo Welding Dual-Phase (DP600) Steels Part 1 - The Causes of Interfacial Fracture, Miami, November 2005. p. 172 - 182.
  42. MAZZAFERRO, J. A. E. **Estudo da Estabilidade do Arco Elétrico na Soldagem Subaquática com Eletrodos Revestidos**. Tese (Tese de doutorado em engenharia) - UFRGS/PPGEM. Porto Alegre, p. 243. 1998.

43. WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **SOLDAGEM PROCESSOS E METALURGIA**. Sao Paulo: Edgard Blucher, 2004.
44. SCOTTI, ; REIS, ; LISKEVYCH,. Modelo Descritivo do Fluxo de Calor em Soldagem a Arco Visando o Conceito de Calor Imposto Efetivo, São Paulo, 30 Maio 2012. 07. Acesso em: 11 Abril 2018.
45. FISCHER, A. **Estudo influencia parametros processo soldagem gmaw arco pulsado**. Tese (doutorado em Mecânica) - UFMG. Belo Horizonte, p. 170. 2011.
46. PESSOA, E. C. P.; BRACARENSE, A. Q. Estudo Comparativo do Desenvolvimento de Eletrodos Revestidos E6013 e E7018 em Soldagem Subaquática em Água Doce do Aço A36 á Profundidade de 50 a 100 metros., PamPulha, 21 Maio 2003. 10.
47. FUJIIA, N. et al. Comparison of strength characteristics of nodular graphite cast iron welded joints by various welding processes, Japão, 25 Fevereiro 2007. 9. Disponível em: <<http://www.informaworld.com/journals>>.
48. SHARMA, S. ; MAHESHWARI, S. M. Effects of Process Parameters on Arc Characteristics of Submerged Arc Welding, Delhi, 10 Dezembro 2016. 04.
49. GUILLE, A. E. Electric arcs - Their electrode processes and engineering applications. **Physical Science, Measurement and Instrumentation**, England, v. 131, p. 7, Setembro 1984.
50. BELINGA, E. M. M. **Applications and Benefits of adaptive Pulsed GMAW**. University of Technology. Lappeeranta, p. 140. 2012.
51. VENTRELLA, V. A. Microestrutura e Tenacidade do Aço API 5LX - Grau 70 Soldado com Arame Tubular AWS E-81T1 - Ni1 e Eletrodo Revestido AWS E-8010-G, Ilha Solteira/São Paulo, 2004. 15.
52. SEGEN, E. et al. Análise de Evolução do Estado das Tensões Residuais de Soldagem, Rio de Janeiro/RJ, 2008. 17.
53. ANTUNES, A. E. B. Tensões Residuais na Soldagem, Aspectos Básicos. **Repositório Institucional Unesp**, 1995. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/64688>>. Acesso em: 15 maio 2018.
54. FONSECA, C. M. P. et al. Estudo das Propriedades Mecânicas e Tensões Residuais em Juntas Soldadas de Aço ARBL Bifásico usado na Indústria Automobilística, Rio de Janeiro / RJ, 23 Outubro 2007. 09.
55. A. E. R. E. L. E. <http://www.aws.com.br/pdf/Catalogo.pdf>. **AWS**. Disponível em: <<http://www.aws.com.br/pdf/Catalogo.pdf>>. Acesso em: 14 Junho 2018.
56. VERA, M. Fabricante de elementos especiais Metalúrgica Vera. **Metalúrgica Vera**. Disponível em: <<http://metalurgicavera.com.br/produtos/TABELA-DE-CONVERSAO-DE-DUREZAS.php>>. Acesso em: 11 Junho 2018.

57. RODRIGUES, L. M. et al. Estudo da Microestrutura e da Microdureza dos aços 1020 e 1060, Volta Redonda / RJ, Dezembro 2014. 06.
58. CLEITON, A. L. F. et al. REFINO DE GRÃO EM AÇOS BAIXO CARBONO: UMA REVISÃO CRÍTICA, São José do Rio Preto/SP, 11 Abril 2011. 08.
59. PAULO, M. J.; PAULO, M. V. Relatório de Solda em Eletrodo Revestido. **Ebah**, 06 Setembro 2011. Disponível em: <[http://www.ebah.com.br/content/ABAAAe\\_LOAD/relatorio-solda-eletrodo-revestido?part=4](http://www.ebah.com.br/content/ABAAAe_LOAD/relatorio-solda-eletrodo-revestido?part=4)>. Acesso em: 24 maio 2018.
60. AMARAL, H. M. M. F. Soldadura dos Ferros Fundidos Cinzentos, Nodulares e Baíníticos, Porto / Portugal, Junho 1989. 153.

## **8 APÊNDICE 01**

### **PROCEDIMENTO PARA REPARO EM TUBULAÇÕES DE ÁGUA UTILIZANDO SOLDAGEM ESPECIAL APLICADA AO FERRO FUNDIDO**

**PROCEDIMENTO PARA REPARO EM TUBULAÇÕES DE ÁGUA  
UTILIZANDO SOLDAGEM ESPECIAL APLICADA AO FERRO  
FUNDIDO**

Aluno:

Carlos Henrique Reis dos Santos

Orientador:

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

Co-Orientador:

Roberto de Oliveira Magnago,

**VOLTA REDONDA**

**2018**

## SUMÁRIO

<b>1. APRESENTAÇÃO.....</b>	<b>4</b>
<b>2. FLUXO PROCEDIMENTO PARA REPARO TUBULAÇÕES DE FERRO FUNDIDO.....</b>	<b>4</b>
<b>3. INTRODUÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>5</b>
<b>4. LIMPEZA DA ÁREA DE SOLDAGEM.....</b>	<b>7</b>
<b>5. IDENTIFICAÇÃO DE TRINCA OU QUEBRA DA PEÇA.....</b>	<b>7</b>
<b>6. REALIZAÇÃO DE CHANFRO.....</b>	<b>8</b>
<b>7. CONSUMÍVEL XYRON 224.....</b>	<b>9</b>
<b>8. DEFINIÇÃO DE POSIÇÃO DE SOLDAGEM.....</b>	<b>9</b>
<b>9. ACOMPANHAMENTO DA TEMPERATURA ADJACENTE.....</b>	<b>9</b>
<b>10. CUIDADOS COM O RESFRIAMENTO.....</b>	<b>9</b>
<b>11. TRATAMENTO DOS CORDÕES DE SOLDAS.....</b>	<b>10</b>
<b>12. TÉRMINO DO PRIMEIRO CICLO DE SOLDAGEM.....</b>	<b>10</b>
<b>13. CONCLUSÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>14. REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>12</b>

## 1 APRESENTAÇÃO

Este presente trabalho tem como objetivo principal, apresentar um procedimento para soldagem em ferro fundido cinzento, através da técnica de soldagem com arco elétrico em eletrodos revestidos a base de níquel.

O Procedimento para Recuperação de Tubulações de Água utilizando Soldagem Especial Aplicada ao Ferro Fundido Cinzento, é um documento com objetivo de efetuar a formalização de sua produção, dispor conteúdo informativo, padronizar o conhecimento assim como o conteúdo por todos os envolvidos, desta forma buscar a qualidade e a eficiência nas soldagens em ferro fundido.

## 2 FLUXO DO PROCEDIMENTO PARA REPARO EM TUBULAÇÕES DE FERRO FUNDIDO CINZENTO

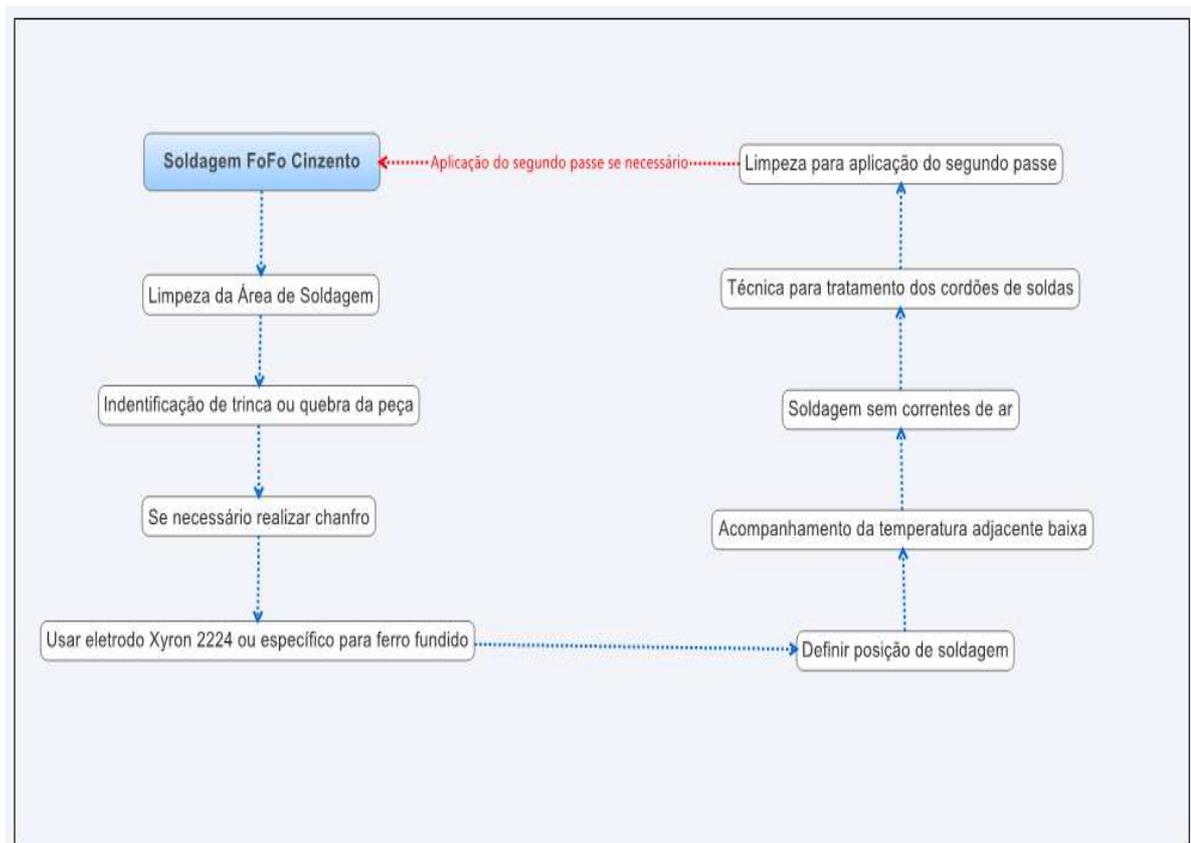


Figura 01: Fluxograma para reparo em tubulações em ferro fundido cinzento.

Fonte: Autor

### 3 INTRODUÇÃO TEÓRICA

Os ferros fundidos possuem características próprias, entretanto, as suas propriedades mecânicas os deixam diferenciados dos aços carbonos.

A série de ligas ferrosas contendo em sua composição química, teor de carbono superior a 2,19%, 1 a 3% de silício, ainda na mistura o enxofre e fósforo, possui o nome de ferro fundido.

Os ferros fundidos apresentam em suas estruturas, constituintes que são merecidos seus destaques tendo suas importâncias em grau relevantes, entre elas é possível citar:

- ✓ **Grafita**= este constituinte se apresenta como a forma mais estável do carbono puro em ferro fundido, com características de baixa densidade, baixa dureza e com alta condução térmica. Sua forma é de veios lamelares, esferoidal ou até nodular, sendo a forma lamelar aquela que aparece como trincas em matriz de ferro e a nodular aquela que inibe as trincas.
- ✓ **Carboneto de Ferro**= também conhecido como Cementita, este constituinte é um composto intermetálico cuja fórmula química é  $Fe_3C$  se apresenta de forma dura e frágil na microestrutura. Pode aparecer também através de elementos formadores como, vanádio, cromo ou molibdênio, por este motivo são peças de difícil usinagem e frágeis.
- ✓ **Ferrita**= encontrada no ferro fundido na fase  $\alpha$ , responsável na diminuição da resistência mecânica e dureza do ferro.
- ✓ **Perlita**= esta constituinte tem sua criação imediatamente após a eutetóide, onde temos a formação da cementita. Uma das características é sua alta resistência com uma leve redução na ductilidade.
- ✓ **Martensita**= esta constituinte tem sua aparição quando altas taxas de resfriamento são aplicadas ao material. Seu revenimento tem a finalidade de obtenção de uma estrutura com alta resistência mecânica e ao desgaste. Na ausência deste processo esta constituinte possui alta dureza e uma fragilidade.

- ✓ **Austenita**= tem sua formação em elevadas temperaturas consistindo no carbono dissolvido em ferro.
- ✓ **Bainita**= composta por ferrita e carbonetos. Tem sua formação com a mistura de elementos de liga e também em tratamento térmico.
- ✓ **Ausferrita**= obtém-se misturando a ferrita acicular e austenita com carbono estabilizado.
- ✓ **Steadita**= a formação do carboneto de ferro e fosfeto de ferro se devem a mistura do fósforo com o ferro e o carbono. Suas imagens apresentam a cor branca com furos em sua extensão, esta constituinte é chamada de Steadita. Sua microestrutura apresenta-se dura e frágil nos contornos celulares. Possui como característica a diminuição da ductilidade e quando em grande quantidade e distribuição, pode diminuir o limite de resistência à tração e a dificuldade na usinagem das peças. Sua aparição se dá quando o fósforo é presente na quantidade acima de 0,15%.

### Ferro fundido cinzento

A liga que apresenta uma cor escura em sua superfície de fratura justifica a sua denominação de ferro cinzento. A mesma possui a grafite na forma de lamelas em matriz perlítica, como se observa na figura 2.



Figura 02: Forma do grafite nos ferros fundidos cinzentos.

Fonte: Arquivo FOA

A resistência a tração, a microestrutura e a dureza das peças de ferro fundido são influenciadas pela velocidade de resfriamento, pela sua forma geométrica e pela composição química. Pode-se usar com a finalidade de controle da formação de grafite assim como de sua estrutura em matriz, o incremento de níquel, cobre cromo e o molibdênio. Este aumento na resistência à corrosão em alguns meios se consegue através das composições encontradas nestas adições.

## INICIO DO PROCEDIMENTO

### 4 LIMPEZA DA ÁREA DE SOLDAGEM

Tendo em vista que este tipo de material tende a absorver óleo e líquidos, estes tipos de contaminação afetam a soldabilidade e claro, devem ser retirados antes da soldagem do material. Pode ser usado uma solução clorada para retirada de graxa, vestígio de areia ou quaisquer outras impurezas. Pode-se também queimar o óleo através de um leve aquecimento da junta a ser soldada.

### 5 IDENTIFICAÇÃO DE TRINCA OU QUEBRA DA PEÇA

- Identificar a trinca:
  - ✓ Se caso for trinca limitá-la furando as extremidades destas;
- Se necessário realizar chanfro:
  - ✓ Com esmerilhadeira para trincas pequenas;
  - ✓ Eletrodo de chanfro – Chanfer Trode 03 (eletrodo de corte);

## 6 REALIZAÇÃO DE CHANFRO

Após a identificação da trinca (s) a ser reparada, executar o chanfro até os limites das trincas.

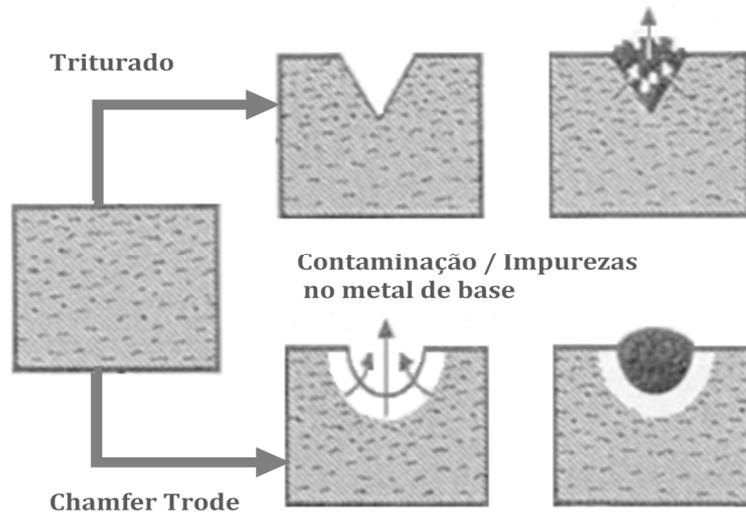


Figura 03: Chanfro para soldagem das peças.

Fonte: Autor

Uma das vantagens em se utilizar um método para realização deste chanfro, como este mostrado na figura acima, é correta abertura deste evitando assim a trituração das superfícies do chanfro.

Na abertura do chanfro utilizando esmerilhadeira, podemos ter a grafita e impurezas contidas no ferro fundido espalhados pela superfície do chanfro e que podem causar sérios problemas na execução da soldagem.

Em determinadas soldas, é aconselhável o uso da técnica do amanteigamento, sendo esta o revestimento antes da união em uma ou ambas as superfícies a serem soldadas. Esta técnica tem sua utilização para se evitar formação de fases frágeis na soldagem. Provenientes da alta taxa de resfriamento do metal de adição em cordões subsequentes aparecem as tensões de contração, entretanto, este efeito será maior na camada dúctil do amanteigamento do que na camada frágil da ZTA do material de base.

## 7 CONSUMÍVEL XYRON 2224

Este consumível é aplicado na soldagem de blocos, camisas e cárter de motores, carcaças de bombas, polias e apoio de virabrequim, por exemplo. Do tipo eletrodo Ni, cujo depósito favorece a soldagens em ferros fundidos com baixo aporte de calor, possui excelente usinagem. Os metais bases em que estes eletrodos podem ser usados são ferros fundidos cinzentos, nodulares, ligados e uniões com ligas de cobre. Possui como característica, uma resistência à tração de 350 MPa e um Dureza de 160HB na segunda camada de solda.

## 8 DEFINIÇÃO DE POSIÇÃO DE SOLDAGEM

Este eletrodo citado no item 6, além de excelente para reconstruções, enchimentos, reparos de trincas e junções de ferros fundidos com bronze, possui também a característica de soldabilidade em todas as posições.

## 9 ACOMPANHAMENTO DA TEMPERATURA ADJACENTE

É importante que a temperatura adjacente ao local de soldagem, se mantenha baixa para garantia de baixo aporte térmico na soldagem.

## 10 CUIDADOS COM O RESFRIAMENTO

Na execução de soldagem, é importante abrigar o ponto de soldagem de forma a não termos correntes de ar circulando pelo ponto de soldagem, proporcionando ao pós aquecimento um resfriamento bem lento. Este cuidado favorece ao não aparecimento de martensita na microestrutura.

## 11 TRATAMENTOS DOS CORDÕES DE SOLDAS

Efetue o martelamento dos cordões de solda com uma ferramenta de ponta arredondada imediatamente após a soldagem, estes cordões deverão ser curtos, filetados entre 20 a 30 mm dependendo da espessura da peça a ser soldada, de forma a termos baixa aporte térmico na soldagem.

## 12 TÉRMINO DO PRIMEIRO CICLO DE SOLDAGEM

Para o procedimento de soldagem a frio, a temperatura entre - passes deve ser de no máximo 100°C. Antes de efetuar o segundo passe, deve-se limpar a escória e remover toda a escória para que a região fique limpa antes de abrir o arco de solda.

### 13 CONCLUSÃO

A utilização em Ferros Fundidos Cinzentos de eletrodos Xyron, assim como o procedimento adequado descrito acima, garante o resfriamento lento das junções a fim de evitar o surgimento de constituintes de martensita, ocasionando uma alta dureza no material e sua fragilidade. A ZTA apresentará estruturas compatíveis com o metal base mesmo com a presença de pequenas quantidades de martensita na microestrutura. No metal de adição, as durezas serão semelhantes às do metal base quando no uso de eletrodos a base de níquel. Fica claro que existe a necessidade de manutenção da temperatura na solda em valores baixos com alto tempo de resfriamento através de procedimento descrito neste anexo.

## 14 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

GUESSER, W. L. **Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos**. 1ª. ed. São Paulo: Blucher, 2009.

FRANCKLIN,. Um Breve Estudo Sobre Ferro Fundido Nodular, Rio de Janeiro, Julho 2009. 30.

COLPAERT, H. **Metalurgia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1969.

SILVA, L. G. R. G. Estudo da Soldabilidade do Ferro Fundido SIBODUR® 450. Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto - Portugal, p. 156. 2016.

QUEIROZ, A. A. **Usinabilidade do Ferro Fundido Cinzento e Avaliação da Temperatura e Força de Corte como Sensores de Desgaste**. UFSC. Florianópolis, p. 149. 1976.

EUTECTIC, C. **Manual de Aplicações em Soldagem**. 4ª. ed. São Paulo: Pedro Kitta, 2017.

INFOSOLDA. Infosolda - O Portal Brasileiro da Soldagem. **Site da Infosolda**, 2003. Disponível em: <[http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/processos\\_solda/2013-09-12-soldagem-por-fuso-para-reconstruo-de-ferro-fundido.pdf](http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/processos_solda/2013-09-12-soldagem-por-fuso-para-reconstruo-de-ferro-fundido.pdf)>. Acesso em: 08 mar. 2018.

ONLINE, P. Perspectivas online - ciências exatas e engenharia. **Perspectivas online**, 2014. Disponível em: <[http://seer.perspectivasonline.com.br/index.php/exatas\\_e\\_engenharia/article/view/454/497](http://seer.perspectivasonline.com.br/index.php/exatas_e_engenharia/article/view/454/497)>. Acesso em: 09 mar. 2018.

ASTM A47/A47M – 99 (2004) – Standard Specification for **Ferritic Malleable Iron** Castings.

ASTM A8/A48M – 03 (2004) – Standard Specification for **Gray Iron Castings**.

ANSI/AWS A5.11/A5.11M:2005 – Specification for Nickel and Nickel Alloy Welding Electrodes for Shielded Metal Arc Welding.

ANSI/AWS A5.15-90 ( 2006) – Specification for Welding Electrodes and Rods for Cast Iron.