

CENTRO UNIVESITÁRIO UNIFACVEST

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ARIANE GIACOMELLI DE MOURA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS PROCESSOS DE SOLDAGEM  
MIG/MAG E SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR COM GÁS DE  
PROTEÇÃO, COM ÊNFASE NAS ALTERAÇÕES  
MICROESTRUTURAIS E QUALIDADE SUPERFICIAL DA JUNTA  
SOLDADA.**

LAGES

2018

ARIANE GIACOMELLI DE MOURA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS PROCESSOS DE SOLDAGEM  
MIG/MAG E SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR COM GÁS DE  
PROTEÇÃO, COM ÊNFASE NAS ALTERAÇÕES  
MICROESTRUTURAIS E QUALIDADE SUPERFICIAL DA JUNTA  
SOLDADA.**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado ao Centro Universitário  
Unifacvest como parte dos requisitos  
para a obtenção de grau de Bacharela  
em Engenharia Mecânica.

Prof. Esp.: Alisson Ribeiro de Oliveira

LAGES

2018

ARIANE GIACOMELLI DE MOURA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS PROCESSOS DE SOLDAGEM  
MIG/MAG E SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR COM GÁS DE  
PROTEÇÃO, COM ÊNFASE NAS ALTERAÇÕES  
MICROESTRUTURAIS E QUALIDADE SUPERFICIAL DA JUNTA  
SOLDADA.**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado ao Centro Universitário  
Unifacvest como parte dos requisitos  
para a obtenção de grau de Bacharela  
em Engenharia Mecânica.

Prof. Esp.: Alisson Ribeiro de Oliveira

Lages SC \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / 2018. Nota \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Prof. Esp. Alisson Ribeiro de Oliveira

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por ter me dado condições e forças para atingir meus objetivos, por estar comigo e ter me sustentado nos momentos difíceis.

A minha família pelo amor e confiança depositados a mim, durante toda minha trajetória acadêmica, por tudo o suporte concedido e pela compreensão nos momentos difíceis.

A meu orientador Alisson Ribeiro de Oliveira pelo apoio que foi de fundamental importância, e pelas oportunidades de aprendizado que me proporcionou durante a execução deste projeto.

A professora Tamara Zanette pela dedicação e tempo concedido para a realização deste projeto

A instituição CEDUP Industrial de Lages, pela pronta disponibilidade de seus laboratórios e pelo acolhimento durante o estágio e execução dos testes.

Aos professores da instituição CEDUP Industrial de Lages em especial ao professor Rodrigo Ricardo da Silva, pela prontidão em me auxiliar em meus testes, pela paciência e apoio concedido.

A Empresa Mecânica Pró-Indústria e ao professor Rafael Guimarães, por conceder seu estabelecimento e conhecimentos para a realização dos corpos de provas, deste trabalho.

A meus colegas e amigos, que escutaram durante meses sobre um assunto o qual não os instigava interesse de uma forma extremamente agradável, e me apoiaram durante todo este período.

# **ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS PROCESSOS DE SOLDAGEM MIG/MAG E SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR COM GÁS DE PROTEÇÃO, COM ÊNFASE NAS ALTERAÇÕES MICROESTRUTURAIS E QUALIDADE SUPERFICIAL DA JUNTA SOLDADA.**

Ariane Giacomelli de Moura<sup>1</sup>

Prof. Alisson Ribeiro de Oliveira<sup>2</sup>

## **RESUMO**

Nos dias atuais, quanto menos tempo se perde com manutenção corretiva mais se ganha em produção. Neste contexto viu-se a necessidade do aperfeiçoamento e estudo de técnicas de manutenção e produção eficientes e rápidas, com isto os estudos relacionados com soldagem foram ampliados. O processo de soldagem foi se aperfeiçoando durante os anos e se dividindo entre suas aplicações, hoje temos uma vasta gama de processos de soldagem e variações dos mesmos, segundo os parâmetros de soldagem escolhidos. Neste trabalho vamos focar nossa pesquisa nos processos de soldagem MIG, MAG e arame tubular com gás de proteção CO<sub>2</sub>, além da revisão bibliográfica que ressaltará as principais variáveis de cada processo, as análises serão feitas através de ensaios não destrutivos com líquido penetrante, a fim de revelar trincas, poros ou outras descontinuidades na parte superficial do cordão de solda, e ensaios destrutivos de macrografia, que através do ataque químico busca uma identificação interna de descontinuidades bem com zona termicamente afetada da junta soldada, e micrografia que revelará a microestrutura dos grãos do metal bem como suas transformações causadas pelo processo de soldagem. Através destes ensaios buscamos relacionar os três processos em características como qualidade superficial, defeitos e alterações microestruturais no cordão de solda.

Palavras-chave: Soldagem. Macrografia. Micrografia. Arame Tubular

---

<sup>1</sup>Acadêmica do Curso de Engenharia Mecânica 10ª fase do Centro Universitário UNIFACVEST

<sup>2</sup>Professor Especialista do Centro Universitário UNIFACVEST

**COMPARATIVE STUDY AMONG THE MIG / MAG WELDING  
PROCESSES AND WELDING WITH TUBULAR WIRE WITH  
PROTECTIVE GAS, WITH EMPHASIS ON MICRO-STRUCTURAL  
CHANGES AND SUPERFICIAL QUALITY OF THE WELDED JOINT.**

Ariane Giacomelli de Moura<sup>1</sup>

Prof. Alisson Ribeiro de Oliveira<sup>2</sup>

**ABSTRACT**

Nowadays, the less time that is lost with corrective maintenance, the more you can gain in production. In this context it was necessary to improve and study techniques of maintenance and ways of fast and efficiency production, and with it the studies related to welding were extended. The welding process has been improving over the years and divide between its applications, today we have a wide range of welding processes and variations, according to the welding parameters chosen. On this essay we will focus our researches on the MIG, MAG and tubular wire with CO<sub>2</sub> gas protection processes, in addition to the bibliographic review that will highlight the main variables of each process, the analyzes will be done through the non destructive tests with penetrating liquid, in order to detect cracks, pores or others discontinuities in the superficial part of the weld bead, and destructive tests of macrography, that through the chemical attack seeks an internal identification of discontinuities well with thermally affected zone of the welded joint, and micrography that will reveal the microstructure of the grains of metal as well as its transformations caused by the welding process. Through these tests we try to relate the three processes in characteristics such as surface quality, defects and microstructural changes in the weld bead.

Keywords: Welding. Macrography. Micrography. Tubular Wire

---

<sup>1</sup>Academica do Curso de Engenharia Mecânica 10ª fase do Centro Universitário UNIFACVEST

<sup>2</sup>Professor Especialista do Centro Universitário UNIFACVEST

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Vista ampliada de uma superfície metálica .....	18
Figura 2: Processo de soldagem por deformação .....	19
Figura 3: Processo de soldagem por fusão .....	19
Figura 4: Regiões do arco elétrico .....	23
Figura 5: Classificação arames para soldagem de aços .....	28
Figura 6: Classificação arames tubulares para soldagem .....	30
Figura 7: Deformação elástica X Deformação plástica .....	34
Figura 8: Tensão x Deformação, material dúctil x material frágil .....	35
Figura 9: Ensaio de dureza Brinell .....	39
Figura 10: Variação de temperatura X tempo .....	40
Figura 11: Crescimento epitaxial dos grãos na zona fundida.....	41
Figura 12: Crescimento competitivo os grãos .....	42
Figura 13: Diagrama de fases Ferro–Carbeto de Ferro(Fe-Fe <sub>3</sub> C) .....	44
Figura 14: Comportamento microestrutural de liga hipoeutetóide no resfriamento.....	46
Figura 15: Micrografia aço estrutural soldado X Distribuição da energia térmica na soldagem .....	47
Figura 16 :Curvas de resfriamento (tratamentos isotérmicos) para um aço carbono eutetóide. .....	48
Figura 17: Processo de corte.....	55
Figura 18: Chanframento e limpeza da peças a serem soldadas.....	55
Figura 19: Processo de soldagem .....	56
Figura 20: Limpeza das peças com escova manual.....	57
Figura 21: Aplicação do Líquido Penetrante .....	57
Figura 22: Aplicação do removedor .....	58
Figura 23: Aplicação do revelador .....	58
Figura 24: Análise líquido penetrante em solda MIG .....	59
Figura 25: Análise líquido penetrante em solda MAG.....	60
Figura 26: Análise líquido penetrante em solda com arame tubular com gás de proteção CO <sub>2</sub> .....	61
Figura 27: Policorte metalográfico com refrigeração.....	62
Figura 28: Sequência de lixas e processo de lixamento .....	63

Figura 29: Polimento da superfícies a serem analisadas com alumina.....	63
Figura 30: Ataque da superfície com solução acida para macrografia e secagem. ....	64
Figura 31: Macrografia ataque com solução de ácido clorídrico .....	65
Figura 32: Macrografia processo de soldagem MIG, com solução Nital 10%.....	66
Figura 33: Macrografia processo de soldagem MAG .....	67
Figura 34: ZTA processo de soldagem MAG .....	68
Figura 35: Macrografia processo de soldagem com arame tubular com gás de proteção .....	68
Figura 36: Ataque da superfície com solução ácida para micrografia .....	70
Figura 37: Micrografica material de base, junta soldada pelo processo MIG.....	71
Figura 38: Aço com cerca 0,3% carbono resfriado lentamente. Ferrita e perlita .....	71
Figura 39: Micrografia material de base, junta soldada pelo processo MAG.....	72
Figura 40: Material de base, processo com arame tubular .....	72
Figura 41: [...] c) Região onde ocorreu leve esferoidização dos carbonetos de perlita. Ferrita e perlita levemente esferoidizada.....	73
Figura 42: Micrografia material de adição .....	74
Figura 43: Micrografia material de adição pelo processo MAG.....	74
Figura 44: Estrutura Bainítica.....	75
Figura 45: Micrografia material de adição pelo processo arame tubular .....	75
Figura 46: Material de adição X material de adição.....	76
Figura 47:Material de adição X material de base, processo de soldagem MAG.....	77
Figura 48:Material de adição X material de base, processo de soldagem arame tubular com gás de proteção CO <sub>2</sub> .....	77
Figura 49: Poros processo de soldagem MIG, material de adição .....	78
Figura 50: Segregações causadas pelo processo de soldagem MAG, material de base .....	78
Figura 51: Microporos gerados pelo processo de soldagem arame tubular com gás de proteção no material de adição.....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Processos de soldagem por fusão .....	20
Tabela 2: Especificações AWS de materiais de adição para soldagem MIG/MAG .....	27
Tabela 3: Gases e misturas usados na soldagem MIG MAG .....	28
Tabela 4: Faixa de correntes utilizáveis com arames de diferentes diâmetros e diferentes materiais .....	29
Tabela 5: Composição química aço ASTM A-36 .....	32
Tabela 6 : Propriedades mecânicas aço ASTM A -36.....	33
Tabela 7: Escala de dureza Rockwell segundo a norma NP141:1990 .....	37
Tabela 8: Escala de dureza superficial Rockwell segundo a norma NP 4073:1990.....	38
Tabela 9: Rendimento térmico de alguns processos de soldagem.....	40
Tabela 10: Reagente para ensaios metalográficos .....	52
Tabela 11- Composição arame ER70S-6.....	73
Tabela 12: Composição arame E71T1/T9 C(M) Ti 52FD-B .....	73

## LISTA DE ABREVEATURAS E SÍMBOLOS

GMAW-	Gas Metal Arc Welding
FCAW-	Flux Cored Arc Welding
MIG-	Metal Inert Gas
MAG-	Metal Active Gas
TIG-	Tungstênio Inert Gas
CO <sub>2</sub> -	Dióxido de carbono
Ar-	Argônio
He-	Hélio
H <sub>2</sub> -	Hidrogênio
O <sub>2</sub> -	Oxigênio
Å -	Angstroms
mmHG-	Milímetros de Mercúrio
A -	Amperagem,
°C/mm –	Graus Celsius por milímetro
V/mm-	Volts por milímetro
K -	Kelvin
AWS-	American Welding Society
E -	Modulo de elasticidade ou modulo de <i>Young</i> ,
$\sigma$ -	Tensão de deformação,
$e$ -	Deformação
$G =$	Módulo de cisalhamento

$\tau =$	Tensão
$\gamma =$	Deformação de cisalhamento
HR-	Dureza Rockwell
N-	Newton
HB-	Dureza Brinell
ZTA-	Zona Termicamente Afetada
$P -$	Potência da fonte de soldagem
V-	Velocidade de soldagem,
Apt.-	Aporte térmico
V-	Tensão de soldagem
I -	Intensidade de corrente
v-	Velocidade de soldagem
$\eta$ -	Fator de correção da eficiência energética de cada processo.
$Apt^{\circ}$ -	Aporte térmico líquido
T.max -	Temperatura máxima
$v$ -	Velocidade de resfriamento
$K -$	Condutividade térmica do metal
$T_c$ -	Temperatura crítica
$\epsilon$ -	Espessura da peça
$\rho c -$	Calor específico volumétrico.
Fe -	Ferro
$Fe_3C$ -	Carbeto de Ferro ou cementita
Ferro $\gamma$ -	Austenita

Ferro $\alpha$ –	Ferrita
CFC-	Cúbico de face centrada
CCC-	Cúbico de corpo centrado
LP-	Líquido penetrante

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO .....</b>	<b>16</b>
2.1	Uma breve história sobre soldagem.....	16
2.2	Processos de soldagem .....	17
2.2.1	Processo de soldagem por Arco Elétrico .....	22
2.2.2	Fontes de energia para soldagem.....	24
2.2.3	Soldagem MIG/ MAG .....	25
2.2.4	Soldagem com arame tubular .....	29
2.2.5	Segurança na soldagem.....	31
2.3	Metalografia.....	32
2.3.1	Aço ASTM A-36 .....	32
2.3.2	Propriedades Mecânicas dos metais e ensaios.....	33
2.3.3	Ciclo térmico .....	39
2.3.4	Diagrama de fases.....	42
2.3.5	Diagrama TTT .....	47
2.3.6	Ensaio de qualidade.....	49
<b>3</b>	<b>ANÁLISES E DISCUSSÕES.....</b>	<b>54</b>
3.1	Análise com Líquido Penetrante.....	56
3.1.1	Soldagem MIG.....	58
3.1.2	Soldagem MAG .....	59
3.1.3	Soldagem Arame Tubular com Gás de Proteção .....	60
3.1.4	Comparativo entre as análise após ensaio com líquido penetrante.....	61
3.2	Análise Macrográfica.....	62

3.2.1	Preparação dos corpos de provas para análises de Macrografia e Micrografia.....	62
3.2.2	Soldagem MIG.....	65
3.2.3	Soldagem MAG.....	66
3.2.4	Soldagem Arame Tubular com Gás de Proteção.....	68
3.2.5	Comparativo entre as análise após ensaio de Macrografia.....	69
3.3	Análise de Micrografia.....	70
3.3.1	Microestrutura do material de base ZTA.....	71
3.3.2	Microestrutura do material de adição.....	73
3.3.3	Linha de fusão.....	76
3.3.4	Micro descontinuidades.....	78
3.3.5	Comparativo entre as análise após ensaio de Micrografia.....	79
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>82</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>84</b>
	<b>ANEXO A – EPS MIG.....</b>	<b>87</b>
	<b>ANEXO B – EPS MAG.....</b>	<b>89</b>
	<b>ANEXO C- EPS ARAME TUBULAR COM GAS DE PROTEÇÃO CO<sub>2</sub>.....</b>	<b>91</b>
	<b>ANEXO D - TABELA JAEGER.....</b>	<b>93</b>
	<b>ANEXO E- TABELA MONOCROMÁTICA DE ISHIHARA.....</b>	<b>94</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com o constante crescimento das indústrias de produção metal mecânica bem como os demais ramos de produção criou-se uma preocupação em comum, referente a manutenção das máquinas e componentes na linha de produção. A manutenção tornou-se um mal necessário e, quanto menos tempo é atribuído à manutenção, mais tempo é atribuído à produção. Neste contexto viu-se a necessidade de uma engenharia que foque nos erros que ocorrem durante a operação, no desgaste das peças e recuperação dos componentes, e entrelaçado a este problema surge também a necessidade de estudo e aperfeiçoamento do processo de soldagem, pois o mesmo é muito utilizado na manutenção e reparo de componentes.

O processo de soldagem foi se aperfeiçoando durante os anos e se dividindo entre suas aplicações. Hoje existe um grande número de processos de soldagem, os quais podem ser subdivididos de acordo com vários critérios, entre eles a fonte de energia usada para fundir as peças, o material de adição ou o tipo de proteção da poça de fusão.

A escolha do processo de soldagem a ser utilizado deve ser analisado em vários aspectos para que se possa garantir seu melhor aproveitamento, por este motivo visamos neste trabalho analisar algumas características nos processos de soldagem MIG/MAG e soldagem com arame tubular com gás de proteção.

Nos processos de soldagem, ocorre uma alteração na estrutura dos materiais da junta soldada, pois este processo tem uma alta emissão de energia térmica (calor). As propriedades dos materiais soldados sofrem alterações principalmente durante o processo de solidificação ou resfriamento, e algumas destas alterações nem sempre são desejáveis no processo.

Os metais e suas ligas em geral, apresentam uma estrutura cristalina, ou seja, tem um arranjo atômico ordenado, para conhecer suas propriedades e alterações em sua estrutura é necessário que tenhamos um conhecimento prévio sobre seu diagrama de fases, (diagrama ferro-carbono), o qual abordaremos detalhadamente a diante. Este diagrama será estudado pois um dos aços estruturais mais utilizados na indústria metal mecânica é aço ASTM A-36 o qual é um aço ligado ferro-carbono, e o mesmo que utilizaremos em nossos corpos de prova.

Os processos de soldagem MIG/MAG (soldagem a arco com proteção gasosa GMAW- (Gas Metal Arc Welding) tem uma boa aceitação na indústria, devido a sua qualidade no cordão de solda, qualidade esta devida ao gás de proteção utilizado durante o processo, e notável crescimento nos últimos anos, devido a sua alimentação constante o que permite a semiautomatização do processo de soldagem. Atribui-se também a este processo a vantagem de ausência da necessidade de remoção de escória e limpeza como citado por Machado (2007).

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2011) o processo de soldagem a arco com arame tubular (FCAW-Flux-Cored Arc Welding), por reunir as vantagens do processo MIG/MAG e do processo de soldagem com eletrodo revestido, vem crescendo sua aceitação na indústria. Este processo possui uma alimentação contínua, o que também possibilita a semiautomatização na soldagem.

Visando contribuir para a indústria e para a pesquisa acadêmica, este trabalho irá apresentar um estudo comparativo entre os processos de soldagem MIG/MAG e soldagem com arame tubular com gás de proteção. Este estudo estará voltado em apresentar as características e alterações internas e externas na junta soldada.

Para características externas, bem como suas alterações os métodos de análises escolhidos foram ensaio por líquido penetrante e macrografia, estes ensaios podem ser classificados como ensaios não-destrutivo (líquido penetrante) e ensaio destrutivo (macrografia). As características avaliadas serão a qualidade superficial do cordão de solda, descontinuidades, e trincas no processo de resfriamento.

Para as características internas, o método de análise escolhido foi o ensaio de micrografia, tal ensaio é classificado como um ensaio destrutivo, e traz informações sobre a estrutura do material, arranjo dos grãos da estrutura cristalina, zona termicamente afetada, mudança de fase no resfriamento e solidificação, mudança nas propriedades mecânicas, devido ao aquecimento e resfriamento da junta soldada.

O objetivo deste trabalho está diretamente ligado, em fornecer informações relevantes para a escolha do processo de soldagem, tais informações estão ligadas a:

- Análise da estrutura externa, com ensaio não destrutível, com líquido penetrante.
- Analisar externamente fissuras, trincas e falhas no cordão de solda.
- Análise da estrutura, com ensaio destrutivo, através da técnica de macrografia.
- Analisar internamente os aspectos de fissuras, trincas ou falhas no cordão de solda.
- Análise da estrutura interna, com ensaio destrutível, através de micrografia.
- Apresentar os diagramas de fases (ferro-carbono), zona termicamente afetada, e análise dos grãos da estrutura cristalina do metal.

## 2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

### 2.1 Uma breve história sobre soldagem

Como citado por Machado (2007), o processo de soldagem, ou união de materiais, como conhecemos hoje foi criado no século XIX, porém esta técnica é bem mais antiga, tem-se indícios que o processo de união de materiais já era praticado a cerca de quatro mil e oitocentos anos, nos vales dos rios Nilo e Tigre-Eufrates.

Para Marques, Modenesi e Bracarense (2011), esta técnica é mais antiga ainda, no Museu de Louvre, afirmam que pode-se encontrar um pingente de ouro, fabricado a cerca de 4000 AC, na Pérsia, com indicações de soldagem.

“Da idade do bronze, pode-se apreciar no Museu Nacional de Dublin (Irlanda) pequenas caixas circulares de ouro cujas juntas foram realizadas por pressão” (MACHADO, 2007, p 3).

Machado (2007) cita que na Índia, existe uma estrutura que chama a atenção, o Pilar de Delhi, feita a cerca de 1700 anos, com dimensões de 8m de altura, 400mm de diâmetro na base e 300mm de diâmetro no topo, com um peso aproximado de 5500Kg, e tem diversas partes soldadas.

Desde de 1800 várias descobertas vêm auxiliando no desenvolvimento do processo de soldagem, tais como a criação de bateria (Alessandro Volta -1800), a descoberta do gás acetileno, e a produção do arco elétrico entre dois eletrodos de carvão, denominada chama voltaica (Humphry Davy-1801), e a invenção do gerador elétrico (metade do século XIX).

“A primeira patente de um processo de soldagem, obtida na Inglaterra por Nikolas Bernados e Stanilav Olszewsky em 1885, foi baseada em um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de carvão e a peça a ser soldada” (MARQUES E MODENESI, 2000, p. 4).

Machado (2007) atribui a precursão dos processos TIG e MIG, a Henry M.Hobat e Philip K. Devers 1926, que utilizaram gás hélio e argônio, como meio de proteção o arco e poça de fusão. Também apresentaram os princípios da alimentação contínua de um arame (eletrodo consumível).

Segundo Machado (2007) em 1953 K.V.Lyubavskii e N.M. Novoshilov desenvolveram a soldagem MAG, com um arame nu, continuamente alimentado empregando como gás de proteção CO<sub>2</sub>. Em 1954 Arthur A. Bernard desenvolveu o processo eletrodo tubular protegido por gás s(“Dualshield”), patenteado em 1957.

“Em 1959 George G. Landis e D.M.Patton desenvolveram o processo eletrodo tubular auto-potegido (“Innershield”)” (MACHADO, 2007, p. 4). Marque, Modenesi e Bracarense consideram que hoje mais de 50 tipos de soldagem tem aplicação na indústria, e novas tecnologia continuam sendo estudadas e aperfeiçoadas.

## 2.2 Processos de soldagem

“Solda: uma coalescência localizada de metais ou não metais, produzida ou pelo aquecimento dos materiais até a temperatura de soldagem, com ou sem a aplicação de pressão, ou pela aplicação de pressão somente, com ou sem o uso de metal de adição” (WELDING HANDBOOK, 8ª edição apud MACHADO, 2007, p. 4).

“A solda pode ser definida como uma união de peças metálicas, cujas superfícies se tornaram plásticas ou liquefeitas, por ação de calor ou de pressão, ou mesmo de ambos. Poderá ou não ser empregado metal de adição para se executar efetivamente a união” (SENAI - ES, 1996, p. 5).

Marques, Modenesi e Bracarense (2011), consideram a soldagem um processo de união, porém atualmente o processo de soldagem ou variações dele são usados na indústria para a deposição de material sobre uma superfície visando a recuperação da peça desgastada para a formação de um revestimento com características especiais.

Para Okumura e Taniguchi (1982) o processo de soldagem tem aplicações como enchimento de falhas em fundidos, reparo de trilhos, depósito superficial de alta dureza em ferramentas, reparos e manutenção.

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2011), a soldagem pode ser classificada como um método de união de metais baseado na ação de forças microscópicas- interatômicas e intermoleculares, esta união acontece pela aproximação dos átomos ou moléculas das peças a serem unidas, ou de um material intermediários adicionado à esta junta, até distâncias suficientemente pequenas para a formação de ligações químicas.

Para Okumura e Taniguchi (1982) apesar de parecer simples, a técnica de soldagem abrange diversas áreas do conhecimento tais como engenharia elétrica, estrutural, mecânica, metalúrgica, química e conhecimento sobre física aplicada.

Segundo Marques e Modenesi (2000), no interior da estrutura de um material sólido, os átomos estão ligados a seus átomos vizinhos, com uma distância  $r=0$ , e com isto a energia do sistema é mínima pois as forças estão equilibradas. Na superfície deste material, existe menos

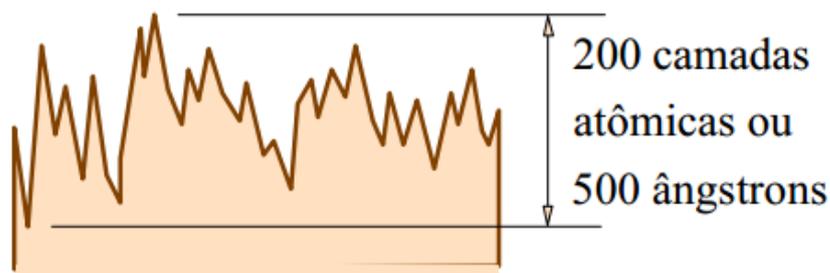
ligações, os átomos estão ligados a menos vizinhos, e com isto a energia na superfície é maior. Esta energia tende a diminuir quando ligados a outros átomos, portanto, se uma superfície for aproximada a uma distância suficientemente pequena para a formação de uma ligação permanente, uma solda será formada.

Para Machado (2007), a atração entre dois materiais, quando tratada em nível atômico, pode ser baseada simplesmente pela atração entre os átomos dos materiais, isto é possível dependendo do espaçamento interatômico dos materiais envolvidos.

Para Marques e Modenesi (2000), este processo é muito difícil de ocorrer com superfícies metálicas, pois mesmo a superfície mais lisa, ainda contém um número muito alto de rugosidades, o que impede a aproximação suficiente para a formação da junta soldada.

Segundo Machado (2007), Se duas peças perfeitamente limpas fossem colocadas no vácuo absoluto, a única separação entre elas seria o contorno de grãos, porém existindo a atmosfera (na Terra), entre as peças a serem soldadas sempre existirá duas camadas formadas por óxidos e gás adsorvido (100 a 200 Å de espessura), o que mesmo com uma superfície suficientemente lisa ainda seria necessário a aplicação de uma força suficientemente alta, para obtenção de juntas soldadas.

Figura 1: Vista ampliada de uma superfície metálica



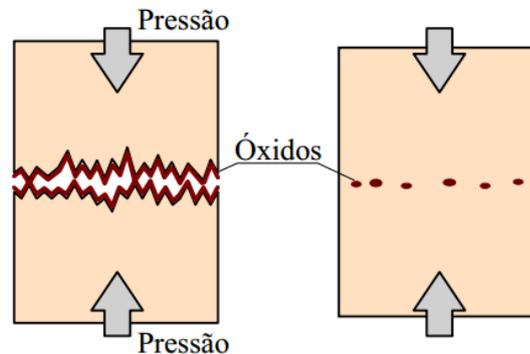
Fonte: Marques; Modenesi, 2000

“Dois métodos principais são utilizados para superar estes obstáculos, os quais originam os dois grandes grupos de processos de soldagem. O primeiro consiste em deformar as superfícies de contato permitindo a aproximação dos átomos a distâncias da ordem de  $r=0$ ” (MARQUES, MODENESI, 2000, p.8).

“Soldagem por pressão é o processo no qual as partes soldadas são inicialmente unidas e posteriormente pressionadas uma contra a outra para efetuar a união” (ANDRADE e tal, 1996, p. 9). Para Marques e Modenesi (2000) neste processo as peças podem ser previamente

aquecidas no local da soldagem, este procedimento facilita as deformações nas superfícies de contato.

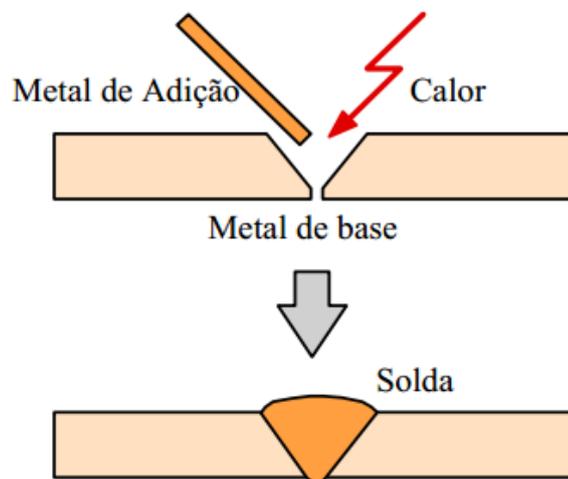
Figura 2: Processo de soldagem por deformação



Fonte: Marques e Modenesi, 2000

“O segundo método se baseia na aplicação localizada de calor na região até a sua fusão e do metal de adição (quando este é utilizado) destruindo as superfícies de contato e produzindo a união pela solidificação do metal fundido” (MARQUES; MODENESI, 2000, p.9).

Figura 3: Processo de soldagem por fusão



Fonte: Marques e Modenesi, 2000

“Nos processos em que a soldagem é realizada por fusão, há a formação da “poça (de fusão)”, a qual ocorre a cada deslocamento da fonte de energia e possui como fronteira a isoterma dada pela temperatura de solidificação do material” (MACHADO, 2007, p. 6).

Para Okumura e Taniguchi (1982), existe ainda um terceiro grupo nos processos de soldagem, a *Brasagem* processo no qual uma junta é unida através de um metal de adição de baixo ponto de fusão, neste caso o metal de base não é fundido.

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2011), a soldagem por fusão, tem um grande número de processos. A maioria destes processos utilizam algum meio de proteção a fim de minimizar a reação do material fundido com os gases da atmosfera.

Tabela 1: Processos de soldagem por fusão

<b>Processo</b>	<b>Fonte de calor</b>	<b>Tipo de corrente e polaridade</b>	<b>Agente protetor ou de corte</b>	<b>Outras características</b>	<b>Aplicações</b>
<b>Solda por eletro-escória</b>	Aquecimento por resistência da escória	Contínua ou alternada	Escória	Automática/mecanizada. Junta na vertical. Arame alimentado mecanicamente pela poça de fusão. Não existe arco	Soldagem de aços carbono baixas e altas ligas, espessura $\geq 50\text{mm}$ . Soldagem de peças de grande espessura, eixos etc.
<b>Soldagem ao arco-submerso</b>	Arco elétrico	Contínua ou alternada Eletrodo +	Escória e gases gerados	Automática/mecanizada ou semiautomática. O arco arde sob uma camada de fluxo granular	Soldagem de aços carbono baixa e alta liga. Espessura $\geq 10\text{mm}$ . Posição plana ou horizontal de peças estruturais, tanques, vasos de pressão, etc.
<b>Soldagem com eletrodos revestidos</b>	Arco elétrico	Contínua ou alternada Eletrodo +	Escória e gases gerados	Manual. Vareta metálica recoberta por camada de fluxo	Soldagem de quase todos os metais, exceto cobre, ouro, metais preciosos, reativos e de baixo ponto de fusão. Usado na soldagem em geral.
<b>Soldagem com Arame tubular</b>	Arco elétrico	Contínua Eletrodo +	Escória e gases gerados ou fornecidos por fonte externa. Em geral $\text{CO}_2$	O fluxo está contido dentro do arame tubular de pequeno diâmetro. Automático ou semiautomático	Soldagem de aços carbono com espessura $\geq 1\text{mm}$ . Soldagem de chapas
<b>Soldagem MIG /MAG</b>	Arco elétrico	Contínua Eletrodo +	Argônio ou Hélio, Argônio+	Automática/mecanizada ou semiautomática.	Soldagem de aços carbono de baixa e alta liga não

			O <sub>2</sub> , Argônio +CO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>	O arame é sólido.	ferrosos com espessura ≥1mm. Soldagem de tubos, chapas etc. Qualquer posição de soldagem
<b>Soldagem a plasma</b>	Arco elétrico	Contínua Eletrodo -	Argônio, Hélio ou Argônio + hidrogênio	Manual ou automática. O arame é adicionado separadamente. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arco é constituído por um bocal.	Todos os metais importantes em engenharia, exceto Zn, Be e suas ligas, com espessura de até 1,5mm. Passes de raiz
<b>Soldagem TIG</b>	Arco elétrico	Contínua ou alternada Eletrodo -	Argônio, Hélio ou mistura destes	Manual ou automática. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arame é adicionado separadamente	Soldagem de todos os metais exceto Zn, Be e suas ligas, espessura entre 1 e 6 mm, soldagem de não ferrosos e aços inox, passe de raiz de soldadas em tubulações.
<b>Soldagem por feixe eletrônico</b>	Feixe eletrônico	Contínua alta tensão. Peça +	Vácuo(>> 10 <sup>4</sup> mmHG)	Soldagem automática. Não há transferência de metal. Feixe de elétrons focalizado em um pequeno ponto	Soldagem de todos os metais exceto os casos de evolução dos gases ou vaporização excessiva, a partir de 25 mm de espessura. Indústria nuclear e aeroespacial
<b>Soldagem a Laser</b>	Feixe de luz		Argônio ou Hélio	Como acima	Como acima. Corte de materiais não metálicos.
<b>Soldagem a gás</b>	Chama oxiacetileno		Gás (CO, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O)	Manual. Arame é adicionado separadamente	Soldagem manual de aço carbono, Cu, Al, Zn, Pb e bronze. Soldagem de chapas finas e tubos de pequeno diâmetro

Fonte: Marques e Modenesi, 2000

### 2.2.1 Processo de soldagem por Arco Elétrico

Descoberto no início do século XIX, por Humphrey Davy a soldagem por arco elétrico é o método mais utilizado na indústria, devido à combinação de ótimas características, tais como concentração adequada de energia para fusão localizada do metal de base, facilidade de controle, baixo custo relativo do equipamento, e um nível aceitável de riscos à saúde dos operadores, como citado por Marques, Modenesi e Bracarense (2011).

Para Machado (2007) este processo foi o responsável pela expansão e aceitação da soldagem, foi o primeiro a obter a aceitação como método de produção com boa qualidade.

“Pode-se definir o arco elétrico como sendo uma descarga elétrica mantida através de um gás ionizado, iniciada por uma quantidade de elétrons emitidos do eletrodo negativo (cátodo) aquecido e mantido pela ionização térmica do gás aquecido” (WAINER, BRANDI E MELO, 2004, p. 9). Para Marque, Modenesi e Bracarense (2011) este gás é conhecido como plasma, e pode produzir energia térmica suficiente para a fusão localizada das peça a serem soldadas.

Para Wainer, Brandi e Mello (2004), a intensidade da corrente é um parâmetro determinante na taxa de deposição do material de adição, aspecto do cordão, propriedades da junta soldada, magnitude e distribuição espacial da energia térmica, bem como controla a penetração da solda.

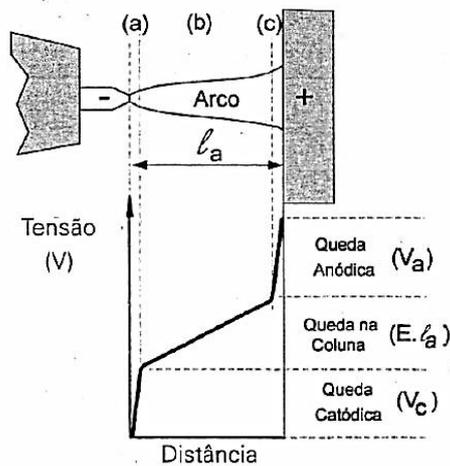
Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2011) a corrente do arco elétrico não tem um limite superior estabelecido, porém para correntes de ordem  $10^3$  A, a utilização se restringe a soldagem com arco submerso, as correntes comumente utilizadas na soldagem com arco elétrico estão entre 10 e 100 A.

A diferença de potencial do arco elétrico varia em suas extremidades, e esta diferença é necessária para manter a descarga elétrica. Nas regiões catódica e anódica os gradientes térmicos e elétricos chegam a ordem de  $10^6$  °C/mm e  $10^3$  a  $10^5$  V/mm respectivamente, segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2011).

O calor é gerado devido a movimentação e choque das cargas no arco elétrico, os íons podem ser considerados imóveis quando comparados a velocidade dos elétrons, assim estes são considerados os responsáveis pela geração de calor. A ionização ocorre quando um elétron recebe energia suficiente para mudar para uma órbita de energia maior, esta energia pode o transformar em um elétron livre, o qual pode sair da influência do campo eletromagnético do átomo e se tornar um elétron livre. A ionização térmica, útil em soldagem é obtida através destes

choques do constituintes do plasma, estes choques formam um elétron livre e um íon positivo, como citado por Wainer, Brandi e Mello (2004).

Figura 4: Regiões do arco elétrico



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense, 2011

No plasma os íons e elétrons são responsáveis pelo transporte da corrente elétrica, eles são produzidos pelo choque dos constituintes do plasma, como já citado. A velocidade dos elétrons é muito superior que a velocidade dos outros constituintes, e por isto ele pode carregar consigo até 90% da corrente elétrica, por este motivo é essencial manter a neutralidade do plasma, para isto deve-se produzir elétrons adicionais no eletrodo negativo (cátodo) como citado por Marques, Modenesi e Bracarense (2011).

“Por sua vez o cátodo é dito termiônico, quando aquecido à uma suficientemente alta temperatura emite elétrons sem fundir” (MACHADO, 2007, p. 24). Isto ocorre quando o material tem um elevado ponto de fusão, acima de 3500K (exemplo tungstênio e carbono).

Quando o cátodo tem temperatura de fusão menor que 3500K, processos para emissão de elétrons alternativos precisam ser aplicados, segundo Marques e Modenesi (2011), o processo mais comumente usado, é a emissão de elétrons a partir da destruição de filmes de óxidos existentes na superfície do material, este efeito de limpeza é de fundamental importância para os processos de soldagem com proteção gasosa de ligas de alumínio e magnésio.

Para todas as cargas elétricas em movimento é gerado um campo magnético em torno delas. Todo condutor percorrido por uma corrente elétrica, e posto em um campo magnético estará submetido a Força de Lorentz, perpendicular ao campo magnético e a corrente. As forças de origem magnéticas aumentam com a corrente elétrica, e portanto seu efeitos tendem a se

tornar mais intensos na soldagem com corrente elevada como citado por Marques, Modenesi e Bracarense (2011).

Este campo magnético exerce uma força de compressão na forma de pressão, que é diretamente proporcional ao raio do arco, ou seja, é menor na extremidade do eletrodo e maior na peça, esta diferença de pressão, induz no arco um intenso fluxo de gás para a peça, chamado jato de plasma, este por sua vez é responsável pela penetração da solda, como explicado por Marques, Modenesi e Bracarense (2011).

Para Marques, Modenesi e Bracarense (2011), outro efeito magnético importante é o sopro magnético, um desvio do arco de sua posição normal, resulta de uma distribuição assimétrica do campo magnético em torno do arco. Geralmente é indesejado pois prejudica a penetração e uniformidade do cordão, como também gera instabilidade no arco.

### 2.2.2 Fontes de energia para soldagem

Fontes de energia para soldagem podem ser classificadas de diversas formas, mas geralmente são classificadas em dois grupos: 1º as fontes que geram energia pela conversão de uma forma dada de energia, em energia elétrica, fontes tipo geradoras, 2º fontes que convertem a energia elétrica da rede de distribuição em uma forma adequada de energia para soldagem, fontes tipo transformadoras, como citado por Marques, Modenesi e Bracarense (2011).

Segundo Martins e Santos (2011), fontes geradoras são máquinas rotativas que possuem um motor elétrico ou motor de combustão interna, acoplado a um gerador onde encontra-se um rotor com bobinas que giram no campo magnético. As bobinas contidas no rotor produzem corrente contínua de saída para alimentar o arco.

“Um transformador é composto por um núcleo de chapas de aço sobrepostas e enrolado por dois segmentos de fios, que formam os enrolamentos primário (entrada) e secundário (saída)” (MARQUES, MODENESI E BRACARENSE, 2011, p. 69). São ditas retificadoras, máquinas transformadoras que possuem diodos, componentes eletrônicos que apresentam valor de resistência elétrica diferentes dependendo do sentido do fluxo da corrente, assim este dispositivo retifica a corrente alternada através do bloqueio de um sentido do fluxo, transformando corrente alternada em corrente contínua, explicado por Marque, Modenesi e Bracarense (2011).

Para Martins e Santos (2011), além destes dois tipos, os mais comuns, ainda existe as máquinas ditas inversoras de soldagem, elas têm a capacidade de transformar corrente alternada

em altas voltagens, armazenando-as em um banco de capacitores de corrente contínua, onde um microprocessador controla o fornecimento da corrente. Este tipo de equipamento é muito mais eficiente que as máquinas de solda convencionais, pois o fato de um microprocessador fornecer a corrente, eventuais picos de energia na rede não afetaram o processo de soldagem.

### 2.2.3 Soldagem MIG/ MAG

“A Soldagem é realizada por um arco elétrico, estabelecido entre um arame nu continuamente alimentado e a peça. A proteção do mesmo e da poça de fusão é realizada por gás que flui pela boca, concentricamente com o arame” (MACHADO, 2007, p.15).

“GMAW (soldagem MIG/MAG) um processo de soldagem a arco que usa um arco entre um eletrodo de metal de adição contínuo e poça de fusão. O processo é usado com proteção de um gás de proteção fornecido externamente e sem a aplicação de pressão” (AWS D1.1 STRUCTURAL WELDING CODE-STEEL, 2004, p. 316).

Segundo Marques e Modenesi (2000) a proteção do arco elétrico e da poça de fusão é feita através de um gás de proteção, sendo que o processo é considerado:

- MIG (metal inerte gás) quando o gás utilizado é inerte (Argônio/Hélio), o gás inerte puro é usado na soldagem de juntas não ferrosas. Para a soldagem de aços uma quantidade de gás oxidante ( $O_2$  ou  $CO_2$ ) é necessária para manter a estabilidade do arco. O argônio é mais barato que o gás Hélio, sendo o mais usado no Brasil, segundo Machado (2007)
- MAG (Metal Active Gás) quando o gás utilizado é ativo ( $CO_2$ , ou mistura  $Ar/O_2/CO_2$ ), gás inerte com mistura em pouca proporção de gás ativo geralmente usado na soldagem de aços ligados. E quando a proporção de gás ativo for alta, ou puro  $CO_2$ , a soldagem é usada em aço carbono.

É considerando um processo semiautomático, pois a alimentação do eletrodo pode ser feita mecanicamente por um alimentador motorizado, enquanto fica a cargo do soldador a iniciação e interrupção do processo bem como a movimentação da tocha ao longo do processo, como citado por Marques, Modenesi e Bracarense (2011).

Segundo Wainer, Brandi e Mello (2004), existe quatro formas de transferência de metal de adição para a peça: globular, curto-circuito, pulverização e arco pulsado.

- Na transferência globular a transferência de metal é feita em forma de gotas, o diâmetro das gotas de metal são maiores que o diâmetro do eletrodo o qual as

formam, e associado ao fato da transferência ser realizada pela ação da gravidade, ente processo se restringe a posição de soldagem plana, segundo Wainer, Brandi e Melo (2004)

- A transferência de metal de adição feita por curto-circuito ocorre em baixos valor de corrente, uma gota de metal se forma na ponta do eletrodo nu, e ao tocar a poça de fusão, forma um curto-circuito sendo rapidamente atraída por ela pela ação da tensão superficial. É adequado para todas as posições de soldagem. A penetração não é muito grande e existe problemas relacionada a quantidade de respingos, como citado por Wainer, Brandi e Mello (2004). Segundo a definição da AWS D1.1 GMAW-S (soldagem MIG/MAG-arco de curto circuito) É uma variação de processo de soldagem MIG/MAG na qual o eletrodo consumível é depositado durante curtos circuitos repetidos.
- Como o diâmetro da gota de metal diminui com o aumento da corrente, em uma faixa de corrente chamada corrente de transição, a transferência globular passa a ser transferência por spray ou pulverização, onde as gotas de metal são menor que o eletrodo e em número elevado. Só ocorre com determinados gases de proteção, geralmente com argônio ou misturas ricas em argônio, (para soldas com valores de CO<sub>2</sub> acima de 15% a transferência por spray não é possível) o arco é estável e praticamente não há ocorrência de respingos. Marques, Modenesi e Bracarense (2011).
- A transferência por arco pulsado é semelhante a transferência por pulverização, porém o equipamento gera duas faixa de corrente, a primeira no início da fusão do arame, com a formação de uma pequena gota, é baixa e não há transferência de metal, esta pequena gota é transferida ao metal de base quando há a transição para a segunda faixa de corrente, esta por sua vez ultrapassa o valor de corrente de transição, fazendo que a transferência de uma única gota ocorra, segundo Wainer, Brandi e Mello (2004), segundo Machado (2007) a formação de respingos é praticamente nula.

O equipamento de soldagem é composto basicamente por uma fonte de energia, um alimentador de arame, uma tocha, e uma fonte de gás protetor. Para se conseguir que a velocidade de alimentação satisfaça a velocidade de consumo, mantendo o comprimento do arco existem basicamente duas maneiras:

- 1º. “Trabalha-se com uma fonte tipo corrente constante, que resulta em uma velocidade de fusão aproximadamente constante, e um alimentador de arame

com velocidade variável, controlada pelo equipamento” (MARQUES, MODENESI E BRACARENSE, 2011, p. 245).

- 2º. Utiliza-se uma fonte tipo tensão constante, e uma alimentador de arame com alimentação constante, e permite-se variação nos parâmetros de soldagem a fim de manter um consumo constante e aproximadamente igual a velocidade de alimentação citado por Marques, Modenesi e Bracarense (2011).

Segundo Machado (2007) a fonte de energia para a soldagem MIG /MAG são do tipo transformador-retificador, e a corrente utilizada em sua grande maioria é corrente contínua. Segundo Wainer, Brandi e Mello (2004) o equipamento conta ainda com o alimentador de arame que está ligado a fonte de energia, a tocha e o cilindro de gás de proteção.

Para Machado (2007) os arames para soldagem devem ser produzidos com extremo controle de composição e pureza, porém propriedades como resistência a tração, dureza e rigidez devem ser levados em consideração pois influenciam no processo de soldagem. Os eletrodos de aço, possuem uma fina camada de cobre, para a proteção contra corrosão, aumento do contato elétrico e aumento da vida útil do bico de contato.

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2011), os arames de soldagem com proteção com CO<sub>2</sub>, contém um teor maior de silício e manganês devido ao seu auxílio na desoxidação.

Tabela 2: Especificações AWS de materiais de adição para soldagem MIG/MAG

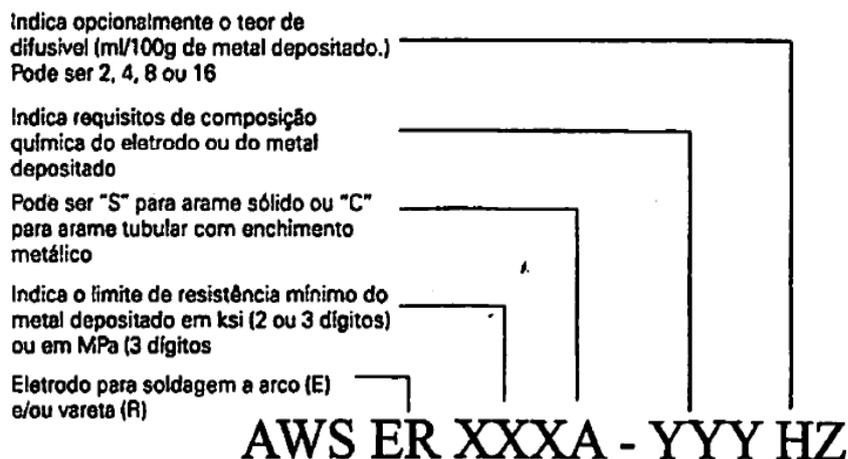
<b>ESPECIFICAÇÃO</b>	<b>CONSUMÍVEL</b>
<b>AWS A 5.7</b>	Arames de cobre e suas ligas
<b>AWS A 5.9</b>	Arames de aço inoxidável
<b>AWS A 5.10</b>	Arames de alumínio e suas ligas
<b>AWS A 5.14</b>	Arames de níquel e suas ligas
<b>AWS A 5.15</b>	Arames para soldagem de ferro fundido
<b>AWS A 5.16</b>	Arames de titânio e suas ligas
<b>AWS A 5.18</b>	Arames e arames tubulares de aço carbono com pó metálico interno
<b>AWS A 5.19</b>	Arames de magnésio e suas ligas
<b>AWS A 5.20</b>	Arames tubulares de aço carbono com fluxo interno
<b>AWS A 5.21</b>	Arames para revestimento
<b>AWS A 5.22</b>	Arames tubulares para soldagem de aço inoxidável
<b>AWS A 5.24</b>	Arames para a soldagem de zircônio

**AWS A 5.28** Arames de aços de baixa liga

Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense, 2011.

A classificação dos arames de soldagem de aços AWS A 5.18 e A 5.28, tem o seguinte formato:

Figura 5: Classificação arames para soldagem de aços



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense, 2011

Os gases utilizados na soldagem MIG/MAG, podem ser inertes, ativos ou uma mistura destes. O tipo de gás influencia nas características do arco na transferência de metal, na penetração, largura e formato do cordão, na velocidade máxima de operação, tendência no aparecimento de mordeduras e custo de soldagem.

Tabela 3: Gases e misturas usados na soldagem MIG MAG

Gás ou mistura	Comportamento químico	Aplicações
<b>Argônio</b>	Inerte	Quase todos os metais
<b>Hélio</b>	Inerte	Al, Mg, Cu e suas ligas, Alta penetração
<b>Ar + He (20-50%)</b>	Inerte	Idem He, mas melhor que 100% He
<b>Nitrogênio</b>	-	Cobre, maior energia de soldagem
<b>Ar + 20-30% N<sub>2</sub></b>	-	Idem N <sub>2</sub> , mas melhor que 100% N <sub>2</sub>
<b>Ar + 1-2% O<sub>2</sub></b>	Ligeiramente oxidante	Aços inoxidáveis e algumas ligas de Cu
<b>Ar + 3-5% O<sub>2</sub></b>	Oxidante	Aços carbono e alguns aços de baixa liga
<b>CO<sub>2</sub></b>	Oxidante	Aços carbono e alguns aços de baixa liga
<b>Ar + 20-50% CO<sub>2</sub></b>	Oxidante	Aços
<b>Ar + CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub></b>	Oxidante	Aços

Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2011)

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2011), o diâmetro do eletrodo é escolhido principalmente pela espessura do material de base. Para cada espessura de arame, existe uma corrente adequada para soldagem.

Tabela 4: Faixa de correntes utilizáveis com arames de diferentes diâmetros e diferentes materiais

<b>Material</b>	<b>Diâmetro do eletrodo (mm)</b>	<b>Faixa de Corrente (A)</b>
<b>Aço carbono e de baixa liga</b>	0,8	70-180
	1,0	90-220
	1,2	100-270
	1,6	190-360
	2,4	280-490
	3,2	270-580
<b>Aço inoxidável austenítico</b>	0,8	60-180
	1,0	80-200
	1,2	90-260
	1,6	170-320
	2,4	250-450
<b>Alumínio</b>	0,8	70-150
	1,2	80-200
	1,6	120-300
	2,4	180-350
<b>Cobre</b>	0,8	70-170
	1,2	90-250
	1,6	10-400

Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense, 2011

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2011) no processo MIG/MAG a corrente influencia diretamente na penetração, largura e reforço na poça de fusão, influencia também na taxa de deposição, energia de soldagem e no modo de transferência de metal. A tensão de soldagem influi no comprimento do cordão, modo de transferência de metal e formato do cordão. Tensões elevadas tendem a formar respingos, enquanto tensões baixas tendem a formar porosidade.

#### 2.2.4 Soldagem com arame tubular

“A soldagem a arco com eletrodo tubular (Flux Cored Arc Welding-FCAW) é um processo de coalescência dos metais onde o eletrodo tubular apresenta internamente um fluxo de gás que desempenha funções similares ao revestimento do eletrodo em SMAW” (MARQUES E MODENESI, 2000, p.22).

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2011), o processo de soldagem com arame tubular, reúne as melhores características do processo de soldagem com eletrodo revestido, como alta taxa de deposição, alto rendimento o que resulta em grande produtividade, e do processo MIG/MAG como ajuste de composição química do metal de solda e facilidade de operação em campo.

Segundo Machado (2007) o processo com arame tubular reúne duas importantes características, uma o fato de o consumível ser alimentado continuamente e a outra é de conter fluxo em seu interior. Dessa forma, as benéficas reações pirometalúrgicas das quais participam o fluxo são executadas em todas as posições, além de reduzir em muito o perigo de contaminação do mesmo pela umidade e dejetos do ambiente.

O processo de soldagem com arames tubulares, em linhas gerais é muito semelhante com o processo de soldagem MIG/MAG, a transferência metálica, a fonte de gás de proteção (quando usada), a técnica operatória e a fonte de energia seguem os mesmos princípios.

Os consumíveis usados na soldagem FCAW são os arames tubulares, classificados segundo o AWS.

Figura 6: Classificação arames tubulares para soldagem

O sistema de classificação AWS para arames com fluxo interno tem o seguinte formato:

O "M" (opcional) indica mistura de proteção contendo entre 75 e 80% Ar e restante de CO<sub>2</sub>. Se não usado, a proteção é de CO<sub>2</sub> puro.

Refere-se à usabilidade e desempenho do eletrodo. Ver tabela II.

Indica arame tubular com fluxo interno

Indica a posição de soldagem. "0" para plana ou horizontal e "1" para todas as posições

Indica o limite de resistência mínimo do metal depositado em ksi (2 ou 3 dígitos). Pode ser 6 ou 7

Eletrodo para soldagem a arco (E)

**AWS E XXT - XMJ HZ**

Indica requisitos de tenacidade. Ver especificação AWS

Indica teor de hidrogênio difusível em ml/100g de metal depositado. Pode ser 4, 8 ou 16.

Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense, 2011

“FCAW-G (soldagem a arco com arame tubular -auto-potegida). Um processo de soldagem a arco com arame tubular em que a proteção é exclusivamente fornecida por um fluxo contido no eletrodo tubular” (AWS D1.1 STRUCTURAL WELDING CODE-STEEL,2004, p. 315).

“FCAW-G (soldagem a arco com arame tubular - com gás de proteção). Uma variação de processo de soldagem a arco com arame tubular na qual proteção adicional é obtida de um gás ou mistura de gás fornecido externamente” (AWS D1.1 STRUCTURAL WELDING CODE-STEEL,2004, p. 315).

#### 2.2.5 Segurança na soldagem

Os principais riscos na operação de soldagem estão relacionados com choque elétrico, radiação emitida pelo arco elétrico, gases e fumos metálicos emitidos pela solda, incêndios ou explosões, salpicos de solda.

A intensidade do choque elétrico é medido pela intensidade da corrente que passa pelo corpo humano, sendo que uma corrente acima de 80 mA passando pelo parte torácica pode levar ao óbito da vítima, levando em consideração que o processo de soldagem geralmente é realizado em ordem de  $10^1$  e  $10^2$  A, um choque desta intensidade teria efeitos fatais no ser humano. Deve-se considerar também que uma peça metálica submetida a corrente elétrica, tende a elevar sua temperatura, e o contato com tal peça além de apresentar o risco de choque elétrico, pode também causar lesões de peles e queimaduras graves.

Os cuidados a serem adotados referente ao risco de choque elétrico, está diretamente voltado a correta utilização dos cabos, alicates de solda isolantes, máquina de soldagem com carcaça isolada e aterrada, para o risco de queimaduras é exigido roupas em couro, tais como avental magotes e luvas são as mais comuns.

“O arco elétrico é formado em gases ionizados a uma temperatura muito elevada e capaz de gerar radiação eletromagnética intensa na forma infravermelho luz visível e ultravioleta” (MARQUES, MODENESI E BRACARENSE, 2011, p. 47). Os olhos são a parte mais atingida pela radiação, e o melhor meio de proteção são óculos com proteção adequada.

As operações de soldagem, por trabalharem a temperaturas acima da temperatura de fusão, geram gases e fumos que podem prejudicar a saúde do operador por vários motivos, o mais comum é que operações de soldagem com argônio e  $\text{CO}_2$  liberam gases mais densos que o ar, e isto pode deslocar o ar e causar asfixia ao soldador, mas também requer uma atenção para a aspiração de gases tóxicos, que podem causar problemas pulmonares aos soldadores e operador de soldagem. A proteção contra tal risco é feita com uso adequado de máscaras, e ventiladores e aspiradores de gases na local da soldagem.

Outro problema grave o qual deve se atentar é o risco de explosões e incêndios, para que um incêndio se inicie é preciso uma fonte de calor um combustível e oxigênio. Oxigênio além de existente no ar ele pode estar presente em cilindros para operações de soldagem específicas, a fonte de calor é caracterizada pelo arco elétrico o qual emite grande energia térmica, mas também os respingos de solda possuem um temperatura elevada podem do ser o agente causador, por isso é preciso ter cuidado com materiais perto das operações de soldagem.

## 2.3 Metalografia

As análises de metalografia são estudos referentes a estrutura dos materiais, em aspectos externos ou internos.

O processo de soldagem em sua grande maioria, envolve uma grande quantidade de energia térmica, calor, com isso alterações na estrutura, metalúrgicas e nas propriedades mecânicas podem ocorrer, alterações estas que nem sempre são desejadas, e que se não levadas em consideração podem comprometer o procedimento. As mudanças mais relevantes ocorrem normalmente durante o processo de solidificação e resfriamento segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2011).

“A ação do calor, mais ou menos intensa, dependendo de particularidades do processo, é a principal responsável pela ocorrência de fenômenos físico-químicos como fusão, vaporização e solidificação, e das transformações metalúrgicas no estado líquido e sólido” (FILHO, 2008, p. 2).

### 2.3.1 Aço ASTM A-36

Segundo Allgayer o aço ASTM A-36, é um aço baixo carbono de média resistência mecânica e com boa soldabilidade. Os aços com percentuais de até 0,15% de carbono possuem excelente soldabilidade por serem pouco temperáveis. Aços com percentuais entre 0,15% e 0,30% de carbono possuem boa soldabilidade, entretanto, existe a possibilidade de endurecimento.

Tabela 5: Composição química aço ASTM A-36

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)					
C máximo	Mn	P máximo	S máximo	Si máximo	Cu máximo
0,28	0,60 – 0,90	0,04	0,05	0,4	0,2

Fonte: Allgayer, 2017

Tabela 6 : Propriedades mecânicas aço ASTM A -36

<b>PROPRIEDADES MECÂNICAS</b>	
<b>Limite de Escoamento (LE)</b>	250 MPa
<b>Limite de Ruptura</b>	400-550 Mpa
<b>Alongamento</b>	23%

Fonte: Allgayer, 2017

### 2.3.2 Propriedades Mecânicas dos metais e ensaios

Para que possamos compreender as alterações que podem ocorrer vamos revisar algumas propriedades mecânicas dos metais.

“As propriedades mecânicas dos materiais são verificadas pela execução de experimentos de laboratório cuidadosamente programados, que reproduzem o mais fielmente possível as condições de serviço” (CALLISTER, 1999, p. 78).

#### 2.3.2.1 Deformação elástica

Para Callister (1999), na deformação elástica a deformação sofrida pelo material é proporcional a tensão aplicada e não permanente. Para Shackelford (2010), a deformação elástica é uma deformação temporária, ela é recuperável quando a carga é removida, no gráfico tensão x deformação, a deformação elástica corresponde a parte linear do gráfico, esta inclinação pode ser interpretada como a representação gráfica da Lei de Hooke.

$$\sigma = E \cdot e$$

- E - Constante chamada módulo de elasticidade ou módulo de *Young*,
- $\sigma$  - Tensão de deformação,
- e - Deformação sofrida pelo material.

A anelasticidade é uma característica semelhante a deformação elástica, porém, ela depende do tempo, ou seja, após o término do esforço de tração ela não retorna **instantaneamente** ao seu tamanho original.

No esforço de compressão, também há relevância a elasticidade do material, sendo que a deformação de cisalhamento é proporcional a tensão, e expressa na seguinte fórmula:

$$\tau = G \cdot \gamma$$

Onde:

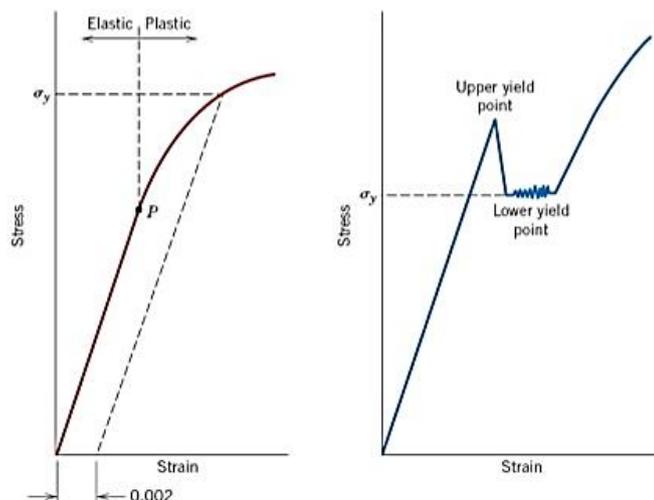
- $G$  = Módulo de cisalhamento
- $\tau$  = Tensão
- $\gamma$  = Deformação de cisalhamento

### 2.3.2.2 Deformação plástica

Para Shackelford (2010) na deformação plástica, a deformação deixa de ser proporcional a tensão, ocorre então uma deformação permanente e não recuperável quando a carga é removida. Para Callister (1999) esta deformação é caracterizada pela quebra de ligações entre átomos vizinhos e formação de novas ligações.

É de suma importância para projetos, saber a qual tensão a deformação plástica começa a acontecer, este ponto no gráfico tensão-deformação é chamado escoamento, caracterizado como a transição entre a deformação elástica para deformação plástica.

Figura 7: Deformação elástica X Deformação plástica



Fonte: Callister, 1999

### 2.3.2.3 Ensaio de tração e compressão

Segundo Callister (1999), o ensaio de tração pode trazer informações a respeito de várias propriedades mecânicas dos materiais. Para este teste aplica-se uma carga de tração gradativamente crescente em um corpo de prova devidamente padronizado, até sua fratura.

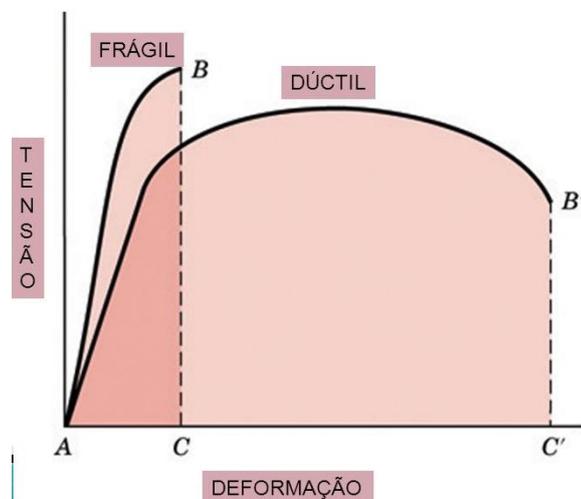
“A máquina de ensaios de tração é projetada para alongar o corpo de prova a uma taxa constante, a carga necessária para produzir um determinado alongamento é monitorada enquanto o corpo-de-prova é tracionado a uma velocidade constante” (SHACKELFORD, 2010, p. 122).

“Um ensaio de compressão é conduzido de uma maneira semelhante à de um ensaio de tração, exceto pelo fato de que a força é compressiva e o corpo de prova se contrai ao longo da direção da tensão” (CALLISTER, 1999, p. 81).

### 2.3.2.4 Ductilidade

Segundo Callister (1999), a ductilidade representa a medida de deformação plástica que um material suporta até sua fratura. Quando o material suporta pouca ou nenhuma deformação plástica até sua fratura ele é considerado um material frágil.

Figura 8: Tensão x Deformação, material dúctil x material frágil



Fonte: Callister, 1999

Segundo Davim e Magalhães (2010) o volume do corpo de prova permanece aproximadamente constante durante a deformação plástica, como a um alongamento, há uma redução na secção do corpo de prova. Quando se atinge a força máxima (ou limite de resistência a tração LRT) a redução da secção é mais rápida que a resistência a tração por deformação, e a deformação torna-se localizada dando origem a uma estrição.

#### 2.3.2.5 Resiliência

Segundo Souza (1982) a resiliência é uma propriedade relacionada a capacidade de um material de absorver, energia mecânica aplicada durante a deformação elástica, e readquiri sua forma original após o descarregamento da energia. Sua medida é feita pelo módulo de resiliência, que é a energia de deformação por unidade de volume necessária para o material atingir o limite de proporcionalidade.

“Os materiais resilientes são aqueles que possuem limites de escoamento elevados e módulos de elasticidade pequenos; tais ligas encontram aplicações como mola” (CALLISTER, 1999, p. 91).

#### 2.3.2.6 Tenacidade

Tenacidade é a medida da energia mecânica de impacto por unidade de volume até a fratura de um material.

Para (SOUZA, 1982, p. 42) “a tenacidade de um material é a sua capacidade de absorver energia na zona plástica”. Segundo Darvim e Magalhães (2010) os ensaios de choque além de medir a capacidade de absorção de energia de deformação plástica, constituem um método de comparação entre os materiais, os ensaios de tenacidade mais habituais são os métodos de Charpy e Izod.

Para que um material seja tenaz, ele deve apresentar tanto resistência como ductilidade, materiais dúcteis são geralmente mais tenazes do que materiais frágeis, o material frágil tem maior limite de escoamento e maior limite de resistência à tração, segundo Callister 1999.

### 2.3.2.7 Dureza

Segundo Shackelford (2010), a dureza pode ser definida como a resistência de um material a penetração (deformação plástica localizada).

Segundo Callister 1999, os primeiros ensaios de dureza classificavam os materiais segundo a capacidade que um material tinha de riscar outro mais macio, segundo esta classificação foi criada a escala Mohs, atribuindo 1 para o material mais macio o talco e 10 para o mais duro o diamante.

Hoje, porém existem outras técnicas para medir a dureza de um material. Entre eles o ensaio de dureza Rockwell, que segundo Souza 1982, as escalas Rockwell cobre toda a gama de dureza dos metais. Segundo Callister (1999) consiste em aplicar uma carga menor de 10 kg seguida de uma carga principal em um penetrador e medir a diferença de profundidade da penetração no material, os penetradores são esferas em aço endurecido, e um penetrador cônico em diamante para materiais mais duros, essas esferas podem ser de vários diâmetros (1/16, 1/8, 1/4 e 1/2 polegada), e as cargas principais aplicadas são de 60, 100 e 150 kg.

Também é possível realizar este ensaio em corpos de provas finos e delgados com o ensaio de dureza de Rockwell superficial onde a carga menor é de 3 kg e as cargas principais são de 15, 30 e 45 kg.

Souza (1982) indica que a praticidade deste ensaio se dá ao fato de uma máquina ter sido desenvolvida para esta finalidade, ela converte automaticamente os valores de profundidade em valores de dureza, obedecendo a representação da tabela a seguir:

Tabela 7: Escala de dureza Rockwell segundo a norma NP141:1990

Escala de dureza	Símbolo de dureza	Tipo de penetrador	Força inicial FO(N)	Força adicional F1(N)	Força total F(N)	Campo de aplicação	Materiais
<b>A</b>	HRA	Cone de diamante	98,07	490,3	588	20 a 88 HRA	Aços niturados carbonetos metálicos
<b>B</b>	HRB	Esfera de aço 1,5875 mm	98,07	882,6	981	20 a 100 HRB	Aços ao carbono recozido c/ baixo teor de carbono
<b>C</b>	HRC	Cone de diamante	98,07	1373	1471	20 a 70 HRC	Aços duros
<b>D</b>	HRD	Cone de diamante	98,07	882,6	981	40 a 70 HRD	Aços cementados

<b>E</b>	HRE	Esfera de aço 3,175 mm	98,07	882,6	981	70 a 100 HRE	Metais macios, como antifricção e peças fundidas
<b>F</b>	HRF	Esfera de aço 1,5875 mm	98,07	490,3	588	60 a 100 HRF	Bronze recozido
<b>G</b>	HRG	Esfera de aço 1,5875 mm	98,07	1373	1471	30 a 94 HRG	Bronze fosforoso e outros metais
<b>H</b>	HRH	Esfera de aço 3,175 mm	98,07	490,3	588	80 a 100 HRH	Metais macios com homogeneidade e ferro fundido
<b>K</b>	HRK	Esfera de aço 3,175 mm	98,07	1373	1471	40 a 100 HRK	Metais duros com homogeneidade e ferro fundido

Fonte: Darvim e Magalhães, 2010

Tabela 8: Escala de dureza superficial Rockwell segundo a norma NP 4073:1990

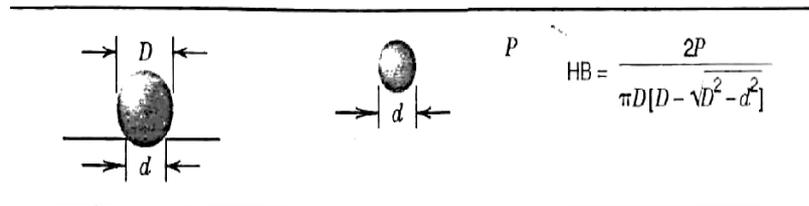
<b>Escala de dureza</b>	<b>Símbolo de dureza</b>	<b>Tipo de penetrador</b>	<b>Força inicial FO(N)</b>	<b>Força adicional F1(N)</b>	<b>Força total F(N)</b>	<b>Campo de aplicação</b>	<b>Materiais</b>
<b>15N</b>	HR15N	Cone de diamante	29,4	117,7	147,1	70 a 94 HR15N	Aços nitrurados cementados e metal duro
<b>30N</b>	HR30N	Cone de diamante	29,4	264,8	294,2	42 a 86 HR30N	Idem
<b>45N</b>	HR45N	Cone de diamante	29,4	411,9	441,3	20 a 77 HR45N	Idem
<b>15T</b>	HR15T	Esfera de aço 1,5875 mm	29,4	117,7	147,1	6 a 9 HR15T	Bronze, latão, aço macio
<b>30T</b>	HR30T	Esfera de aço 1,5875 mm	29,4	264,8	294,2	29 a 82 HR30T	Idem
<b>45T</b>	HR45T	Esfera de aço 1,5875 mm	29,4	411,9	441,3	1 a 72 HR45T	Idem

Fonte: Darvim e Magalhães, 2010

O ensaio de dureza Brinell segue o mesmo princípio de do ensaio Rockwell, porém o penetrador esférico de aço endurecido (ou carbeto de tungstênio) com diâmetro de 10mm é forçado sobre a superfície do material com cargas de 500 kg a 3000 kg com incrementos de 500

kg por um período de 10s a 30s, esta dureza é especificada pelo símbolo HB, e obtida pela fórmula:

Figura 9: Ensaio de dureza Brinell



Fonte: Callister (1999)

### 2.3.3 Ciclo térmico

A junta soldada pode ser considerada toda região que de alguma maneira foi afetada pelo processo de soldagem, isto inclui o metal de base- região da peça mais afastada, que não sofre alterações devido ao ciclo térmico, zona termicamente afetada ZTA- região onde a energia térmica não foi suficiente para alterar seu estado físico porém sofreu alterações metalúrgicas importantes em suas propriedades iniciais, as temperaturas de pico são superiores a temperatura crítica , e zona fundida- onde a energia térmica é suficiente para mudar o estado físico do metal de base fundindo os metais de adição com metal de base na poça de fusão, as temperaturas de pico são superiores a temperatura de fusão, segundo Castro (2011).

A energia de soldagem, é definida pela quantidade de energia térmica envolvida no processo, comumente utilizado o termo “heat Input” - calor de entrada. A energia térmica é sem dúvidas umas principais variáveis de soldagem a ser controlada, para que se possa reduzir a ocorrência de defeitos, segundo Filho(2008).

$$Apt = P/v$$

Onde:

$P$  – É a potência da fonte de soldagem, dada em Watt (W)

$V$  = É a velocidade de soldagem, dada em metros por segundos (m/s)

$Apt$ . = É o aporte térmico, dado em joule por metro (J/m)

Para soldagem com arco elétrico, o aporte térmico pode ser calculado com a fórmula:

$$Apt' = \eta \times \left( \frac{V \times I}{v} \right)$$

Onde:

$V$  – É a tensão de soldagem em Volts (V);

$I$  – É a intensidade de corrente em Amperes (A);

$v$  – É a velocidade de soldagem em m/min;

$\eta$  – É o fator de correção da eficiência energética de cada processo.

$A_{pt}$  – É o aporte térmico líquido

Tabela 9: Rendimento térmico de alguns processos de soldagem

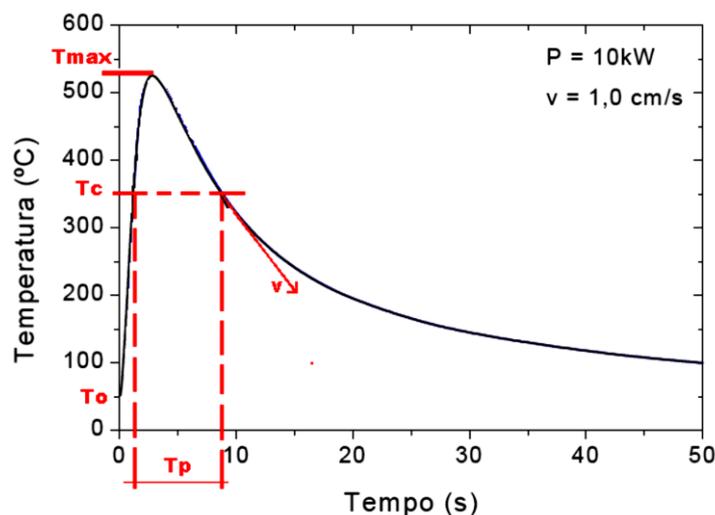
Processo	Rendimento Térmico ( $\eta$ )
Arco Submerso (SAW)	0,85 - 0,98
MIG/MAG (GMAW)	0,75 - 0,95
Eletrodo Revestido (SMAWA)	0,70 - 0,90
TIG (CC-) (GTAW)	0,50 – 0,80
TIG (CC+) (GTAW)	0,20 – 0,50
Laser (LBW)	0,005- 0,70

Fonte: Modenesi, 2003

“Define-se ciclo térmico como a curva que relaciona a variação da temperatura deste ponto (durante a soldagem e posterior resfriamento) com passar do tempo” (CARLOS ABREU FILHO, 2008, p. 7).

“Considerando o ciclo térmico de cada ponto próximo à junta, pode-se dizer que a temperatura do pico ( $T_p$ ) de cada ponto varia com a sua distância ao centro do cordão de solda” (CASTRO, 2011, p. 13)

Figura 10: Variação de temperatura X tempo



Fonte: Filho, 2008

Como pode-se perceber a elevação de temperatura até a temperatura máxima ( $T_{max}$ ), levam em torno de 4s, esta severidade é um dos principais fatores da ocorrência de defeitos na junta soldada.

O pré-aquecimento da peça na soldagem é justificada pelo fato de a velocidade de resfriamento variar inversamente com a temperatura inicial da peça, ou seja quanto maior a temperatura da peça menor a velocidade de resfriamento, porém quanto maior a temperatura inicial, maior será a temperatura máxima do ciclo térmico como citado por Filho (2008)

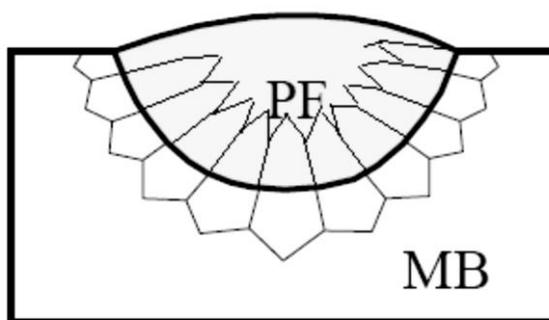
Normalmente o tempo de permanência da poça de fusão no estado líquido é de apenas alguns segundos, porém este tempo é o suficiente para a ocorrência de reações físicas, químicas e metalúrgicas, que tem influência direta na qualidade da junta soldada.

Segundo Filho, 2008 quando os metais passam de estado sólido para estado líquido, eles passam a ter uma alta solubilidade gasosa, e este aumento brusco na solubilidade é o responsável pela absorção de gases provenientes do ar atmosférico na poça de fusão, os principais gases absorvidos pelos metais são o hidrogênio, nitrogênio e oxigênio, estes gases podem se dissolver na soldagem e afetar significativamente a qualidade no metal de solda.

Segundo Filho, 2008 a solidificação da poça de fusão é um importante ponto de estudo pois a característica predominante da estrutura solidificada vai influenciar diretamente em importantes fatores definidores da qualidade da junta.

Em relação aos grãos da microestrutura da junta soldada, pode se observar o crescimento epitaxial e o crescimento competitivo. O crescimento epitaxial ocorre quando o processo de soldagem possui elevados gradientes de temperaturas e contato direto entre o metal líquido e metal sólido, neste mecanismo os grão da zona fundida apresentam um crescimento direto do sólido sem a nucleação de novos grãos, relatado por Filho, 2008.

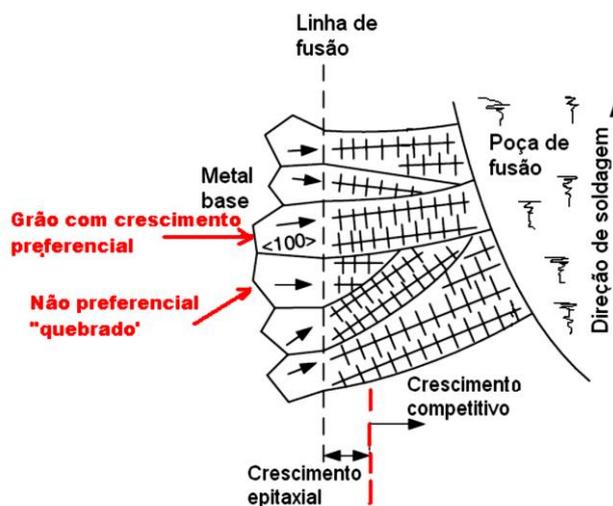
Figura 11: Crescimento epitaxial dos grãos na zona fundida



Fonte: Filho, 2008

O crescimento competitivo de grãos ocorre durante a solidificação, os grãos com direção de crescimento preferencial na mesma direção do gradiente máximo de temperatura crescem e barram o crescimento de outros grãos, segundo Castro (2013)

Figura 12: Crescimento competitivo os grãos



Fonte: Filho, 2008

O ciclo térmico também tem influência diretamente na ZTA, sendo que esta pode ser dividida em três regiões principais que sofrem alterações ligadas a influência térmica do processo de soldagem:

**Região de crescimento de grão** – “Compreende a região do metal de base, mais próxima da solda, que foi submetida a temperaturas próximas da temperatura de fusão. Esta região é a mais problemática da ZTA, podendo ter menor tenacidade e até apresentar problemas de fissuração” (FILHO, 2008, p. 21).

**Região de refino de grão** – “Compreende a porção de junta aquecida a temperaturas de 900 a 1000 °C, esta região é caracterizada, geralmente, por uma estrutura fina de ferrita não sendo problemática na maioria dos casos” (FILHO, 2008, p. 21).

**Região intercrítica.** – “É a região mais afastada do cordão de solda. Nesta região, a temperatura oscila em torno de 727 °C, é caracterizada pela transformação parcial micro estrutural do metal de base, cada vez mais imperceptíveis” (FILHO, 2008, p. 22)

#### 2.3.4 Diagrama de fases

O entendimento do diagrama de fases é de suma importância no controle de qualidade utilizado em tratamentos térmicos, ele fornece informações sobre fusão, fundição, cristalização,

resfriamento entre outros. Como já vimos a ciclo térmico pode alterar a microestrutura do material e conseqüentemente alterar suas propriedades.

Diagramas de fases representam a mudança estrutural que um componente ou liga sofre em determinadas temperaturas e determinadas concentrações de soluto.

A maioria dos diagramas de fase representa microestruturas estáveis ou em equilíbrio, com a concentração de soluto ideal para a temperatura estudada, porém em muitos casos as propriedades de estruturas não estáveis são mais desejadas que estruturas estáveis, como por exemplo o endurecimento por precipitação, como citado por Callister (1999).

O equilíbrio de fases é um termo muito utilizado, e está relacionado com a concentração de soluto que o solvente admite em determinada temperatura, ao se elevar a temperatura de um sistema o limite de solubilidade aumentará, e até que a concentração de soluto atinja o valor admissível haverá um desequilíbrio.

Segundo Colpaert (2008), as ligas a base de ferro são divididos em duas famílias principais, os aços (até 2,14% de concentração de carbono) e os ferros fundidos (< 2,14% e >6,7 % de concentração carbono), uma das principais características de diferenciação entre eles, é associada ao fato da capacidade do aço se deformar plasticamente.

“Solução sólida consiste em pelo menos dois tipos diferentes de átomos, os átomos de soluto ocupam posições substitutivas ou intersticiais no retículo cristalino do solvente, e a estrutura cristalina do solvente é mantida” (CALLISTER, 1999, p. 170).

Segundo Colpaert (2008), a maioria dos metais apresentam uma única estrutura cristalina em pressão ambiente, porém o ferro é capaz de mudar a sua estrutura cristalina dependendo da temperatura, assim diferentes fases do ferro, são estáveis em diferentes faixas de temperaturas, controlar as transformações entre essas estruturas é uma ferramenta útil no controle da estrutura dos aços.

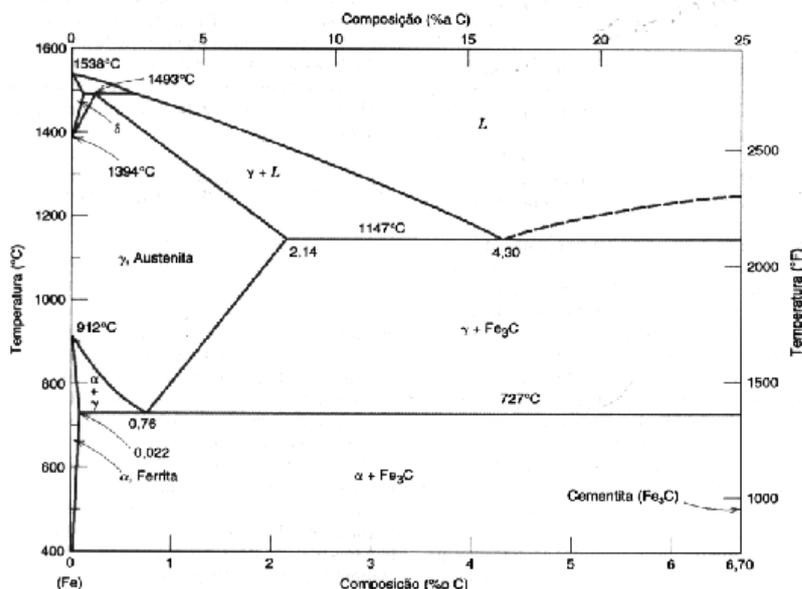
Segundo Callister (1999) o limite de solubilidade é definido como a concentração máxima de átomos de soluto que o solvente é capaz de dissolver em uma solução sólida a determinada temperatura. Quando se acrescenta mais soluto a esta solução, ocorrerá a formação de outra solução sólida ou de outro composto com composição diferente.

“A microestrutura de uma liga depende de variáveis tais como os elementos de liga presentes, suas concentrações e o tratamento térmico da liga (isto é, a temperatura, o tempo de aquecimento à temperatura do tratamento e a taxa de resfriamento até a temperatura ambiente)” (CALLISTER, 1999, p. 171).

Um diagrama de fases contém três informações relevantes no entendimento de uma liga, a fase em qual se encontra em determinada temperatura, a concentração de elementos em

determinada fase, e a porcentagem de cada fase no sistema em determinada temperatura e concentração.

Figura 13: Diagrama de fases Ferro–Carbeto de Ferro(Fe-Fe<sub>3</sub>C)



Fonte Callister, 1999

Como já mencionado o ferro apresenta estrutura cristalina diferente em determinadas temperaturas, segundo Callister (1999) para a temperatura ambiente ele apresenta estrutura cristalina CCC conhecida como ferrita ou ferro  $\alpha$ , a 912°C ela sofre uma transformação e passa a ter uma estrutura cristalina CFC, conhecida como austenita ou ferro  $\gamma$ , a temperatura de 1394°C ela reverte novamente para uma estrutura cristalina CCC conhecida como ferrita  $\delta$  e aos 1538°C funde.

O carbono é uma impureza intersticial, que forma uma solução sólida com o ferro e altera algumas propriedades mecânicas. Como já visto anteriormente a temperatura pode aumentar o limite de solubilidade, para o ferro  $\alpha$ -ferrita, na temperatura de 727° a solubilidade máxima de carbono é de apenas 0,022%, é considerado um aço macio e magnético. Para o ferro  $\gamma$ -austenita, a solubilidade máxima é atingida à 1147°C aceitando 2,14% de carbono, é se transformando em um aço não magnético. O ferro  $\delta$  apresenta as mesmas propriedades da ferrita  $\alpha$  apenas se diferenciando pela temperatura(<1394°C), como citado Callister (1999).

O Diagrama Ferro -Carbeto de Ferro, é representado até a composição de 6,7%C, é considerado que todos as aços e ferros fundidos apresentam teores de carbono até esta margem, a partir desta concentração forma-se grafite, segundo Callister (1999).

Segundo Colpaert (2008), campos abaixo da temperatura eutetóide 723°C, forma-se duas fases perlita e cementita, devido a diferença de composição química entre as fases o

carbono terá que se movimentar consideravelmente, isto é feito através do crescimento cooperativo de ferrita e cementita, que se dá na forma de placas paralelas das duas fases figura 14, a nucleação inicial de cementita remove carbono da austenita favorecendo a nucleação da ferrita. A nucleação de outras placas, chamadas lamelas, de mesma orientação cristalográfica prosseguirá, dando origem a uma colônia de perlita (um conjunto de lamelas de ferrita e cementita de mesma orientação cristalográfica).

Segundo Colpaert (2008), a perlita é uma das melhores soluções, apresenta uma matriz dúctil (a ferrita) e um reforço alinhado de alta dureza (a cementita). Embora não tenha alta tenacidade a fratura, ela tem alta dureza, alta resistência mecânica, resistência ao desgaste, e resistência a fadiga, e sua tenacidade a fratura é razoável.

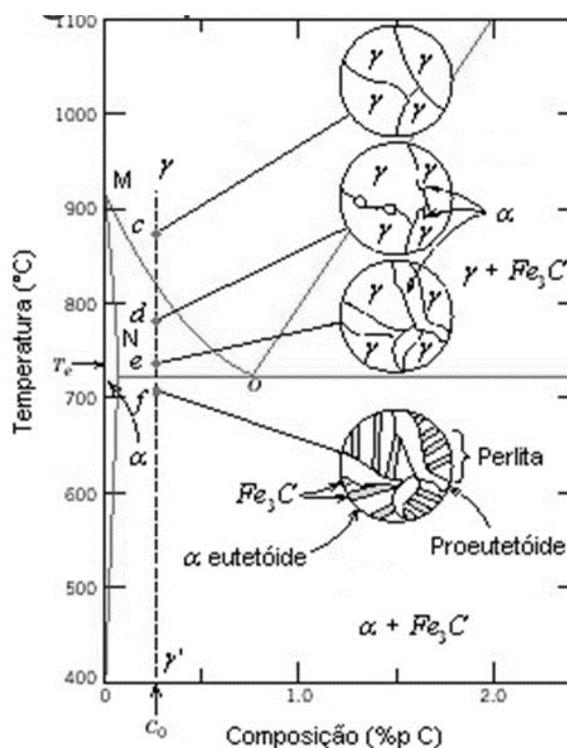
No entanto, durante o resfriamento estruturas intermediárias a perlita e a austenita podem se formar. A martensita, a bainita e a esferoidização de perlita podem ser consideradas como exemplos.

A martensita é uma estrutura formada através de uma transformação “militar”, isto é, segundo Colpaert (2008) conforme a austenita é resfriada a movimentação dos átomos fica cada vez mais restrita, e a reorganização por difusão fica dificultada, nestes casos há uma movimentação coordenada dos átomos, chamadas transformação militar, nos aços esta transformação resulta na martensita. A martensita tem a mesma composição química da austenita. Depende da temperatura que atingiu e não do tempo em que permaneceu nesta temperatura, a martensita forma-se rapidamente, chegando a velocidade próximas a velocidade do som no material. Segundo Callister (1999), é formada quando ligas ferro-carbono são resfriadas rapidamente.

Segundo Callister (1999), a bainita consiste em fases de ferrita e cementita, entretanto seu arranjo é diferente da estrutura lamelar da perlita, ela é dividida entre bainita superior e inferior.

Para Colpaert (2008) a bainita superior é formada de pacotes de cristais de ferrita que cresceram através da austenita de forma paralelas entre si. Callister (1999) a classifica como ripas paralelas de ferrita separadas por cementita alongada. Já a bainita inferior é classificada como placas finas de ferrita e no interior destas placas se formam partículas estreitas de cementita, segundo Callister (1999). Para Colpaert (2008), a bainita inferior apresenta uma microestrutura análoga a da martensita em placas, isto faz com que seja comumente caracterizada como acicular. A diferenciação da bainita e martensita é difícil devido a semelhança na microestrutura.

Figura 14: Comportamento microestrutural de liga hipoeutectóide no resfriamento



Fonte: Callister, 1999

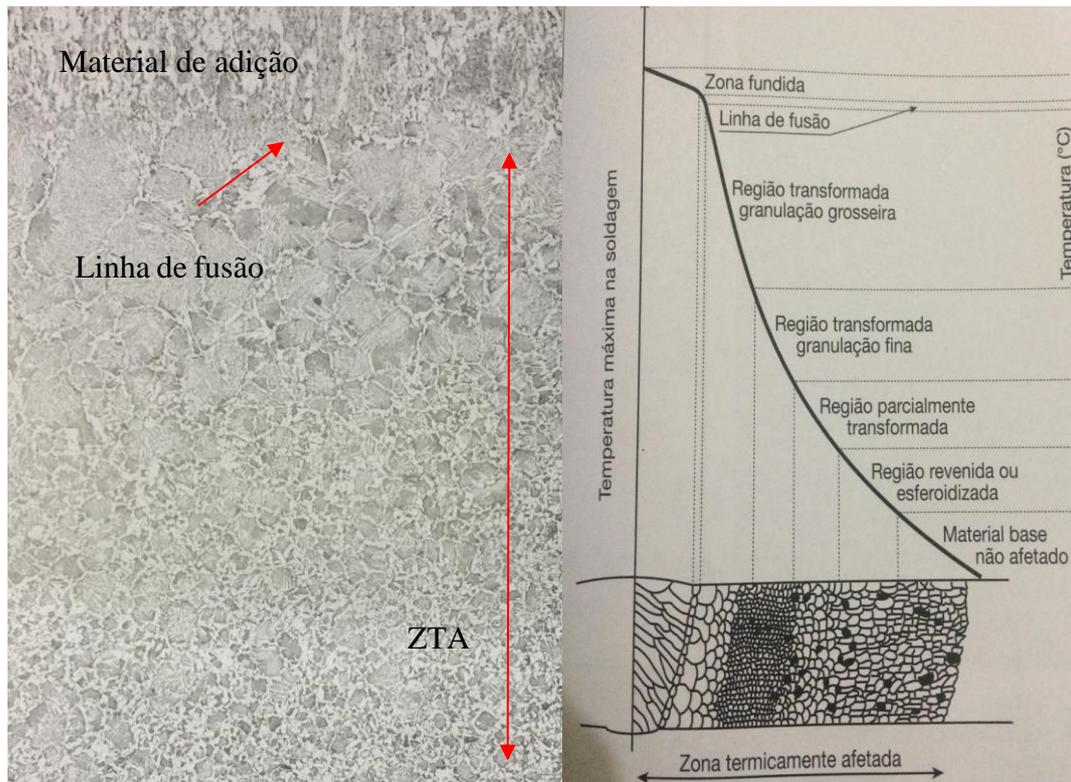
“A esferoidização é um processo de ajuste morfológico que se dá sob a ação da energia superficial, onde ocorre uma evolução microestrutural da perlita pelo mecanismo de coalescimento, com conseqüente formação de carbonetos globulares em uma matriz ferrítica” (FAGUNDES, 2006, p. 21).

“Quando uma estrutura perlítica lamelar é substituída por uma estrutura ferrítica com esferóides de carbonetos, essa nova estrutura irá conferir aos aços médio e alto carbono boa ductilidade, aliada a uma alta usinabilidade” (FAGUNDES, 2006, p. 13).

Quando uma fonte de calor se desloca ao longo de um material, gera variações de temperatura com o tempo em cada ponto da peça, as primeiras soluções matemáticas para este problema foram relatadas por Rosenthal, segundo Colpaert (2008).

A figura 15, mostra a estrutura de uma junta soldada e as diversas microestruturas formadas. Para se aumentar a tenacidade na ZTA Colpaert (2018) cita dois métodos principais, 1º controle do crescimento de grãos, 2º nucleação de ferrita intragranular no interior de grãos austenítico. (Aihara apud in Colpaert 2008), afirma que temperaturas mais altas e tempos mais curto do que o patamar intermediário, resultam em maior fração de ferrita intragranular.

Figura 15: Micrografia aço estrutural soldado X Distribuição da energia térmica na soldagem



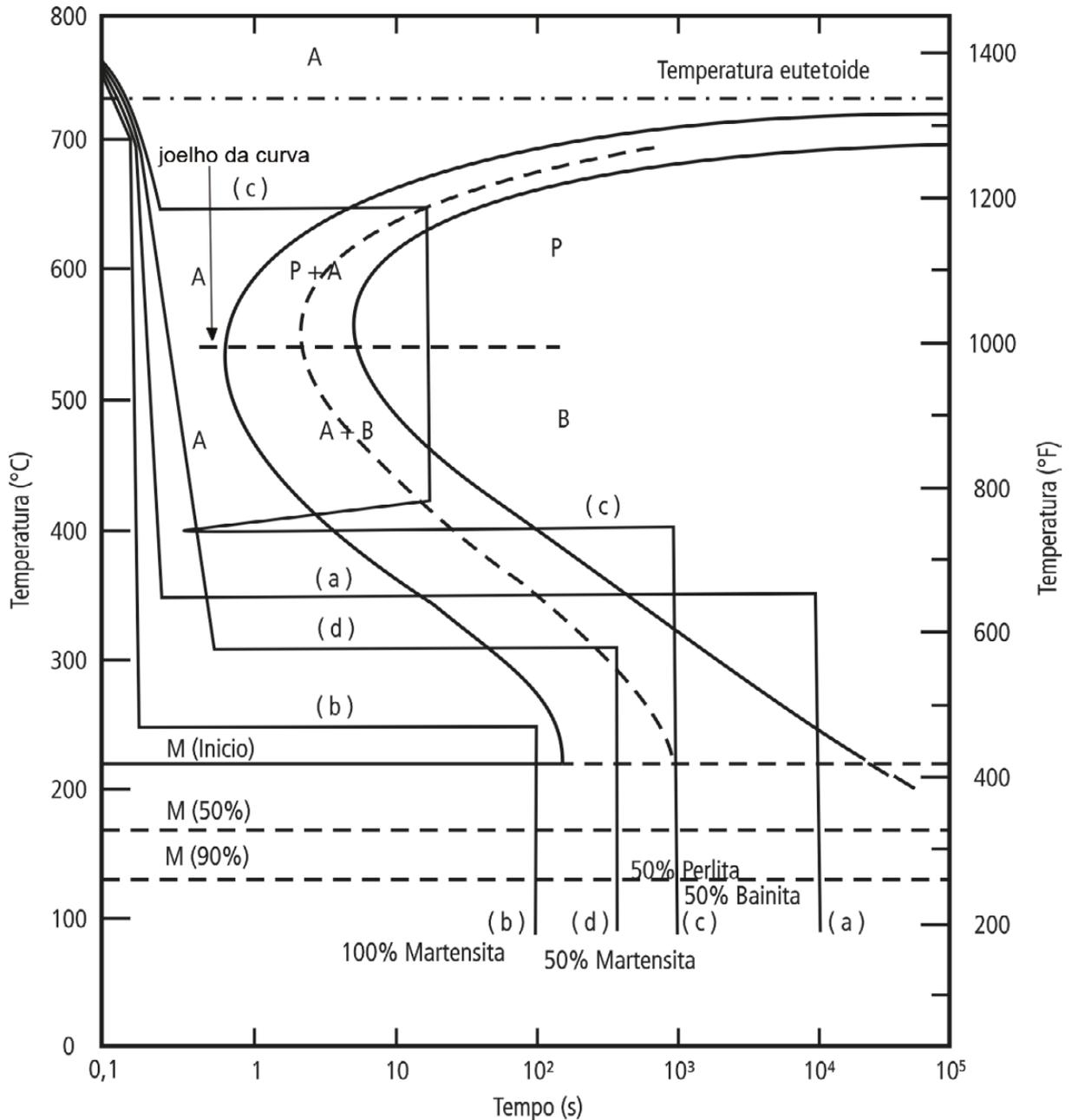
Fonte: Colpaert, 2008

### 2.3.5 Diagrama TTT

Segundo Vale (2011), quando se necessita de informações adicionais a respeito das transformações com velocidades de resfriamento rápidas, utiliza-se o diagrama, denominado **Diagrama Isotérmico ou Diagrama TTT (Tempo – Temperatura – Transformação)**.

Nesse gráfico, podem-se notar as mudanças de fase, onde haverá transformação parcial ou total do aço, em função do período de tempo no qual ele foi resfriado ou mantido a uma dada temperatura.

Figura 16 :Curvas de resfriamento (tratamentos isotérmicos) para um aço carbono eutetóide.



Fonte: Valle, 2011

Valle (2011) explica as curvas de resfriamento do diagrama TTT do aço eutetóide da seguinte maneira:

- Na curva “a” ocorre resfriamento rápido até 350°C, mantendo-se a temperatura constante, na sequência, por 10<sup>4</sup> segundos e, em seguida, realizando-se um resfriamento brusco até 25°C, o que ocasiona uma passagem da linha de resfriamento abaixo do “joelho” formado pelas curvas de transformação do aço, havendo 100% de transformação da perlita em austenita (reação austenítica completa).

- Na curva “b”, o aço é resfriado rapidamente até 250°C, onde ele permanece por 100 segundos a essa temperatura, seguindo-se com resfriamento brusco até 25°C. Para esta, o tempo necessário para a transformação completa é muito longo (horas), bem como o tempo necessário para iniciar a transformação da austenita. Dessa forma, com a continuidade do resfriamento rápido haverá formação da martensita, e o aço transformado será exclusivamente deste constituinte.
- Observando-se a curva “c” constata-se que o aço sofreu resfriamento rápido até 650°C, mantido por 20 segundos nessa temperatura, onde ocorre a transformação de cerca de 50% de austenita em perlita. Depois dessa etapa, o aço é resfriado bruscamente até 400°C e mantido por 10<sup>3</sup> segundos, passando pela linha de transformação de austenita em bainita abaixo do “joelho”, ocorrendo o complemento da formação bainítica com resfriamento rápido de até 25°C. A composição final desse aço será de 50% bainita e 50% perlita.
- Na curva “d” verifica-se resfriamento rápido do aço até cerca de 300°C. Depois ocorre a manutenção dessa temperatura por um tempo de 500 segundos com posterior resfriamento rápido de até 25°C. Nessa curva, o tempo de manutenção da temperatura permite transformar cerca de 50% da austenita em bainita em 300°C. Conclui-se que metade da microestrutura ainda se constitui de austenita não transformada. Resfriando-se o aço, essa austenita transformar-se-á em martensita quando a curva passar pela linha M<sub>s</sub>. Por fim haverá uma microestrutura do aço composta 50% martensita e 50% bainita.

### 2.3.6 Ensaio de qualidade

Segundo Rohde (2010) a controle de qualidade estrutural do material preocupa-se com o material que forma uma peça, sua composição, propriedades, estrutura a aplicação, o estudo metalográfico relaciona a estrutura íntima do material com as suas propriedades físicas, com o processo de fabricação, com o desempenho de suas funções.

### 2.3.6.1 Líquido penetrante

Segundo Durer et al (2010), o ensaio por líquido penetrante (LP) é utilizado para detectar descontinuidade superficiais, tais como: trincas, poros, dobras, etc., podendo ser aplicado em todos os materiais sólidos e que não tenham poros ou superfícies muito grosseira.

Existem cinco etapas para este método de ensaio: preparação da superfície, aplicação do líquido penetrante, remoção do excesso do líquido penetrante, aplicação do revelador, e inspeção.

A preparação da superfície consiste em retirar todo corpo estranho que possa interferir no ensaio, tais como água, óleo, graxas solventes entre outros. Segundo a Norma Petrobras N-1596 (2003), para os ensaios de superfícies soldadas recomenda-se o ensaio na superfície bruta, usando-se apenas escova manual para a limpeza prévia, evitando o uso de escovas rotativas.

Ainda segundo a Norma Petrobras N-1596 (2003), após a limpeza do corpo de prova, o líquido penetrante deve ser aplicado, esta aplicação deve cobrir toda a área a ser inspecionada, e ser mantida úmida durante todo o tempo de penetração, este tempo deve ser obedecido segundo a indicação do fabricante, porém deve estar na faixa de 10 minutos a 60 minutos, nas temperaturas entre 10°C e 52°C.

Para a retirada do excesso de líquido penetrante a Norma Petrobras N-2370 estabelece que o mesmo pode ser água ou produto químico (solvente), segundo a especificação do fabricante, que deve seguir a tabela a designação da tabela abaixo.

Quadro 1: Classificação dos produtos para realização de ensaio por meio de líquido penetrante.

Penetrante		Remoção do Excesso de Penetrante		Revelador	
Tipo	Designação	Método	Designação	Forma	Designação
I	Penetrante fluorescente	A	Água	a	Seco
II	Penetrante de contraste colorido	B	Emulsificante lipofílico	b	Solúvel em água
		C	Solvente	c	Em suspensão na água
		D	Emulsificante hidrofílico	d	Diluído em solvente

Fonte: Norma Petrobras N1596, 2003

Para a aplicação de revelador algumas especificações da Norma Petrobras N-1596 (2003) devem ser seguidas como: a não utilização de pinceis escovas ou similares para a aplicação, deve-se obter uma camada fina e uniforme de revelador sobre toda a área a ser ensaiada. Esta norma permite também que o tempo de secagem seja reduzido com o uso de sopro de ar quente desde que este não ultrapasse a temperatura máxima indicada no processo.

A inspeção deve ser realizada obedecendo os parâmetros de acuidade visual estabelecidos na Norma Petrobras N-1590 sendo o inspetor aprovado na tabela Jaeger J1e aprovado no teste de Ishihara para visão cromática normal (tabelas disponíveis nos anexos). Os resultados devem ser descritos e um relatório contendo dados básicos do ensaio.

### 2.3.6.2 Macrografia e Micrografia

Segundo Colpaert (2008) macrografia examina o aspecto de uma amostra com superfície plana após esta estar devidamente polida e atacada por um reagente adequado. Para Rohde (2008), examina-se com pouca ampliação, através dela tem-se uma ideia do conjunto, referente à homogeneidade do material, a distribuição e natureza das falhas, qualidade de solda, profundidade de tratamentos térmicos, entre outras características.

Rohde (2008) a micrografia consiste no estudo dos produtos metalúrgicos, com o auxílio do microscópio, onde se pode observar as fases presentes e identificar a granulação do material (tamanho de grão), o teor aproximado de carbono no aço, a natureza, a forma, a quantidade, e a distribuição dos diversos constituintes ou de certas inclusões.

A preparação das superfícies para ensaios de macrografia e micrografia seguem os mesmos cuidados.

A seguir apresentamos os passos para a preparação adequada dos corpos de prova.

Para a Norma Técnica Interna SABESP NTS 034, a qualificação de soldagem estrutural, será feito através do exame de macrografia obedecendo os seguintes critérios:

- Soldar duas chapas metálicas na forma de junta “T”;
- Retirar seções da junta soldada, através do corte com serra,
- Limpar as superfícies cortadas, com solvente removedor de gordura, não usar gasolina, querosene ou outro solvente que possa deixar resíduos oleosos na peça;
- Lixar as superfícies de cada seção de forma obter uma superfície lisa.
- Mergulhar as superfícies preparadas em um recipiente contendo 50% de ácido clorídrico e 50% de água.
- Realizar a inspeção.

Segundo Rohde (2010), o corte mais apropriado para a reparação de amostras metalográficas é o corte abrasivo, pois operações de torneamento, aplainamento ou outros pode

gerar mudanças estruturais no corpo de prova devido ao trabalho a frio. O corte abrasivo é realizado no equipamento de policorte com os discos abrasivos altamente refrigerados.

O processo de lixamento, deve ser executado visando a retirada de riscos ou marcas na superfície a ser ensaiada. Segundo a Norma ASTM E3-95 as lixas a serem utilizadas são respectivamente as lixas com granulometria 180, 240, 320, 400, 600, porém estas sofrem algumas alterações podem ser usadas até lixas com granulometria de 1200. Para Rohde (2010) a técnica de lixamento adequada consiste em se lixar a amostra sucessivamente com lixas de granulometria cada vez menor, mudando-se de direção (90°) em cada lixa subsequente até desaparecerem os traços da lixa anterior.

Após o emprego das lixas, o polimento é continuado sobre um disco giratório de feltro, em uma politriz manual ou automática, onde se aplica uma fina camada de abrasivo (alumina diamante, ou em alguns casos usa-se sílica coloidal) segundo Colpaert (2008).

Rohde (2010) recomenda que os seguintes cuidados sejam adotados no processo de polimento mecânico:

- A superfície deve estar rigorosamente limpa;
- Evitar polimentos demorados;
- Nunca polir amostras diferentes sobre o mesmo pano de polimento
- Evitar fricção excessiva;
- Evitar pressão excessiva sobre a amostra.

Após o polimento a superfície deve ser limpa para a retirada de agentes abrasivo, poeiras ou solventes, a limpeza pode ser feita com água ou líquidos com baixo ponto de fulgor como álcool etílico, para uma rápida secagem.

Para melhor visualização macroscópica e microscópica, o ataque químico é de fundamental importância.

“A superfície atacada sofre uma série de transformações eletroquímicas baseadas no processo de óxido-redução, cujo aumento do contraste se deve às diferenças de potencial eletroquímico. O contraste varia em função da composição química, temperatura e tempo” (ROHDE, 2010, p. 22).

Tabela 10: Reagente para ensaios metalográficos

<b>Designação metalográfica</b>	<b>Composição</b>	<b>Aplicação</b>
Cloreto de cobre-amônio em meio amoniacal	10g cloreto de cobre-amônio 120 ml água destilada Amoníaco até dissolver o precipitado	Reativo p/ micrografia de múltipla aplicação para ligas de cobre

Cloreto de ferro III	5g cloreto de ferro III 30 ml ácido clorídrico concentrado 100 ml de água destilada	Reativo para micrografia de superfícies de grãos em liga de cobre, contrastes especialmente acentuados em cristais $\alpha$ .
Água oxigenada + Amoníaco	1 parte de água oxigenada a 3% 1 parte de amoníaco	Reativos para micrografia de contornos dos grãos de cobre.
Lixívia de solda	10g hidróxido de sódio 90 ml água destilada	Reativo universal para micrografia de ligas de alumínio
Ácido fluorídrico	0.5 ml ácido fluorídrico 99.5 ml água destilada	
Adler	3g cloreto de cobre II amoniacal 25 ml água destilada 15g cloreto de ferro III 50 ml ácido clorídrico concentrado	Reativo para Macrografia de aço cobre e ligas de cobre, cordões de solda, estruturas macroscópicas, camadas cementadas, zonas temperadas, segregações, estruturas primárias.
Reativo de ação profunda p/ aço	1 parte de ácido clorídrico concentrado 1 parte de água	Reativo para Macrografia de aço, segregações, inclusões, fissuras, escórias, poros.
Fry	100 ml água destilada 120 ácido clorídrico concentrado 90g cloreto de cobrem II	Reativo para Macrografia a fim de tornar visíveis linhas de ação de forças em aços sensíveis ao envelhecimento.
Baumann	5 ml ácido sulfúrico concentrado 95 ml água destilada	Revelação da distribuição de enxofre no aço, com auxílio de papel fotográfico para ampliações.
Reativo macrográfico Para alumínio e suas ligas	10 ml ácido clorídrico concentrado 10 ml ácido nítrico concentrado 10 ml ácido fluorídrico 2,5 ml água	Cordões de solda e macroestruturas. Determinação microscópica do tamanho do grão no processo rápido.
Nital a 3%	97 ml álcool etílico 3 ml ácido nítrico concentrado	Reativo p/ micrografia de aço e ferro não ligado e de baixa liga, metal branco, ligas de magnésio. Também para aços de alta liga com estrutura martensítica.

Nital a 10%	90 ml de álcool etílico 10 ml de ácido nítrico concentrado	Em ataques microscópicos de ação profunda para tornar visível constituintes especiais da estrutura em aços e ferros (carbonetos, eutético fosforoso) não ligados e de baixa liga. Em casos isolados também como reativo p/ microscopia de alta liga. Em macroscopia p/ camadas cementadas respectivamente profundidade de endurecimento.
Reativo V2A de Goerens	100 ml ácido clorídrico concentrado 100 ml água destilada 10 ml ácido nítrico concentrado 0.3 ml de inibidor	Reativo para micrografia de aços inoxidáveis.
Água Régia	8 ml ácido nítrico concentrado 12 ml ácido clorídrico concentrado 1000 ml álcool etílico	Reativo p/ micrografia de aços inoxidáveis e outros aços de alta liga.
Reativo de Vilella	3 partes glicerina 1 parte de ácido nítrico concentrado 2 partes de ácido clorídrico concentrado	Reativo para micrografia de aços ao manganês e aços-liga com alto teor de cromo.
Picrato de sódio em meio alcalino (Picral)	25g hidróxido de sódio 75 ml água destilada 2g ácido pícrico	Revelação de cementita.

Fonte: Rohde, 2010

### 3 ANÁLISES E DISCUSSÕES

O material para análise foi adquirido em chapas metálicas com a largura 75mm e espessura  $\frac{1}{4}$ ", sendo estas as dimensões desejadas, porém em comprimento maior, sendo necessário corta-las, elas foram dimensionadas com comprimento de 125mm através do corte com serra, foi optado por este tipo de corte devido a possibilidade da serra estar todo o tempo bem refrigerada, para que não houvesse nenhuma alteração microestrutural no material devido a temperatura ou aplicação de pressão ocasionada pelos demais processos de corte.

Figura 17: Processo de corte



Fonte: O autor, 2018

Após o corte foi realizado o processo de chanframento nos corpos de prova, de aproximadamente 45°, e posterior limpeza das mesmas com fluido de baixo ponto de fulgor (álcool etílico) para a remoção de impurezas, poeiras e gorduras que pudessem estar presentes nas peças.

Figura 18: Chanframento e limpeza da pecas a serem soldadas



Fonte: O autor, 2018

As soldas foram realizadas segundo as EPS's dos anexos A, B e C. Os corpos de provas tiveram que ser soldados por dois soldadores diferentes, devido ao fato de que a instituição CEDUP Industrial de Lages, não utiliza o gás de proteção CO<sub>2</sub> puro para a soldagem MAG, a instituição opta pelo uso de Atal com 75% de CO<sub>2</sub> e 25% de argônio como gás de proteção. Nestas condições a soldagem dos corpos de provas MAG e Arame Tubular com gás de proteção CO<sub>2</sub>, foram soldados pelo soldador e professor de soldagem da instituição Prof. Rafael Guimarães, na empresa Mecânica Pro Indústria. Os parâmetros destas soldagens, como já mencionado encontram-se em suas EPS's. Para a soldagem MIG, o processo foi realizado na Instituição CEDUP pelo soldador e professor de soldagem da instituição Prof. Rodrigo Ricardo

da Silva com Argônio 100% como gás de proteção, seguindo os parâmetros de sua EPS em anexo.

Figura 19: Processo de soldagem



Fonte: O autor, 2018

### 3.1 Análise com Líquido Penetrante

Após a soldagem dos corpos de provas, e o resfriamento que deu-se de maneira contínua e a temperatura ambiente, a primeira etapa de preparação para a análise com líquido penetrante, a limpeza da superfície, foi realizada segundo a Norma Petrobras N-1596 (2003), que orienta ser realizada sem o uso de escovas rotativa, dando preferência a análise com a superfície bruta, neste caso foi utilizado apenas escova manual, para a remoção de escória, cavacos e outros corpos estranhos da superfície, e após o escovamento, novamente a superfície foi limpa com álcool etílico a fim de remover gorduras do corpo de prova, sem proporcionar oxidação no material.

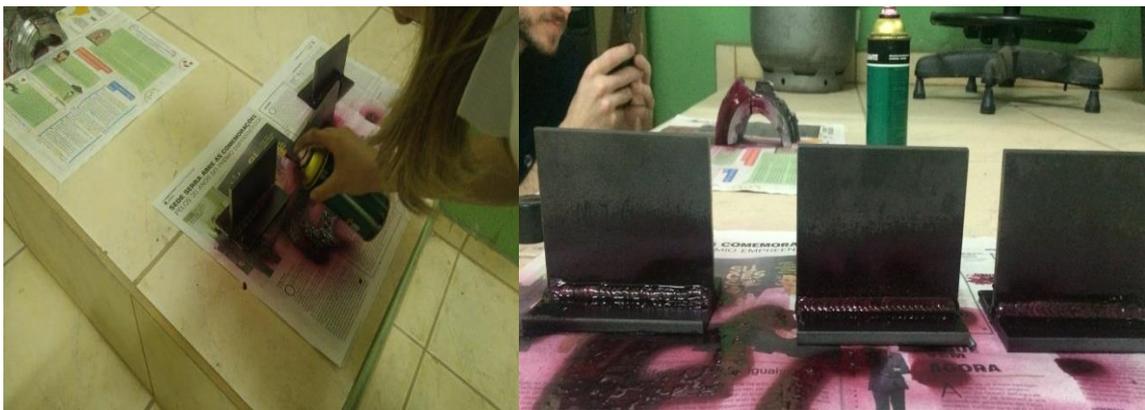
Figura 20: Limpeza das peças com escova manual



Fonte: O autor, 2018

Após a limpeza dos corpos de prova, iniciamos a aplicação do líquido penetrante da Carbografite PCG 53, a aplicação foi realizada em temperatura ambiente em torno dos 20°C, e o tempo de penetração esteve entre 10 e 15 minutos. O método de aplicação foi por pulverização, com cobertura total da superfície a ser analisada, o líquido penetrante utilizado é do tipo II de contraste colorido.

Figura 21: Aplicação do Líquido Penetrante



Fonte: O autor, 2018

A remoção do excesso de líquido penetrante foi realizado com o removedor da Carbografite RCG S, o mesmo foi aplicado em uma estopa afins de umidece-la, e passado na superfície do corpo de prova ate que não fosse mais evidenciado a pesença de líquido penetrante na peça.

Figura 22: Aplicação do removedor



Fonte: O autor, 2018

Após a secagem do removedor (em torno de 5 minutos), a terceira etapa do ensaio foi iniciada, com a aplicação do revelador Carbografite DCG S2, feita por pulverização, ressaltamos que neste teste nenhum soprador ou secador foi utilizado para acelerar os processos de secagem entre as aplicações. A seguir faremos a descrição dos resultados obtidos com líquido penetrante.

Figura 23: Aplicação do revelador



Fonte: O autor, 2018

### 3.1.1 Soldagem MIG

A figura 24, é a representação do ensaio de líquido penetrante, no corpo de prova soldado pelo processo MIG. Para a fixação do corpo de prova, para a soldagem foi realizado

uma solda ponto em suas extremidades, o que deixou uma irregularidade grosseira nas pontas do corpo de prova, a preparação para o ensaio não envolveu nenhum tipo de lixamento, e devido a isto em suas extremidades as irregularidades permaneceram, ao limpar o líquido penetrante com o removedor, uma quantidade de líquido ficou entre estas irregularidades, com a aplicação do revelador, uma mancha com contraste colorido foi fortemente evidenciada nas extremidades.

Percebemos porém, que ao longo do cordão de solda houve uniformidade, havendo apenas um contraste mais marcante na peça, que pode facilmente ser confundindo com um poro, porém é uma respingo de solda que foi capaz de armazenar líquido penetrante sendo revelado pelo revelador, percebemos também que alguns contrastes em rosa estão no decorrer do cordão, porém associando o fato do cordão está com sua superfície bruta e que a geometria do cordão é convexa, este contraste é esperado, devido a um pequeno ângulo que se forma entre o material de adição e material de base, nesta geometria.

Figura 24: Análise líquido penetrante em solda MIG



Fonte: O autor, 2018

### 3.1.2 Soldagem MAG

Da mesma forma que no ensaio com a soldagem MIG, percebemos na soldagem MAG que suas extremidades há um contraste mais marcante devido a suas irregularidades, causadas

pelo processo de fixação. Porém ao longo do cordão de solda percebemos que há uniformidade do revelador, com apenas alguns contrastes mais evidenciados, estes contrastes não são considerados defeitos no processo de soldagem, pois segundo a norma supracitada, não é aconselhável nenhum processo de lixamento ou esmerilhamento na região de teste, e com isto a geometria do cordão foi mantida em sua configuração inicial, configuração esta que pode ser observada nas figuras 21 e 22, sendo que originalmente um cordão de solda tem irregularidades superficiais, devido ao movimento do eletrodo. A geometria do cordão de solda MAG é convexa e isto tende a armazenar líquido penetrante nas extremidades horizontais da peça.

Figura 25: Análise líquido penetrante em solda MAG



Fonte: O autor, 2018

### 3.1.3 Soldagem Arame Tubular com Gás de Proteção

A soldagem com arame tubular com gás de proteção  $\text{CO}_2$ , é uma soldagem com geração de escória devido a configuração de seu arame. Os parâmetros de soldagem foram mantidos os mesmo que na soldagem MAG, e podemos perceber que houve a geração de respingos bem superior à dos outros corpos de provas, isto se dá pelo fato do arame ser tubular, por isso funde mais rápido, mantendo os mesmos parâmetros de soldagem, principalmente a amperagem, teremos um aumento velocidade de deposição, associando isto a configuração do arame, que por conter desoxidantes forma escória aumentando número de impurezas no cordão de solda, teremos uma formação de respingos considerável .

Também podemos perceber bem evidente a formação de poros no cordão de solda, associado a inclusão de escória na superfície soldada, a escória solidificou junto com o material de adição, e após a remoção das escórias com a escova manual, os poros formaram vazios que foram evidenciados pela análise com LP. Sua geometria é côncava.

Figura 26: Análise líquido penetrante em solda com arame tubular com gás de proteção CO<sub>2</sub>



Fonte: O autor, 2018

#### 3.1.4 Comparativo entre as análises após ensaio com líquido penetrante

A análise com líquido penetrante busca detectar descontinuidades no cordão de solda e qualidade superficial da solda, neste contexto avaliamos se houve trincas, poros, respingos, mordeduras entre outras descontinuidades na superfície soldada. Em termos classificativos, apresentamos a comparação dos processos de soldagem, do cordão com qualidade superficial inferior ao superior

A soldagem com arame tubular apresentou qualidade superficial inferior aos demais corpos de prova, apresentando respingos excessivos e formação de poros no cordão de solda. A principal causa de sua inferioridade está ligada a configuração do arame tubular, o fato do mesmo ser tubular aumenta a velocidade em que o mesmo é fundido pelo arco elétrico, e com isto a transferência de metal se dá de forma mais rápida, associando este fato a formação de escória gerada pelos desoxidantes que gera uma certa impureza na soldagem temos como resultado geração maior de respingos. Os poros estão relacionados a inclusão de escória que solidificou-se juntamente com o material de adição, ao ser removida pelo processo de escovamento, formaram-se as descontinuidades identificadas como poros.

A soldagem MIG, apresentou a geração de respingos, dentro do padrão aceitável, esta geração de respingos está associado ao gás de proteção utilizado, pois a soldagem foi realizada

com 100% argônio, esta composição no entanto não é a mais recomendada para aços carbono, sendo aconselhável uma concentração de 3-5% O<sub>2</sub>, mesmo na soldagem MIG, o que ajuda a estabilizar o arco elétrico, melhorando a molhabilidade da poça de fusão pela diminuição da tensão superficial.

A soldagem MAG apresentou um cordão de solda com boa qualidade superficial em toda sua extensão, o gás de proteção CO<sub>2</sub>, dissocia-se em altas temperaturas formando CO+O, isto estabiliza o arco, e sua alta condutividade térmica transfere mais calor a peça melhorando a fusão.

## 3.2 Análise Macrográfica

### 3.2.1 Preparação dos corpos de provas para análises de Macrografia e Micrografia

O processo de preparação dos corpos de provas para as análises de micrografia e macrografia inicia-se com o corte abrasivo dos corpos de provas já soldados, o corte foi realizado em um policorte metalográfico altamente refrigerado, para evitar alterações térmicas ou por pressão no material. Ressaltamos que devido a soldagem, a dureza do material foi alterada, e a regulagem de pressão para o corte é controlada manualmente, devido a sensibilidade humana, em alguns corpos de provas poderemos perceber que houve uma pequena interferência do disco abrasivo, devido a aplicação de pressão acima do ideal.

Figura 27: Policorte metalográfico com refrigeração



Fonte: O autor, 2018

Após o corte, foi necessário um processo de lixamento das superfícies a serem analisadas. Este lixamento foi sequencial utilizando as lixas com granulometria 80, 120, 220, 240, 320, 400, 600, 1200, respectivamente, em politirzes metalográficas refrigeradas com água a fim de evitar que o cavaco proveniente do processo de lixamento gerasse novos riscos na

superfície. O lixamento constitui em segurar o corpo de prova sobre a politriz equipada com a lixa adequada, mudando sua orientação em 90 ° a cada lixa subsequente.

Figura 28: Sequência de lixas e processo de lixamento



Fonte: O autor, 2018

Finalizado o processo de lixamento, foi realizado o polimento da superfície, em uma politriz equipada com feltro e o abrasivo de alumina lum, mantendo a refrigeração com água.

Figura 29: Polimento das superfícies a serem analisadas com alumina



Fonte: O autor, 2018

Após as superfícies devidamente polidas, as mesmas foram atacadas com o ácido apropriado para análise em questão, para a análise de macrografia o reagente ácido utilizado foi ácido clorídrico, o mesmo foi preparado em proporção de 50% de volume de ácido clorídrico e

50% de água destilada, aquecidos em temperatura próxima a ebulição, chegando e mantendo aproximadamente 75°C.

Figura 30: Ataque da superfície com solução acida para macrografia e secagem.



Fonte: O autor, 2018

Mantendo esta temperatura os corpos de provas foram imergidos na solução, com o auxílio de uma garra para que os mesmos não tocassem o fundo do recipiente, e mantidos por volta de 2 minutos na solução até que as segregações começassem a ser evidenciadas.

Após o ataque as peças foram lavadas com água a fim de parar a reação química, e posterior lavadas com álcool etílico a fim de facilitar a evaporação da água para que a oxidação fosse retardada. Para acelerar o processo de secagem foi utilizado um soprador térmico com a distância aproximada de 30 cm com ângulo de 70° da peça. Após a secagem a superfície estava pronta para a análise.

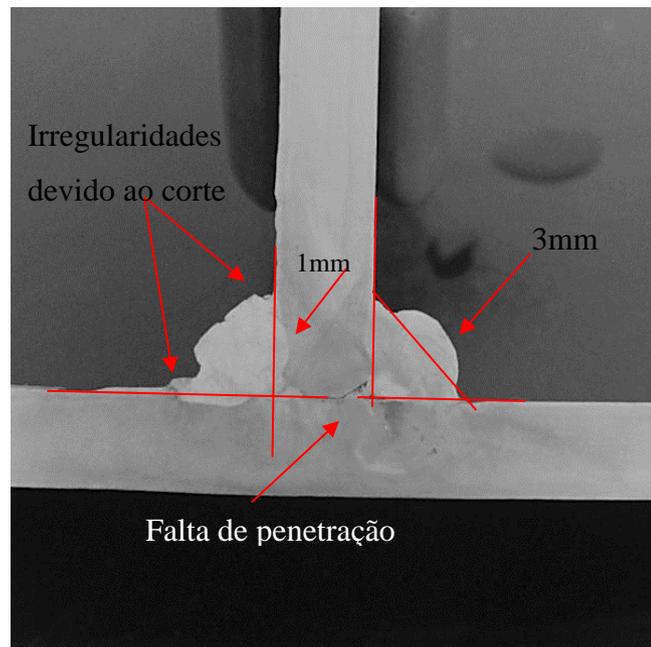
### 3.2.2 Soldagem MIG

Após o ataque químico a macrografia foi observada a olho nu, sem a ampliação por lupa. Para os corpos de provas do processo de soldagem MIG, tivemos um cordão de solda com perna de 7mm, com convexidade de 3mm e garganta de 4 mm, percebemos no cordão direito uma falha entre o material de base e material de adição, esta descontinuidade não é caracterizada uma trinca e sim falta de penetração do cordão de solda no chanfro.

Esta descontinuidade foi capaz de armazenar uma quantidade extra de solução ácida, e a oxidação, mesmo após o processo de secagem, foi acelerada devido a solução que continha na descontinuidade.

Ainda do lado direito podemos perceber que a fusão entre material de base e adição, não atingiu os parâmetros desejados, pois possui uma área de zona fundida menor que 1mm.

Figura 31: Macrografia ataque com solução de ácido clorídrico



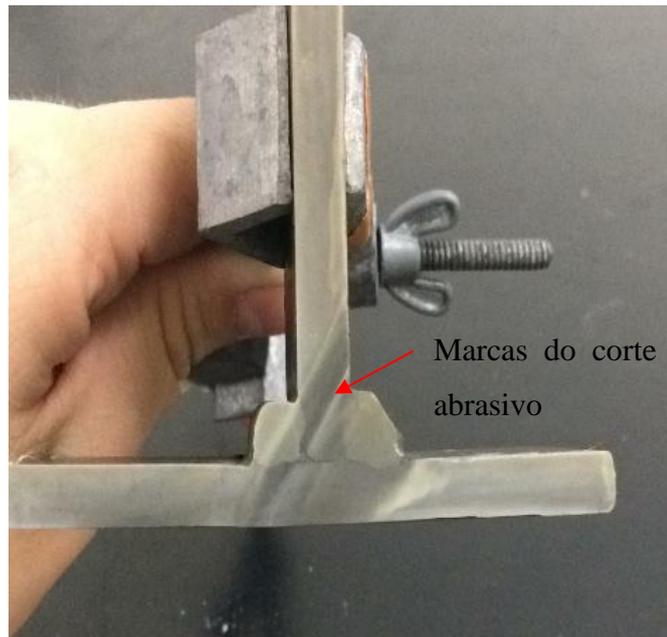
Fonte: O autor, 2018

Ao lado esquerdo devemos desconsiderar a superfície do cordão de solda, pois sua irregularidade é devido ao processo de corte abrasivo, que gerou rebarbas e devido a geometria circular dificultou a retirada das mesmas, no entanto conseguimos visualmente concluir que há uma convexidade menor neste lado da peça, percebemos que deste lado há uma melhor penetração do material de adição, e a zona fundida foi de 1mm. A visualização da zona

termicamente afetada foi prejudicada devido ao acúmulo de ácido na descontinuidade no chanfro, com isto a oxidação foi excessiva para a visualização da ZTA.

Na figura 32, foi registrado as segregações reveladas a olho nu após o ataque com Nital a 10%, ressaltamos que o ataque com Nital é próprio para análise de micrografia, porém, também revela macrograficamente as reações eletroquímicas do material com a solução ácida, esta imagem podemos perceber linhas de interferências térmicas do processo de corte abrasivo.

Figura 32: Macrografia processo de soldagem MIG, com solução Nital 10%



Fonte: O autor, 2018

### 3.2.3 Soldagem MAG

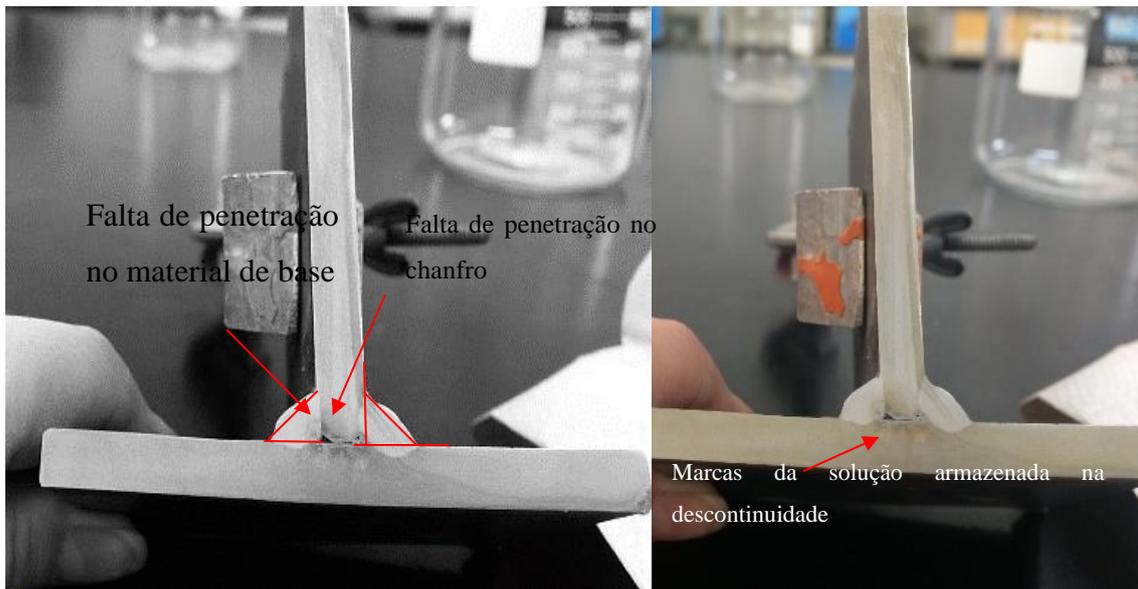
O processo de soldagem MAG, foi realizado pelo soldador/professor Rafael Guimarães nos dois lados da peça, porém embora a técnica e parâmetros de soldagem sejam os mesmos podemos perceber uma diferença na geometria do cordão, isto devido a sensibilidade humana, e o pré-aquecimento da peça após o primeiro cordão de solda, ressaltamos este processo no entanto pode ser 100% automatizado, o que reduziria tais diferenças devido a precisão robótica.

Em relação aos cordões de soldas podemos observar ao lado esquerdo do corpo de prova temos uma convexidade de 1mm, percebemos também que neste lado há falta de penetração, tanto no chanfro, quanto nas paredes vertical e horizontal do material de base.

Ao lado direito da peça podemos observar que quase não há convexidade, a penetração do material de adição foi melhorada, podemos perceber isto tanto na parte chanfrada quanto nas

paredes do material, identificando uma penetração de 1mm no material de base, e quase que penetração completa no chanfro, como já mencionado este fato está relacionado com a sensibilidade humana e com a temperatura inicial da peça, o lado direito foi o segundo cordão de solda nesta junta, com isto o calor transferido pelo primeiro cordão de solda do lado esquerdo, aqueceu a peça favorecendo a penetração do material de adição. A perna e garganta de solda tem as mesmas dimensões do processo de soldagem MIG, perna de 7mm e garganta de 4mm.

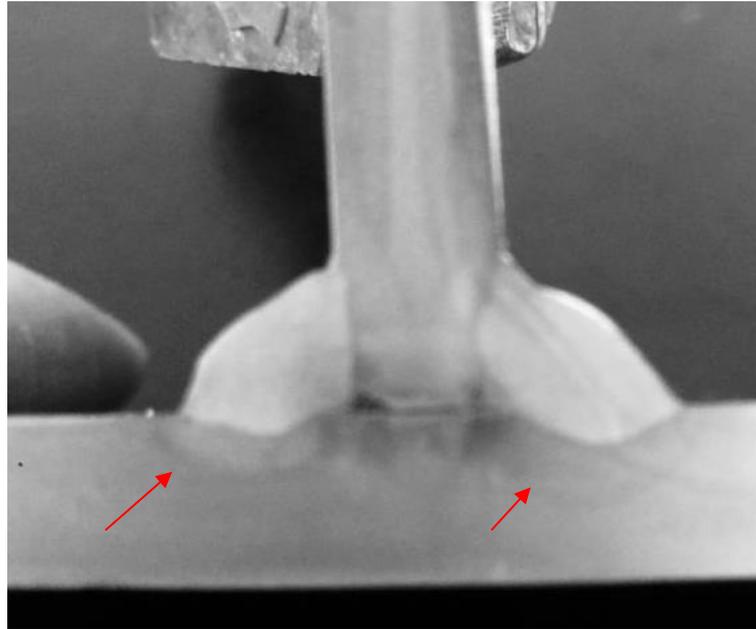
Figura 33: Macrografia processo de soldagem MAG



Fonte: O autor, 2018

A figura 34, nos deixa mais evidente a zona termicamente afetada pelo processo de soldagem, assim como os demais corpos de provas, a visualização foi dificultada devido ao acúmulo de solução ácida no chanfro, porém podemos perceber uma ZTA de aproximadamente 1mm.

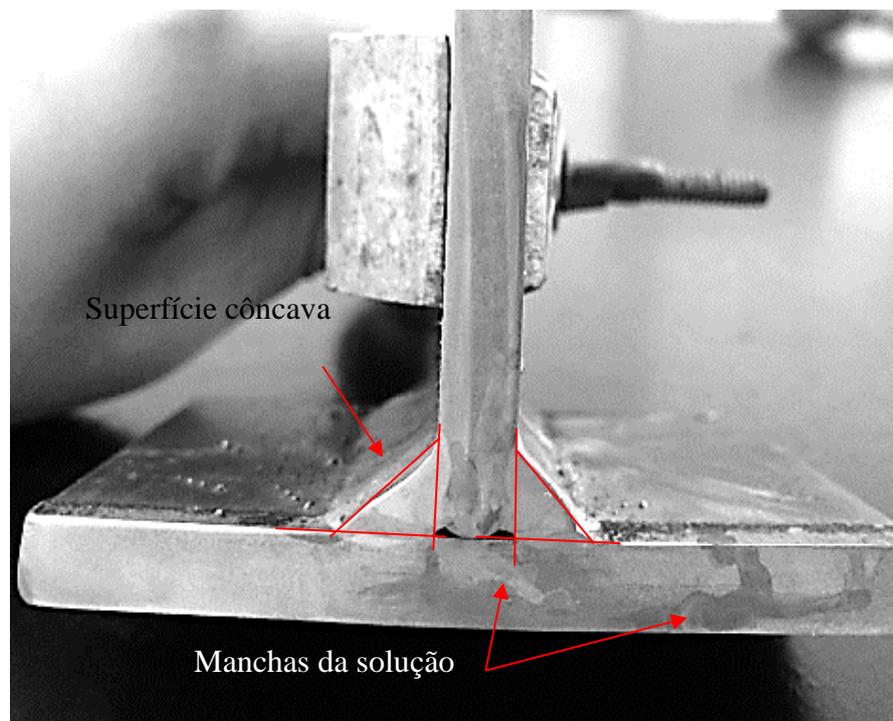
Figura 34: ZTA processo de soldagem MAG



Fonte: O autor, 2018

### 3.2.4 Soldagem Arame Tubular com Gás de Proteção

Figura 35: Macrografia processo de soldagem com arame tubular com gás de proteção



Fonte: O autor, 2018

A figura 35, é a representação fotográfica da macrografia do corpo de prova do processo de soldagem com arame tubular com gás de proteção CO<sub>2</sub>. O cordão de solda deste processo tem uma geometria côncava, houve penetração no material de base, porém no chanfro não houve penetração adequada, como nos demais corpos de provas nesta descontinuidade houve acúmulo de solução ácida, acelerando o processo de oxidação das peças, neste corpo de prova, no entanto ficou mais evidentes manchas na peça.

### 3.2.5 Comparativo entre as análises após ensaio de Macrografia

As análises de macrografia buscam avaliar as descontinuidades internas no cordão de solda, bem como zona termicamente afetada, pelo processo de soldagem. Comparando os corpos de provas macrograficamente, tivemos resultados bem semelhantes em ambos, devido a isto cabe-nos os comentários pertinentes a cada amostra.

O chanfro foi realizado para melhorar a penetração, porém este processo não foi efetivo em nossos testes, devido as dimensões das chapas soldadas, as mesmas eram de dimensões pequenas de ¼”, ocasionando um ângulo com área de contato muito pequena entre as peças. Devido a isto temos em todos nossos testes uma falta de penetração interna, na área chanfrada.

Entre os outros aspectos que a macrografia busca avaliar, não tivemos trincas, poros ou outras descontinuidades geradas pelo processo de solidificação do cordão de solda em nenhum de nossos corpos de provas.

É possível perceber que a falta de penetração não foi de tamanho linear em todas as amostras, bem como a geometria do cordão também não foi obtida de maneira linear. Interligando tais fatos concluímos que a geometria com menos convexidade resulta em maior penetração do material de adição na parte chanfrada da peça e no material de base.

Embora não tenhamos marcado qual dos lados foi soldado primeiro, concluímos, segundo a geometria obtida e penetração resultante, que o lado o qual apresenta melhor penetração e menor convexidade foi o segundo lado a ser soldado, pois o calor dissipado no primeiro cordão de solda, fez o pré-aquecimento da junta, procedimento que melhora a penetração do material de adição, devido ao material de base fundir-se mais facilmente.

No corpo de prova soldado pelo processo com arame tubular com gás de proteção CO<sub>2</sub>, não houve efetiva penetração no chanfro em nenhum dos lados, isto devido a velocidade de soldagem, como o arame é tubular o mesmo fundiu mais rápido, obrigando o soldador “puxar” o eletrodo de maneira mais rápida, esta velocidade influenciou diretamente na deposição de material, embora não haja convexidade na junta, a massa de material depositado foi menor, não

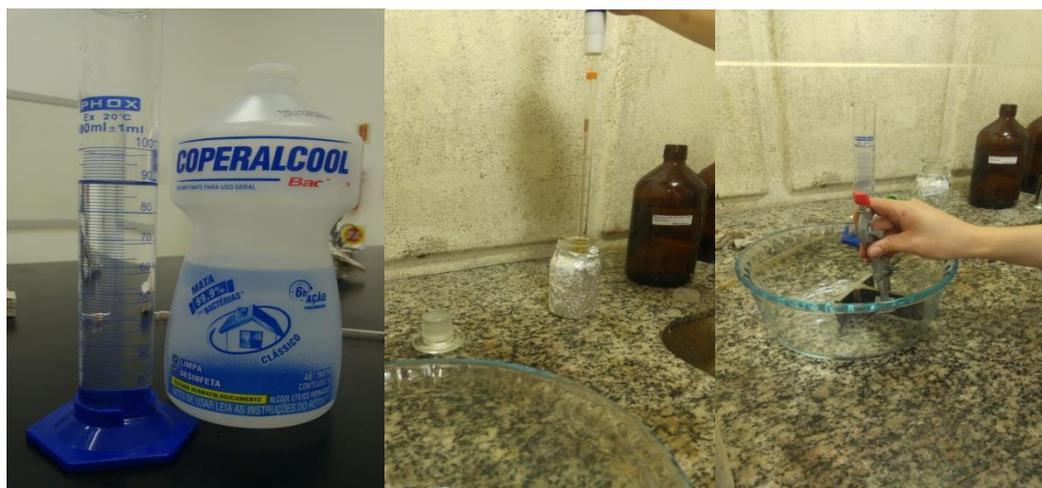
penetrando no chanfro. Desta maneira é seguro afirmar, que é necessário manter um ajuste entre a geometria côncava e convexa, a geometria convexa pode ser o indicador que o material de adição não está tendo penetração adequada na junta, e a geometria côncava o indicador de pouco material de adição sendo depositado.

Em relação a zona termicamente afetada, podemos concluir que a falta de penetração no chanfro afetou tal análise, pois a solução ácida contida nesta descontinuidade espalhou-se na superfície após a secagem, sendo de forma gradativa absorvida pelo material, o que causou manchas devido a reação eletroquímica, mascarando a ZTA.

### 3.3 Análise de Micrografia

A preparação do corpo de prova para micrografia de forma geral é muito semelhante a preparação para macrografia, sendo distinta apenas pelo reagente de ataque, a solução utilizada foi uma solução de Nital a 10%, foi utilizado 90 ml de álcool etílico e 10ml de ácido nítrico. Para o manuseio deste ácido, não foi possível utilizar as luvas pois as mesmas poderiam reagir com o ácido causando uma chama. Esta solução foi utilizada em temperatura ambiente, sem a necessidade de aquecimento. O processo de frenagem da reação e secagem foi o mesmo já mencionado para macrografia. A análise micrográfica foi realizado com o microscópio metalográfico XJP-H200.

Figura 36: Ataque da superfície com solução ácida para micrografia

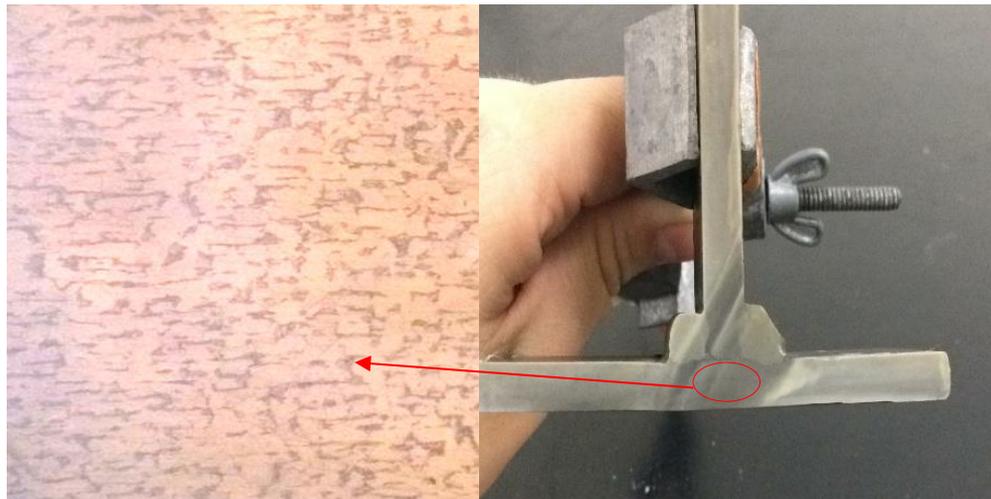


Fonte: O autor, 2018

### 3.3.1 Microestrutura do material de base ZTA

A figura 37, é a micrografia com ampliação de 400x, da junta soldada pelo processo MIG, a parte representada é o material de base. Podemos perceber a formação de perlita (grãos escuros) e ferrita (grãos claros). Esta estrutura é característica de um processo de resfriamento lento, associado a laminação a quente a qual chapas finas de aço são submetidas.

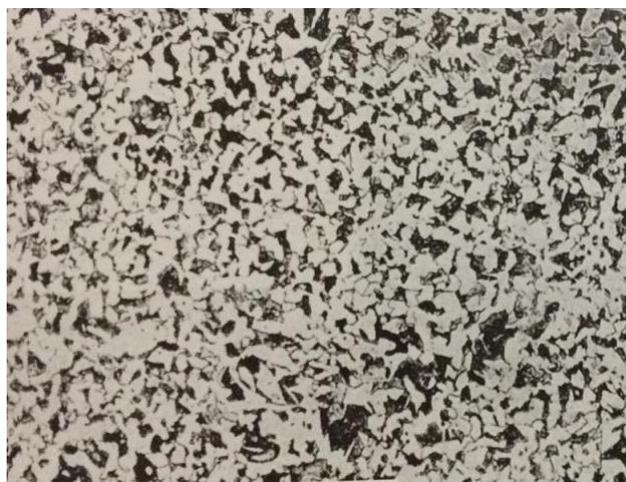
Figura 37: Micrografica material de base, junta soldada pelo processo MIG



Fonte: O autor, 2018

A metalografia é uma técnica que exige um olho muito apurado na diferenciação das microestruturas, considerando a relevância da identificação como fundamental na interpretação nas alterações nas propriedades mecânicas, a figura 38 representa a microestrutura trazida pela bibliografia de Colpaert (2008) correspondente a microestrutura identificada no teste realizado.

Figura 38: Aço com cerca 0,3% carbono resfriado lentamente. Ferrita e perlita



Fonte: Colpaert, 2008

A figura 39, representa a microestrutura do material de base, da junta soldada pelo processo MAG, como o material usado nos corpos de provas é o mesmo, podemos perceber a mesma microestrutura, com a formação de perlita e ferrita levemente esferoidizada. A diferença em contraste é justificada pela variação de luminosidade no microscópio. Vemos nesta amostra, no entanto, que houve um aumento na porcentagem de perlita (grãos escuros) na microestrutura, e mudança no tamanho dos grãos austeníticos, que é maior visivelmente na amostra MAG, esta estrutura representa que a secção estudada está mais próxima da ZTA.

Figura 39: Micrografia material de base, junta soldada pelo processo MAG



Fonte: O autor, 2018

Figura 40: Material de base, processo com arame tubular



Fonte: O autor, 2018

Para a figura 40, valem os comentários da figura 39, ela representa o material de base do corpo de prova do processo com arame tubular com gás de proteção CO<sub>2</sub>, há um aumento

também, na concentração de perlita em sua microestrutura, a diferente concentração de perlita em secções do mesmo material é justificada pelas diferentes concentrações de carbono ao longo da chapa metálica.

A seguir apresentamos a microestrutura relatada, com embasamento na descrição da bibliografia.

Figura 41: [...] c) Região onde ocorreu leve esferoidização dos carbonetos de perlita. Ferrita e perlita levemente esferoidizada



Fonte: Colpaert, 2008

### 3.3.2 Microestrutura do material de adição

Segundo a classificação do arame AWS 5.18 ER70 S-6 arame utilizado para soldagem MIG e MAG e AWS 5.20 E71T1/T9 para soldagem com arame tubular, a composição química dos arames é apresentada nas tabelas 9 e 10.

Tabela 11- Composição arame ER70S-6

CARBONO	SILICIO	MANGANES	FOSFORO	ENXOFRE	COBRE
0,06 a 0,15	0,8 a 1,15	1,4 a 1,85	0,025 máx.	0,035 máx.	0,5 máx.

Fonte: Belgo Bekaert Arames, 2013

Tabela 12: Composição arame E71T1/T9 C(M) Ti 52FD-B

CARBONO	SILICIO	MANGANES	FOSFORO	ENXOFRE	COBRE
0,05	0,5	1,4	-	-	-

Fonte: Bohler Welding, 2016

A figura 42, tem ampliação de 400x, e representa a microestrutura do material de adição do processo de soldagem MIG, conseguimos identificar a formação de perlita e ferrita.

Figura 42: Micrografia material de adição



Fonte: O autor, 2018

A figura 43, representa a micrografia com ampliação de 400x, do material de adição do processo de soldagem MAG, apresenta uma microestrutura composta por perlita e ferrita.

Figura 43: Micrografia material de adição pelo processo MAG



Fonte: O autor, 2018

A configuração dos grãos formam uma estrutura característica de bainita, uma estrutura intermediária entre a formação de perlita e cementita no resfriamento, a formação da perlita e da bainita se confundem na curva de resfriamento, sendo de difícil distinção entre elas, para fundamentar a conclusão da formação desta estrutura trazemos a imagem da bibliografia de Colpaert (2008) com a devida identificação para comparações.

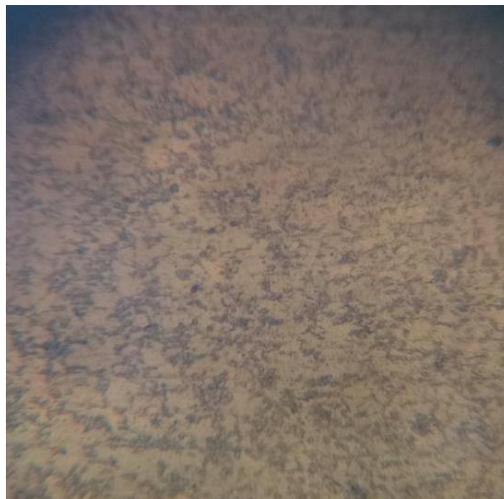
Figura 44: Estrutura Bainítica



Fonte: Colpaert, 2008

A figura 45, representa a micrografia com ampliação de 400x, do material de adição do processo de soldagem com arame tubular, devido a concentração de carbono ser mais baixa identificamos uma redução no percentual de perlita, porém a composição característica é ferrita e perlita, não identificamos a formação de bainita neste material de adição.

Figura 45: Micrografia material de adição pelo processo arame tubular



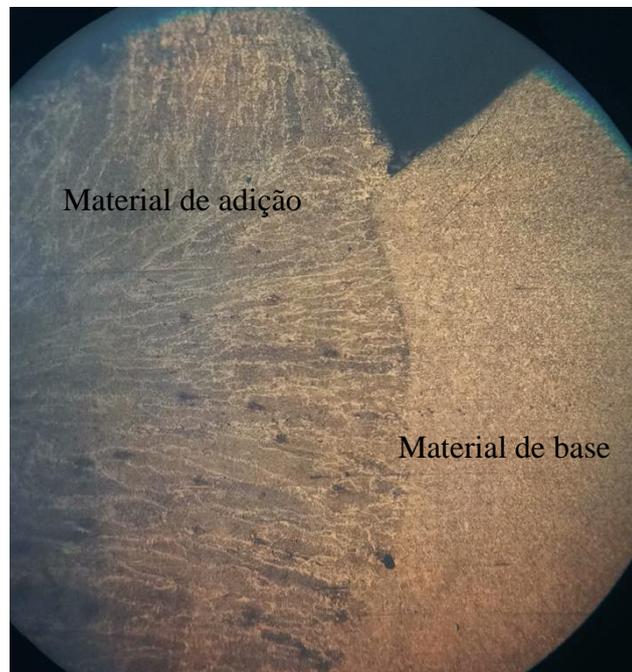
Fonte: O autor, 2018

### 3.3.3 Linha de fusão

A figura 46, mostra claramente a divisão entre material de base e material de adição, com ampliação de 40x. podemos ver o crescimento competitivo dos grãos, onde os grão com melhor orientação cristalográfica crescem impedindo o crescimento de alguns grãos. Percebemos claramente na linha de fusão, uma pequena parcela de crescimento epitaxial, e também o refino de grãos no material de base. Nesta micrografia pode-se distinguir com clareza os contornos de grão. Outro ponto de relevância é a mudança brusca entre a composição dos grãos dos materiais envolvidos

A figura 47, representa o material de base e material de adição do processo de soldagem MAG, a linha de fusão neste corpo de prova não é tão marcante quanto nos demais testes, é possível confundir material de base com material de adição, associamos isto a uma excelente fusão entre material de base e material de adição. É possível concluir também que o resfriamento foi linear, apresenta um crescimento de grãos mais controlado e a diferença de concentração de perlita não é tão expressivo quanto nos demais corpos de prova.

Figura 46: Material de adição X material de adição



Fonte: O autor, 2018

Figura 47:Material de adição X material de base, processo de soldagem MAG



Fonte: O autor,2018

A figura 48, é a representação da linha de fusão entre o material de adição e material de base do processo de soldagem arame tubular com gás de proteção  $\text{CO}_2$ , percebemos o crescimento de grão na linha e fusão, e nesta microfotografia percebemos mais marcante do que nas demais o crescimento epitaxial, onde os grãos do material de adição crescem em direção a fonte de calor de soldagem, após este crescimento novos grãos do material de adição começam a nuclear-se, formando perlita e ferrita, percebemos o contorno de grãos austenítico e a transformação marcante entre a composição de perlita entre um material e outro.

Figura 48:Material de adição X material de base, processo de soldagem arame tubular com gás de proteção  $\text{CO}_2$



Fonte: O autor,2018

### 3.3.4 Micro descontinuidades

No processo de soldagem quando se analisa trincas, poros ou descontinuidades o momento de maior interesse é a solidificação, pois neste momento o material está com alta solubilidade de gases e está sofrendo uma serie de transformações físicas e químicas. As figuras 49, 50 e 51, apresentam uma serie de segregações nos corpos de provas analisados. Podemos identificar poros em todos os corpos de prova e uma trinca entre o material de base e material de adição do processo MIG.

Figura 49: Poros processo de soldagem MIG, material de adição



Fonte: O autor,2018

Figura 50: Segregações causadas pelo processo de soldagem MAG, material de base



Fonte: O autor,2018

Figura 51: Microporos gerados pelo processo de soldagem arame tubular com gás de proteção no material de adição



Fonte: O autor, 2018

### 3.3.5 Comparativo entre as análises após ensaio de Micrografia

A análise metalográfica é uma técnica que traz uma gama altíssima de informações sobre o objeto de estudo, também é uma técnica que requer grande habilidade e afinidade com seus conceitos, devido a isto apresentamos apenas os aspectos mais relevantes neste estudo. Comparativamente os três corpos de provas apresentaram características bem semelhantes, inclusive na formação de segregações, as estruturas apresetam-se de maneiras já esperadas no estudo bibliográfico.

O material de base apresenta uma configuração típica de uma liga a qual sofre um tratamento térmico, esta configuração é obtida através do processo de conformação para obtenção de chapas finas, a laminação a quente, sem resfriamento acelerado. A estrutura característica formada foi a composição de perlita e ferrita, a ferrita grãos claros apresenta alta ductibilidade, enquanto a perlita, que é formada por lamelas de ferrita e cementita forma uma matriz com alta dureza (cementita), ela também apresenta razoável tenacidade, boa resistência mecânica, resistência ao desgaste e resistência a fadiga. Apartir de tais considerações, é seguro afirmar que a estrutura a qual possui maior fração de perlita, é portanto a secção mais frágil. No material de base do corpo de prova para soldagem MIG, percebemos que o tamanho dos grãos de ferrita são mais lineares. Nos materiais de base nos corpos de provas para MAG e Arame Tubular, percebemos que as há um aumento nas colônias de perlita, nestas colônias percebemos

melhor as lamelas de ferrita e cementita, devido a configuração atingida, sendo perlita esferoidizada, nestes corpos de prova, há um aumento na concentração de perlita, porém sendo ela esferoidizada, confere ao material uma boa ductibilidade, e ainda temos uma configuração de grãos a qual na tenacidade não foi comprometida, devido a proporção de ferrita.

Nos material de adição para os corpos de provas MIG e MAG, tivemos uma configuração estrutural bem semelhante, associamos esta configuração a composição do arame de soldagem, o qual possui a mesma composição para ambos os casos. Identificamos nestas seções a formação de perlita e ferrita, e uma estrutura intermediária a formação de perlita- bainita, sua formação visível é caracterizada como ripas de ferrita separadas por cementita, ou ferritas alongadas na forma de agulhas, sendo esta chamada acicular, ou bainita inferior, na microestrutura dos processos MIG e MAG caracterizamos a estrutura encontrada como bainita inferior, percebemos que ferrita-grãos claros, tem proporção menor, sendo que as lamelas de cementita-grãos escuros, é predominante, esta configuração forma uma matriz altamente dura, porém com baixa tenacidade. No material de adição do processo com arame tubular, não detectamos a presença de bainita, porém a porção de perlita nesta estrutura é predominante, configurando uma estrutura com baixa tenacidade e alta dureza. Embora estas estruturas se apresentem de tal forma que seria fácil acreditar que estariam mais sujeitas a fratura, estas estruturas apresentam granulação fina, o que confere a elas boas propriedades mecânicas, sendo que regiões próximas a elas na ZTA, estão mais sujeitas a trincas e fraturas devido a granulação grosseira.

A linha de fusão entre material de base e material de adição ficou extremamente evidente nos corpos de provas dos processos MIG e Arame Tubular, e uma linha de fusão mais discreta no processo MAG. Formando uma estrutura característica deste ponto, identificamos o crescimento epitaxial, onde grãos do material de base crescem em direção a fonte de calor, sem a nucleação de novos grãos, e também a crescimento competitivo de grãos no material de adição, onde percebe-se alguns grãos com tamanho menor devido a outros grãos com melhor orientação cristalográfica crescerem em sua frente, impedindo seu crescimento e delimitando seu contorno de grão. A região onde os grãos são maiores possuem índice de ductibilidade menor, porém tem alta resistência a tração, associando baixa tenacidade a estes grãos e sujeição a fratura.

Percebemos em todos os corpos de provas, que há descontinuidade significativas, principalmente em regiões próximas a alguma extremidade do material. Durante a solidificação ocorre uma contração de aproximadamente 4% do volume devido a diferença de densidade entre o aço sólido e líquido, para garantir a ausência de vazios é necessário concentrar esta

contração em uma parte do fundido, segundo Colpaert (2008). Quando em uma determinada região coexistem sólido e líquido, surgem dificuldade de escoamento do líquido, necessário para a compensação da contração, quando o fluxo do líquido não for suficiente, em função da existência de uma zona pastosa o movimento do líquido para compensar a contração resulta em microporos.

Identificamos uma trinca no corpo de prova do processo MIG, Colpaert (2008) explica tais trincas como resultado de um resfriamento insuficientemente uniforme, maior heterogeneidade de temperatura cria gradientes de temperatura no interior da peça, e consequentemente gradientes de tensões, associado a diferentes contrações térmicas, ocasionando trincas.

## 4 CONCLUSÃO

A união de peças metálicas é de fundamental importância na indústria metalomecânica, tanto no setor produtivo, quanto no setor de manutenção. Compreender a coalescência entre os metais visa uma melhor aplicação dos processos de soldagem. Ao decorrer deste trabalho foi levantado vários pontos de relevância a respeito dos parâmetros e processos de soldagem, buscando uma comparação entre três processos, soldagem MIG, MAG e soldagem com Arame Tubular com gás de proteção CO<sub>2</sub>, esta comparação punha em questão a qualidade superficial do cordão de solda, descontinuidades no interior da junta soldada, e as alterações microestruturais causadas pelo processo de soldagem.

O processo de soldagem abrange uma vasta gama de assuntos, sendo que abordar todos seus aspectos demandariam de um estudo mais aprofundado, neste contexto optamos em revisar bibliograficamente assuntos pertinentes ao trabalho em questão.

A elaboração das amostras, e preparação das mesmas para os ensaios, foram de fundamental importância para compreender alguns resultados, como marcas do disco abrasivo, ou manchas de solução ácida nas peças.

A análise com líquido penetrante, revelou aspectos já imaginados e aspectos não desejados segundo a bibliografia. As amostras do processo MIG e MAG corresponderam em grande parte o que nossa revisão afirmava, uma boa qualidade superficial e baixo nível de respingo. Porém a soldagem com arame tubular apresentou qualidade superficial inferior a esperada segundo as bibliografias abordadas, com a formação de poros e um nível considerável de respingos, porém segundo o conhecimento popular, através da investigação entre os soldadores da instituição, este tipo de solda tem como característica comum a formação de respingos, e o nível de respingos é aumentado quando usado o método auto protegido sem a adição do gás de proteção CO<sub>2</sub>, acreditávamos que a formação de respingos era ocasionada pelo fluxo interno, o qual exercia uma força de sentido oposto a do gás de proteção ocasionando que algumas gotas de metal fundido ultrapassassem a barreira de gás e formasse respingos, porém esta teoria não pode ser comprovada bibliograficamente, assim pode-se concluir que a formação de respingos está associado a velocidade de soldagem. Deixamos aqui uma sugestão para trabalhos futuros na comprovação ou invalidação da hipótese levantada.

Para a análise de macrografia, também obtivemos alguns resultados inesperados, como a má penetração no chanfro, este resultado foi obtido devido a realização de chanfro em peças finas, ao se realizar estes chanfros deixamos um ângulo obtuso com uma área muito pequena para a penetração da soldagem, sendo inefetivo nestes casos. A penetração no material de base,

foi melhorada no segundo cordão de solda, atribuindo ao pré-aquecimento tal melhora. Nos demais aspectos que a macrografia busca avaliar tivemos bons resultados, sem a presença de trincas ou outras descontinuidades que comprometeriam a qualidade da solda. O acúmulo de solução ácida na secção do chanfro sem preenchimento de solda, afetou de forma significativa a visualização da zona termicamente afetada.

A análise de micrografia demonstrou-se desafiadora, devido a sua complexidade, abrangência de seus conteúdos e aplicações, devido a isto foi sintetizado tanto a revisão bibliográfica quanto o foco de estudo. Concluímos que quanto maior a concentração de perlita, maior dureza é conferida ao material, bem como o aumento de ferrita aumenta a tenacidade. Em relação ao material de adição tivemos composições de perlita e ferrita, bem semelhantes em ambos os corpos de prova, porém a identificação de bainita nos processos MIG e MAG conferem a este corpo de prova menor tenacidade que no processo com arame tubular. Na linha de fusão é possível identificar a região de granulação grosseira onde devido ao crescimento de grãos e devido a presença de perlita (grãos escuros) sua tenacidade é comprometida, estando esta secção mais sujeita a trincas.

As descontinuidades encontradas, são resultados da contração do material, devido a diferença de densidade entre sua fase líquida e sólida. Em termos gerais não há uma classificação entre um processo e outro no que diz respeito a qualidade microestrutural, sendo que o processo de resfriamento tem maior influência no que se refere a descontinuidades ou problemas relacionados a soldagem, fica a sugestão de uma nova pesquisa no que se diz respeito a resfriamentos indesejáveis em trabalhos de soldagem em campo.

## REFERÊNCIAS

ALLGAYER, Alexandre André. **Caracterização Das Propriedades Mecânicas E Metalúrgicas De Uma Junta De Aço ASTM A36 Soldado Pelo Processo De Arco Submerso (SAW) Com Diferentes Aportes Térmicos.**2017. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Universitário Univates, Lajeado, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 3-95:** American Society for Testing and Materials. 3 ed. United States: ASTM, 1982.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **D1.1/D1.1M:** Structural Welding Code— Steel. 19th ed. Miami: AWS, 2004.

ASHBY, M. F.; JONES, D. R. H. **Engenharia de Materiais:** Uma Introdução a Propriedades, Aplicações e Projeto. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007. 1 v. e Tradução de Arlete Simille Marques

ASHBY, M. F.; JONES, D. R. H. **Engenharia de Materiais:** Uma Introdução a Propriedades, Aplicações e Projeto. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007. 2 v. e Tradução de Arlete Simille Marques

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14842:** Critérios para qualificação e certificação de inspetores de soldagem. Rio de Janeiro, 2003

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais uma Introdução.** 5. ed. Rio de Janeiro: LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1999.

CASTRO, R. M. **Efeito do Aporte Térmico na Soldagem de Reparos Embutidos em Minerodutos.** 2011. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, REDEMAT, Ouro Preto, 2011. Cap. 1.

COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns.** 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008.

COMISSÃO DE NORMAS TÉCNICAS. **N-1590:** Ensaio não-destrutivo-Qualificação de pessoal. Brasil: Petrobras, 2003.

COMISSÃO DE NORMAS TÉCNICAS. **N-1596:** Ensaio não-destrutivo-Líquido penetrante. Brasil: Petrobras, 2003.

COMISSÃO DE NORMAS TÉCNICAS. **N-2370** -Líquido penetrante. Brasil: Petrobras, 2003.

DAVIM, J.P.; MAGALHÃES, A.G. **Ensaaios Mecânicos e Tecnológicos**. 3. ed. Porto: Publindústria, Produção e Comunicação Ltda., 2010.

DURER, C.H. et al. **Ensaio de Líquido Penetrante**. Piracicaba, Escola de Engenharia de Piracicaba, 2010

FAGUNDES, E. J. **Análise da Influência do Ciclo de Recozimento de Esferoidização nas Propriedades Mecânicas do Aço SAE 1050**. 2006. 62 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

FILHO, C. A. **Metalurgia da Soldagem**. Belém: CEFET-PA, 2008.

FORTES, C. **Metalurgia da Soldagem**. ESAB BR, 2004.

MACHADO, I. G. **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**. Porto Alegre: Editado Pelo Autor, 1996.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2011.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J. **Soldagem I: Introdução aos Processos de Soldagem**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2000.

MARTINS, J. F.; SANTOS, D. **Técnicas em soldagem: Processo a Arco Elétrico Eletrodo Revestidos (SMAW)**. Acácia Três Lagoas MS: Criativa, 2011.

MODENESI, P. J. **Fluxo de Calor em Soldagem**. 2003. Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

MODENESI, P. J. **Soldagem I: Normas e Qualificação em Soldagem**. Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, 2000.

OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. Rio de Janeiro: LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora Sa, 1982.

ROHDE, R. A. **Metalografia**: Preparação de Amostras. 3. ed. Santo Ângelo: LEMM Laboratório de Ensaios Mecânicos e Materiais, 2010.

RODRIGUES, R; GONÇALVES, J. C. **Procedimentos de Metodologia Científica**. 8. ed. Lages: Papervest Editora, 2017.

SABESP. **Norma Técnica Interna SABESP**: NTS 034 Soldagem. São Paulo, 1999.

SABESP. **Norma Técnica Interna SABESP**: NTS 035 Consumíveis de soldagem. São Paulo, 1999.

SCHACKELFORD, J. F. **Ciências dos Materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson, 2010. Tradução Daniel Vieira, Revisão Técnica Nilson Cruz

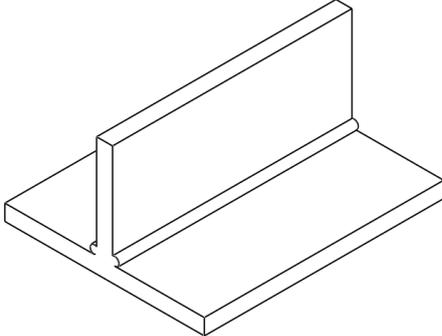
SENAI-ES. Divisão de Assistência às Empresas Departamento Regional do Espírito Santo. **Noções Básicas de Processos de Soldagem e Corte- Mecânica**. Vitória: Senai, 1996.

SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânico de Materiais Metálicos**: Fundamentos Teóricos e Práticos. 5. ed. São Paulo: Blucher, 1982.

VALE, Alan Rafael Menezes do. **Tratamento Térmico**. Belem: Rede E-tec Brasil, 2011. 130 p

WAINER, E.; BRANDI, S.D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem**: Processos e Metalurgia. São Paulo: Blucher Ltda, 2004.

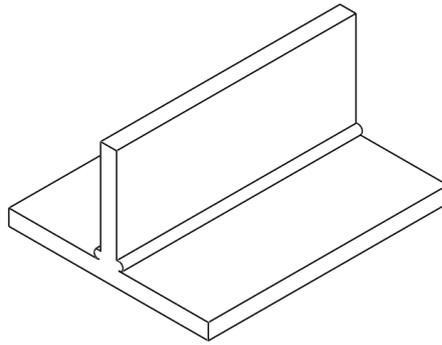
**ANEXO A – EPS MIG**

ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM (EPS)	
Nome da Companhia: CEDUP Industrial de Lages	
EPS No: 01	
Data: 01/11/18	
Processo(s) de soldagem: MIG	
Tipo: Semiautomático	
<b>JUNTAS:</b> Projeto da Junta: Junta T Cobre Junta: Não Outro: CJP- penetração parcial Tamanho da perna da solda: 7mm	<b>CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS:</b> Corrente: CC Polaridade: + Faixa de corrente: 100 A Tensão: 6 volts
<b>METAIS DE BASE:</b> Tipo: ASTM A-36 Faixa de espessura: ¼” Outro: chanfro k	<b>TÉCNICA:</b> Dimensão do bocal: 25mm Dist. Bico de contato-peça: 15 mm Cordão: reto
<b>METAIS DE ADIÇÃO E FLUXOS:</b> Classif. AWS 5.18 ER70S-6 Marca comercial: BELGO Dimensões: $\phi$ 0,8 mm	Número de passes (por lado): 1 passe Eletrodo: Simples Velocidade de soldagem (faixa): 2,74 m/s Posição: Plana
<b>GÁS:</b> Gás(es) de proteção: Argônio Vazão: 10L/min Outro: Pressão 10kgf/cm <sup>2</sup>	
<b>DETALHES DA JUNTA:</b> <div style="text-align: center;">  </div>	

Nº do Passe	Processo	Metal de adição		Corrente		Faixa de Tensão	Velocidade de Soldagem (mm/s)
		Classe	Diâmetro	Pol.	Faixa (A)		
1	MIG	AWS 5.18 ER70S-6	0,8mm	CC+	100	6V	2,74 m/s

**ANEXO B – EPS MAG**

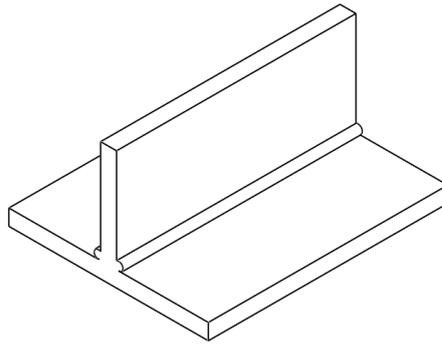
ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM (EPS)	
Nome da Companhia: Mecânica Pró Industria	
EPS No: 02	
Data: 31/10/2018	
Processo(s) de soldagem: MAG	
Tipo: Semiautomático	
<b>JUNTAS:</b> Projeto da Junta: Junta T Cobre Junta: Não Outro: CJP- penetração parcial Tamanho da perna da solda: 7mm	<b>CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS:</b> Corrente: CC Polaridade: + Faixa de corrente: 150 A Tensão: 20 volts
<b>METAIS DE BASE:</b> Tipo: ASTM A-36 Faixa de espessura: ¼” Outro: chanfro k	<b>TÉCNICA:</b> Dimensão do bocal: 25mm Dist. Bico de contato-peça: 15mm Cordão: reto Número de passes (por lado): 1 passe Eletrodo: Simples Velocidade de soldagem (faixa): -- Posição: Plana
<b>METAIS DE ADIÇÃO E FLUXOS:</b> Classif.: AWS 5.18 ER70S-6 Marca comercial: BELGO Dimensões: $\phi$ 1mm Outro:	
<b>GÁS:</b> Gás(es) de proteção: CO <sub>2</sub> Vazão: 10 L/min Outro: Pressão 10kgf/cm <sup>2</sup>	
<b>DETALHES DA JUNTA:</b>	



N° do Passe	Processo	Metal de adição		Corrente		Faixa de Tensão	Velocidade de Soldagem (mm/s)
		Classe	Diâmetro	Pol.	Faixa (A)		
1	MAG	AWS 5.18 ER70S-6	1mm	CC+	150 A	20V	-

## ANEXO C- EPS ARAME TUBULAR COM GAS DE PROTEÇÃO CO<sub>2</sub>

ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM (EPS)	
Nome da Companhia: Mecânica Pró Industria	
EPS No: 03	
Data: 31/10/2018	
Processo(s) de soldagem: Arame Tubular	
Tipo: Semiautomático	
<b>JUNTAS:</b> Projeto da Junta: Junta T Cobre Junta: Não Outro: CJP- penetração parcial Tamanho da perna da solda: 7mm	<b>CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS:</b> Corrente: CC Polaridade: + Faixa de corrente: 150 A Tensão: 20
<b>METAIS DE BASE:</b> Tipo: ASTM A-36 Faixa de espessura: ¼” Outro: chanfro k	<b>TÉCNICA:</b> Dimensão do bocal: 25mm Dist. Bico de contato-peça: 15 mm Cordão: reto
<b>METAIS DE ADIÇÃO E FLUXOS:</b> Classif. AWS 5.20 E71T-1-T9 Marca comercial: BOHLER WELDING Dimensões: $\phi$ 1,2mm Outro: TI 52FD-B	Número de passes (por lado): 1 passe Eletrodo: Simples Velocidade de soldagem (faixa): - Posição: Plana Outro:
<b>GÁS:</b> Gás(es) de proteção: CO <sub>2</sub> Vazão: 10L/min Outro: Pressão 10kgf/cm <sup>2</sup>	
<b>DETALHES DA JUNTA:</b>	



Nº do Passe	Processo	Metal de adição		Corrente		Faixa de Tensão	Velocidade de Soldagem (mm/s)
		Classe	Diâmetro	Pol.	Faixa (A)		
1	Arame Tubular	AWS 5.20 E71T	1,2mm	CC+	150 A	20V	-

**ANEXO D - TABELA JAEGER****J5**

Tenho em mim todos os sonhos do mundo

**J4**

Tudo vale a pena quando a alma não é pequena.

**J3**

Haja ou não deuses, deles somos servos.

**J2**

Para viajar basta existir.

**J1**

As vezes ouço passar o vento; e só de ouvir o vento passar, vale a pena ter nascido

ANEXO E- TABELA MONOCROMÁTICA DE ISHIHARA

