

**Sérgio Oliveira Alexandrino**

**ESTUDO COMPARATIVO DAS  
CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO AÇO  
INOXIDÁVEL AL-6XN (UNS N08367) NA ZONA  
AFETADA PELO CALOR QUANDO SUBMETIDO  
AOS PROCESSOS DE SOLDAGEM TIG E  
ELETRODO REVESTIDO.**

Monografia apresentada ao Programa de  
Educação Continuada em Engenharia da Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para  
conclusão de curso de Especialização.

São Paulo

02/2016

**Sérgio Oliveira Alexandrino**

(Engenheiro Mecânico, UFBa, 2011)

**ESTUDO COMPARATIVO DAS  
CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO AÇO  
INOXIDÁVEL AL-6XN (UNS N08367) NA ZONA  
AFETADA PELO CALOR QUANDO SUBMETIDO  
AOS PROCESSOS DE SOLDAGEM TIG E  
ELETRODO REVESTIDO.**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para conclusão de curso de Especialização.

Área de Concentração: Engenharia da Soldagem

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Duarte Brandi

São Paulo

02/2016

*"Quando penso que cheguei ao meu limite, descubro que tenho  
forças para ir além."*

*Ayrton Senna.*

## **DEDICATÓRIA**

*Dedico este trabalho em memória ao meu sogro*

*Joselito Silva.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus em primeiro lugar por poder está sempre me guiando e me iluminando durante a minha vida.

Agradeço ao meu orientador, Professor Sérgio Duarte Brandi, pelos ensinamentos, explicações, orientações, os quais me fizeram crescer pessoalmente e profissionalmente, me levando a finalização de mais uma etapa de minha vida.

Agradeço a minha esposa Monaliza Barbosa Silva Alexandrino, pelo apoio e dedicação durante esse período e por estar sempre ao meu lado em todos os momentos.

Agradeço aos meus pais por sempre me apoiarem em minhas decisões.

Agradeço aos meus amigos Aleandro Souza pela soldagem das peças, Carlos Ernane pela ajuda com as dúvidas durante o curso e Marcelo Ferrer Santiago pelo apoio.

Agradeço também aos meus amigos Cleiton Cabral, Adriano Araújo e Celso Modesto pela parceria durante a jornada.

## **CURRICULUM VITAE**

Sérgio Oliveira Alexandrino  
Engenheiro Mecânico – CREA 73894 – BA

### **FORMAÇÃO ACADÊMICA**

- Engenharia Mecânica (UFBA – 2011)
- Conhecimentos em Informática: Pacote Microsoft Office, Internet, Autocad, SolidEdge V18 e SAP ;
- Seminário Nacional de Engenharia Mecânica e Industrial: Avanços e Desafios no Novo Cenário Industrial Brasileiro – CREA 2003;

### **IDIOMA**

- INGLÊS – CENTRO DE CULTURA AVANÇADA ANGLO AMERICANA (AVANÇADO)

### **EXPERIÊNCIAS PROFISSIONAIS**

#### **MCE Engenharia S/A**

Período: Agosto/2011 até Julho de 2015

Cargo: Engenheiro Mecânico de Manutenção

#### **DSM Produtos Nutricionais S/A**

Período: Julho/2015 (Atual)

Cargo: Engenheiro Mecânico de Confiabilidade



## **RESUMO**

Esse trabalho foi desenvolvido com o intuito de entender o que ocorre na Zona Afetada pelo calor do material AL-6XN e, através de ensaios, poder avaliar o que ocorre nessa região, comparando dois processos de soldagem, o processo TIG e o eletrodo revestido, empregando-se classificações equivalentes dos consumíveis. Os ensaios executados para desenvolvimento do trabalho foram a análise química para verificar eventuais alterações dos elementos químicos de cada região do corpo de prova, macrografia das juntas, caracterização microestrutural das juntas e avaliação de corrosão intergranular na região do metal de solda, ensaio de tração, ensaio de dobramento lateral e o ensaio de dureza Vickers. Os resultados mostram que o processo de soldagem TIG teve um desempenho superior ao processo de soldagem com eletrodo revestido.



**ABSTRACT**

This work was developed in order to understand what happens in the Heat Affected Zone of a superaustenitic stainless steel AL-6XN and through testing, to assess what happens in this region, comparing two welding process, GTAW process and SMAW, employing equivalent consumables classifications. Tests carried out for development work were: chemical analysis to check any changes of the chemical elements of each specimen region; macrographs of joints; microstructural characterization of the joints; evaluation of intergranular corrosion in the weld metal region; tensile testing; lateral bending test and Vickers hardness test. The results show that the TIG welding process presented better performance than coated electrodes welding process.

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 2.1 Evolução dos processos de soldagem ao longo do tempo.....	03
Figura 2.2 Processo de soldagem com Eletrodo Revestido.....	06
Figura 2.3 Esquema básico de montagem para soldagem pelo Processo Eletrodo Revestido.....	07
Figura 2.4 Influência da polaridade na taxa de fusão e de penetração.....	11
Figura 2.5 Perfil longitudinal de temperatura do eletrodo revestido idealizado por WASZINK e Piena.....	13
Figura 2.6 Fluxograma das etapas de fabricação dos eletrodos revestidos.....	17
Figura 2.7 Máquina de Solda TiG da época.....	23
Figura 2.8 Esquema do processo de soldagem TIG.....	24
Figura 2.9 Esquema da máquina para o processo de soldagem TIG.....	25
Figura 2.10 Tocha TIG refrigerada a ar.....	27
Figura 2.11 Tocha TIG refrigerada a água.....	28
Figura 2.12 Valores de eficiência do arco e dos rendimentos térmicos de alguns processos de soldagem.....	31
Figura 2.13 Curva de temperatura em diferentes pontos de uma junta soldada.....	44
Figura 2.14 Desenho esquemático das regiões de uma junta soldada.....	45
Figura 2.15 Desenho esquemático do fenômeno de crescimento competitivo.....	46
Figura 2.16 Representação esquemática de distribuição de temperatura na ZAC.....	47
Figura 2.17 Crescimento epitaxial e colunar próximos a linha de fusão de junta soldada.....	49
Figura 2.18 Efeito do Níquel a resistência a CST dos fios de aços inoxidáveis 18% - 20% Crem solução a quente de $MgCl_2$ .....	52

Figura 2.19 Efeito do Molibdênio na tenacidade a fratura da liga Fe-Cr-Ni-Mo em solução aquosa aerada de 22% de NaCl, a 105°C.....	53
Figura 4.1 Detalhe do tipo de chanfro da junta que foi utilizada nos experimentos 01 e 02.....	66
Figura 4.2 Região onde foram extraídas as medidas de dureza em cada experimento. Baseado na Norma Petrobras® N-133.....	72
Figura 5.1 Comparativo entre o metal de base, de solda e o consumível no experimento 01 (Eletrodo Revestido).....	74
Figura 5.2 Comparativo entre o metal de base, de solda e o consumível no experimento 02 (TIG).....	76
Figura 5.3 Quantidade de nitrogênio e oxigênio no tubo soldado pelo Processo Eletrodo Revestido (experimento 1).....	77
Figura 5.4 Quantidade de nitrogênio e oxigênio no tubo soldado pelo Processo TIG (experimento 2).....	78
Figura 5.5 Macrografia da junta soldada referente ao experimento 01 (Eletrodo Revestido).....	79
Figura 5.6 Macrografia da junta soldada referente ao experimento 02 (TIG).....	79
Figura 5.7 Microestrutura do metal de base do tubo ASTM A312. Ataque: Kalling's. Aumento: 200X.....	80
Figura 5.8 Modelo orientativo para apresentação das imagens que serão comentadas.....	81
Figura 5.9 Microestrutura entre o metal de solda e a ZAC 1, onde pode-se observar através desses pontos escuros possíveis nitretos na linha de fusão. Ataque com Kalling's. Aumento: 200X.....	82
Figura 5.10 Microestrutura entre o metal de solda e a ZAC 1 ampliada, onde observar-se os pontos escuros que são possíveis nitretos e migração de Ni. Ataque com Kalling's. Aumento: 500X.....	83
Figura 5.11 Microestrutura do metal de base 1 onde foi medido o tamanho do grão. Ataque com Kalling's. Aumento: 200X.....	84
Figura 5.12 Microestrutura da ZAC 1 onde foi medido o tamanho do grão. Ataque com Kalling's. Aumento: 200X.....	84

Figura 5.13 Microestrutura do metal de solda, onde nota-se a estrutura gama e os pontos escuros sendo possíveis nitretos dispersos na matriz. Ataque com Kalling's. Aumento: 200X.....	85
Figura 5.14 Microestrutura do metal de solda após ensaio ASTM A262/14 Prática A. Ataque com ácido oxálico a uma concentração de 10%. Aumento: 200X.....	86
Figura 5.15 Microestrutura que vai do metal de solda para a ZAC 2 até o metal de base. Estrutura de matriz de grão austenítico com migração de possíveis nitretos na linha de fusão e em contorno de grão da ZAC. Ataque com Kalling's. Aumento: 500X.....	87
Figura 5.16 Microestrutura da ZAC 2, onde foi extraída a imagem para medir o tamanho do grão. Ataque com Kalling's. Aumento: 200X.....	88
Figura 5.17 Microestrutura do metal de solda 2, onde foi extraída a imagem para medir o tamanho do grão. Ataque com Kalling's. Aumento: 200X.....	89
Figura 5.18 Microestrutura entre o metal de base 1, ZAC 1 e o metal de solda, onde pode-se observar os possíveis nitretos na linha de fusão. Ataque com Kalling's. Aumento: 200X.....	90
Figura 5.19 Microestrutura ampliada da ZAC 1 e da linha de fusão, onde pode-se observar os possíveis nitretos nos contornos de grão e também uma possível migração do Ni para o metal de solda. Ataque com Kalling's. Aumento: 500X.....	91
Figura 5.20 Microestrutura de uma região do metal de base 1 onde foi medido o tamanho do grão. Ataque com Kalling's. Aumento: 200X.....	92
Figura 5.21 Microestrutura de uma região da ZAC 1 onde foi medido o tamanho do grão. Ataque com Kalling's. Aumento: 200X.....	93
Figura 5.22 Microestrutura sólida gama com possíveis nitretos dispersos na matriz. Ataque com Kalling's. Aumento: 200X.....	94
Figura 5.23 Microestrutura do metal de solda, onde após o ensaio ASTM A262/14 Prática A. Ataque com ácido oxálico. Aumento: 200X.....	95

Figura 5.24 Microestrutura da ZAC 2, onde pode ser visualizado a matriz de grãos austeníticos com migração de possíveis nitretos na linha de fusão. Ataque com Kalling's. Aumento: 200X.....	96
Figura 5.25 Microestrutura da ZAC 2 ampliada na região destacada pela figura 5.24, onde pode-se observar possíveis nitretos na linha de fusão e a migração do Ni. Ataque com Kalling's. Aumento: 500X.....	97
Figura 5.26 Microestrutura de uma região da ZAC 2, onde foi medido o tamanho do grão. Ataque com Kalling's. Aumento: 200X.....	98
Figura 5.27 Microestrutura da região do metal de base 2, onde foi medido o tamanho do grão. Ataque com Kalling's. Aumento: 200X.....	98
Figura 5.28 Resultado do Ensaio de Tração referente aos dois experimentos.....	99
Figura 5.29 Corpo de prova do experimento 01 que sofreu rompimento na solda durante o ensaio de Dobramento Lateral.....	101
Figura 5.30 Medida de dureza Vickers (HV 5) para o experimento 01.....	103
Figura 5.31 Medida de dureza Vickers (HV 5) para o experimento 02.....	104

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 Classificação dos processos de soldagem a partir da natureza da união.....	04
Tabela 2.2 Principais elementos dos revestimentos.....	19
Tabela 2.3 Descrição dos consumíveis para soldagem de aços carbono segundo a AWS.....	21
Tabela 2.4 Requisitos de ensaios para aceitação e classificação de eletrodos segundo a AWS.....	22
Tabela 2.5 Características dos gases de proteção utilizados no processo TIG.....	30
Tabela 2.6 Classificação AWS e a análise química dos eletrodos para soldagem TIG.....	34
Tabela 2.7 Composição química dos eletros nus utilizados para soldar aços carbono.....	35
Tabela 2.8 Composição química dos eletrodos nus utilizados para soldar aços de baixa liga.....	36
Tabela 2.9 Composição química dos eletrodos nus utilizados para soldar aço inoxidável.....	37
Tabela 2.10 Composição química dos eletrodos nus utilizados para soldar aço inoxidável (AWS A 5.9 - 79).....	38
Tabela 2.11 Intensidade das fontes de calor para diferentes processos de soldagem.....	40
Tabela 4.1 Comparação da composição química do tubo do AL-6XN (UNS 08367) utilizado com o exigido pela Norma ASTM A312.....	60
Tabela 4.2 Comparação da composição química do consumível E NiCrMo-3 utilizado com o exigido pela Norma AWS 5.11.....	61
Tabela 4.3 Comparação das propriedades mecânicas do consumível utilizado com o exigido pela Norma AWS 5.11.....	62

Tabela 4.4 Comparação da composição química do consumível Er NiCrMo-3 com o exigido pela Norma AWS 5.14.....	63
Tabela 4.5 Comparação das propriedades mecânicas dos consumível ER NiCrMo-3 com o exigido pela Norma AWS 5.14.....	63
Tabela 4.6 Tipo de processo de soldagem utilizado em cada experimento e a sua identificação nos relatórios.....	61
Tabela 4.7 Variáveis utilizadas no processo de soldagem do experimento 01.....	66
Tabela 4.8 Variáveis utilizadas no processo de soldagem do experimento 02.....	67
Tabela 4.9 Dimensional dos corpos de prova extraídos do experimento 01 (Eletrodo Revestido) para Ensaio de Tração.....	70
Tabela 4.10 Dimensional dos corpos de prova extraídos do experimento 02 (TIG) para Ensaio de Tração.....	70
Tabela 4.11 Dimensional dos corpos de prova extraídos dos experimentos para o Ensaio de Dobramento Lateral.....	71
Tabela 5.1 Tabela comparativa entre o resultado da composição química do tubo soldado através do processo de soldagem (Eletrodo Revestido), metal de base e o consumível.....	73
Tabela 5.2 Tabela comparativa entre o resultado da composição química do tubo soldado através do processo de soldagem (GTAW), metal de base e o consumível.....	75
Tabela 5.3 Medidas da espessura da ZAC 1 do experimento 1 (Eletrodo Revestido).....	80
Tabela 5.4 Medidas da espessura da ZAC 2 do experimento 1 (Eletrodo Revestido).....	86
Tabela 5.5 Medidas da espessura da ZAC 1 do experimento 2 (TIG).....	88
Tabela 5.6 Medidas da espessura da ZAC 2 do experimento 2 (TIG).....	94

Tabela 5.7 Resultado do ensaio de resistência a Tração para os dois experimentos.....	98
Tabela 5.8 Resultado do ensaio de Dobramento Lateral para os dois experimentos.....	99
Tabela 5.9 Resultado do ensaio de Dureza Vickers (HV 5) para o experimento 01(Eletrodo Revestido).....	101
Tabela 5.10 Resultado do ensaio de Dureza Vickers (HV 5) para o experimento 02 (TIG).....	102



**LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS**

AWS: American Welding Society

ASME: American Society of Mechanical Engineers

ASTM: American Society for Testing and Materials

CA: Corrente alternada

CC: Corrente contínua

CST: Corrosão Sob Tensão

GTAW: Gas-Shielded Tungsten Arc Welding

H: Energia de soldagem

I: Corrente de soldagem

$I_b$ : Corrente de base

$I_p$ : Corrente de pico

N-133: Norma Petrobras

RV: Relação volumétrica de revestimento

SMAW: Shielded Metal Arc Welding

$T_b$ : Tempo de base

$T_p$ : Tempo de pico

U: Tensão de soldagem

V: Velocidade de soldagem

ZAC: Zona Afetada pelo Calor

ZF: Zona Fundida

ZL: Zona de ligação

## **SUMÁRIO**

DEDICATÓRIA.....	III
AGRADECIMENTOS .....	IV
CURRICULUM VITAE.....	V
RESUMO .....	VII
ABSTRACT .....	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABELAS.....	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS .....	XVI
SUMÁRIO.....	XVIII
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1 HISTÓRIA DA SOLDAGEM.....	2
2.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM.....	4
2.2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM COM ELETRODO REVESTIDO.....	5
2.2.1.1 HISTÓRIA .....	5
2.2.1.2 PROCESSO .....	5
2.2.1.3 EQUIPAMENTO.....	6
2.2.1.3.1 FONTE DE ENERGIA.....	7
2.2.1.3.2 ALICATE PARA FIXAÇÃO DO ELETRODO OU DOS PORTA- ELETRODOS .....	8
2.2.1.3.3 CABOS DE LIGAÇÃO .....	9
2.2.1.3.4 PINÇA PARA LIGAÇÃO DA PEÇA.....	9
2.2.1.4 PARÂMETROS DE SOLDAGEM – VARIÁVEIS QUE AFETAM O PROCESSO.....	9
2.2.1.4.1 DIÂMETRO DO ELETRODO .....	9
2.2.1.4.2 POLARIDADE.....	10
2.2.1.4.3 INTENSIDADE DA CORRENTE.....	12
2.2.1.4.4 COMPRIMENTO DO ARCO .....	13
2.2.1.4.5 VELOCIDADE DE SOLDAGEM .....	14
2.2.1.5 APLICAÇÃO .....	14
2.2.1.6 VANTAGENS .....	14
2.2.1.7 DESVANTAGENS.....	15
2.2.1.8 CONSUMÍVEIS – FABRICAÇÃO, CARACTERÍSTICAS E PRINCIPAIS FUNÇÕES .....	16
2.2.1.8.1 FABRICAÇÃO .....	16
2.2.1.8.2 CARACTERÍSTICAS E FUNÇÃO DOS REVESTIMENTOS.....	18
2.2.1.9 CLASSIFICAÇÃO DOS ELETRODOS .....	20
2.2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM TIG. ....	23
2.2.2.1 HISTÓRIA .....	23
2.2.2.2 PROCESSO .....	24
2.2.2.3 EQUIPAMENTO.....	25
2.2.2.3.1 FONTE DE ENERGIA.....	26
2.2.2.3.2 UNIDADE DE ALTA FREQUÊNCIA.....	26
2.2.2.3.3 RESERVATÓRIO DE GÁS PARA SOLDAGEM.....	26
2.2.2.3.4 TOCHA.....	26

2.2.2.4 PARÂMETROS DE SOLDAGEM – VARIÁVEIS QUE AFETAM O PROCESSO. ....	29
2.2.2.4.1 TIPOS DE JUNTAS .....	29
2.2.2.4.2 TIPO DE GÁS DE PROTEÇÃO .....	30
2.2.2.4.3 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS.....	31
2.2.2.5 ENERGIA DE SOLDAGEM.....	32
2.2.2.6 CLASSIFICAÇÃO E SELEÇÃO DE CONSUMÍVEIS .....	33
2.2.2.7 APLICAÇÃO .....	38
2.2.2.8 VANTAGENS.....	38
2.2.2.9 DESVANTAGENS .....	39
2.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA SOLDAGEM.....	40
2.3.1 INTRODUÇÃO .....	40
2.3.2 ENERGIA DE SOLDAGEM.....	41
2.3.3 CICLO TÉRMICO DA SOLDAGEM.....	42
2.3.4 MACROESTRUTURAS DE UMA JUNTA SOLDADA .....	44
2.3.4.1 ZONA FUNDIDA (ZF).....	45
2.3.4.2 ZONA AFETADA PELO CALOR .....	46
2.3.4.3 ZONA DE LIGAÇÃO .....	49
2.3.4.4 METAL DE BASE .....	50
2.4 AÇOS INOXIDÁVEIS.....	50
2.4.1 EFEITO DOS ELEMENTOS DE LIGA.....	50
2.4.1.1 CROMO (Cr).....	51
2.4.1.2 NÍQUEL (Ni) .....	51
2.4.1.3 MOLIBDÊNIO (Mo) .....	52
2.4.1.4 CARBONO (C).....	54
2.4.1.5 NITROGÊNIO (N).....	54
2.4.2 PRINCIPAIS GRUPOS DE AÇOS INOXIDÁVEIS .....	55
2.4.2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS .....	55
2.4.2.2 AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS .....	56
2.4.2.3 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS.....	56
2.4.2.4 AÇOS INOXIDÁVEIS SUPERAUSTENÍTICOS .....	57
2.4.2.5 AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX .....	58
3. OBJETIVO.....	59
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	60
4.1 METAL DE BASE. ....	60
4.2 CONSUMÍVEL DE SOLDAGEM. ....	61
4.3 EXECUÇÃO DA SOLDAGEM.....	64
4.3.1 EXPERIMENTOS .....	64
4.3.2 PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM.....	65
4.3.2.1 NORMA ASME IX .....	65
4.3.2.2 EQUIPAMENTOS DE SOLDAGEM .....	66
4.3.2.3 VARIÁVEIS UTILIZADAS NA SOLDAGEM.....	66
4.3.2.5 CONTROLE DAS VARIÁVEIS DE SOLDAGEM .....	68
4.4 COMPOSIÇÃO QUÍMICA. ....	68
4.4.1 TEOR DE NITROGÊNIO E OXIGÊNIO .....	68
4.5 CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA. ....	69
4.5.1 MACROGRAFIAS.....	69
4.5.2 MICROSCOPIA ÓPTICA .....	69

4.6 ENSAIOS MECÂNICOS.....	70
4.6.1 ENSAIO DE TRAÇÃO.....	70
4.6.2 ENSAIO DE DOBRAMENTO LATERAL .....	71
4.6.3 ENSAIO DE DUREZA .....	72
5.RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	73
5.1 ANÁLISE QUÍMICA.....	73
5.1.1 RESULTADO DA ANÁLISE QUÍMICA POR ESPECTROMETRIA DE EMIÇÃO ÓPTICA .....	73
5.1.2 RESULTADO DA ANÁLISE QUÍMICA VIA CROMATOGRAFIA GASOSA..	76
5.2 CARACTERIZAÇÃO METALOGRAFICA .....	79
5.2.1 MACROGRAFIA.....	79
5.2.2 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL POR MICROSCOPIA ÓPTICA	80
5.2.2.1 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO EXPERIMENTO 01 (ELETRODO REVESTIDO) .....	81
5.2.2.2 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO EXPERIMENTO 02 (TIG). .....	89
5.3 ENSAIOS MECÂNICOS.....	99
5.3.1 ENSAIO DE TRAÇÃO .....	99
5.3.2 ENSAIO DE DOBRAMENTO LATERAL .....	100
5.3.3 ENSAIO DE DUREZA .....	102
6.CONCLUSÃO .....	106
7.SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	108
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	109
ANEXO I – RELATÓRIO DOS ENSAIOS.....	113
ANEXO II – CERTIFICADO .....	114

## **1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.**

Esse trabalho foi desenvolvido devido aos problemas que ocorriam em uma fábrica relacionada a soldagem com tubulação de aço superaustenítico. Fiquei muito interessado em realizar um estudo, devido a sua composição química e as suas características mecânicas, que achei muito interessantes, apesar de já ter trabalhado com outras ligas com Hastelloy, Tantaló, Zircônio e Titânio.

Outro ponto interessante foi a sua classificação quanto aos aços inoxidáveis, por se tratar de um aço inoxidável superaustenítico.

Durante a escolha do tema, foi observado poucos trabalhos com relação a esse material, além de poucas avaliações da Zona Afeta pelo Calor, e muitos ligados a questão de corrosão no metal de solda.

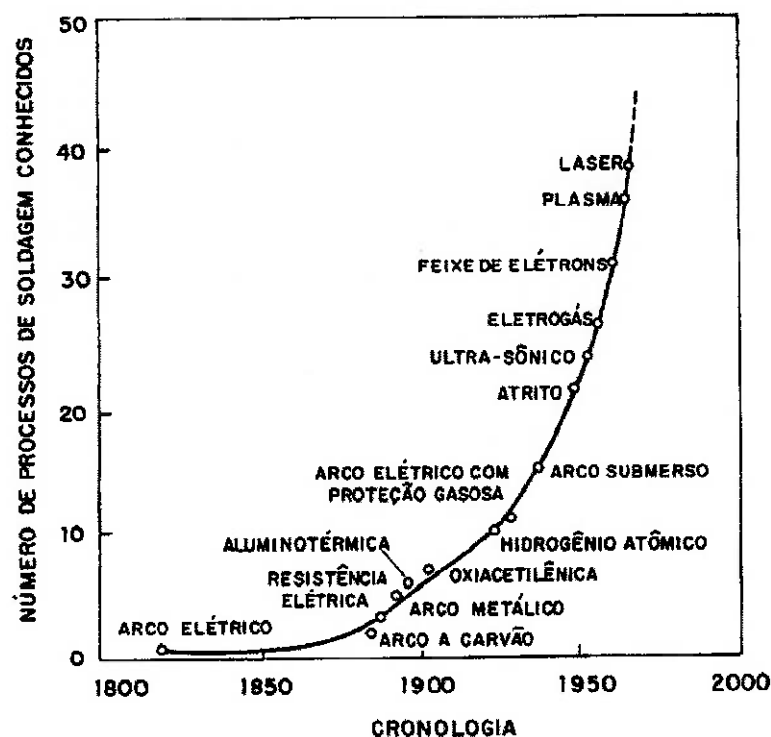
Sendo assim, após muitas pesquisas foi decidido fazer uma comparação entre os dois processos de soldagem mais utilizados na área de manutenção industrial, avaliando as características mecânicas na Zona Afeta pelo Calor, porém utilizando um consumível que alguns já vinham tentando, que foi o Inconel 625.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.**

### **2.1 HISTÓRIA DA SOLDAGEM.**

Soldagem é o processo de junção entre dois materiais metálicos, onde é utilizado uma fonte de energia para produção de calor, com ou sem aplicação de pressão durante a atividade.

O processo de soldagem teve o seu início na década de 1800, mas não foi obtido muito sucesso. Em 1907, porém, começaram a surgir os fundamentos para eliminar o oxigênio ao redor do cordão de solda, melhorando assim as propriedades do metal. Os grandes crescimentos dos processos de soldagem ocorreram durante a Segunda Guerra Mundial, em busca de novas tecnologias para melhorar a qualidade e a produtividade destes processos. Ao longo do tempo os processos foram sendo aperfeiçoados, outros criados, conforme figura 2.1.

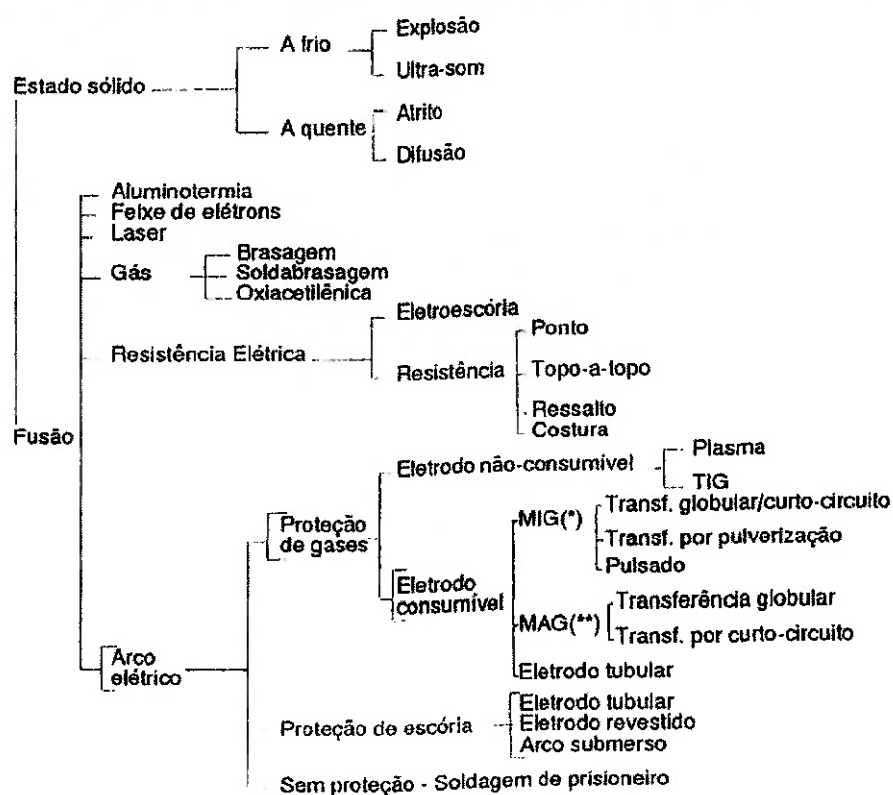


**Figura 2.1** – Evolução dos processos de soldagem ao longo do tempo<sup>(1)</sup> [1].

Atualmente existem muitos processos de soldagem, que, devido a ampla quantidade de processos, podem ser classificados de diversas formas. Contudo, a classificação a partir da natureza da união, conforme descrito na tabela 2.1, é uma forma bem detalhada para se compreender e ter uma pequena noção de cada processo.



**Tabela 2.1** – Classificação dos processos de soldagem a partir da natureza da união. [1].



Observ.: (\*) com argônio ou hélio.

(\*\*) com argônio, oxigênio, CO<sub>2</sub> ou misturas desses gases.

## **2.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM.**

Dentre os processos de soldagem, o trabalho se concentrará em dois processos que são: Processos de Soldagem com Eletrodo Revestido ou Shielded Metal Arc Welding (SMAW) e o processo de soldagem TIG ou Gas Tungsten Arc Welding (GTAW).

## **2.2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM COM ELETRODO REVESTIDO.**

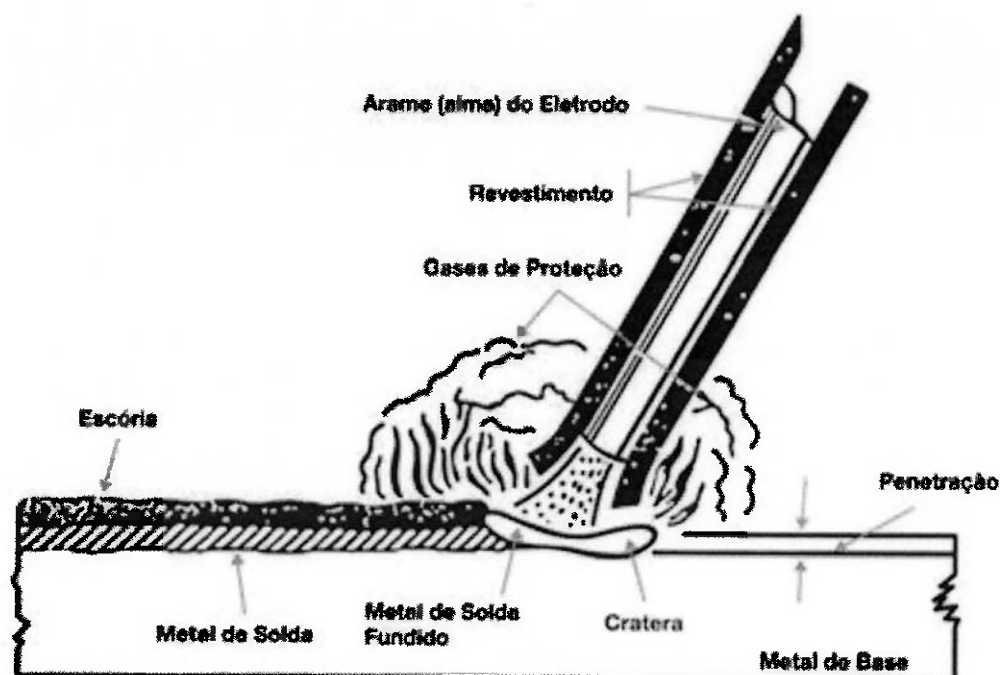
### **2.2.1.1 HISTÓRIA**

Esse processo de soldagem foi desenvolvido em 1800 por Humphry Dave, porém em 1880, russos desenvolveram o processo de soldagem pelo eletrodo de carvão.

Em 1904, Oscar Kjellberg, inventa o primeiro eletrodo revestido, com a função de facilitar a abertura do arco e aumentar a sua estabilidade. Logo após essa invenção é fundada a ESAB, que está até hoje como uma das maiores empresas na área da tecnologia da soldagem.

### **2.2.1.2 PROCESSO**

A soldagem por eletrodo revestido ocorre quando é criado um arco elétrico entre a ponta do eletrodo revestido e o metal de base. Esse arco é criado com a aproximação do eletrodo revestido, ocorrendo assim o aquecimento das duas partes provocados pela corrente elétrica.



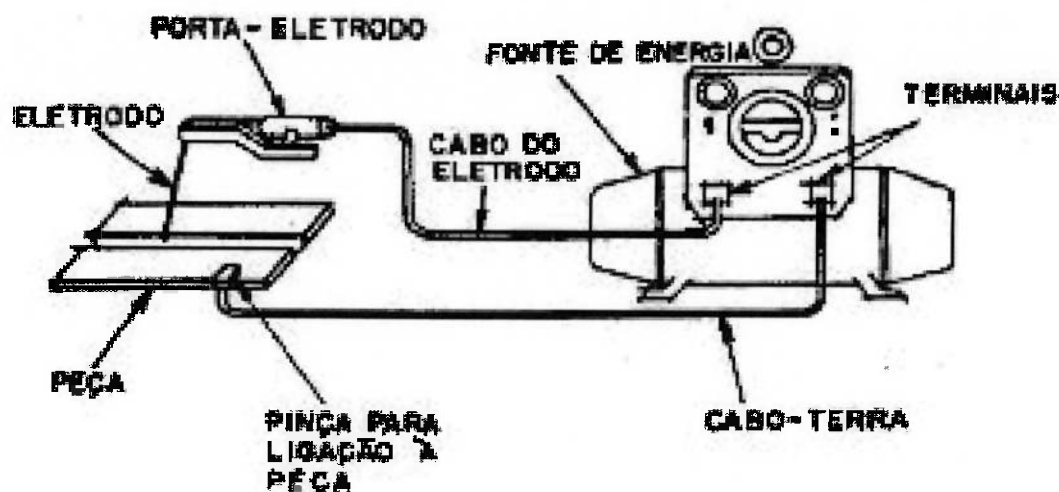
**Figura 2.2** – Processo de soldagem com Eletrodo Revestido. Baseado na ref. [1].

Esse processo de soldagem ainda é muito utilizado, devido ao baixo custo e qualificação de mão de obra, mesmo apresentando baixo rendimento, quando comparado aos outros processos.

Os próximos tópicos servirão para entendermos a função de cada parte do equipamento, as suas variações, formas de controle, aplicações, vantagens e desvantagens e os consumíveis.

### 2.2.1.3 EQUIPAMENTO

Para realização do processo de soldagem por eletrodo revestido, são necessários os seguintes equipamentos, conforme figura 2.3:



**Figura 2.3** – Esquema básico de montagem para soldagem pelo processo Eletrodo Revestido. Baseado na ref. [1].

#### 2.2.1.3.1 FONTE DE ENERGIA

O ideal para o processo de soldagem é que tenhamos sempre uma corrente constante e uniforme para não termos variações no comprimento e na tensão do arco.

Os tipos de energia que podemos ter como configuração são as transformadoras convencionais, transformadoras retificadoras, inversores e geradores.

As fontes de energia disponíveis para esse processo podem ser na forma de corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA), sendo que a de corrente alternada provoca uma instabilidade no arco devido a alternância da polaridade.

O gerador é um equipamento muito utilizado em locais de difícil acesso a fontes de energia elétrica. Esse equipamento pode produzir tanto corrente

continua como corrente alternada. É um equipamento que possui custo elevado tanto no que se refere a locação quanto a compra, porém em determinados trabalhos, a sua utilização se faz necessária. Atualmente já existem equipamentos de soldagem que possuem geradores embutidos na máquina, facilitando assim o transporte e o trabalho.

Durante esse processo de soldagem devemos controlar a variação da tensão do arco e a variação da corrente de soldagem para obter um cordão de solda com pouco respingo e uma boa reabertura de arco conforme a calibração da máquina e o material solicitado durante o trabalho.

#### **2.2.1.3.2 ALICATE PARA FIXAÇÃO DO ELETRODO OU DOS PORTA-ELETRODOS**

O alicate para fixação dos eletrodos é dimensionado de acordo com o diâmetro do eletrodo a ser utilizado e em consequência a sua corrente de trabalho, então quanto maior for o diâmetro do eletrodo, possivelmente mais robusto e pesado será o porta eletrodo.

Atualmente no mercado utilizamos dois tipos de alicate de fixação, que é por garra ou de pinça. Os do tipo pinça são os mais utilizados, devido a melhor fixação e consequentemente melhor resultado. Além disso, existe também o sistema de acionamento para fixação que pode ser por mola ou estilo mandril, mas o usual no mercado é o por mola, devido a sua facilidade de fixação.

### **2.2.1.3.3 CABOS DE LIGAÇÃO**

Os cabos de soldagem podem ser fabricados em cobre ou alumínio. Eles tem a função de conduzir corrente elétrica, independente da direção do fluxo. Esses cabos devem possuir uma boa isolamento e uma excelente resistência a trabalhos para ambientes agressivos.

### **2.2.1.3.4 PINÇA PARA LIGAÇÃO DA PEÇA**

Esse acessório existe em dois tipos: a pinça e o garra. O mais utilizado é o tipo garra, devido a sua facilidade para fixação nas peças, porém o contato elétrico é menor já que a pressão a ser exercida é menor também.

### **2.2.1.4 PARÂMETROS DE SOLDAGEM – VARIÁVEIS QUE AFETAM O PROCESSO.**

Durante o processo de soldagem por eletrodo revestido, os parâmetros que devemos levar em consideração são os seguintes:

#### **2.2.1.4.1 DIÂMETRO DO ELETRODO**

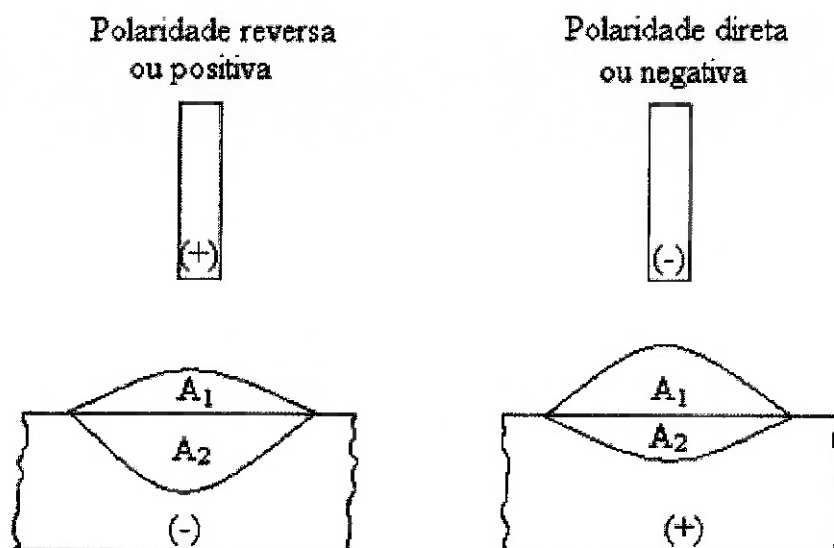
Para uma escolha correta do diâmetro do eletrodo, temos que verificar a espessura do metal de base, a posição de soldagem e o tipo de junta a ser soldada.

O diâmetro do eletrodo pode variar de 1mm à 8mm, porém, sob encomenda, podemos obter em outras dimensões.

Na escolha do diâmetro do eletrodo deve-se ter sempre o cuidado com a espessura do metal de base, pois caso o eletro revestido possua um diâmetro muito elevado e o metal de base possua uma baixa espessura, durante o processo de soldagem pode haver uma perfuração do eletrodo revestido no metal de base, tudo isso provocado pela sua elevada energia de soldagem para gerar a poça de fusão.

#### **2.2.1.4.2 POLARIDADE**

A polaridade tem grande influência nesse processo de soldagem, pois quando se quer garantir uma excelente penetração durante o trabalho, utiliza-se a polaridade inversa. Quando queremos ter uma taxa de deposição maior, utiliza-se a corrente direta. Em alguns casos, onde precisa-se utilizar eletrodos de maior diâmetro e correntes mais elevadas, trabalha-se em corrente alternada.



**Figura 2.4** – Influência da polaridade na taxa de fusão ( $A_1$ ) e de penetração ( $A_2$ ) [2].

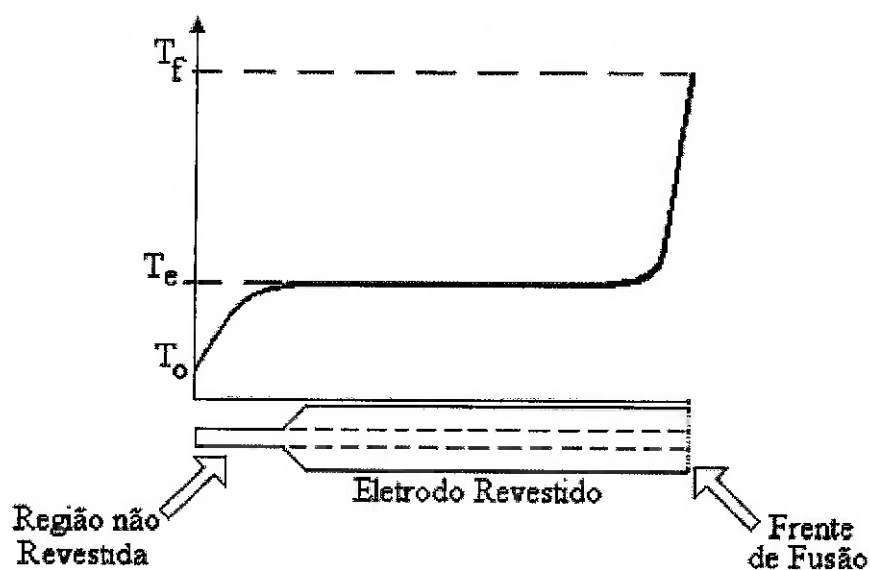
As reações que ocorrem no polo negativo são mais complexas que aquelas que ocorrem no polo positivo. O polo positivo é muito mais sensível a qualquer material que afeta a emissão de elétrons. Normalmente a queda do polo positivo é maior do que a do polo negativo, resultando em altas taxas de fusão, mas em alguns casos envolvendo materiais termiônicos, a taxa de fusão com polaridade negativa pode ser menor que a encontrada com a polaridade positiva [Lernewich, 1987; Welding Handbook, 1987 e 1991]. Conforme dito por Ter Bergem 1952, a polaridade influencia de forma complexa a taxa de fusão[2].



### **2.2.1.4.3 INTENSIDADE DA CORRENTE**

A intensidade da corrente também é um fator muito relevante para esse processo, pois é através dela que controlamos a penetração no metal de base, a taxa de deposição e fusão e a largura do cordão.

Contudo, devemos ter o maior cuidado durante a calibração da máquina nesse momento, pois se quisermos aumentar muito alguns desse parâmetros, deveremos verificar junto ao fabricante a corrente máxima especificada para aquele consumível, caso contrário, se aumentarmos absurdamente a corrente para melhorar o nosso processo, poderemos danificar o arame e o revestimento, devido ao calor provocado pelo efeito joule durante a soldagem, conforme é verificado Na figura 2.5, que mostra a distribuição da temperatura no eletrodo. O aquecimento excessivo no arame, altera as propriedades físicas e elétricas do aço e o revestimento tende a perder umidade. A medida que o teor de calor aumenta no eletrodo, o teor de componentes orgânicos no revestimento responsáveis pela proteção do metal fundido, diminui (Stern, 1948) e consequentemente o metal depositado perde as suas características (Stern, 1948; Bracarense et al, 1994B e 1997) [2].



**Figura 2.5** – Perfil longitudinal de temperatura do Eletrodo Revestido idealizado por Waszink e Piena em 1985. Baseado na ref. [2].

#### 2.2.1.4.4 COMPRIMENTO DO ARCO

Durante o processo de soldagem, deve-se ficar atentos ao arco, pois um arco muito pequeno, em virtude de uma regulação incorreta da corrente, pode ocasionar uma fixação do eletrodo ao metal de base inúmeras vezes, gerando assim um cordão estreito e com um reforço excessivo. Para um arco muito longo, deve-se ter o cuidado com a proteção da poça de fusão.

#### **2.2.1.4.5 VELOCIDADE DE SOLDAGEM**

Durante o processo de soldagem deve-se ter cuidado com a velocidade, pois uma velocidade de deposição alta poderá gerar como consequência um cordão estreito. Uma velocidade muito baixa, porém, dificulta o controle da poça de fusão e ainda pode-se ter uma penetração ruim, por isso deve-se ter um arco ligeiramente a frente da poça de fusão.

#### **2.2.1.5 APLICAÇÃO**

Esse tipo de processo de soldagem, apesar de ser antigo e manual, ainda é muito utilizado em oficinas com fabricação, como em estaleiros, em trabalhos subaquáticos e na área de manutenção industrial, onde o local e a posição não admitem outro tipo de processo. Existe uma vasta quantidade de materiais que pode ser utilizado, como aço carbono de baixa e alta liga, aço inoxidável, ferro fundido, alumínio, níquel e suas ligas.

#### **2.2.1.6 VANTAGENS**

Abaixo algumas vantagens relativas a esse processo de soldagem:

- Equipamento simples, portátil e barato;

- Não necessita de gases e fluxos externos durante o processo;
- Baixo custo de manutenção;
- Baixa qualificação da mão de obra;
- Baixo investimento;
- Controle da composição química do revestimento do eletrodo;
- Processo versátil, pois pode-se utilizar tanto para soldagem, como para cortes e furos em peças;
- Rápida atuação no campo em caso de emergência durante manutenções, devido a simplicidade do equipamento.

#### **2.2.1.7 DESVANTAGENS**

Existem também algumas desvantagens para utilização desse processo, como:

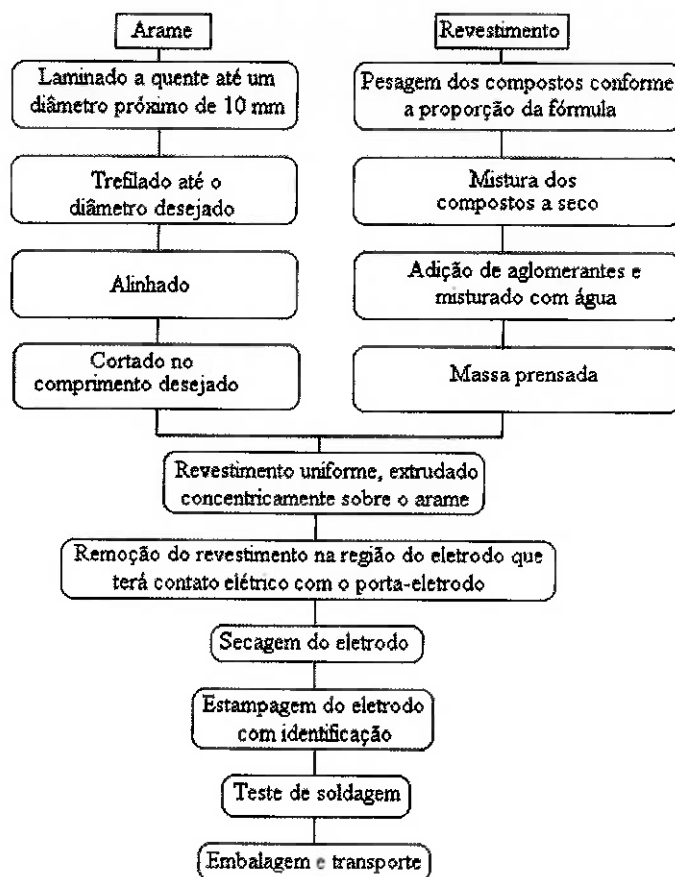
- Processo altamente manual, dependo da experiência do soldador;
- Baixo rendimento quando comparada a outros processos;
- Exige limpeza após cada passe de soldagem;
- Baixa qualidade do cordão, quando comparado a outros processos;
- Baixo controle operacional;
- Grande possibilidade de falhas na junta soldada, como mordeduras e porosidade;

- Processo não pode ser aplicado a materiais com baixo ponto de fusão, como chumbo, por exemplo, ou muito reativos como o titânio.

#### **2.2.1.8 CONSUMÍVEIS – FABRICAÇÃO, CARACTERÍSTICAS E PRINCIPAIS FUNÇÕES**

##### **2.2.1.8.1 FABRICAÇÃO**

A fabricação dos eletrodos revestidos é muito complexa devido a diversidade de materiais que podem ser utilizados. Os eletrodos da soldagem normalmente são produzidos através do processo de extrusão, sob pressão do revestimento sob a alma. Abaixo é apresentado o processo de produção simplificado do eletrodo revestido.



**Figura 2.6** – Fluxograma das etapas de fabricação dos Eletrodos Revestidos. Baseado na ref. [2].

Durante a fabricação dos eletrodos revestidos a relação entre a seção transversal do arame e do revestimento deve ser levada em consideração, definida como “relação volumétrica do revestimento (RV) ” (Boniszewisk, 1979A), sendo assim determinada pela seguinte fórmula matemática:

$$RV = \frac{(D^2 - d^2)}{d^2}$$

Onde: D – diâmetro do eletrodo;  
d – diâmetro do arame.

Podemos obter um alto valor de RV, com elevada proporção de pó de ferro, de forma que o eletrodo deposite de 7 a 9 kg/h de metal de solda

(Bonizewisk, 1979A). Foi mostrado que a qualidade do metal de solda pode aumentar e o teor de nitrogênio diminuir, aumentando a espessura do revestimento, aumentando RV (Mijasaka, 1982). RV e a concentricidade do revestimento têm uma forte influência na estabilidade do arco elétrico (Donchenko et al, 1978; Pokhodnya et al, 1985A) e no modo de transferência metálica (Pokhodnya et al, 1985B) do eletrodo revestido[2].

#### **2.2.1.8.2 CARACTERÍSTICAS E FUNÇÃO DOS REVESTIMENTOS**

O revestimento do eletrodo consiste em uma mistura de diferentes materiais minerais ou orgânicos, como óxidos, combinados em proporções adequadas, porém com finalidades específicas.

Dentre as funções dos revestimentos, seguem as principais:

- Estabilização do arco elétrico;
- Formação de gases protetores na poça de fusão;
- Formação de escória e atuação como agente fluxantes (i.e., desoxidantes);
- Adição de componentes e ligas metálicas ao depósito;
- Melhorar as propriedades do revestimento.

**Tabela 2.2** – Principais elementos dos revestimentos (Jackson, 1973) [2].

Elementos	Fórmula	Funções
Alumina	$Al_2O_3$	Formar escória; Estabilizar o arco
Argila	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$	Ajudar na extrusão; Formar escória
Cal	$CaO$	Agente fluxante;
Calcin	$CaCO_3$	Controlar a viscosidade da escória;
Fluorita	$CaF_2$	Controlar a basicidade da escória;
Celulose	$(C_6H_{10}O_5)_n$	Reduzir a viscosidade da escória
Ferro-Manganês	Fe-Mn	Gerar gases de proteção;
Ferro-Silício	Fe-Si	Ajudar na extrusão
Hematita	$Fe_2O_3$	Controlar a composição química;
Magnetita	$Fe_3O_4$	Promover a desoxidação;
Silicato de Lítio	$Li_2SiO_3$	Promover a desoxidação;
Silicato de Potássio	$K_2SiO_3$	Controlar a composição química;
Titanato de Potássio	$2K_2O \cdot 2TiO_2$	Promover a oxidação; Formar escória
Feldspar	$K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$	Promover a oxidação; Formar escória
Mica	$K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$	Atuar como agente aglomerante
Dolomita	$MgO \cdot CaO \cdot 2(CO_2)$	Estabilizar o arco;
Silicato de Sódio	$Na_2SiO_3$	Atuar como agente aglomerante
Silica	$SiO_2$	Estabilizar arco; Formar escória
Rutila	$TiO_2$	Formar escória; Agente fluxante
Pó de Ferro	-	Ajudar na extrusão; Estabilizar o arco
Zircônio	$ZrO_2$	Gerar gases; Agente fluxante
		Atuar como agente aglomerante;
		Estabilizar o arco
		Formar escória;
		Controlar a viscosidade
		Reduzir a viscosidade da escória;
		Estabilizar o arco
		Aumentar a taxa de deposição e o
		rendimento do eletrodo; Estabilizar o arco
		Estabilizar o arco;
		Facilitar a destacabilidade da escória

A concentração do de um elemento químico de metal de solda é função da quantidade deste elemento originalmente presente no sistema de soldagem (Heuschkel, J., 1969). Seis fontes de elementos químicos na soldagem com eletrodo revestido podem ser identificadas: revestimento, alma do eletrodo, metal de base, arco elétrico, superfícies do metal de base e do eletrodo (Bracarense, 1994A) [2].



### **2.2.1.9 CLASSIFICAÇÃO DOS ELETRODOS**

Os eletrodos revestidos estão classificados como celulósico, rutilico, básico e ácido.

Os eletrodos celulósicos possuem mais de 20% de materiais celulósicos, uma grande quantidade de substâncias inflamáveis no revestimento que se decompõem produzindo um grande volume de gás (hidrogênio, CO e CO<sub>2</sub>), protegendo assim a poça de fusão. Esse tipo de eletrodo quando comparado a outros possui baixa taxa de deposição e alta tensão de arco. Dependendo da composição do revestimento, podemos ter durante o processo de soldagem uma excessiva liberação de hidrogênio provocado pela decomposição de hidrocarbonetos, aumentando assim a tendência de fissuração a frio. A máquina deve ser ajustada para corrente contínua e polaridade reversa, devido à baixa estabilidade do arco. Em alguns casos, onde há adição de estabilizadores, pode-se ajustar o processo utilizando corrente alternada ou corrente contínua com polaridade direta.

Os eletrodos rutilicos possuem mais de 20% de óxido de Titânio, conforme a tabela 2.13 da Norma AWS A5.01-78, obtido através da adição de areia de rutilo ou ilmenita. Estes componentes oferecem ao eletrodo alta estabilidade do arco, com tensões comparativamente baixas, pouca quantidade de respingos e bom aspecto superficial do cordão (Wainer, E.,2013; Brandi, D., S.,2013; Melo, F.,2013). Esses eletrodos possuem boa resistência mecânica e a

ductilidade. Durante o processo de soldagem a máquina pode ser ajustada para utilização de corrente contínua ou corrente alternada.

**Tabela 2.3** – Descrição dos consumíveis para soldagem de aços carbono, segunda a AWS [1].

Classificação	Posições (1)	Corrente	Propriedades Mecânicas (2)			Revestimentos / Características
			L.R. (3)	L.E (4)	$\lambda$ (5)	
E-6010	P, V, S, H	CC+	430	340	22	Altamente celulósico, com silicato de sódio. Alta penetração. Aspecto superficial pobre. Uso geral em tanques, tubulações, navios, etc.
E-6011	P, V, S, H	CC+,CA	430	340	22	Altamente celulósico, com silicato de potássio. Características semelhantes ao E-6010, com penetração inferior.
E-6012	P, V, S, H	CC-,CA	460	380	17	Rutilico com silicato de sódio. Média penetração, densa escória, bom aspecto superficial. Uso geral.
E-6013	P, V, S, H	CC+,CC-,CA	460	380	17	Rutilico com silicato de potássio. Semelhante ao E-6012, com penetração tendendo a ser inferior. Em pequenos diâmetros é especificamente recomendado para chapas finas.
E-6020	HF	CC-,CA	430	340	22	À base de óxido de ferro, com compostos de manganês e silício. Penetração média/alta. Aspecto superficial razoável. Uso em vasos de pressão, bases de máquinas e estruturas.
E-6022	P	CC-,CC+,CA	460	NE	NE	Semelhante ao E-6020, indicado para soldas monopasse, com aspecto superficial inferior.
E-6027	P, HF	CC-,CA	430	340	22	Semelhante ao E-6020, com adição de pó de ferro, média penetração, bom aspecto superficial, qualidade radiográfica levemente inferior. Uso em seções espessas.
E-7014	P, V, S, H	CC-,CC+,CA	500	420	17	Semelhante ao E-6012 e E-6013, com adição de pó de ferro.
E-7015	P, V, S, H	CC+	500	420	22	Básico com silicato de sódio. Moderada penetração, aspecto razoável, p/ pobre, dependendo da qualidade do metal base. Requer maior habilidade. Uso onde propriedades mecânicas e qualidade do depósito são essenciais.
E-7016	P, V, S, H	CC+,CA	500	420	22	Semelhante ao E-7015, com silicato de potássio e pó de ferro.
E-7018	P, V, S, H	CC+,CA	500	420	22	Semelhante ao E-7016, com alta adição de pó de ferro.
E-7024	P, HF	CC-,CC+,CA	500	420	17	Semelhante ao E-6012 e E-6013, com grande adição de pó de ferro. Alta taxa de deposição; uso geralmente em soldas de filete.
E-7027	P, HF	CC-,CA	500	420	22	Semelhante ao E-6027. Uso onde propriedades mecânicas superiores são necessárias.
E-7028	P, HF	CC+,CA	500	420	22	Semelhante ao E-7018, com maior adição de pó de ferro.
E-7048	P, S, H, VD	CC+,CA	500	420	22	Semelhante ao E-7016. Uso especificamente para soldagem na posição vertical descendente.

**NOTAS:**

- (1) P=Plana, V=Vertical, S=Sobrecabeça, H=Horizontal, HF=Horizontal (Filetes)  
VD=Vertical descendente.
- (2) NE=Não especificado
- (3) Limite de resistência, MPa
- (4) Limite de elasticidade, MPa
- (5) Alongamento %

Os eletrodos básicos possuem grande quantidade de Carbonato de Cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e de Fluoreto de Cálcio ( $\text{CaF}_2$ ). Esse tipo de eletrodo possui uma característica marcante pela baixa liberação de hidrogênio durante o processo de soldagem. Devido a essa característica, esse eletrodo possui melhores propriedades mecânicas e grande resistência a trincas a frio. Esse material requer alguns cuidados para manter o baixo teor de hidrogênio, como a manutenção e a secagem seguindo os parâmetros do fabricante. Para esse processo e utilizando esse tipo de eletrodo, a máquina pode ser ajustada para corrente contínua e polaridade reversa e corrente alternada.

Os eletrodos ácidos são baseados em óxidos de manganês, de ferro e em silicatos, conforme a tabela 2.12 da Norma AWS A5.01-78. Uma das grandes características de tipo de eletrodo é a formação de escória. Não é recomendado para teores de carbono acima de 0,25% e com enxofre acima de 0,05%, conforme a tabela 2.12 da Norma AWS A5.01-78. Durante o processo de soldagem a máquina pode ser ajustada para corrente contínua ou alternada. Possuem alta taxa de deposição e penetração.

**Tabela 2.4** – Requisitos de ensaios para a aceitação e classificação de eletrodos segundo a AWS (14-22) [1].

ENSAIO	A5.1 Aços-carbono	A5.3 Alumínio e ligas	A5.4 Aços inoxidáveis	A5.5 Aços de baixa liga	A5.6 Cobre e ligas	A5.11 Níquel e ligas	A5.13 Revesti- mentos	A5.15 Ferro fundido	A5.21 Revestimentos compostos
Análise química	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Tração	X	X	X	X	X	X			
Dobramento		X			X	X			
Impacto	X			X					
Fleios X	X			X	X	X			
Umidade	(*)			X					

(\*) Requerido para revestimentos básicos

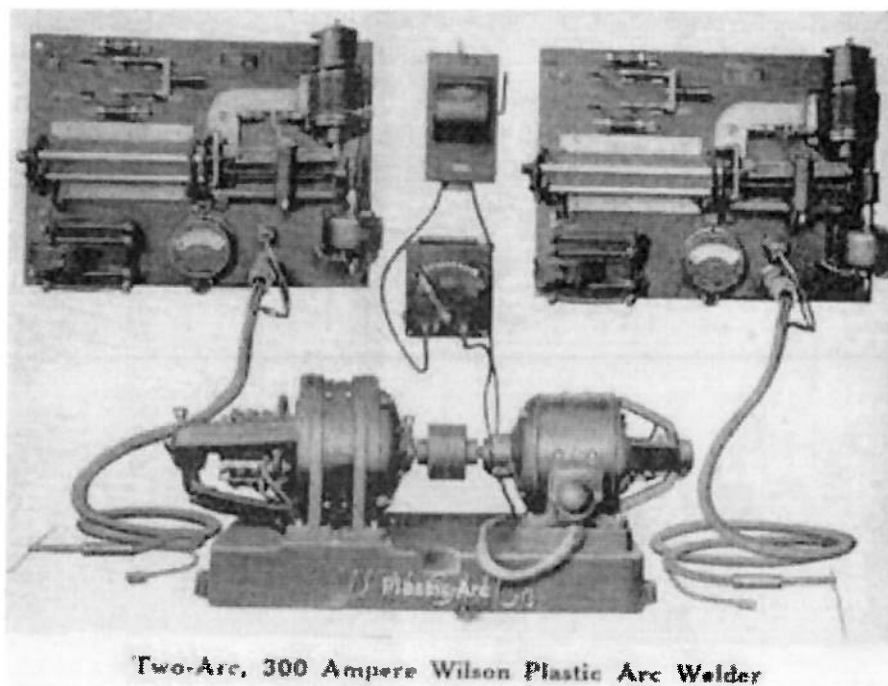
## 2.2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM TIG.

### 2.2.2.1 HISTÓRIA

O processo de soldagem TIG ou Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), foi desenvolvido em 1930, devido o desejo de soldar materiais não ferrosos, como ligas de alumínio e magnésio. Para tanto utilizaram gás inerte engarrafado.

Em 1941, porém, foi que o processo ficou completo, pois foi a partir desse período que passaram a utilizar a corrente alternada com adição de alta frequência, tornando assim o processo perfeito. Antes disso o processo era utilizado com corrente contínua.

Esse processo foi desenvolvido devido a necessidade de se encontrar um processo de soldagem de baixo custo e com uma boa qualidade na junta soldada na indústria da aviação no período da Segunda Guerra Mundial.

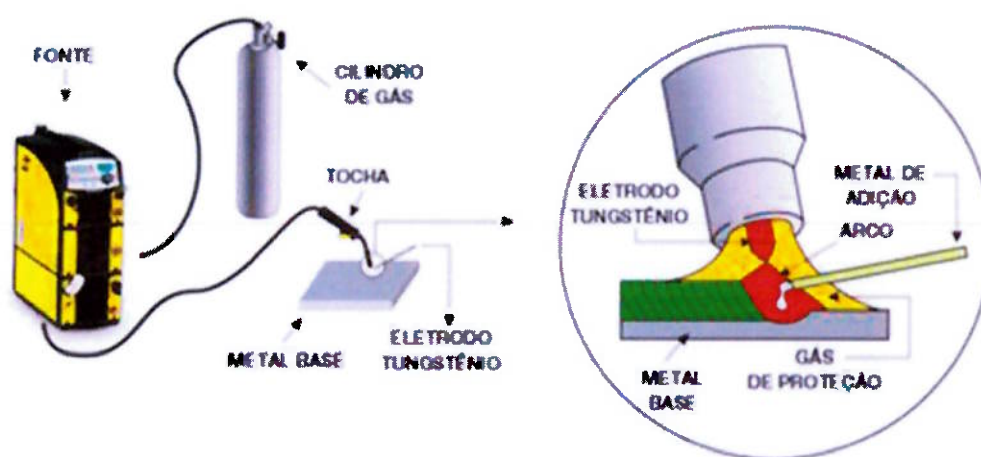


**Figura 2.7** – Máquina de solda TIG da época [3].

No ano de 1950 passou a ser utilizado o argônio no lugar do Hélio, por questões de custo, e mais na frente veio outras inovações como a inclusão de corrente pulsada e as fontes de energia tipo inversoras, com a finalidade de melhorar ainda mais o processo.

#### 2.2.2.2 PROCESSO

Esse processo de soldagem ocorre através de um arco elétrico, produzindo assim uma fonte de calor entre o eletrodo não consumível de tungstênio e a poça de soldagem. Durante o processo a poça de fusão, o eletrodo e parte do cordão de solda são protegidos pelo gás de proteção que é soprado pelo bocal da tocha. Pode ser executado de duas maneiras, uma sendo com adição de metal de solda a outra sem a adição de metal de solda, que é chamado de Solda Autógena.

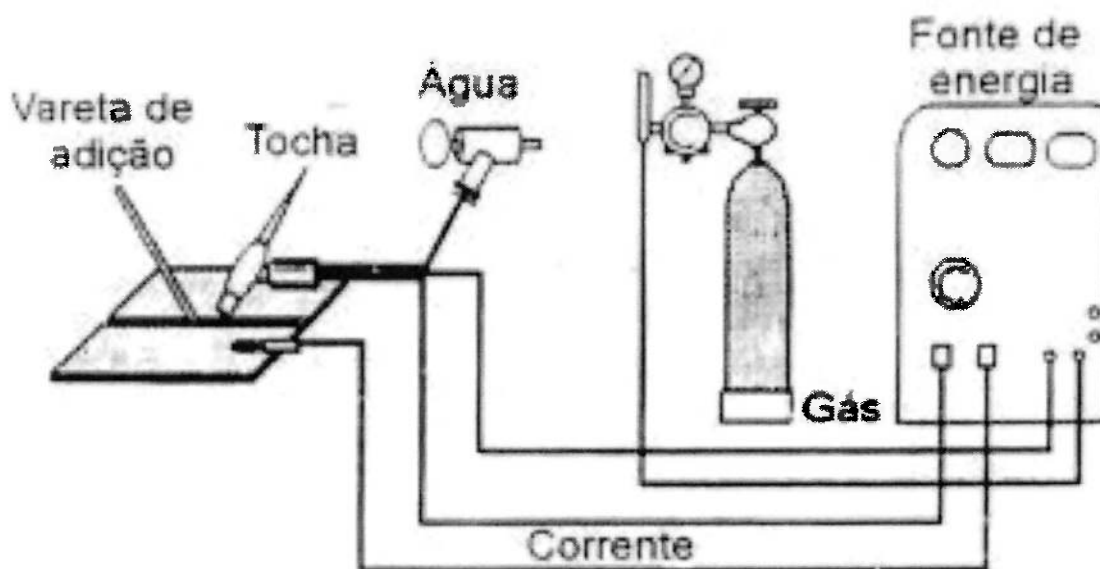


**Figura 2.8** – Esquema do processo de soldagem TIG [4].

Os próximos tópicos serão para entendermos melhor como funciona o equipamento, as suas características e funções, variáveis do processo, aplicações, vantagens e desvantagens e consumíveis.

### 2.2.2.3 EQUIPAMENTO

Para realização do processo de soldagem é requerido alguns equipamentos. Os equipamentos utilizados nesse processo são os seguintes, conforme figura 2.8:



**Figura 2.9** – Esquema da máquina para o processo de soldagem TIG [1].

#### **2.2.2.3.1 FONTE DE ENERGIA**

Deve ser sempre de corrente constante, podendo utilizar um gerador, transformador e retificador. Para melhorar o controle do processo pode-se utilizar o pedal para controle da corrente de soldagem.

#### **2.2.2.3.2 UNIDADE DE ALTA FREQUÊNCIA**

Equipamento de extrema importância para o processo de soldagem, quando se deseja soldar com corrente alternada.

#### **2.2.2.3.3 RESERVATÓRIO DE GÁS PARA SOLDAGEM**

Recipiente geralmente cilíndrico que é utilizado para o armazenamento de gás e possui reguladores de pressão e de vazão. Os reguladores de vazão são importantes para ajuste do parâmetro da vazão de acordo com o material que será aplicado e soldado. Outro fator importante também é que, em casos de misturas gasosas, será preciso realizar ajustes.

#### **2.2.2.3.4 TOCHA**

Equipamento que faz a condução da corrente elétrica até a ponta do eletrodo de tungstênio e também conduz o gás inerte para a zona de soldagem.

A tocha funciona como suporte para o eletrodo de tungstênio que é fixada através de uma pinça regulável, que deve ser especificada de acordo com o diâmetro do eletrodo.

As tochas podem ser refrigeradas a ar ou a água. O sistema das tochas refrigeradas funciona através do argônio que passa por uma mangueira internamente na tocha. A tocha refrigerada a ar, está limitada a uma utilização com a corrente de 200A e para chapas finas e com o clipo de trabalho baixo. Esse modelo de tocha é o mais utilizado hoje em dia, devido ao seu baixo custo.



**Figura 2.10** – Tocha TIG refrigerada a ar. [5].

As tochas refrigeradas a água possuem um sistema de refrigeração composto por radiador, mangueira, bomba e reservatório. Esse sistema é empregado onde se possui trabalhos com o equipamento utilizando correntes na faixa de 200A à 450A. Para esse sistema, é necessário sempre utilizar água



limpa para evitar entupimento dos canais de refrigeração da tocha. Esse dispositivo proporciona um maior conforto para o soldador, porém, em relação a outra tocha, é um pouco mais pesada e o sistema acaba encarecendo o equipamento.



**Figura 2.11** – Tocha TIG refrigerada a água. [6].

Nas tochas temos também como acessório o bocal, que pode ser em cerâmica ou metálico. Ele tem a função de direcionar o gás de proteção para a poça de fusão. Os bocais em cerâmicas são recomendados para soldagem utilizando corrente até 250A.

#### **2.2.2.4 PARÂMETROS DE SOLDAGEM – VARIÁVEIS QUE AFETAM O PROCESSO.**

Segundo a Norma ASME Seção IX, as variáveis para qualificação no procedimento de soldagem são as seguintes: metal de base, metal de adição, preaquecimento, tipo de gás de proteção, tipo de junta, posições de soldagem, características elétricas e técnicas de soldagem.

##### **2.2.2.4.1 TIPOS DE JUNTAS**

Para obtermos uma boa junta soldada, devemos ter atenção com os seguintes pontos: espessura do metal de base, grau de penetração, preparo do chanfro, metal de adição, posição de soldagem e acesso.

O tipo da junta está muito relacionado com o tipo do material ou a espessura, pois em cada caso poderemos ter uma junta com chanfro diferente, para aumentar a eficiência térmica.

A penetração da junta soldada também está ligada com o tipo da junta, porém podemos variar essas condições, alterando a composição química dos gases de proteção. Abaixo uma tabela com as características dos gases de proteção.

**Tabela 2.5** – Características dos gases de proteção utilizados no processo TIG [1].

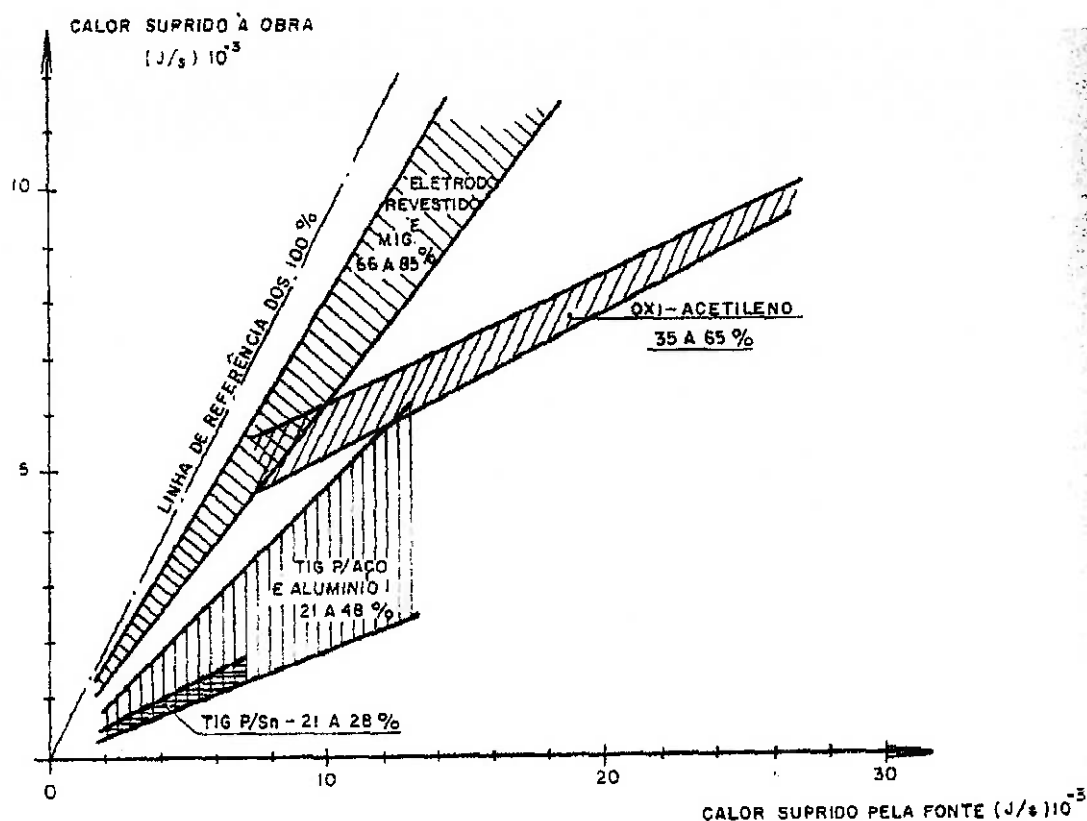
Argônio	Hélio
Baixa tensão de arco	Elevada tensão de arco
Menor penetração	Maior penetração
Adequado à soldagem de chapas finas	Adequado à soldagem de grandes espessuras e materiais de condutibilidade térmica elevada
Soldagem manual devido ao pequeno gradiente de tensão na coluna do arco (6 V/cm)	Soldagem automática
Maior ação de limpeza	Menor ação de limpeza
Arco mais estável	Arco menos estável
Fácil abertura do arco	Dificuldade na abertura do arco
Utilizado em CC e CA	Geralmente CCPD com eletrodo de tungstênio toriado
Custo reduzido	Custo elevado
Vazão para proteção pequena	Vazão para proteção de 2 a 3 vezes maior que a de argônio
Maior resistência à corrente de ar lateral	Menor resistência à corrente de vento

A distorção é controlada pela junta através da sua área. Uma junta com chanfro em U tem, mantidas as outras variáveis constantes, menor distorção que com uma junta com chanfro em V (Wainer,E.,2013; Brandi,D.,S.,2013; Melo, F.,2013).

#### 2.2.2.4.2 TIPO DE GÁS DE PROTEÇÃO

Os gases mais utilizados nesse processo de soldagem são o Hélio, o Argônio, ou a mistura dos dois, porém ambos sob uma pureza de 99,99%. O teor de umidade também é um fator importante e que deve ser controlado.

A função do gás de proteção no processo de soldagem TIG é excluir os gases que podem contaminar a poça de fusão. A escolha do gás no processo é importante, pois ele influenciará na velocidade de soldagem.



**Figura 2.12** – Valores de eficiência do arco e dos rendimentos térmicos de alguns processos de soldagem. [1].

#### 2.2.2.4.3 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS

Na soldagem em corrente contínua com polaridade direta (eletrodo negativo) o arco se comporta de uma forma onde terá um aquecimento do metal de base em uma proporção de 70% e de 30% no eletrodo, aproximadamente, e em decorrência disso terá uma junta soldada com maior penetração, porém com um cordão estreito.

Para uma soldagem utilizando corrente contínua com polaridade reversa (eletrodo positivo), devido ao fluxo dos elétrons, o metal de base será aquecido a uma proporção de 30% e de 70% no eletrodo, aproximadamente,

ocasionando assim uma baixa penetração, porém uma maior deposição do material (alargamento do cordão soldado). Outro ponto importante nesse tipo de ajustagem é que o eletrodo deverá possuir um diâmetro maior ou uma corrente mais baixa, para evitar o superaquecimento e em consequência a fusão do eletrodo e a contaminação da poça de fusão.

Na soldagem em corrente alternada com onda senoidal o arco se comporta de forma alternada, em um momento com eletrodo com polaridade positiva e em outro momento com polaridade negativa, fazendo com que durante o processo ocorra desligamento do arco. Por essas características, nesse processo a penetração sempre será intermediária.

Soldagem em corrente contínua pulsada: é um tipo de ajustagem no equipamento que nos permite variar o nível de corrente. Uma das vantagens dessa ajustagem é que se permite um escoamento mais rápido do calor produzido pela energia de soldagem.

Soldagem em corrente alternada com onda quadrada: esse tipo de ajustagem possui o mesmo comportamento que a ajustagem de uma corrente alternada com onda senoidal, porém o tempo de extinção do arco é bem menor do que o da onda senoidal.

#### **2.2.2.5 ENERGIA DE SOLDAGEM**

O tipo de ajustagem da corrente para o procedimento de soldagem TIG, terá alteração na energia de soldagem transmitida para peça. Para verificar

essa alteração de valores, pode ser feito os seguintes cálculos através das equações:

Corrente contínua:

$$H = \frac{60.V.I}{v}$$

Onde,

H = Energia de soldagem (j/cm)

V = Tensão de soldagem (V)

I = Corrente de soldagem (A)

V = Velocidade de soldagem (cm/min)

Para corrente contínua pulsada, teremos:

$$H = \frac{60.V.(I_p.t_p + I_b.t_b)}{v.(t_p + t_b)}$$

Onde,

I<sub>p</sub> = Corrente de pico (A)

T<sub>p</sub> = tempo de corrente de pico (s)

I<sub>b</sub> = Corrente de base (A)

T<sub>b</sub> = Tempo de corrente de base (s)

#### **2.2.2.6 CLASSIFICAÇÃO E SELEÇÃO DE CONSUMÍVEIS**

O eletrodo, no processo TIG, teoricamente é um eletrodo não consumível. Segundo a classificação AWS, conforme tabela abaixo, tem-se uma

variedade de eletrodos e cada um para um determinado parâmetro de soldagem.

**Tabela 2.6** – Classificação AWS e a análise química dos eletrodos para soldagem TIG (AWS A5.12 – 69) [1].

Classificação AWS	Composição			
	Tungstênio (mín.)	Tória	Zircônio	Outros (máx.)
EWP	99,5	-	-	0,5
EWTh-1	98,5	0,8 - 1,2	-	0,5
EWTh-2	97,5	1,7 - 2,2	-	0,5
EWTh-3 (*)	98,95	0,35 - 0,55	-	0,5
EWZr	99,2	-	0,15 - 0,40	0,5

(\*) Eletrodo de tungstênio contendo ao longo de todo o comprimento uma faixa lateral com 1,0 a 2,0% de tória.

Para escolha do eletrodo nu, podemos consultar a norma AWS A5.18-79.

**Tabela 2.7** – Composição química dos eletrodos nus utilizados para soldar aços-carbono (AWS A5.18 – 79).[1].

Classificação AWS(a)	Composição química (% em peso) <sup>(b)(c)</sup>					
	C	Mn	Si	Ti	Zr	Al
ER 70S - 2	0,07 máx. a 0,15	0,90 a 1,40	0,40 a 0,70	0,05 a 0,15	0,02 a 0,12	0,05 a 0,15
ER 70S - 3	0,06 a 0,15	0,90 a 1,40	0,45 a 0,70	-	-	-
ER 70S - 4	0,07 a 0,15	1,00 a 1,50	0,65 a 0,80	-	-	-
ER 70S - 5	0,07 a 0,19	0,90 a 1,40	0,30 a 0,60	-	-	0,50 a 0,90
ER 70S - 6	0,07 a 0,15	1,40 a 1,85	0,80 a 1,15	-	-	-
ER 70S - 7	0,07 a 0,15	1,50 a 2,00 (d)	0,50 a 0,80	-	-	-
ER 70S - G	Sem requisitos de análise química, por acordo entre fabricante e usuário.					

Observações:

- (a) O eletrodo nu, classificado anteriormente como E 70S-1B, está classificado atualmente como ER 80S-D2 na AWS A5.28-79.
- (b) Em todos os tipos especificados  $P \leq 0,025\%$ ;  $S \leq 0,035\%$ ;  $Cu \leq 0,5\%$ ; esta porcentagem de cobre inclui tanto o cobre residual do aço como o do revestimento do eletrodo nu.
- (c) Níquel, cromo, molibdênio e vanádio podem estar presentes, mas não devem ser adicionados intencionalmente.
- (d) O teor de manganês pode exceder de 2%; se isso ocorrer, o teor de carbono deve ser reduzido de 0,01% para cada aumento de 0,05% Mn.

AWS A5.28-79 para os aços de baixa liga, conforme tabela abaixo.



**Tabela 2.8** – Composição química dos eletrodos nus utilizados para soldar aços de baixa liga (AWS A5.28 – 79). [1].

Composição química (% em peso) <sup>(a)</sup>								
Classificação AWS	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V	Cu <sup>(b)</sup>
Eletrodos nus tipo aço Cr-Mo								
ER80S-B2	0,07 a 0,12	0,40 a 0,70	0,40 a 0,70	0,20	1,20 a 1,50	0,40 a 0,65	-	0,35
ER80S-B2L	0,05				-	-		
ER90S-B3	0,07 a 0,12				2,30 a 2,70	0,90 a 1,20	-	
ER90S-B3L	0,05				-	-		
Eletrodos nus tipo aço ao níquel								
ER80S-Ni1	0,12	1,25	0,40 a 0,80	0,80 a 1,10	0,15	0,35	0,05	0,35
ER80S-Ni2				2,00 a 2,75	-	-	-	
ER80S-Ni3				3,00 a 3,75	-	-	-	
Eletrodos nus tipo aço Mn-Mo								
ER80S-D2 <sup>(c)</sup>	0,07 a 0,12	1,50 a 2,10	0,50 a 0,80	0,15	-	0,40 a 0,60	-	0,50
Eletrodos nus de outros aços de baixa liga								
ER100S-1	0,08	1,25 a 1,80	0,20 a 0,50	1,40 a 2,10	0,30	0,25 a 0,55	0,05	0,25
ER110S-1	0,12		0,20 a 0,80	0,80 a 1,25		0,20 a 0,55		0,35 a 0,65
ER110S-1	0,09	1,40 a 1,80	0,20 a 0,55	1,80 a 2,60	0,50	0,25 a 0,55	0,04	0,25
ER120S-1	0,10		0,25 a 0,80	2,00 a 2,80	0,80	0,30 a 0,65	0,03	
ERXXS-G	por acordo entre fabricante e usuário <sup>(d)</sup>							

**Observações:**

(a) Os eletrodos nus dos tipos de aço Cr-Mo, ao níquel e Mn-Mo, o teor de fósforo e enxofre deve ser  $\leq 0,025\%$ .

Os eletrodos nus de outros aços de baixa liga têm o teor de fósforo e enxofre  $\leq 0,010\%$ , e titânio, zircônio e alumínio  $\leq 0,10\%$ .

Quando a especificação indica apenas um valor e não uma faixa, o valor indicado representa o máximo permitido.

Outros elementos adicionados intencionalmente devem ser citados.

A análise química deve ser feita para os elementos especificados; se aparecem outros, deve-se fazer o rastreamento deles e o somatório deve ser  $\leq 0,50\%$ .

(b) A porcentagem de cobre inclui tanto o cobre residual do aço como o do revestimento do eletrodo nu.

(c) Essa composição equivale a E 70S-1B da especificação AWS A5 18-69.

(d) Para corresponder aos requisitos da classificação G, o eletrodo nu deve ter ou 0,50% de Ni, ou 0,30% de Cr ou 0,20% de Mo.

A AWS A5.9-79 para soldagem com metais em aço inoxidável.

**Tabela 2.9** – Composição química dos eletrodos nus utilizados para soldar aço inoxidável (AWS A5.9 – 79). [1].

Classificação AWS	Análise química (%)						
	C	Cr	Ni	Mo	Nb + Ta (b)	Mn	Si
ER-308L (a,f)	0,08	19,5 a 22,0	9,0 a 11,0	-	-	1,0 a 2,5	0,25 a 0,80
ER-308L (a,f)	0,03	19,5 a 22,0	9,0 a 11,0	-	-	-	-
ER-309 (f)	0,12	23,0 a 25,0	12,0 a 14,0	-	-	-	-
ER-310	0,08 a 0,15	25,0 a 28,0	20,0 a 22,5	-	-	-	-
ER-312	0,15	28,0 a 32,0	8,0 a 10,5	-	-	-	-
ER-316 (f)	0,08	18,0 a 20,0	11,0 a 14,0	2,0 a 3,0	-	-	-
ER-316L (f)	0,03	18,0 a 20,0	11,0 a 14,0	2,0 a 3,0	-	-	-
ER-317	0,08	18,5 a 20,5	13,0 a 15,0	3,0 a 4,0	-	-	-
ER-318	0,08	18,0 a 20,0	11,0 a 14,0	2,0 a 3,0	8xC a 1,0 máx.	-	-
ER-320 (e)	0,07	19,0 a 21,0	32,0 a 36,0	2,0 a 3,0	8xC a 1,0 máx.	2,5	0,80
ER-321 (c)	0,08	18,5 a 20,5	9,0 a 10,5	0,5 máx.	-	1,0 a 2,5	0,25 a 0,80
ER-347 (a,f)	0,08	19,0 a 21,5	9,0 a 11,0	-	10xC a 1,0 máx.	-	-
ER-348 (a)	0,08	19,0 a 21,5	9,0 a 11,0	-	10xC a 1,0 máx.	-	-
ER-349 (d)	0,07 - 0,13	19,0 a 21,5	8,0 a 9,5	0,35 a 0,65	1,0 a 1,4	-	-
ER-410	0,12	11,5 a 13,5	0,6	0,6	-	0,6	0,50
ER-420	0,25 a 0,40	12,0 a 14,0	0,6	-	-	-	-
ER-430	0,10	15,0 a 17,0	0,8	-	-	-	-
ER-502	0,10	4,5 a 8,0	0,8	0,45 a 0,65	-	-	0,25 a 0,60

Notas:

1. Em todos os casos  $S \leq 0,03\%$ ;  $P \leq 0,04\%$ ; para o eletrodo nu ER-320; nos demais casos,  $P \leq 0,03\%$ .
2. A análise química deve ser feita para todos os elementos especificados. Caso a presença de outros elementos seja acusada, seus valores devem ser determinados e o teor total deles deve ser  $\leq 0,7\%$ .
3. Os valores únicos de composição indicam a máxima concentração do elemento.

(a) Cromo mínimo =  $1,9 \times (\% \text{ Ni})$  quando especificado

(b) 0,10% Ta máx.

(c) Titânio =  $9 \times (\% \text{ C})$  a 1,0% máximo

(d) 0,10 a 0,30% Ti e 1,25 a 1,75%W

(e) 3,0 a 4,0% Cu

(f) Esses eletrodos podem ter teores mais elevados de silício. A composição química base não é alterada, com o silício variando de 0,5 a 1,0%. Deve-se, nesse caso, adicionar o símbolo Si à classificação do eletrodo nu.

Por fim a qual se enquadra o material que será desenvolvido o trabalho que é a Norma SFA-5.4, idêntica à AWS A5.4-81.

**Tabela 2.10** – Composição química dos eletrodos nus utilizados para soldar aço inoxidável AWS A5.9 – 79. [1].

Classificação AWS	Análise química (%)						
	C	Cr	Ni	Mo	Nb + Ta (b)	Mn	Si
ER-308L (a,f)	0,08	19,5 a 22,0	9,0 a 11,0	-	-	1,0 a 2,5	0,25 a 0,60
ER-308L (a,f)	0,03	19,5 a 22,0	9,0 a 11,0	-	-	-	-
ER-309 (f)	0,12	23,0 a 25,0	12,0 a 14,0	-	-	-	-
ER-310	0,08 a 0,15	25,0 a 28,0	20,0 a 22,5	-	-	-	-
ER-312	0,15	28,0 a 32,0	8,0 a 10,5	-	-	-	-
ER-316 (f)	0,08	18,0 a 20,0	11,0 a 14,0	2,0 a 3,0	-	-	-
ER-316L (f)	0,03	18,0 a 20,0	11,0 a 14,0	2,0 a 3,0	-	-	-
ER-317	0,08	18,5 a 20,5	13,0 a 15,0	3,0 a 4,0	-	-	-
ER-318	0,08	18,0 a 20,0	11,0 a 14,0	2,0 a 3,0	8xC a 1,0 máx.	-	-
ER-320 (a)	0,07	19,0 a 21,0	32,0 a 36,0	2,0 a 3,0	8xC a 1,0 máx.	2,5	0,60
ER-321 (c)	0,08	18,5 a 20,5	9,0 a 10,5	0,5 máx.	-	1,0 a 2,5	0,25 a 0,60
ER-347 (a,f)	0,08	19,0 a 21,5	9,0 a 11,0	-	10xC a 1,0 máx.	-	-
ER-348 (a)	0,08	19,0 a 21,5	9,0 a 11,0	-	10xC a 1,0 máx.	-	-
ER-349 (d)	0,07 - 0,13	19,0 a 21,5	8,0 a 9,5	0,35 a 0,65	1,0 a 1,4	-	-
ER-410	0,12	11,5 a 13,5	0,6	0,6	-	0,6	0,50
ER-420	0,25 a 0,40	12,0 a 14,0	0,6	-	-	-	-
ER-430	0,10	15,0 a 17,0	0,6	-	-	-	-
ER-502	0,10	4,5 a 6,0	0,6	0,45 a 0,65	-	-	0,25 a 0,60

Notas:

1. Em todos os casos  $S \leq 0,03\%$ ;  $P \leq 0,04\%$ ; para o eletrodo nu ER-320; nos demais casos,  $P \leq 0,03\%$ .
2. A análise química deve ser feita para todos os elementos especificados. Caso a presença de outros elementos seja acusada, seus valores devem ser determinados e o teor total deles deve ser  $\leq 0,7\%$ .
3. Os valores únicos de composição indicam a máxima concentração do elemento.

(a) Cromo mínimo =  $1,9 \times (\% \text{ Ni})$  quando especificado

(b) 0,10% Ta máx.

(c) Titânio =  $9 \times (\% \text{ C})$  a 1,0% máximo

(d) 0,10 a 0,30% Ti e 1,25 a 1,75%W

(e) 3,0 a 4,0% Cu

(f) Esses eletrodos podem ter teores mais elevados de silício. A composição química base não é alterada, com o silício variando de 0,5 a 1,0%. Deve-se, nesse caso, adicionar o símbolo Si à classificação do eletrodo nu.

## 2.2.2.7 APLICAÇÃO

É um dos processos mais utilizados para soldagem em tubos na indústria aeroespacial e nuclear devido a sua facilidade de controle do processo e pela utilização de vários materiais de adição.

## 2.2.2.8 VANTAGENS

As vantagens desse processo de soldagem são as seguintes:

- Não possui respingos ou escória, quando comparado com outros processos a arco elétrico;
- Pode ser utilizada com ou sem adição de metal;
- Maior controle do processo de soldagem;
- Utiliza-se de fontes de energia de baixo custo;
- Pode ser utilizada em quase todos os metais, inclusive em metais dissimilares;
- Pode ser empregado em todas as posições de soldagem e tipos de junta.

#### **2.2.2.9 DESVANTAGENS**

Esse processo de soldagem também tem as suas limitações:

- Procedimento que exige um trabalho em local fechado e protegido;
- Baixa produtividade em casos de utilização para soldagem em chapas com espessuras maior que 10mm
- Alto custo de produção, quando comparado ao processo de soldagem com eletrodo revestido;
- Exige uma maior qualificação da mão-de-obra.

## **2.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA SOLDAGEM.**

### **2.3.1 INTRODUÇÃO**

Nos processos de soldagem, para que ocorra a junção das duas peças, é utilizado o calor como principal fonte de energia. Para que a junta soldada seja de boa qualidade, devemos ter um controle no que se diz com relação a quantidade e intensidade da fonte de calor (tabela 2.11). Essa fonte de calor possui elevadas temperaturas concentradas, que ao serem deslocada, resultam na formação do cordão de solda.

**Tabela 2.11** – Intensidade das fontes de calor para diferentes processos de soldagem. [7].

Processo de Soldagem	Intensidade da Fonte (GW/m <sup>2</sup> )
Eletrodo Revestido (SMAW)	0,005 - 0,5
Processo MIG/MAG (GMAW)	0,005 - 0,5
Soldagem Plasma (PAW)	0,005 – 50
Feixe de Elétrons/Laser (EBW/LBW)	50 – 5000

Obs: 1 GW = 1x10<sup>9</sup> W

Esta transferência de calor da fonte para a junta soldada gera alterações na microestrutura localizada no cordão de solda e nas regiões vizinhas do metal de base, que depende dessa variável para transformação de todo material que está sendo soldado. Essa variação de temperatura pode resultar em defeitos

indesejáveis, como tensões residuais e distorção, perda das propriedades mecânica, físicas e químicas exigidas e formação de trincas.

### 2.3.2 ENERGIA DE SOLDAGEM

Para medição de intensidade da fonte de calor durante o processo de soldagem, utilizamos um parâmetro alternativo, que é a Energia de Soldagem (H), onde é medido a quantidade de energia gerada pela fonte de calor por unidade de comprimento da junta.

A energia de soldagem é calculada da seguinte forma:

$$H = \frac{U \times I}{v}$$

Onde:

H: Energia de soldagem

U: Tensão de soldagem

I: Corrente de soldagem

V: Velocidade de soldagem

A unidade de medida para energia de soldagem é expressa, em geral, em KJ/mm ou KJ/cm.

Na soldagem é usual trabalhar com outra grandeza, denominada aporte de energia ou aporte de calor, onde é feito uma correlação entre a quantidade de energia disponível e a velocidade de avanço da fonte de calor durante o processo de soldagem.

Aporte de energia total:  $H = 60 \frac{V \times I}{v}$  (J/cm)

Aporte líquido de energia:  $Hl = \frac{ea \times 60 \times V \times I}{v} \text{ (J/cm)}$

Apenas uma parte dessa energia é transferida para a peça a ser soldada, o restante é gasto com perdas. O valor do rendimento térmico depende dos parâmetros de ajuste e do processo de soldagem. O rendimento térmico é medido através de métodos calorimétricos.

### 2.3.3 CICLO TÉRMICO DA SOLDAGEM

O ciclo térmico de soldagem é nada mais do que a variação de temperatura durante o processo de soldagem em uma peça, onde ela passa pelo processo de aquecimento do material no início do processo, a fase de temperatura máxima do ciclo e a fase de resfriamento gradual até a temperatura da peça voltar para a sua condição inicial.

Os principais fatores que fazem parte do ciclo térmico em um processo de soldagem são:

Temperatura de pico ( $T_p$ ): é uma etapa do processo de soldagem onde é atingida a temperatura máxima.. Para o cálculo dessa temperatura de pico, podemos aplicar para duas condições:

Soldagem de topo para uma chapa muito espessa:

$$T_p = T_0 + \left( \frac{2}{\pi e} \right) \frac{H_L}{\rho c r_x^2}$$

Soldagem de topo em um passe com penetração total:

$$T_p = T_0 + \left( \frac{2}{\pi e} \right)^{1/2} \frac{H_L}{2\rho c h y}$$

Tempo de permanência ( $T_c$ ): é o tempo de permanência acima da temperatura crítica. Esse parâmetro só é importante para materiais onde ocorre crescimento de grão e /ou dissolução de precipitados.

Velocidade de resfriamento ( $\emptyset$ ): esse parâmetro é muito importante, porque é ele quem vai definir as transformações que irão ocorrer nos materiais durante a fase de resfriamento.

Para o cálculo dessa velocidade podemos aplicar duas equações:

Condição para chapa grossa:

$$\phi = \frac{2\pi k(T - T_0)^2}{H_L}$$

Condição para chapa fina:

$$\phi = 2\pi k\rho c \left( \frac{h}{H_L} \right)^2 (T - T_0)^3$$

Porém, para sabermos se a espessura da chapa é fina ou grossa, utilizamos um parâmetro matemático que pode ser calculado da seguinte forma:

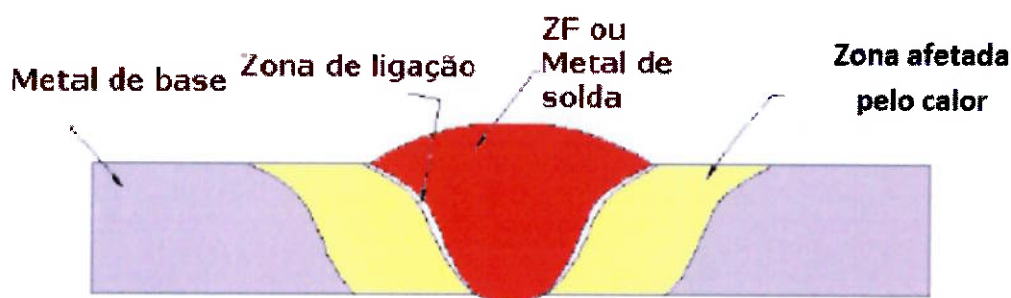
$$\tau = \frac{h}{h_{crit}} = h \sqrt{\frac{\rho c (T - T_0)}{H_L}}$$





O corte  $y - y'$  conforme apresentado na figura XX, apresenta a distribuição, aquecimento e resfriamento de uma junta soldada ao longo da sua seção transversal que sai do centro do cordão ao metal de base.

Esse comportamento do material na junta soldada permite três regiões básicas para estudo: A zona fundida (ZF) ou metal de solda, zona afetada pelo calor (ZAC), que é a área de desenvolvimento do trabalho e o metal de base. Entre a zona fundida e a zona afetada pelo calor existe uma pequena área chamada de zona de ligação. Essas regiões estão representadas na figura abaixo e logo em seguida, segue a explicação de cada região e os fenômenos ocorridos em cada uma delas.

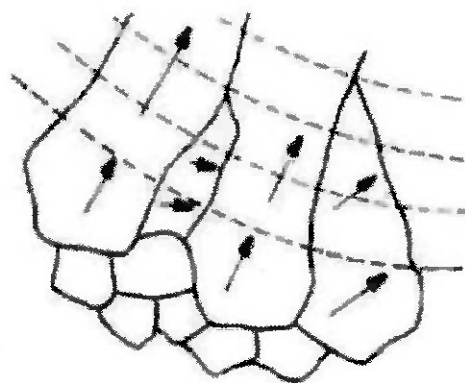


**Figura 2.14** – Desenho esquemático das regiões de uma junta soldada. Adapta de (CAMPOS, 2005). [7].

#### 2.3.4.1 ZONA FUNDIDA (ZF)

Região onde o material foi fundido e solidificou-se durante o processo de soldagem e com as temperaturas de pico superiores a temperatura de fusão. Nessa região ocorre o fenômeno chamado crescimento competitivo de grãos, esquematizado na figura 2.15, (Campos, 2005). Esse fenômeno ocorre durante a solidificação, em que os grãos tendem a crescer em direção ao gradiente

máximo de temperatura. Além disso, os grãos possuem também as direções de crescimento fácil. Para materiais de estruturas CFC e CCC essa direção é a  $\langle 100 \rangle$  [7]. Durante a solidificação, o grão com direção de crescimento fácil cresce na direção do gradiente máximo de temperatura, impedindo o crescimento de outros grãos cujas direções de crescimento não estão orientadas com essa direção, (Campos, 2005) [7].



**Figura 2.15** – Desenho esquemático do fenômeno de crescimento competitivo. (CAMPOS, 2005) [7].

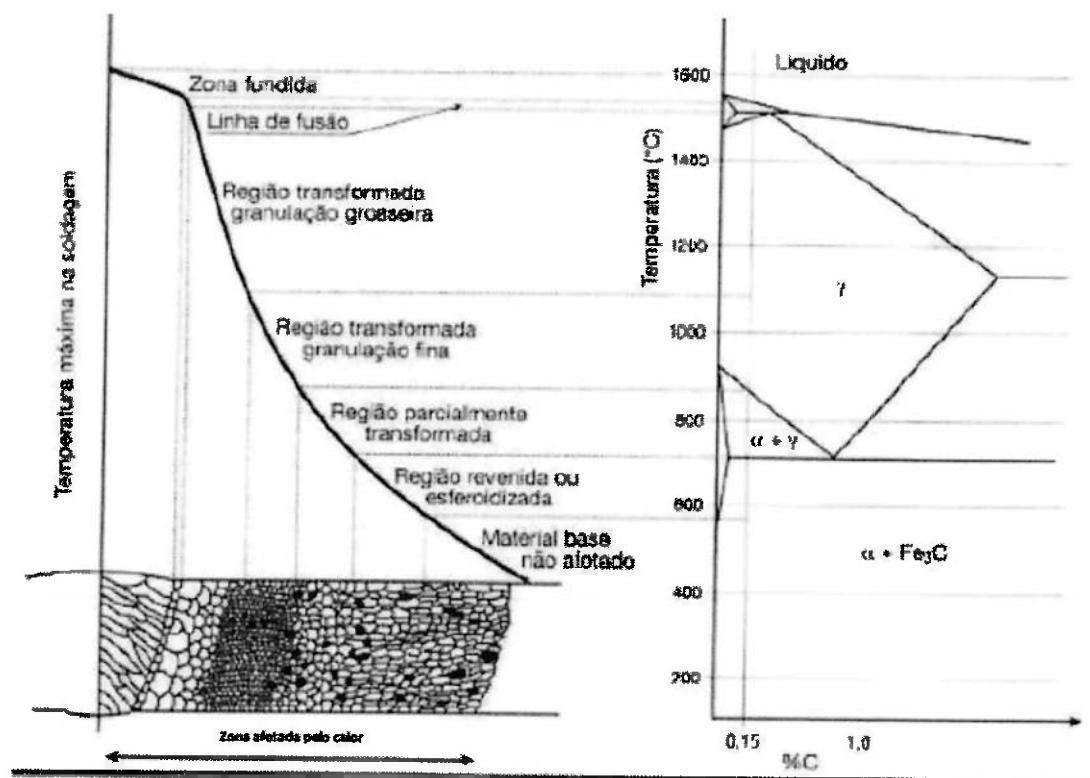
#### **2.3.4.2 ZONA AFETADA PELO CALOR**

A zona afetada pelo calor é uma região do metal de base que não foi fundida, porém sofreu grandes alterações nas propriedades e na microestrutura, provocadas pelo ciclo térmico durante o processo de soldagem. Nessa região a temperatura de pico é superior a temperatura crítica do material e inferiores a temperatura de fusão[7].

A figura 2.16 mostra os efeitos da temperatura máxima de soldagem relacionando com o gradiente de resfriamento na zona afetada pelo calor no diagrama Fe-C.

A região de granulação grosseira, também chamada de crescimento de grão da austenita, ocorre entre 1100°C e 1500°C (WAINER et al. 1992). A granulação grosseira dificulta a sua transformação em ferrita durante o resfriamento, isso é a sua temperabilidade (MARQUES et al. 2008) [7].

De um modo geral essa região é caracterizada por uma ferrita, apresentando morfologia em placas e a presença de bainita (MARQUES et al. 2007) [7].



**Figura 2.16** – Representação esquemática de distribuição de temperatura na ZAC. Adaptada de COLPAERT, 2008[7].

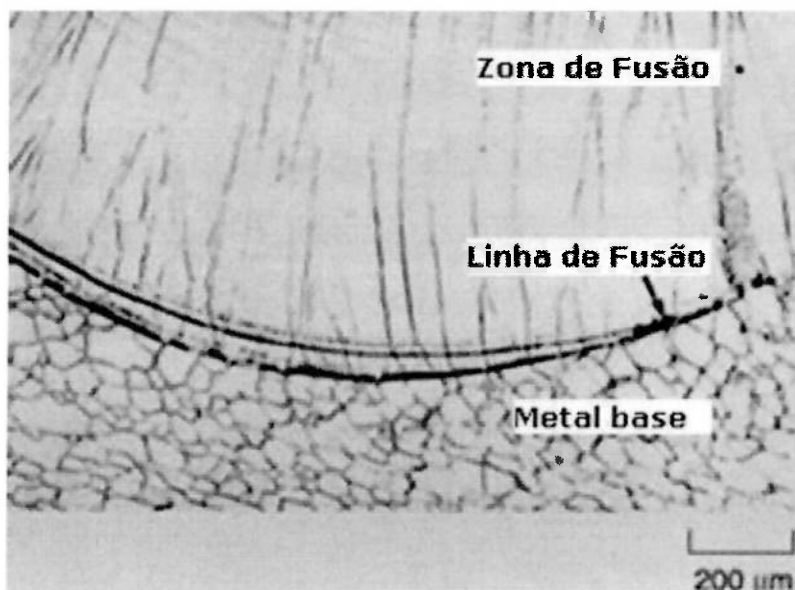
Região transformada de granulação fina ou região de refino de grão, para ações estruturais podem ocorrer entre 900°C e 1100°C (WAINER et al. 1992). Aqui também ocorre a transformação da austenita em ferrita, porém com uma deformação menor daquela e isso, associado à temperatura e tempos menores que na região anterior, não é o suficiente para ocorrer recristalização na região primária, ou seja, o crescimento de grão, resultando numa estrutura fina de ferrita e perlita com pequenos tamanhos de grãos (colônia), (WAINER et al. 1992 e MARQUES et al. 2007).

A região parcialmente transformada e a região revenida ou esferoidizada nomeada por WAINER et al. (1992), são chamadas de região intercrítica por MARQUES et al. (2007). Segundo WAINER et al. (1992), ocorre entre 700°C e 950°C. Dependendo da velocidade de resfriamento, a austenita pode se decompor em perlita, bainita ou martensita maculada, sendo uma região que apresenta propriedades mecânicas inferiores à do metal de base. Na região de esferoidização de carbeto, ou melhor, a esferoidização das lamelas de cementita da perlita, que ocorre entre 700°C e 750°C, resulta numa redução da resistência mecânica, que é de difícil identificação em ensaio de tração, haja vista que a esferoidização ocorre somente numa estreita faixa da ZAC, (WAINER et al. 1992).

Em alguns casos, particularmente na soldagem multipasse, constituintes de elevada dureza e baixa tenacidade podem se formar nesta região, sendo a microestrutura mais complexa, (MARQUES et al. 2007). A natureza dos microconstituintes formados, assim como a dureza nessa região, depende de sua velocidade de resfriamento, (DAVIS & KING apud SANTOS NETO, 2003).

### 2.3.4.3 ZONA DE LIGAÇÃO

Região da junta soldada que fica localizada entre a zona fundida e a zona afetada pelo calor. A partir dessa linha é iniciada a solidificação e o crescimento dos grãos em direção a linha central do cordão de solda, formando o metal de solda (CAMPOS, 2005). Esse processo é chamado de crescimento epitaxial, no qual o início da solidificação na poça de fusão ocorre principalmente pelo crescimento de grãos do metal de base que estão na linha de fusão, assegurando a continuidade metalúrgica entre a zona fundida e a zona afetada pelo calor (MARQUES et al. 2007), conforme figura 2.17



**Figura 2.17** – Crescimento epitaxial e colunar próximos a linha de fusão de uma junta soldada. Adaptada de (DAVID et al., 2005) [7].

A distribuição de soluto na poça de fusão durante a solidificação é um importante fenômeno resultando em segregação que pode afetar

significativamente a soldabilidade, a microestrutura e as propriedades do material da junta soldada (DAVID et al., 2005).

#### **2.3.4.4 METAL DE BASE**

Essa é a região mais afastada da junta soldada durante o processo de soldagem. Suas temperaturas de pico são inferiores à sua temperatura crítica e o material não sofre alterações causadas pelo ciclo térmico em sua estrutura e propriedades.

### **2.4 AÇOS INOXIDÁVEIS.**

Os aços inoxidáveis são ligas ferrosas que possui como elemento principal o cromo, que é adicionado a uma porcentagem em uma concentração mínima de 11%w (p/p) com a finalidade de se obter uma liga mais resistente a ambientes corrosivos. A sua resistência a corrosão a baixa temperatura em meio aquoso é obtida através da formação de óxido de cromo na superfície do material. Essa resistência a corrosão pode ser melhorada adicionando outros elementos a liga de cromo.

#### **2.4.1 EFEITO DOS ELEMENTOS DE LIGA**

Para se obter uma resistência maior de uma liga de aço inoxidável, aumentamos o teor de elementos em sua liga a fim de melhorar as suas propriedades, vejamos abaixo a função de cada um dos principais elementos:

#### **2.4.1.1 CROMO (Cr)**

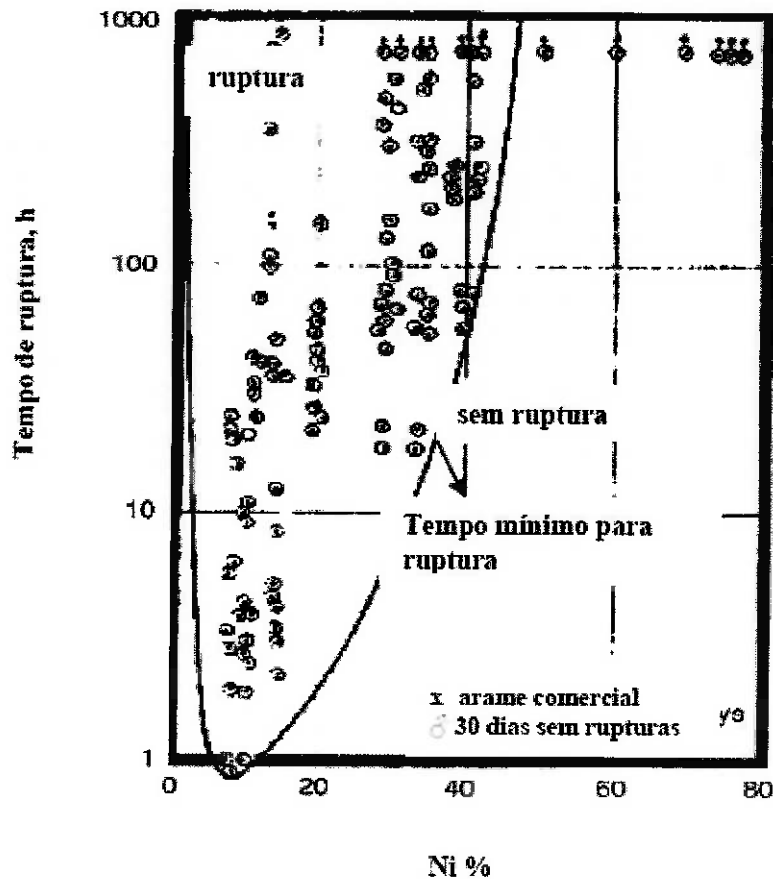
Elemento que estabiliza a fase ferrita no aço inoxidável. Formador das propriedades dos aços inoxidáveis e do filme passivado. Quanto maior a quantidade de cromo adicionado na liga, maior a sua resistência a corrosão, mas teremos também uma maior concentração de carbeto de cromo ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) e de fases intermetálicas frágeis, tais como sigma e  $\alpha'$ , reduzindo assim a sua ductilidade, tenacidade, resistência a corrosão, a soldabilidade e a facilidade de fabricação.

#### **2.4.1.2 NÍQUEL (Ni)**

A presença do elemento níquel, ajuda na repassivação dos aços inoxidáveis, na recuperação do filme protetor em meios ácidos redutores. Estabiliza a estrutura austenítica melhorando a resistência a corrosão além das propriedades mecânicas e das características de fabricação dos aços inoxidáveis [8]. O níquel mantém também a relação ideal entre a fase ferrita e austenita. A figura 2.18 apresenta a influência do níquel na resistência de fios de aços inoxidáveis a corrosão sob tensão.



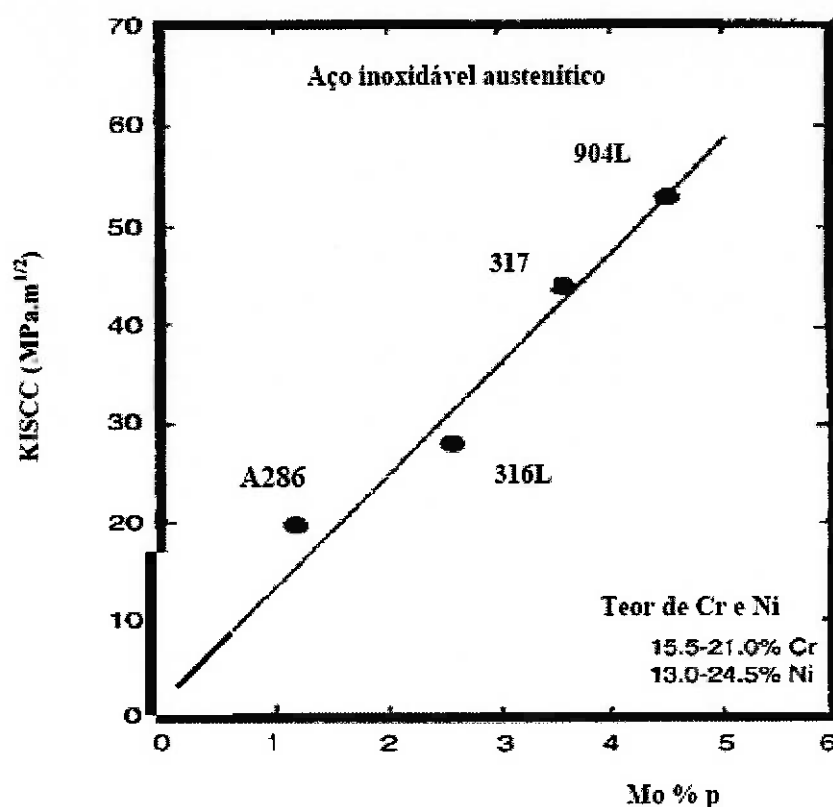
A resistência mínima a ruptura do aço inoxidável se encontra entre os teores de 6% a 12%w (p/p) de Ni.



**Figura 2.18** – Efeito do Níquel a resistência a CST dos fios de aços inoxidáveis 18% - 20% Cr em solução a quente de  $MgCl_2$ . Adaptado de (Copson) [8].

#### 2.4.1.3 MOLIBDÊNIO (Mo)

Esse elemento químico estabiliza a ferrita e endurece o aço inoxidável. A adição de molibdênio nos aços inoxidáveis tem como finalidade aumentar a sua resistência a corrosão por pites e frestas e tenacidade a fratura, como mostra a Figura 2.19.



**Figura 2.19** – Efeito do molibdênio na tenacidade à fratura da liga Fe-Cr-Ni-Mo em solução aquosa aerada de 22% de NaCl, a 105°C. Adaptado de ASTM[8].

A sua combinação com o cromo melhora a estabilização do filme passivo e retarda a iniciação ou previne a formação de pites.

O cromo e o molibdênio são fortes promotores da fase ferrita, que em grandes concentrações na fase ferrita residual dos aços inoxidáveis austeníticos e duplex promovem a precipitação da fase intermetálica sigma[8].

#### **2.4.1.4 CARBONO (C)**

O carbono quando tratado termicamente por endurecimento nos aços inoxidáveis, mais no caso dos aços inoxidáveis martensítica, melhora a resistência mecânica do material. Para os austeníticos, isso só é conseguido por meio de precipitação de carbeto de titânio e nióbio, porém a formação de carbeto de cromo ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) baixa a resistência a corrosão devido a sensitização do material em temperaturas elevadas. O aumento do teor de carbono diminui a tenacidade dos aços inoxidáveis ferríticos diminuindo o tempo para ruptura e, assim, a resistência a corrosão sob tensão (Yuam, Rubem. 2011).

#### **2.4.1.5 NITROGÊNIO (N)**

O nitrogênio é vinte vezes mais efetivo na estabilização da austenita do que o níquel, diminuindo a precipitação das fases intermetálicas, como a sigma, reduzindo o cromo nas fases dos aços inoxidáveis. Além disso, em solução sólida intersticial aumenta a resistência mecânica e, nos aços inoxidáveis austeníticos, aumenta a sua tensão de escoamento, deixando o seu valor de resistência próxima de um aço inoxidável ferrítico.

Para os aços inoxidáveis austeníticos, o nitrogênio aumenta a resistência a corrosão por pite e por frestas, além de gerar também maior estabilidade do filme de passivação.

## **2.4.2 PRINCIPAIS GRUPOS DE AÇOS INOXIDÁVEIS**

Os principais grupos de aços inoxidáveis são os aços: Ferríticos, Martensíticos, Austeníticos, Superausteníticos e Duplex. O trabalho em desenvolvimento terá como material estudado o aço inoxidável superaustenítico, que será apresentado futuramente. Abaixo uma descrição com as principais características principais e aplicações de cada um.

### **2.4.2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS**

Os aços inoxidáveis ferríticos possuem como características principais a baixa ductilidade, endurecimento por deformação a frio e tensão elevada de escoamento, além de ser magnético. A sua estrutura cristalina é cúbica, de corpo centrado (CCC), o mesmo do ferro puro em temperatura ambiente.

Para aumentarmos a resistência mecânica e a corrosão, se faz necessário o aumento do teor de carbono, nitrogênio e cromo, porém esse aumento favorece a semitização do aço causada pela precipitação dos carbeto e nitreto de cromo, reduzindo assim a quantidade de cromo próximo ao contorno de grão. Os aços inoxidáveis ferríticos, com altos teores de cromo e submetidos a alta temperatura podem nuclear a fase intermetálica sigma e precipitar a fase frágil.

Para reduzir a fragilização por hidrogênio é adicionado molibdênio a liga.

Os aços inoxidáveis ferríticos são normalmente aplicados para fabricação de utensílios domésticos como panelas, talheres e também muito empregado

na fabricação de equipamentos para indústria de processamento de cana-de-açúcar.

#### **2.4.2.2 AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS**

Os aços inoxidáveis martensítica são similares aos aços carbonos e de baixa liga. Possuem a sua estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado, que é obtida pela transformação da austenita, que é formada pelo aquecimento da ferrita através do resfriamento rápido. As suas características principais são, alta resistência mecânica, dureza, pequena ductilidade e baixa tenacidade, tudo isso devido ao alto teor de carbono. Por este motivo são classificados como uma família ferro magnético "duro". O seu principal elemento de liga é o cromo com um teor de 12% - 15%.

Os aços inoxidáveis martensítica são utilizados para construção de internos em equipamentos e válvulas.

#### **2.4.2.3 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS**

Os aços inoxidáveis são ligas com 18% Cr e 8% Ni com adição variável de molibdênio.

Os aços austeníticos são os maiores em termos de número de ligas e de utilização. Possuem a sua estrutura cristalina cúbica de face centrada. Sua principal característica é ser resistente a oxidação e ter elevada tenacidade a altas temperaturas, além de ter uma estrutura não magnética.

O molibdênio é adicionado para aumentar a sua resistência a corrosão galvânica, por pite ou alveolar.

Esse tipo de aço é susceptível à semitização durante o processo de soldagem, formando precipitados de carbeto de cromo ao longo do contorno de grão, reduzindo a concentração de cromo nessa região, diminuindo assim a sua resistência a corrosão.

Como exemplos de aços inoxidáveis austeníticos, temos o 304, 304L, 316 e 316L.

Esses aços inoxidáveis são muito utilizados para fabricação de tubulações e equipamentos em plantas químicas e petroquímicas.

#### **2.4.2.4 AÇOS INOXIDÁVEIS SUPERAUSTENÍTICOS**

Os aços inoxidáveis austeníticos foram concebidos com o propósito de preencher a lacuna existente entre os aços inoxidáveis austeníticos da série 300 e as ligas de Ni-Cr-Mo com melhores resistências mecânica e a corrosão.

Os aços inoxidáveis superausteníticos possuem elevados teores de Ni-Cr-Mo e N. A sua fabricação pode promover a formação de fases secundárias de ferrita e, conseqüentemente, a nucleação da fase intermetálica frágil sigma quando submetido a trabalho a quente, o que facilita o trincamento desses aços inoxidáveis em meios corrosivos severos com H<sub>2</sub>S úmido (Yuam, Rubem. 2011). Adicionando altas taxas de nitrogênio nos aços inoxidáveis superausteníticos, estabilizamos a estrutura austenita, inibindo a formação da fase sigma e assim reduzindo a susceptibilidade ao trincamento.

#### **2.4.2.5 AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX**

Os aços inoxidáveis duplex possuem uma estrutura mista de ferrita com ilhas de austenita e, como resultado, tem uma característica desses tipos básicos. Esses aços são ligas de Fe-Cr-Ni com teor de carbono menor que 0,03%w (p/p) e adição de molibdênio, nitrogênio, tungstênio e cobre. Para ser atingida a proporção igual de ferrita e austenita, deve ser controlada a temperatura de processamento e resfriamento.

As principais características desses aços são a elevada resistência e elevada tenacidade. Além disso, possuem excelente resistência a corrosão, porém possuem índices de pites elevados e o seu grau de corrosão localizada pode ser determinado pelo seu Número Equivalente de Resistência ao Pite (NERP).

### **3. OBJETIVO.**

Os objetivos deste trabalho são:

1. Avaliar as características mecânicas do material aço inoxidável AL-6XN (UNS N08367) na zona afetada pelo calor utilizando os processos de soldagem com Eletrodo Revestido e o processo de soldagem TIG;
2. Avaliar através de experimentos a microestrutura do metal na zona afetada pelo calor e nas regiões próximas.



#### **4. MATERIAIS E MÉTODOS.**

O intuito desse trabalho foi avaliar a zona afetada pelo calor devido a esta ser a região da junta soldada que mais sofre alterações nas suas propriedades e estrutura. Como material, foi utilizado um aço inoxidável superaustenítico e como modelo utilizamos dois processos de soldagem diferentes, porém com o consumível de mesma base.

##### **4.1 METAL DE BASE.**

Para realização desse trabalho foi utilizado como metal de base o aço inoxidável superaustenítico AL-6XN (ASTM A312 ou UNS N08367).

Na execução da soldagem foram utilizados dois pares de anéis do tubo. Cada anel tinha 50,8mm (2 polegadas) de diâmetro externo, 2,78mm de espessura de parede e 150mm de comprimento.

Os corpos de prova utilizados foram removidos utilizando o processo de usinagem.

Na tabela 4.1 pode-se observar a composição química do material utilizado e exigido pela Norma ASTM A312.

**Tabela 4.1** - Comparação da composição química do tubo de AL-6XN (UNS N08367) utilizado com o exigido pela Norma ASTM A312.

ELEMENTOS DE LIGA	CATALOGO DE UM FABRICANTE	EXIGIDO PELA NORMA ASTM A312	METAL DO TUBO (ANÁLISE QUÍMICA)
C	0,020%	0,030%	0,014%
Mn	0,400%	2,000%	0,382%
P	0,025%	0,040%	0,020%
S	0,002%	0,030%	0,001%
Si	0,400%	1,000%	0,447%
Cr	20,500%	20,00% - 22,00%	20,458%
Ni	24,000%	23,50% - 25,50%	23,316%
Mo	6,300%	6,00% - 7,00%	5,817%
N	0,220%	0,18% - 0,25%	0,217%
Cu	0,100%	0,750%	0,258%
Fe	Balanceado	Não informado	48,02%

## **4.2 CONSUMÍVEL DE SOLDAGEM.**

Os consumíveis utilizados durante o processo de soldagem foram similares. Uma das diferenças é que, para o processo de soldagem TIG foram utilizadas varetas e para o processo de soldagem Eletrodo Revestido foram utilizados Eletrodos. O gás também foi utilizado apenas para o processo de soldagem TIG.

O consumível utilizado durante o processo de soldagem SMAW, foi classificado como Eletrodo Revestido Básico E NiCrMo-3, segundo a norma AWS A5.11 "Specification for Nickel and Nickel-Alloy Welding Electrodes for Shield Metal Arc Welding"[16]. Esse tipo de eletrodo é coberto por liga de Níquel. Esse consumível possui grande propriedades mecânicas e de corrosão, como podemos observar segundo tabela 4.2 abaixo:

**Tabela 4.2** - Comparação da composição química do consumível E NiCrMo-3

utilizado com o exigido pela Norma AWS 5.11.

ELEMENTOS DE LIGA	CATALOGO DO FABRICANTE	EXIGIDO PELA NORMA AWS A5.11	ENSAIO REALIZADO EM LABORATÓRIO
C	0,025%	0,10%	0,028%
Mn	0,060%	1,00%	0,026%
Fe	1,500%	7,00%	0,217%
P	NE <sup>(1)</sup>	0,03%	0,002%
S	NE <sup>(1)</sup>	0,02%	0,003%
Si	0,400%	0,75%	0,016%
Cu	NE <sup>(1)</sup>	0,50%	0,086%
Ni	bal	55,00% min.	63,460%
Cr	22,000%	20,00% - 23,00%	22,013%
Nb (cb) Plus Ta	3,300%	3,15% - 4,15%	0,068%
Mo	9,000%	8,00% - 10,00%	9,599%
Outros elementos	NE <sup>(1)</sup>	0,50%	*
NE- NÃO ESPECIFICADO. QUANDO ESPECIFICADO PELO COMPRADOR O ELETRODO PODE VIR COM UM MÁXIMO DE 0,12% DE COBALTO. QUANDO ESPECIFICADO PELO COMPRADOR O ELETRODO PODE VIR COM UM MÁXIMO DE 0,30% DE TÂNTALO. * NÃO ENCONTRADO NA ANÁLISE.			

**Tabela 4.3** - Comparação das propriedades mecânicas do consumível utilizado

com o exigido pela Norma AWS 5.11.

PROPRIEDADE	CATALOGO DO FABRICANTE	ESPECIFICAÇÃO AWS
LIMITE DE RESISTÊNCIA	>110 Ksi (>760 MPa)	110 KSi (760 MPa)
LIMITE DE ESCOAMENTO	> 450 MPa	NE <sup>(1)</sup>
ALONGAMENTO MÍNIMO %	>30	30
VALORES DE IMPACTO (J CVN)	>75 (+20°C) / 45 (-196°C)	NE <sup>(1)</sup>
NE(1)- NÃO ESPECIFICADO.		

Para execução do processo de soldagem TIG foi utilizado a vareta como consumível. A vareta utilizada segue a especificação da norma AWS A5.14 "Specification for Nickel and Nickel-Alloy Bare Welding Electrodes and Rods", classificada como ER NiCrMo-3[16].

Na tabela 4.4 é possível observar a composição química do metal de solda a partir da vareta de ERNiCrMo-3 e compará-la com o especificado pela AWS A5.14 e com o catálogo do fabricante.

**Tabela 4.4** - Comparação da composição química do consumível ER NiCrMo-3 com o exigido pela Norma AWS 5.14.

ELEMENTOS DE LIGA	CATALOGO DO FABRICANTE	EXIGIDO PELA NORMA AWS A5.14	CERTIFICADO DO CONSUMIVEL
C	0,02%	0,10%	0,012%
Mn	NE <sup>(1)</sup>	0,50%	0,15%
Fe	1,00%	5,00%	0,29%
P	NE	0,02%	0,009%
S	NE	0,015%	0,005%
Si	<0,20%	0,50%	0,05%
Cu	NE <sup>(1)</sup>	0,50%	<0,001%
Ti	NE <sup>(1)</sup>	0,40%	0,22%
Al	NE <sup>(1)</sup>	0,40%	0,11%
Ni	bal	58,00% min.	65,00%
Cr	22,00%	20,00% - 23,00%	22,89%
Nb (cb) Plus Ta	3,50%	3,15% - 4,15%	3,64%
Mo	9,00%	8,00% - 10,00%	8,97%
Outros elementos	NE <sup>(1)</sup>	0,50%	NE <sup>(1)</sup>
NE(1)- NÃO ESPECIFICADO.			

Na tabela 4.5 pode-se observar as propriedades mecânicas da vareta e compará-las com a especificação AWS.

**Tabela 4.5** - Comparação das propriedades mecânicas do consumível ER NiCrMo-3 com o exigido pela Norma AWS 5.14.

PROPRIEDADE	CATALOGO DO FABRICANTE	ESPECIFICAÇÃO AWS
LIMITE DE RESISTÊNCIA MÍNIMO	> Ksi (>740 MPa)	110 KSi (760 MPa)
LIMITE DE ESCOAMENTO	> 460 MPa	NE <sup>(1)</sup>
ALONGAMENTO MÍNIMO %	>30	30
VALORES DE IMPACTO (J CVN)	>100 (+20°C) / >85 (-196°C)	NE <sup>(1)</sup>
NE <sup>(1)</sup> - NÃO ESPECIFICADO.		

### **4.3 EXECUÇÃO DA SOLDAGEM.**

#### **4.3.1 EXPERIMENTOS**

Foram utilizados quatro (4) trechos dos tubos nos experimentos, onde cada par de trecho formou uma junta que foi soldada. Uma junta foi denominada de experimento 01 e a outra junta foi denominada de experimento 02.

O processo de soldagem em cada junta está descritos na tabela 4.6 Os corpos de prova para os ensaios de propriedades mecânicas e as análises químicas foram recolhidos de cada junta soldada.

**Tabela 4.6** – Tipo de processo de soldagem utilizado em cada experimento e a sua identificação nos relatórios.

JUNTA	PROCESSOS DE SOLDAGEM	IDENTIFICAÇÃO
EXPERIMENTO 1	ELETRODO REVESTIDO	10234-15
EXPERIMENTO 2	TIG	10233-15

Os Corpos de Prova foram analisados quimicamente e também foram submetidos a ensaios mecânicos destrutivos para avaliação da sua integridade.

#### **4.3.2 PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM**

##### **4.3.2.1 NORMA ASME IX**

O trabalho realizado tem como finalidade avaliar as características mecânicas na Zona Afetada pelo Calor, porém todos os procedimentos foram realizados conforme Norma ASME IX e a ASME B31.3. No entanto, além de executar dois ensaios de dobramento lateral e dois ensaios de tração em cada experimento como é exigido, para se obter mais informações sobre os fenômenos ocorridos na região em estudo e realizar comparações, foi necessário efetuar ensaio de Composição Química por espectrometria de emissão óptica, medidas de dureza Vickers, macrografia da junta soldada, caracterização microestrutural por microscopia óptica, detecção de corrosão intergranular no metal de solda e contagem do tamanho do grão.

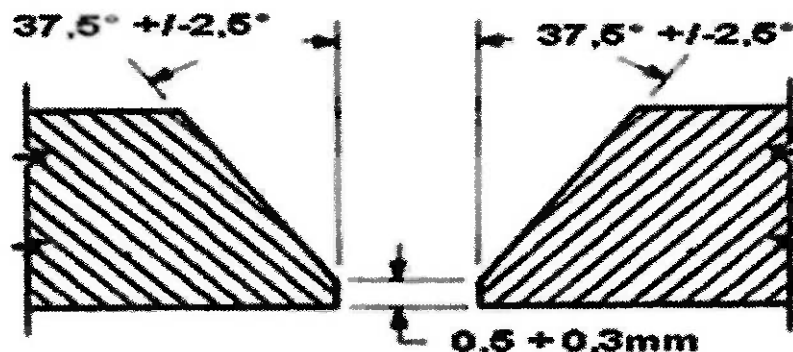
#### 4.3.2.2 EQUIPAMENTOS DE SOLDAGEM

O equipamento de soldagem utilizado tanto no experimento 01 (Processo de Soldagem Eletrodo Revestido) como no experimento 02 (Processo de Soldagem TIG) foi uma fonte inversora de corrente contínua e curva característica de tensão.

#### 4.3.2.3 VARIÁVEIS UTILIZADAS NA SOLDAGEM

No experimento 01, a soldagem foi executada apenas em um passe, devido a espessura do tubo ser de 2,78mm.

Nos dois experimentos foram utilizados o modelo junta, conforme figura 4.1 abaixo.



**Figura 4.1** – Detalhe do tipo de chanfro da junta que foi utilizado nos experimento 01 e 02.

No experimento 01 foi utilizado o Processo de Soldagem com Eletrodo Revestido (TIG) e as variáveis estão apresentadas na tabela 4.3.2.3.1.

**Tabela 4.7** – Variáveis utilizadas no processo de soldagem do experimento 01 (Eletrodo Revestido).

EXPERIMENTO 01 - ELETRODO REVESTIDO	
CLASSIFICAÇÃO DO ELETRODO	E NiCrMo-3
NÚMERO DE PASSES	1
CORRENTE CC (-) (A)	50 - 80
TENSÃO (V)	24
DIÂMETRO DO ELETRODO (mm)	2,4
TEMPERATURA DE PRÉ-AQUECIMENTO (°C)	25
TEMPERATURA DE INTERPASSE (°C)	100
VELOCIDADE DE SOLDAGEM (mm/mim)	89
ENERGIA DE SOLDAGEM (KJ/mm)	1,3

O experimento 02 a soldagem foi realizada pelo Processo TIG e foram executado em dois passes, um de raiz e outro de enchimento/acabamento. As variáveis aplicadas durante o processo estão apresentadas na tabela 4.8

**Tabela 4.8** – Variáveis utilizadas no processo de soldagem do experimento 02 (TIG).

EXPERIMENTO 02 – TIG	
CLASSIFICAÇÃO DO ELETRODO	ER NiCrMo-3
NÚMERO DE PASSES	2
CORRENTE CC (-) (A)	90 - 120
TENSÃO (V)	12
DIÂMETRO DO ELETRODO (mm)	2,4
TEMPERATURA DE PRÉ-AQUECIMENTO (°C)	25
TEMPERATURA DE INTERPASSE (°C)	100
VELOCIDADE DE SOLDAGEM (mm/mim)	72
ENERGIA DE SOLDAGEM (KJ/mm)	1,3



#### **4.3.2.5 CONTROLE DAS VARIÁVEIS DE SOLDAGEM**

Durante os dois processos de soldagem foram feitos monitoramentos da corrente e da tensão utilizando um Multímetro.

Para obtenção da velocidade de soldagem foi utilizado o comprimento do cordão de solda dividido pelo tempo de arco aberto e fechado. O instrumento utilizado para medição do tempo foi um cronômetro.

### **4.4 COMPOSIÇÃO QUÍMICA.**

A determinação da composição química para os dois processos de soldagem foi realizado através de um aparelho Expectrômetro de emissão óptica. O ensaio foi realizado a uma temperatura de 22°C e com uma umidade relativa do ar de aproximadamente 42%.

#### **4.4.1 TEOR DE NITROGÊNIO E OXIGÊNIO**

Para determinar a quantidade de nitrogênio e oxigênio no cordão de solda foi realizado o ensaio de cromatografia gasosa (LECO®) no experimento 1 (Eletrodo Revestido) e no experimento 2 (TIG), comparando com a concentração do metal de base.

Este ensaio foi realizado a uma temperatura ambiente de 23°C e com a umidade relativa do ar de aproximadamente 51%. Os pontos onde foram removida das amostras foram das faces do cordão de solda de acabamento.

## **4.5 CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA.**

### **4.5.1 MACROGRAFIAS**

Foram executadas macrografias nas juntas soldadas pelo processo de soldagem Eletrodo Revestido (experimento 01) e processo de Soldagem TIG (experimento 02).

O objetivo desse ensaio é medir a zona afetada pelo calor. Para esse experimento foi utilizado o reagente Água Régia.

O equipamento utilizado foi uma lupa estéreo microscopia Leica com o aumento de 10X.

### **4.5.2 MICROSCOPIA ÓPTICA**

A realização da avaliação microestrutural dos corpos de prova foram feitas a partir de duas amostras conforme Norma ASTM E 3/2011 e ensaiadas conforme Norma ASTM E 7/2009.

Após a superfície está totalmente polida, a amostra foi colocada no microscópio óptico para observar a microestrutura resultante no metal de base, na ZAC e no metal de solda. As amostras sofreram ataque com o reagente Kalling's.

As imagens foram feitas através do microscópio Olympus GX 51.

Além desse ensaio, foi feito o ensaio para detecção de corrosão intergranular conforme a Norma ASTM A 262/14 e o corpo de prova foi preparado conforme Norma ASTM E 3/11.

Após a superfície está totalmente polida, a amostra foi colocada no microscópio óptico para observar a microestrutura no metal de solda. As

amostras sofreram ataque com o reagente Ácido oxálico a concentração de 10%.

As imagens foram feitas através do microscópio Olympus GX 51.

Para finalizar, também foi executado a contagem do tamanho do grão austenítico conforme a Norma ASTM E 112/2013.

Após a superfície está totalmente polida, a amostra foi colocada no microscópio óptico para observar a microestrutura resultante no metal de base e na ZAC. As amostras sofreram ataque com o reagente Kalling's.

As imagens foram feitas através do microscópio Olympus GX 51.

#### **4.6 ENSAIOS MECÂNICOS.**

Os ensaios mecânicos foram realizados para comparação das características mecânicas na Zona Afetada pelo Calor pelos dois processos de soldagem referente ao estudo. Os ensaios realizados foram os de Tração e o de dobramento lateral seguindo procedimento de soldagem conforme ASME IX. Também foi realizado o ensaio de dureza Vickers (HV 5) baseado na Norma ASTM E 384/2011.

##### **4.6.1 ENSAIO DE TRAÇÃO**

O ensaio de tração foi realizado em uma temperatura ambiente 24°C através da Máquina Universal de Ensaio de Tração e Compressão com capacidade de 60ton da Tinius Olsen®.

Para cada experimento foram ensaiados 2 corpos-de-prova. As dimensões dos corpos de prova estão descritos nas tabela 4.9 e 4.10.

**Tabela 4.9** – Dimensional dos corpos de prova extraídos do experimento 01 (ELETRODO REVESTIDO) para o Ensaio de Tração.

AMOSTRA	DIMENSÃO (mm)	SEÇÃO DO CP (mm <sup>2</sup> )
CP 01	2,49 X 13,09	32,59
CP 02	2,27 X 13,04	29,6

**Tabela 4.10** – Dimensional dos corpos de prova extraídos do experimento 02 (TIG) para o Ensaio de Tração.

AMOSTRA	DIMENSÃO (mm)	SEÇÃO DO CP (mm <sup>2</sup> )
CP 01	2,54 X 12,96	32,92
CP 02	2,50 X 13,02	32,55

Os critérios utilizados para esse experimento foram baseados na Norma ASME IX, da seguinte forma:

- Preparação dos corpos de prova: ASME IX Ed. 2013 QW 462.1a
- Ensaio realizado: ASME IX ed. 2013 QW 152
- Critério de avaliação: ASME IX Ed. 2013 QW 153

#### **4.6.2 ENSAIO DE DOBRAMENTO LATERAL**

O ensaio de dobramento lateral foi executado em uma temperatura ambiente de 24°C através da Máquina Universal de Ensaio de Tração e Compressão com capacidade de 60ton da Riehle.

Para cada experimento foram ensaiados 2 corpos-de-prova. As dimensões dos corpos de prova estão descritos conforme as tabelas 4.11, pois foram iguais as dimensões para os dois experimentos.

**Tabela 4.11** – Dimensional dos corpos de prova extraídos dos experimentos para o Ensaio de Dobramento Lateral.

AMOSTRA	DIMENSÕES (mm)		
	ESPESSURA	LARGURA	COMPRIMENTO
DF-1*	2,77	25	300
DR-1*	2,77	25	300
* DOBRAMENTO DE FACE			
* DOBRAMENTO DE RAIZ			

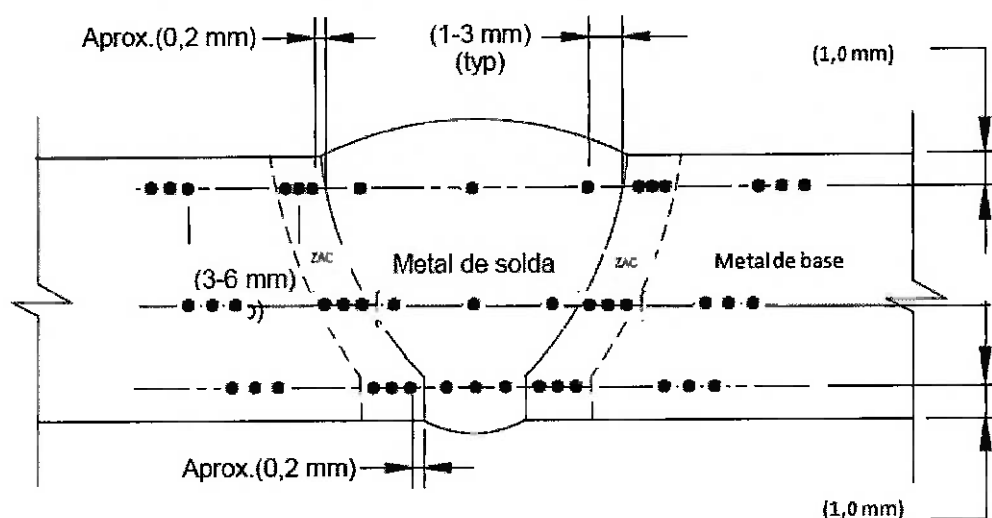
Os critérios utilizados para esse experimento foram baseados na Norma ASME IX, da seguinte forma:

- Preparação dos corpos de prova: ASME IX Ed. 2013 QW 462.3a
- Ensaio realizado: ASME IX ed. 2013 QW 162
- Critério de avaliação: ASME IX Ed. 2013 QW 163

#### 4.6.3 ENSAIO DE DUREZA

O Ensaio de Dureza Vickers (5Kg) foi realizado nas juntas soldadas a fim de ser verificado as alterações e principalmente avaliar a Zona Afetada pelo Calor que é o foco do trabalho. O equipamento utilizado foi um durômetro digital Vickers.

Os pontos e as regiões que foram retiradas as medidas dos corpos-de-prova foram baseadas na Norma Petrobras® N-133. Rocha, D. B. [9], acrescenta três pontos de medição por região em uma linha adicional na metade da junta, conforme observado na figura 4.2:



**Figura 4.2** – Região onde foram extraídos as medidas de dureza em cada experimento. Baseado na Norma Petrobras® N-133.

## **5.RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **5.1 ANÁLISE QUÍMICA.**

#### **5.1.1 RESULTADO DA ANÁLISE QUÍMICA POR ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓPTICA**

Os resultados obtidos da análise química por espectrometria de emissão óptica podem ser verificados na tabela 5.1 para o experimento 01 (Eletrodo Revestido) e na tabela 5.2 para o experimento 02 (TIG).

As amostras, tanto do experimento 01 quanto para o experimento 02, foram removidas de uma parte da circunferência da amostra de cada experimento, envolvendo o metal de base e o metal soldado.

**Tabela 5.1** - Tabela comparativa entre o resultado da composição química do tubo soldado através do processo de soldagem Eletrodo Revestido, metal de base e o consumível.

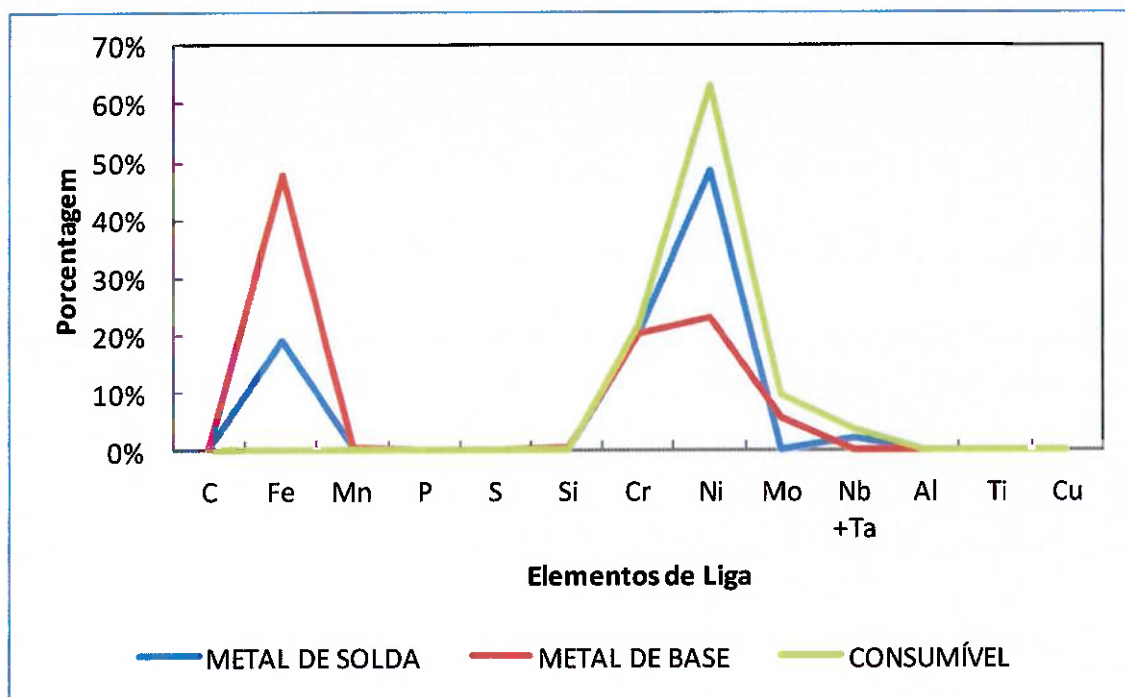
PROCESSO	ELETRODO REVESTIDO (EXPERIMENTO 01)												
METAL DE SOLDA													
ELEMENTOS DE LIGA	C	Fe	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Nb +Ta	Al	Ti	Cu
PORCENTAGEM DOS ELEMENTOS	0,026%	19,425%	0,406%	0,008%	0,003%	0,252%	20,512%	48,590%	0,007%	2,177%	0,031%	0,049%	0,086%
METAL DE BASE													
ELEMENTOS DE LIGA	C	Fe	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Nb +Ta	Al	Ti	Cu
PORCENTAGEM DOS ELEMENTOS	0,014%	48,020%	0,382%	0,020%	0,001%	0,447%	20,458%	23,316%	5,817%	0,068%	0,076%	-	0,258%
CONSUMÍVEL													
ELEMENTOS DE LIGA	C	Fe	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Nb +Ta	Al	Ti	Cu
PORCENTAGEM DOS ELEMENTOS	0,028%	0,217%	0,026%	0,002%	0,003%	0,016%	22,013%	63,460%	9,599%	3,79%	0,031%	0,049%	0,086%

Podemos observar fazendo uma comparação do metal de solda com o metal de base, que tivemos uma queda expressiva na concentração de ferro.

O C, Mn, P, S e o Si não sofreram grandes alterações nas suas concentrações.

Para os elementos Cr, Ni e Mo tivemos duas grandes alterações. O Cr não sofreu grandes alterações, porém o Ni aumentou mais que o dobro a sua concentração e o Mo praticamente desapareceu na diluição.

Essas alterações podem ser observada através da figura abaixo, que é composta pelo metal de solda, metal de base e consumível.



**Figura 5.1** – Comparativo entre o metal de base, de solda e o consumível no experimento 01 (Eletrodo Revestido).

**Tabela 5.2** - Tabela comparativa entre o resultado da composição química do tubo soldado através do processo de soldagem TIG, metal de base e o consumível.

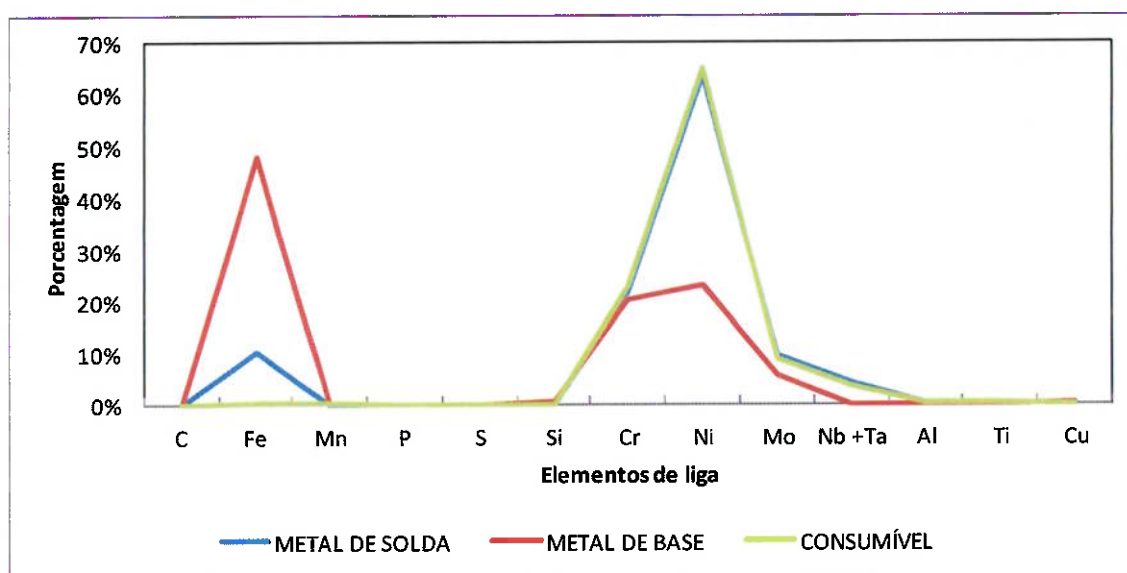
PROCESSO	TIG (EXPERIMENTO 02)												
METAL DE SOLDA													
ELEMENTOS DE LIGA	C	Fe	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Nb +Ta	Al	Ti	Cu
PORCENTAGEM DOS ELEMENTOS	0,028%	10,217%	0,026%	0,002%	0,003%	0,016%	22,013%	63,460%	9,599%	4,095%	0,304%	0,193%	0,004%
METAL DE BASE													
ELEMENTOS DE LIGA	C	Fe	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Nb +Ta	Al	Ti	Cu
PORCENTAGEM DOS ELEMENTOS	0,014%	48,020%	0,382%	0,020%	0,001%	0,447%	20,458%	23,316%	5,817%	0,068%	0,076%	-	0,258%
CONSUMÍVEL													
ELEMENTOS DE LIGA	C	Fe	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Nb +Ta	Al	Ti	Cu
PORCENTAGEM DOS ELEMENTOS	0,012%	0,290%	0,150%	0,009%	0,005%	0,050%	22,890%	65,000%	8,970%	3,640%	0,110%	0,220%	<0,001%



Analisando o Fe foi observado que a sua concentração caiu em praticamente um quarto. O C, P e S não tiveram grandes alterações nas suas concentrações, porém o Si teve uma queda na sua concentração. Essas grandes alterações são provocadas pela influência do consumível.

Quando analisamos a diluição do Cr, Ni e Mo, verificamos que houve um aumento significativo na concentração de Ni e um aumento também na concentração de Mo.

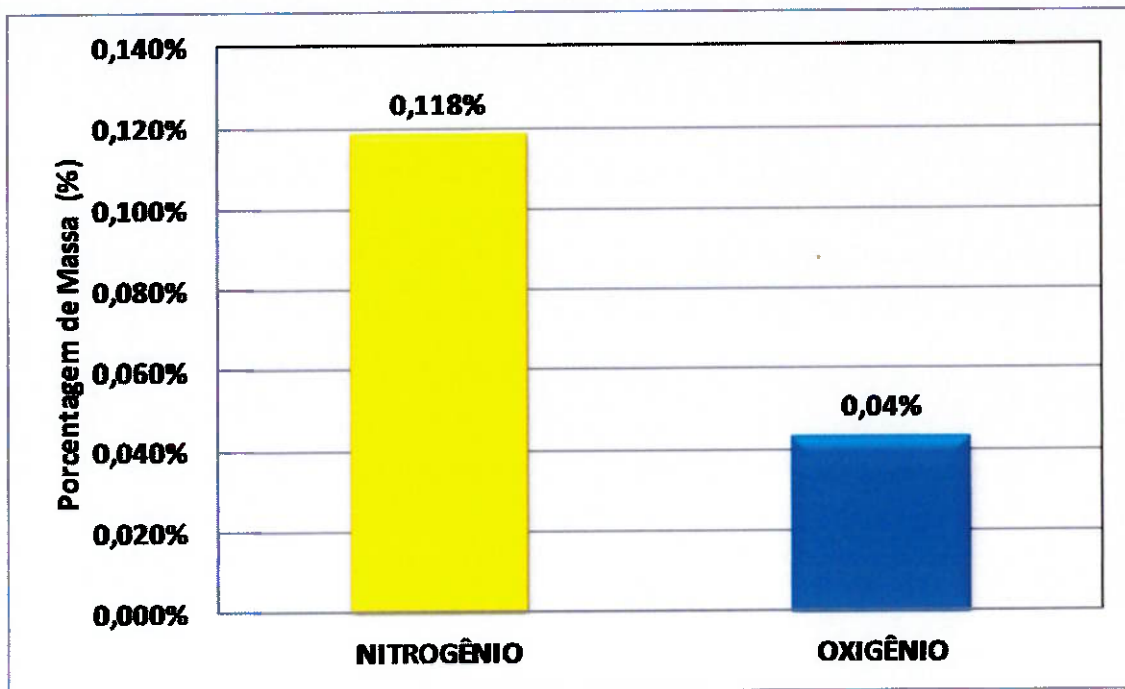
Essas alterações ficam visíveis na figura 5.2.



**Figura 5.2** – Comparativo entre o metal de base, de solda e o consumível no experimento 2 (TIG).

### 5.1.2 RESULTADO DA ANÁLISE QUÍMICA VIA CROMATOGRAFIA GASOSA.

O resultado da análise química via cromatografia gasosa (LECO®) para o experimento 01 está representado na figura 5.3. Nesse gráfico pode-se notar os valores referente as porcentagens de oxigênio (O) e nitrogênio (N).

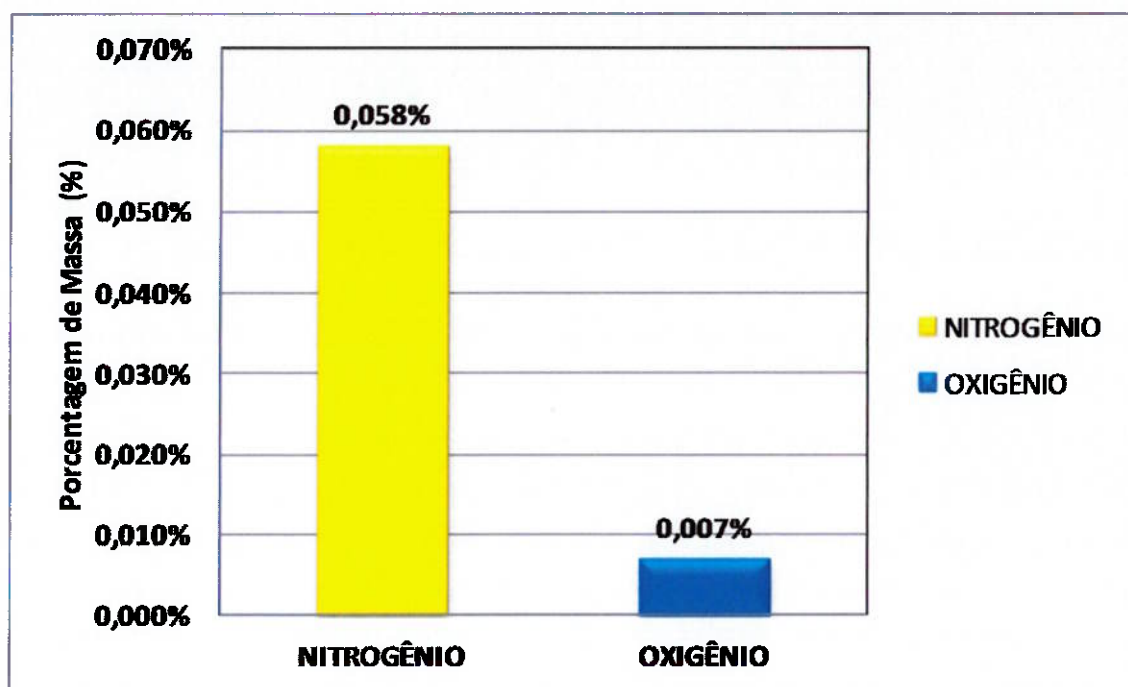


**Figura 5.3** – Quantidade de nitrogênio e oxigênio no tubo soldado pelo Processo de Soldagem Eletrodo Revestido (experimento 1).

O valor do nitrogênio (N) no experimento 1 quando comparado com o valor do nitrogênio no metal de base, que foi de 0,217%, podemos observar uma redução de 45,6%.

O nitrogênio em altas concentrações sabe-se que pode formar os carbonitreto e assim fragilizar o metal.

Através da figura 5.4 pode-se observar o resultado do ensaio para o experimento 2.



**Figura 5.4** – Quantidade de nitrogênio e oxigênio no tubo soldado pelo Processo de Soldagem TIG (experimento 2).

Ao comparar o valor de nitrogênio no metal de solda do experimento 2 (TIG) com o metal de base (0,217%), pode-se notar que houve uma redução de 73,27% e também esse valor quando comparado ao experimento 01, verifica-se que houve uma redução de 67,77%.

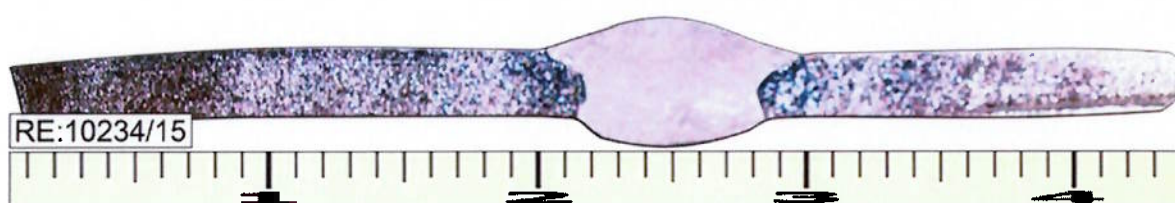
Quando comparado também o valor do oxigênio do experimento 2 (TIG) com o experimento 1 (Eletrodo Revestido), percebe-se uma redução de 82,5%.

Nesses resultados pode-se verificar que os valores em ambos experimentos do oxigênio em relação ao nitrogênio são mínimos, esse fato possivelmente está associado ao teor de alumínio no metal de solda, que tem efeito antioxidante.

## **5.2 CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA**

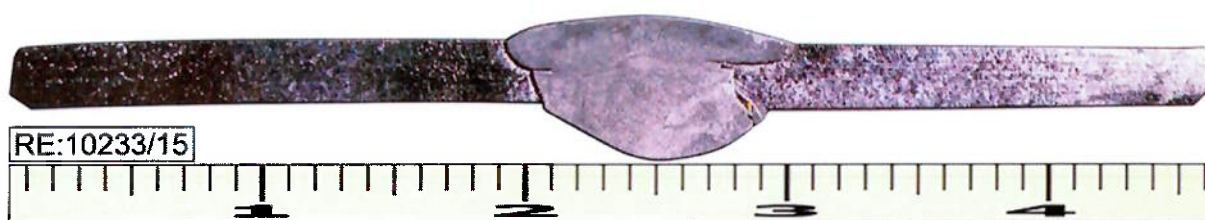
### **5.2.1 MACROGRAFIA**

A macrografia feita no experimento 01 pode ser verificada através da figura 5.3. Nessa figura fica evidente a qualidade da junta soldada, apesar de durante os experimentos ter sido encontrados inclusão de escórias.



**Figura 5.5** – Macrografia da junta soldada referente ao experimento 01 (Eletrodo Revestido).

Na macrografia do experimento 02 podemos também observar pela figura 5.4 a boa qualidade das juntas soldadas e os dois passes realizados.

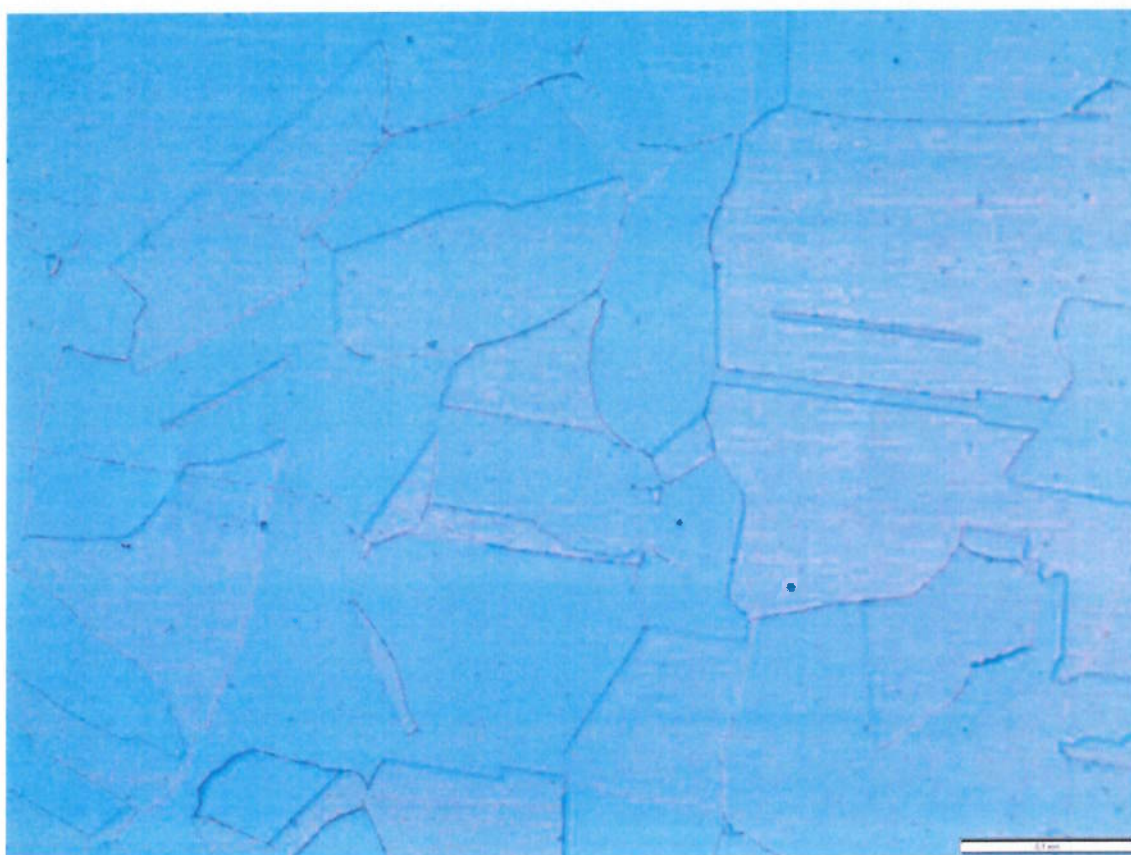


**Figura 5.6** – Macrografia da junta soldada referente ao experimento 02 (TIG).

As macrografias, apesar de fazerem uma boa representação da junta soldada, não foi suficiente para fazer uma medição da extensão da ZAC, devido a qualidade e ampliação da imagem.

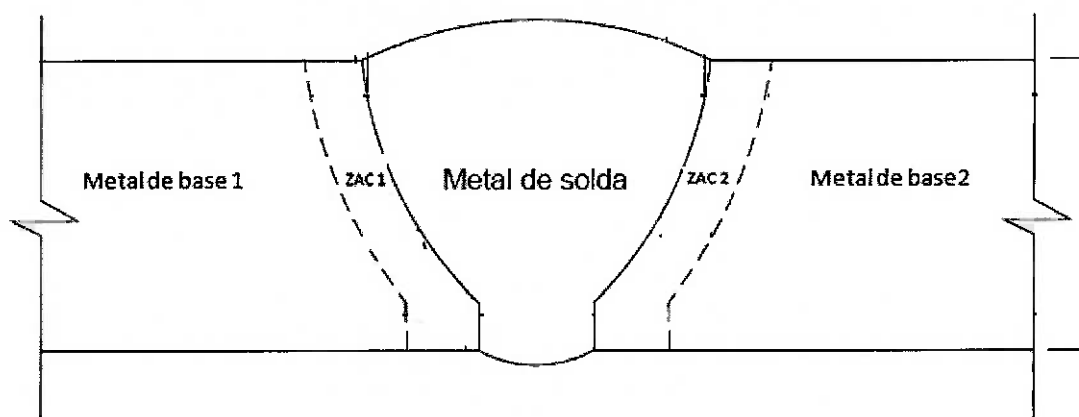
### 5.2.2 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL POR MICROSCOPIA ÓPTICA

Analisando a figura 5.7 pode-se observar a microestrutura do material ASTM A 312, que é composta basicamente por matriz de grão austeníticos.



**Figura 5.7** – Microestrutura do Metal de base do tubo ASTM A 312. Ataque: Kalling's. Aumento: 200X.

A partir dos próximos tópicos será tomado como base orientativa a figura 5.8, para melhor entendimento de como foi executado a sequência da micrografia dos experimentos.

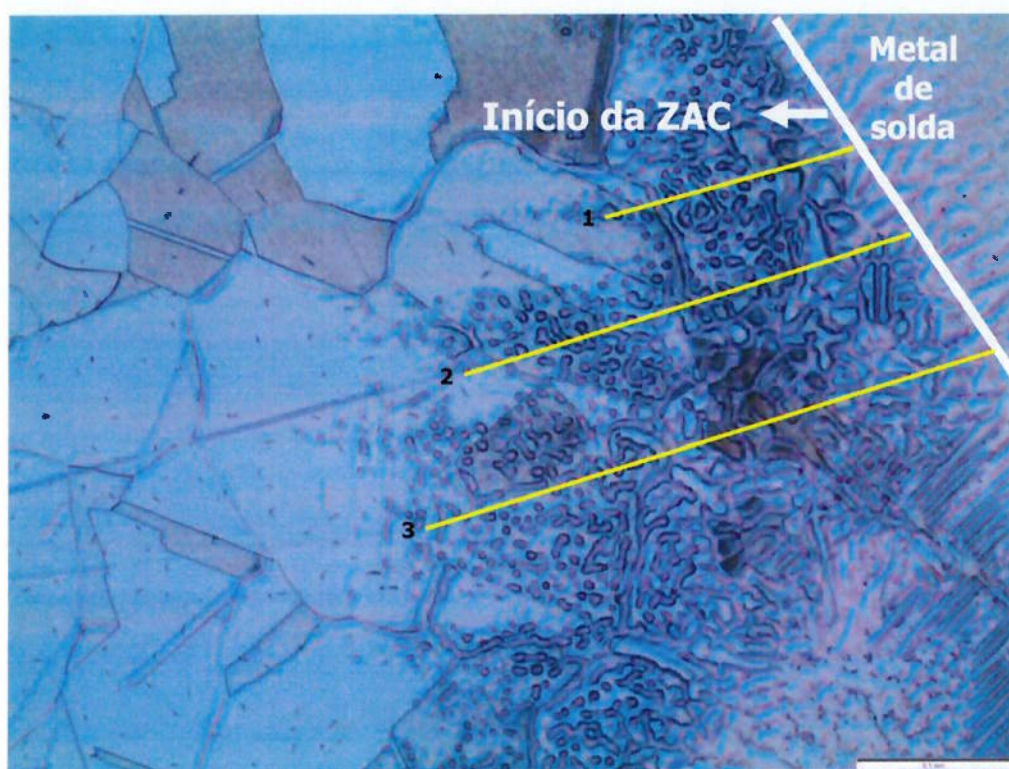


**Figura 5.8** – Modelo orientativo para apresentação das imagens que serão comentadas. [Adaptado da Norma Petrobras® N-133].

#### **5.2.2.1 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO EXPERIMENTO 01 (ELETRODO REVESTIDO)**

Nesse experimento pode-se observar através da figura 5.9 que na ZAC 1 temos uma matriz de grão austeníticos, com migração de possíveis nitretos na linha de fusão e no contorno de grão da ZAC. Os pontos cinzas são possivelmente migração de Ni do metal de base em direção ao metal de solda, conforme observado pela análise química.





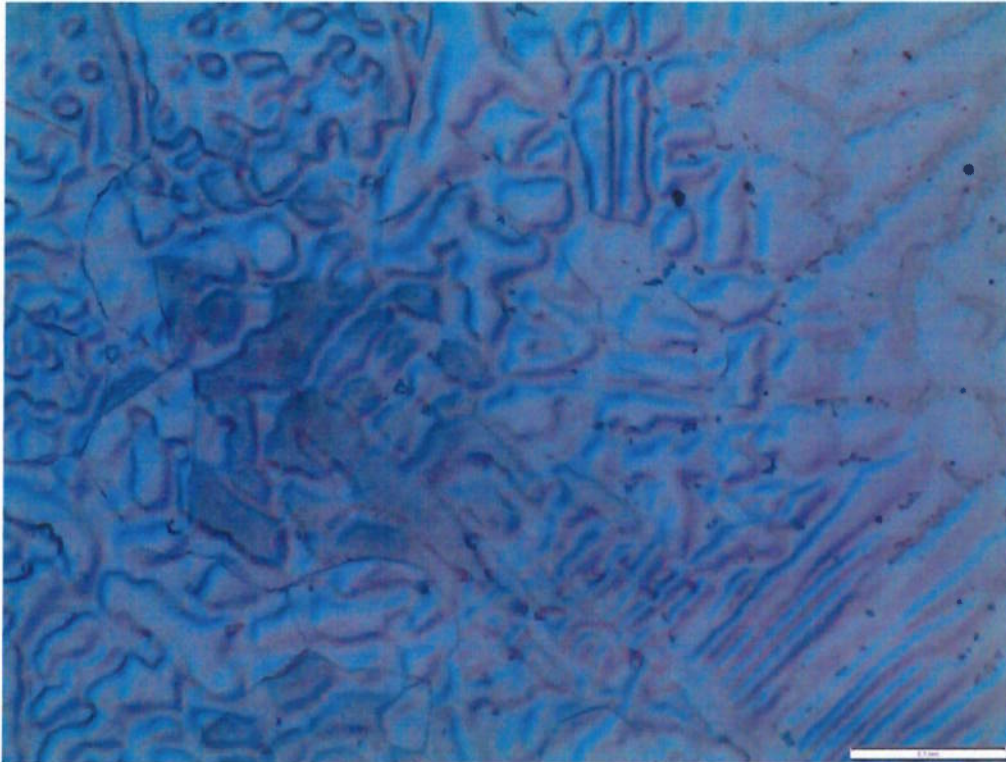
**Figura 5.9** – Microestrutura entre o metal de solda e a ZAC 1, onde pode-se observar através desses pontos escuros possíveis nitretos na linha de fusão. Ataque com Kalling's. Aumento: 200X.

Na figura 5.9 também foi possível medir a espessura da linha de fusão em três pontos, onde obteve-se os seguintes resultados:

**Tabela 5.3** - Medidas da espessura da ZAC 1 do experimento 1 (Eletrodo Revestido).

PONTOS DE AMOSTRAGEM	DIMENSÕES (mm)
	ESPESSURA
1	0,09
2	0,15
3	0,2

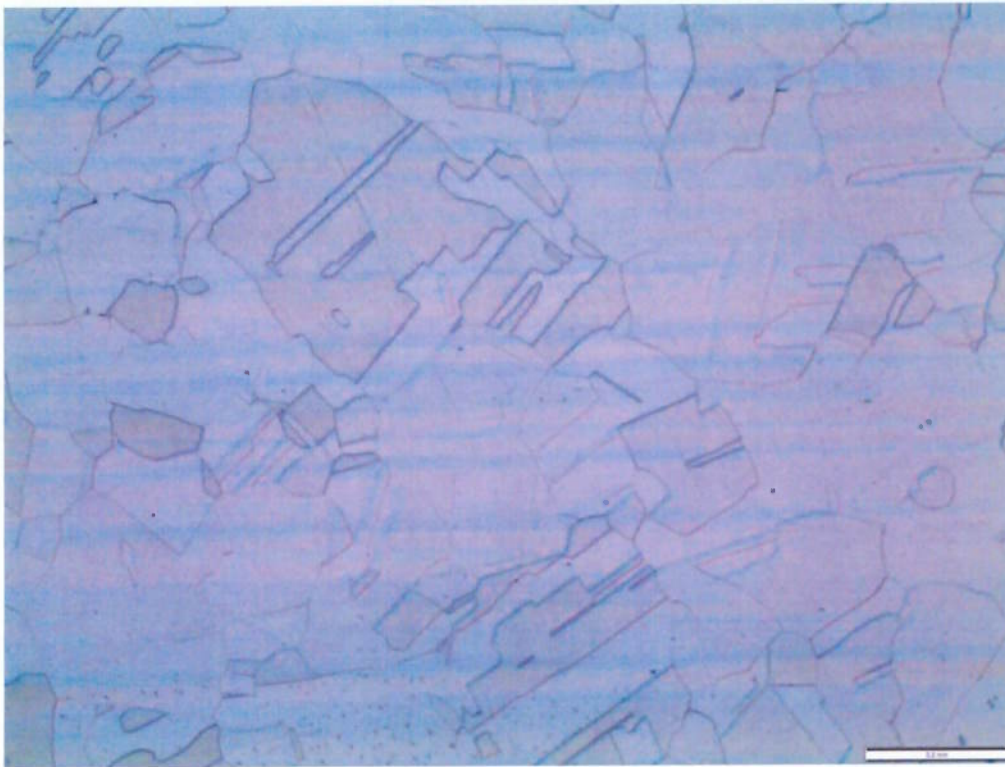
Na figura 5.10, pode-se observar melhor a migração possivelmente de Ni e os nitretos no contorno de grão na ZAC.



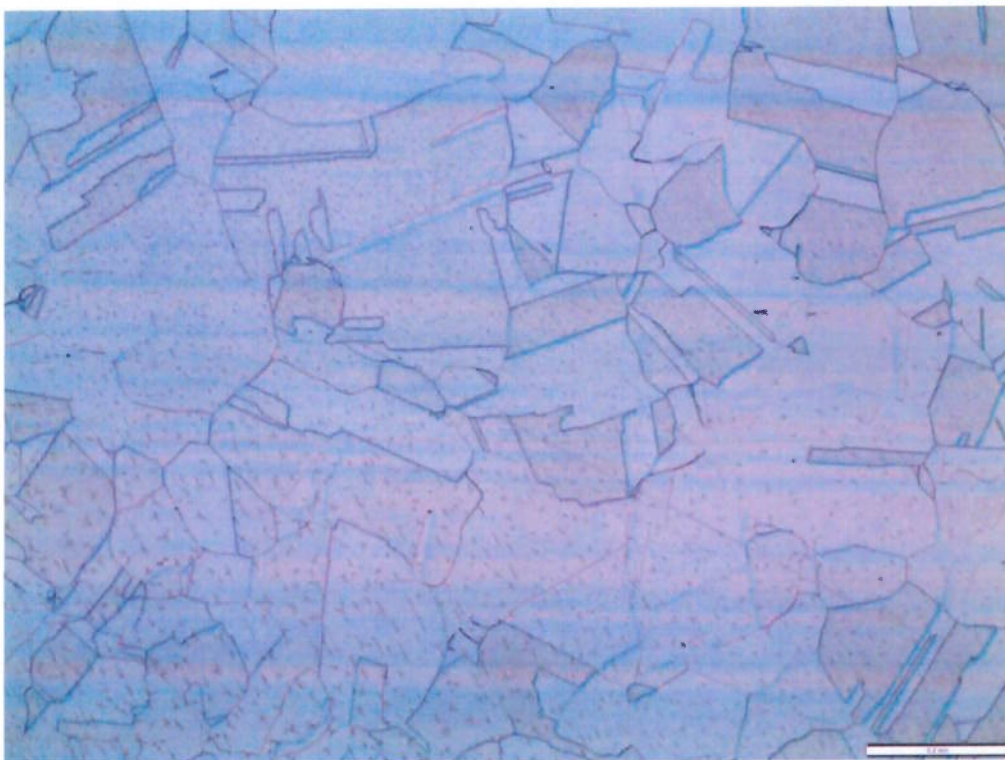
**Figura 5.10** – Microestrutura entre o metal de solda e a ZAC 1 ampliada, onde observa-se os pontos escuros que são possíveis nitretos e a migração do Ni. Ataque com Kalling's. Aumento: 500X.

Quando observando pelas figuras 5.11 e 5.12 o tamanho dos grãos nessa região, nota-se que não houve uma variação quando comparado o metal de base 1 com a ZAC 1, pois ambos são grãos autênticos de número 4.





**Figura 5.11** – Microestrutura do metal de base 1, onde foi medido o tamanho do grão. Ataque com Kalling's. Aumento: 200X.



**Figura 5.12** – Microestrutura da ZAC 1, onde foi medido o tamanho do grão. Ataque com Kalling's. Aumento: 200X.

Na figura 5.13 trata-se da microestrutura do metal de solda, onde verifica-se uma estrutura de solução sólida gama e pequenas partículas de nitretos dispersos na matriz.



**Figura 5.13** – Microestrutura do metal de solda, onde nota-se a estrutura gama e os pontos escuros sendo possíveis nitretos dispersos na matriz. Ataque com Kalling's. Aumento: 200X.

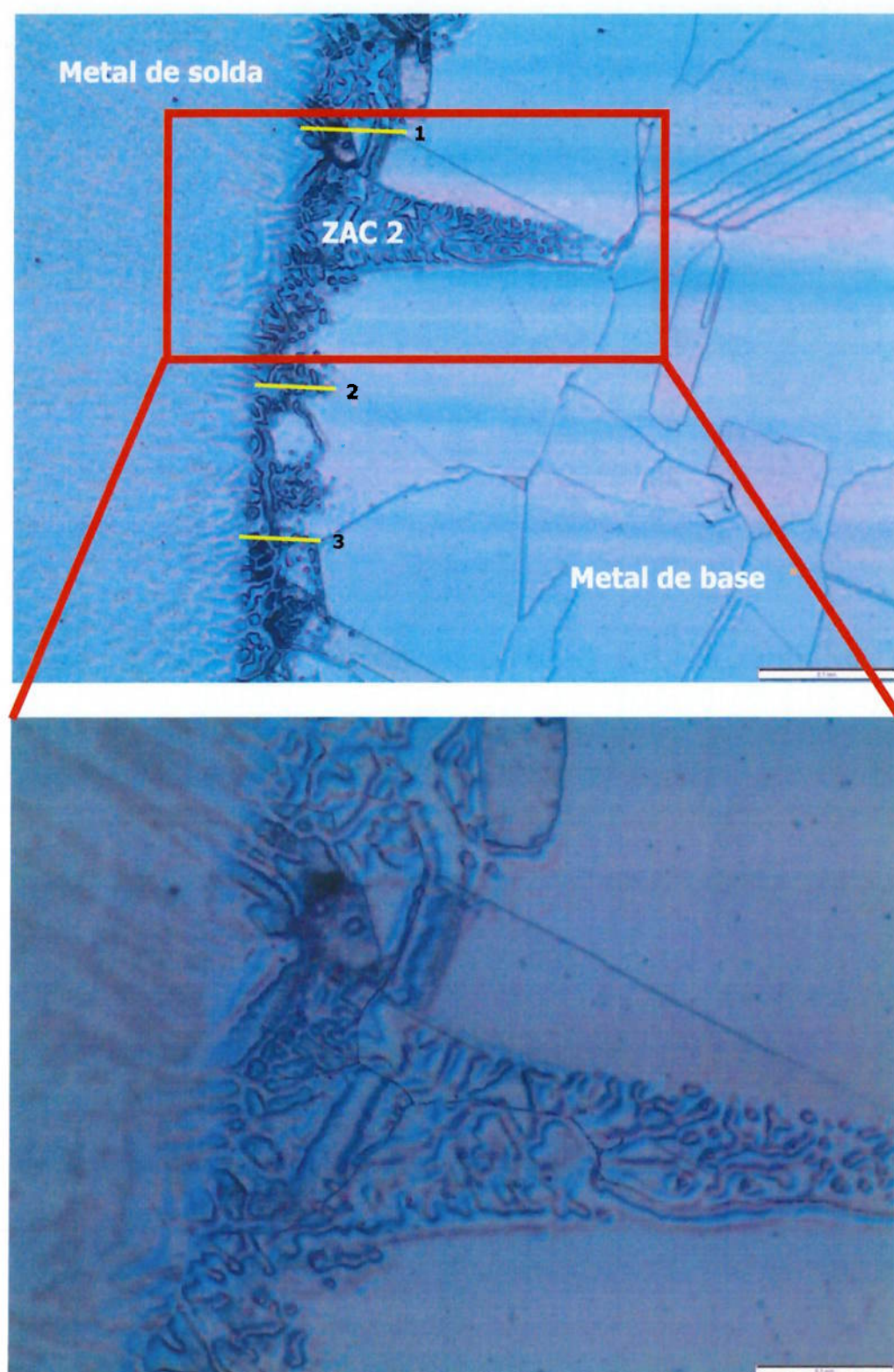
Nessa região do metal de solda também foi verificado a possibilidade de corrosão intergranular. Após ensaio ASTM A262/14 Prática A, foi constatado que a região estava isenta de corrosão, conforme figura 5.14 apresentada abaixo:





**Figura 5.14** – Microestrutura do metal de solda após ensaio ASTM A262/14 Prática A. Ataque com ácido oxálico a uma concentração de 10%. Aumento: 200X.

Na figura 5.15 observa-se na ZAC 2 uma microestrutura de matriz de grãos Auteníticos, com a formação de possíveis nitretos na linha de fusão e no contorno de grão da ZAC. Pode-se observar com maior detalhe o ponto destacado na parte ampliada.



**Figura 5.15** – Microestrutura que vai do metal de solda para a ZAC 2 até o metal de base. Estrutura de matriz de grão austeníticos com migração de possíveis nitretos na linha de fusão e em contorno de grãos da ZAC. Ataque com Kalling's. Aumento: 500X.

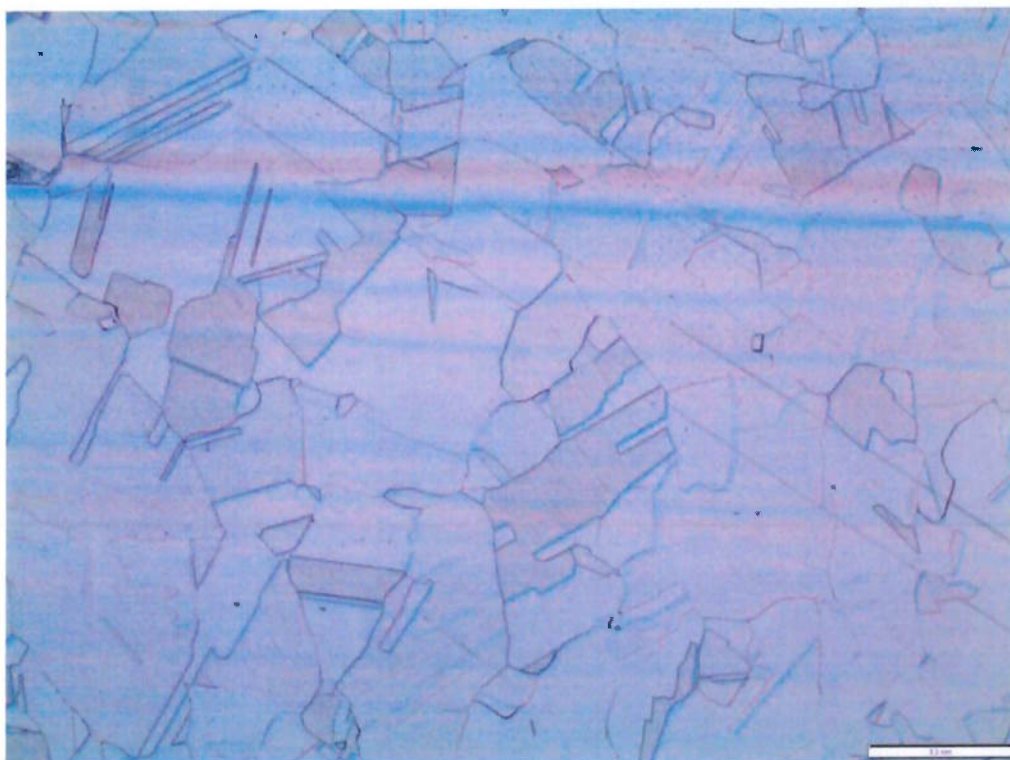


Na figura 5.15 foi possível medir a espessura da linha de fusão da ZAC 2 do experimento 1, obtendo assim os seguintes resultados:

**Tabela 5.4** - Medidas da espessura da ZAC 2 do experimento 1 (Eletrodo Revestido).

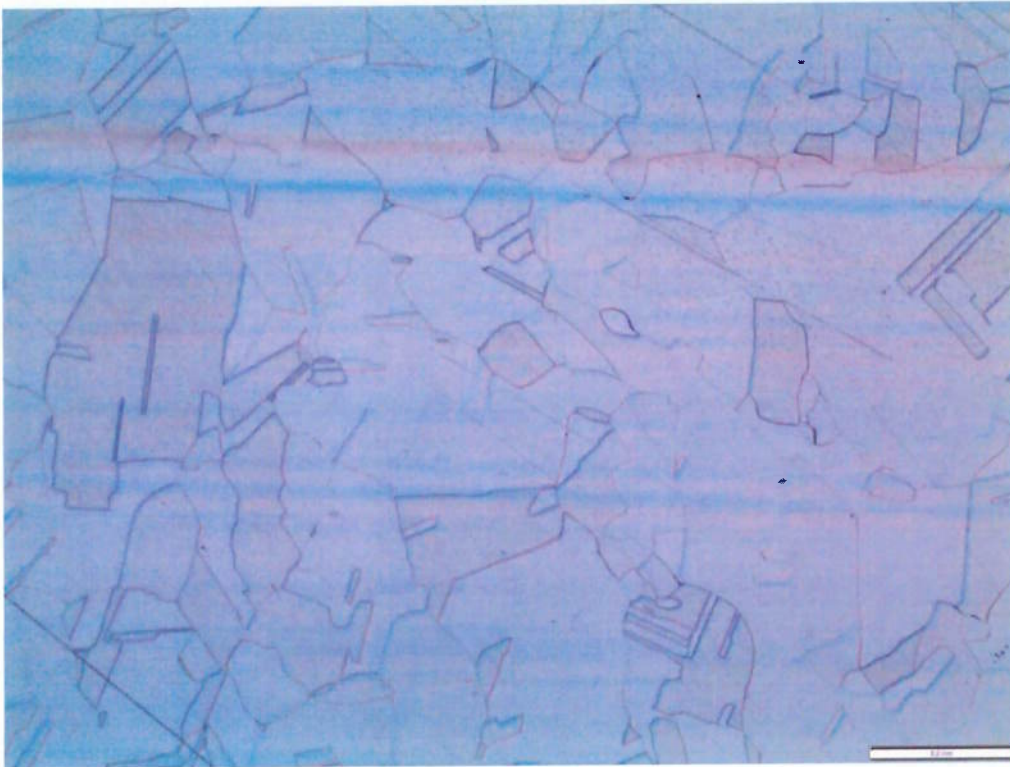
PONTOS DE AMOSTRAGEM	DIMENSÕES (mm)
	ESPESSURA
1	0,09
2	0,07
3	0,07

Nessa região também foi observado pelas figuras 5.16 e 5.17 que não houve variação com relação ao tamanho do grão, tanto na ZAC 2, quanto no metal de base 2, pois ambos permaneceram com grão austenítico de tamanho número 4.



**Figura 5.16** – Microestrutura da ZAC 2, onde foi medido o tamanho do grão.

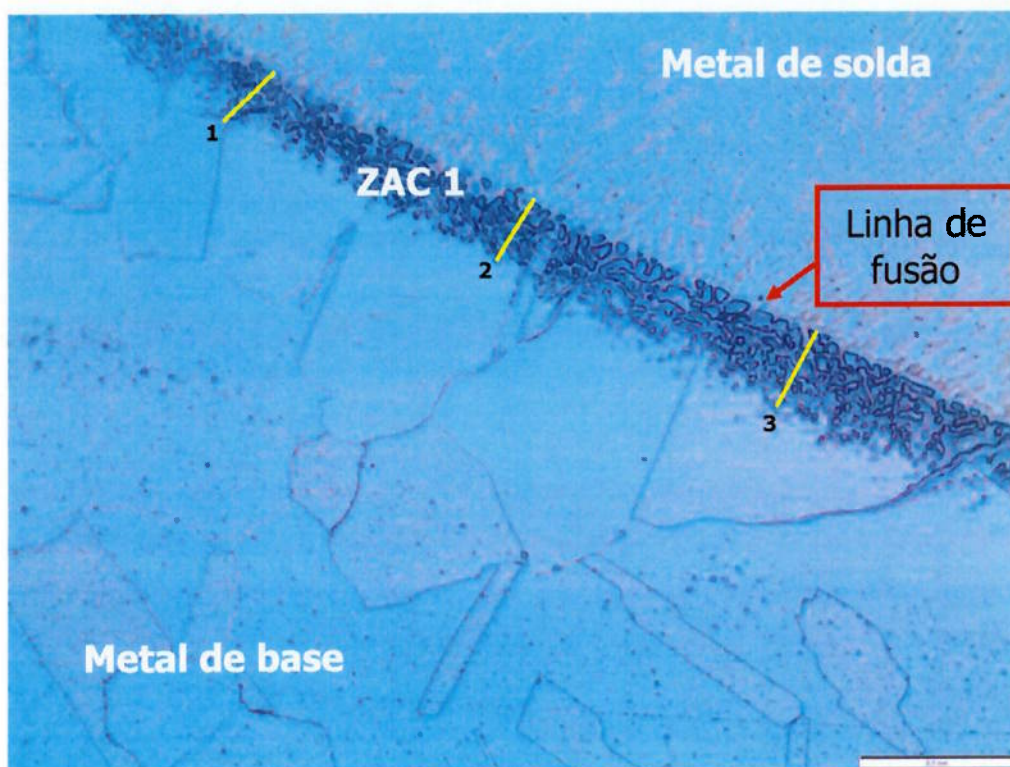
Ataque com Kalling's. Aumento: 200X.



**Figura 5.17** – Microestrutura de uma região do metal de solda 2 onde foi medido o tamanho do grão. Ataque com Kalling's. Aumento: 200X.

#### **5.2.2.2 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO EXPERIMENTO 02 (TIG).**

No experimento 2 pode-se observar através da figura 5.18 que a microestrutura na ZAC 1 possui uma matriz de grãos austeníticos com migração de possíveis nitretos na linha de fusão.



**Figura 5.18** – Microestrutura entre o metal de base 1, ZAC 1 e o metal de solda, onde pode-se observar os possíveis nitretos na linha de fusão. Ataque com Kalling's. Aumento: 200X.

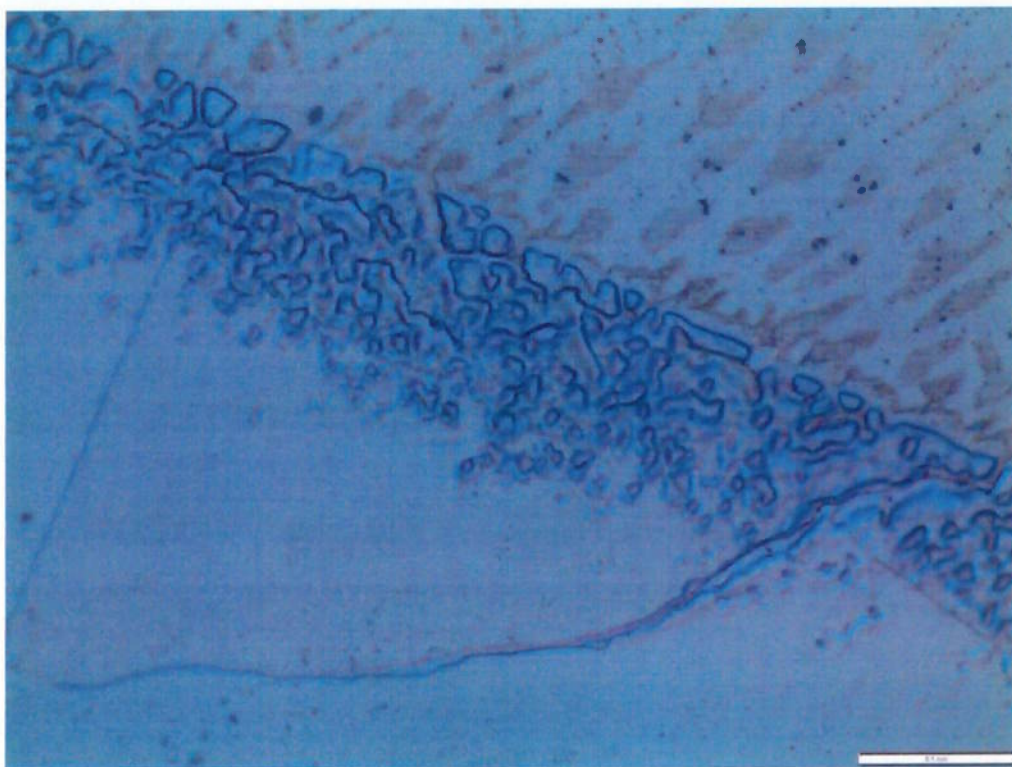
Na figura 5.18 também foi realizada a medida da espessura da linha de fusão da ZAC 1 do experimento 2 (TIG), obtendo assim os seguintes resultados:

**Tabela 5.5** - Medidas da espessura da ZAC 1 do experimento 2 (TIG).

PONTOS DE AMOSTRAGEM	DIMENSÕES (mm)
	ESPESSURA
1	0,05
2	0,05
3	0,06

Na figura 5.19 podemos ter uma visão ampliada de uma região da ZAC 1 e da linha de fusão.

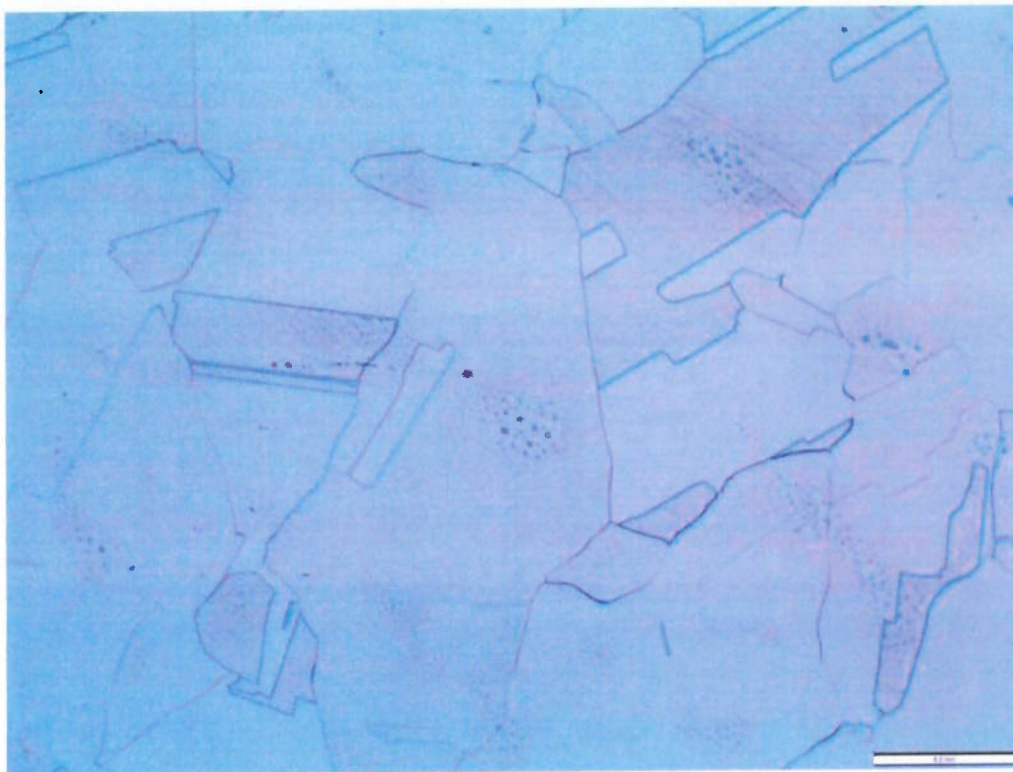




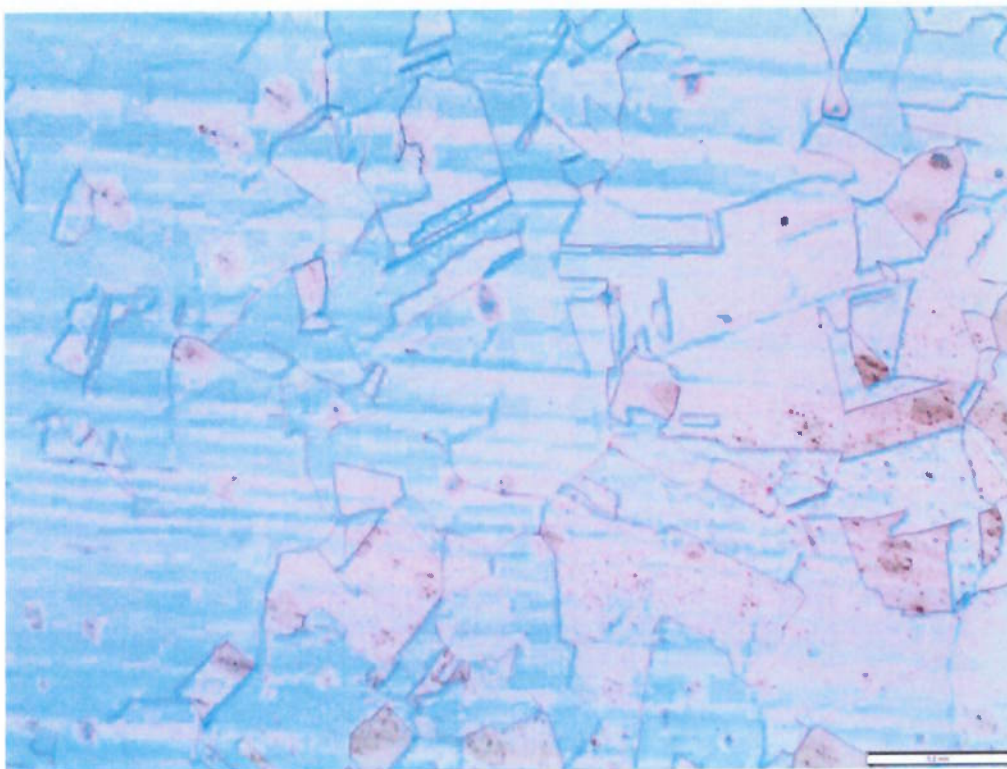
**Figura 5.19** – Microestrutura ampliada da ZAC 1 e da linha de fusão, onde pode-se observar os possíveis nitretos nos contornos de grão e também uma possível migração do Ni para o metal de solda. Ataque com Kalling. Aumento: 500X.

Avaliando o tamanho do grão pode-se notar que houve uma diminuição no seu tamanho, se comparado com os apresentados nas figuras 5.20 e 5.21. De acordo com o resultado observamos um tamanho de grão austenítico número 3 no metal de base 1 e na ZAC 1 um tamanho de grão austenítico número 4.





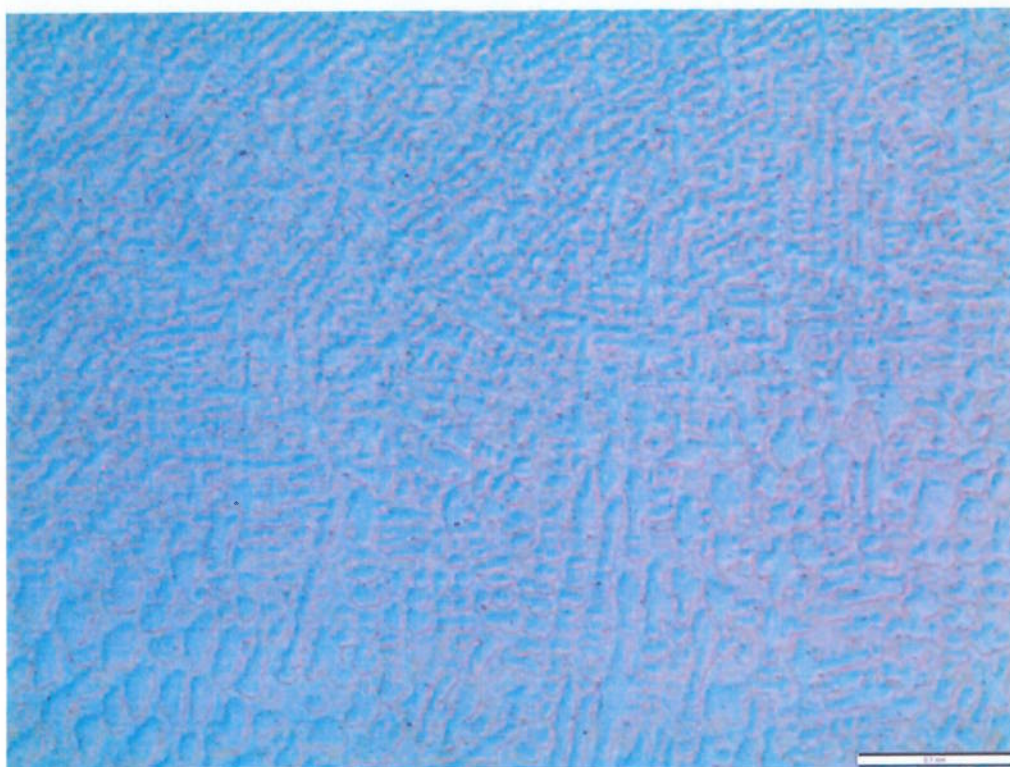
**Figura 5.20** – Microestrutura retirada de uma região do metal de base 1, onde foi medido o tamanho do grão. Ataque com Kalling's. Aumento: 200X.



**Figura 5.21** – Microestrutura da ZAC 1 onde foi medido o tamanho do grão.

Ataque com Kalling's. Aumento: 200X.

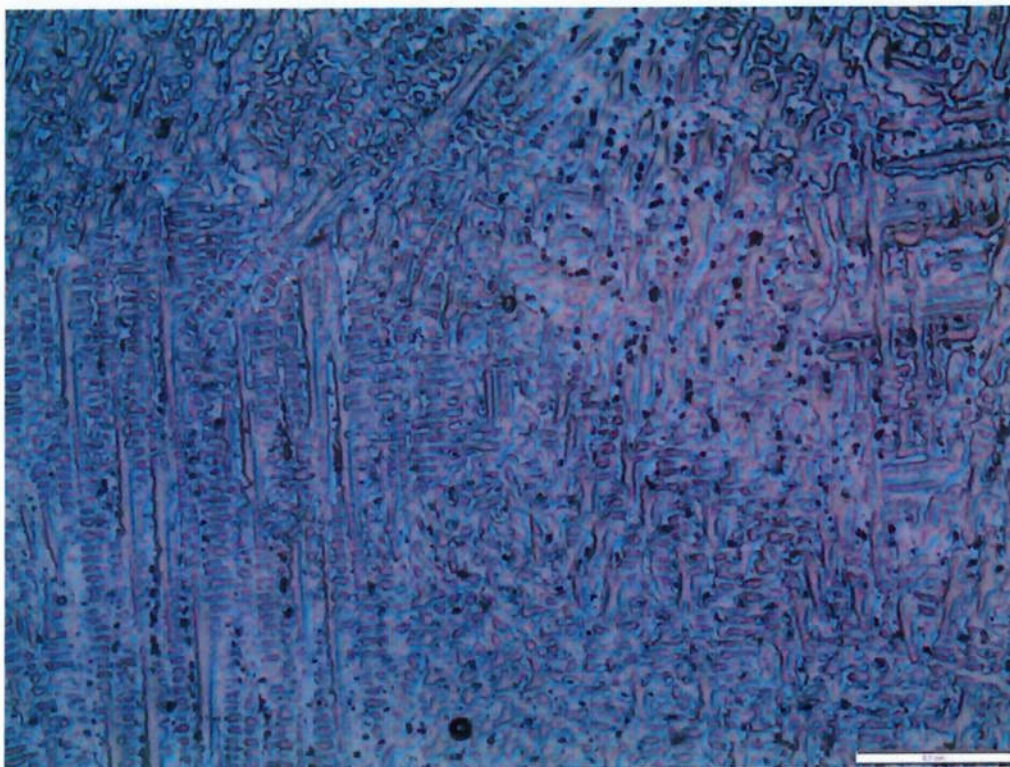
Na região do metal de solda é possível visualizar através da figura 5.22 uma estrutura sólida gama e partículas de nitretos dispersos na matriz, que podem ser percebidos através desses pontos escuros.



**Figura 5.22** – Microestrutura sólida gama com possíveis nitretos dispersos na matriz. Ataque com Kalling's. Aumento: 200X.

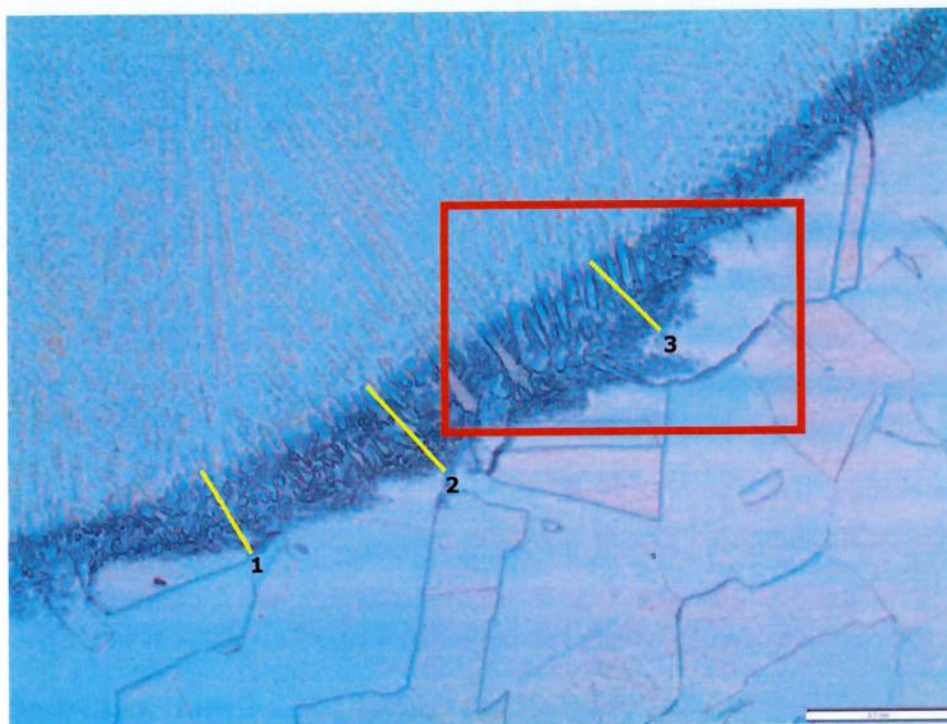
Para verificação da integridade do metal de solda com relação a corrosão intergranular também foi feito o ensaio ASTM A262/14 Prática A, onde observou-se que não foi detectada corrosão intergranular, conforme figura 5.23:





**Figura 5.23** – Microestrutura do metal de solda onde após ensaio ASTM A262/14 Prática A. Ataque com Ácido oxálico a uma concentração de 10%. Aumento: 200X.

A figura 5.24 é a imagem da microestrutura da ZAC 2, onde também é encontrado uma matriz de grãos autênticos com migração de possíveis nitretos na linha de fusão.



**Figura 5.24** – Microestrutura da ZAC 2, onde pode ser visualizado a matriz de grãos austeníticos com migração de possíveis nitretos na linha de fusão. Ataque com Kalling's. Aumento: 200X.

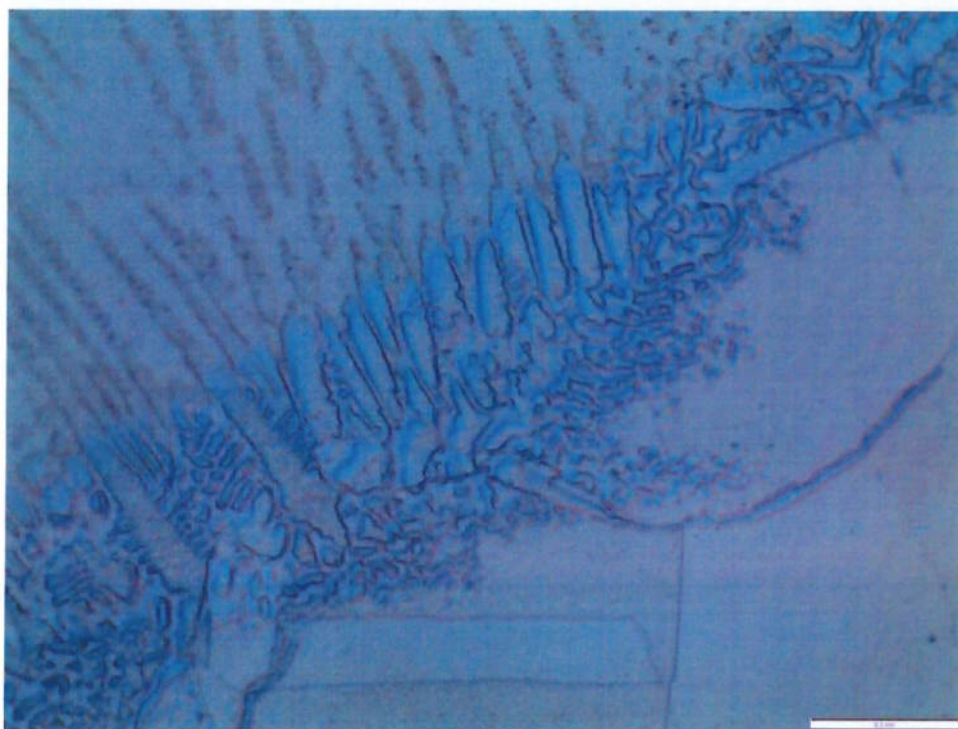
Na figura 5.24 foi medido também a espessura da linha de fusão da ZAC 2 do experimento 2 (TIG), conforme resultados abaixo:

**Tabela 5.6** - Tabela com as medidas das espessuras da ZAC 2 do experimento 2 (TIG).

PONTOS DE AMOSTRAGEM	DIMENSÕES (mm)
	ESPESSURA
1	0,06
2	0,08
3	0,06

Através da figura 5.25 abaixo pode-se verificar com mais detalhes a linha de fusão representadas pelos pontos escuros, que são possíveis nitretos, e também a migração de Ni do metal de base para o metal de solda através dos

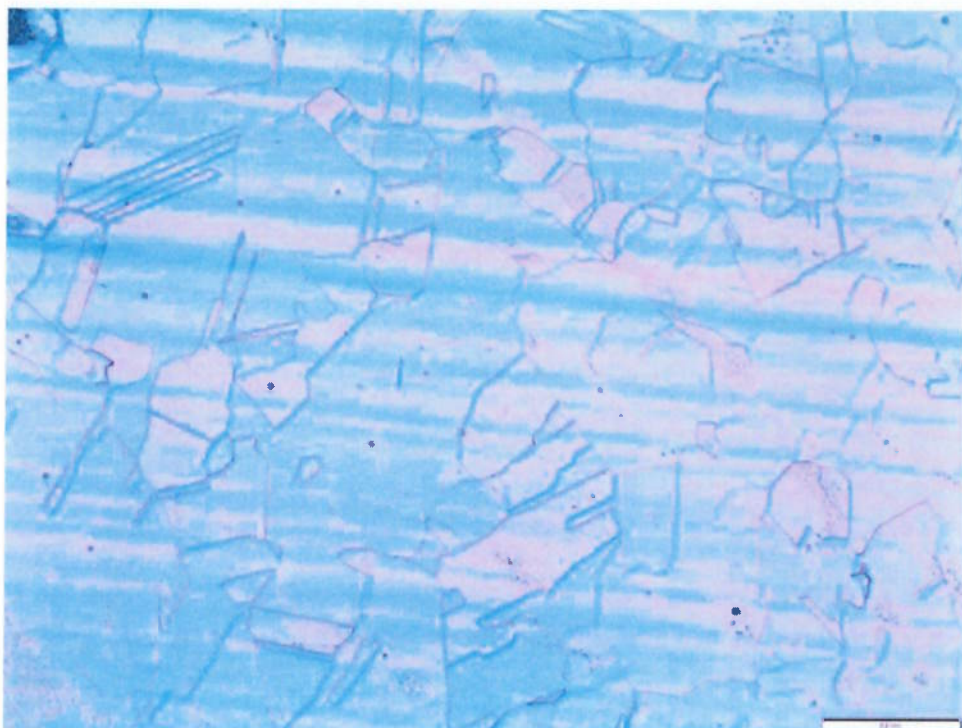
pontos de cor azulada. Essa figura é uma ampliação da área destaca na figura 5.24.



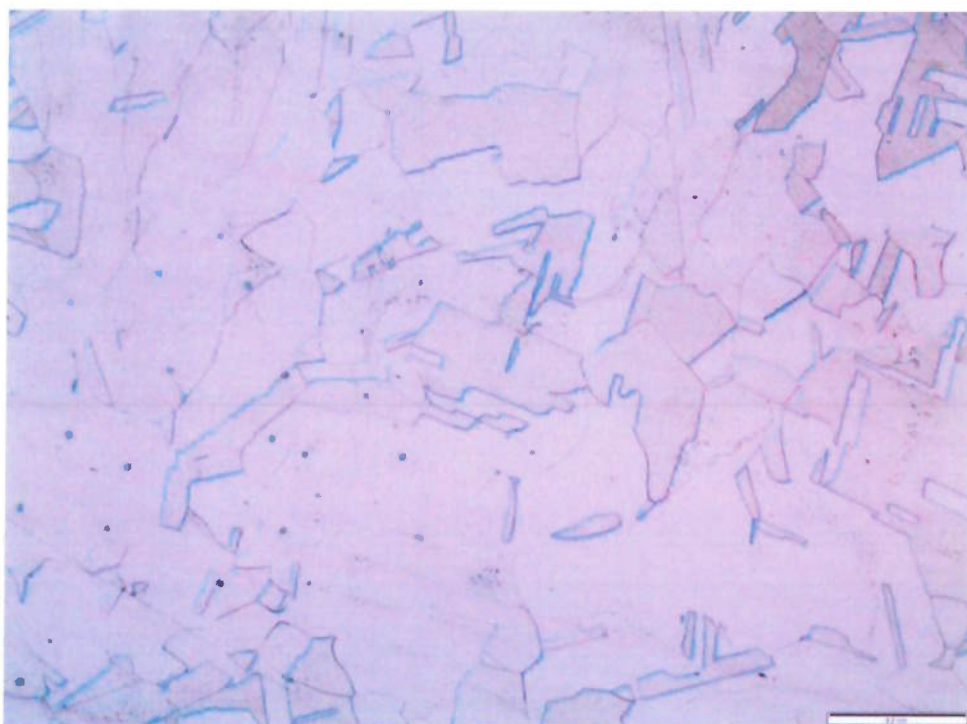
**Figura 5.25** – Microestrutura da ZAC 2 ampliada na região destacada pela figura 5.24, onde pode-se observar possíveis nitretos na linha de fusão e a migração do Ni. Ataque com Kalling's. Aumento: 500X.

Avaliando agora o tamanho do grão austenítico na região entre a ZAC 2 e o metal de base 2, pode-se observar que houve também uma alteração do tamanho do grão, onde, na ZAC 2, conforme figura 5.26, o tamanho do grão austenítico foi de número 4 e no metal de base 2 números 2 o tamanho do grão austenítico foi de número 3, conforme figura 5.27.





**Figura 5.26** – Microestrutura de uma região da ZAC 2 onde foi medido o tamanho do grão. Ataque com Kalling's. Aumento: 200X.



**Figura 5.27** – Microestrutura da região do metal de base 2 onde foi medido o tamanho do grão. Ataque com Kalling's. Aumento: 200X.

## **5.3 ENSAIOS MECÂNICOS**

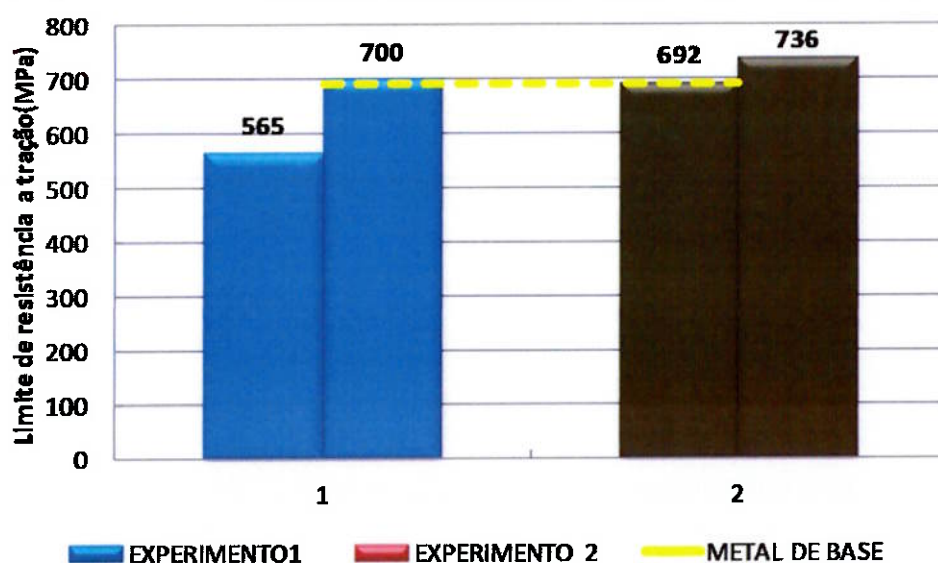
### **5.3.1 ENSAIO DE TRAÇÃO**

Para cada experimento foram realizados dois ensaios de tração, para que tivéssemos uma mínima forma para avaliar e comparar cada experimento.

O resultado do Ensaio de Tração está apresentado na tabela 5.7 e através da figura 5.28 tanto para o experimento 1 quanto para o experimento 2. Na figura 5.28 também foi incluído o valor de aceitação pela na Norma ASME IX.

**Tabela 5.7** - Resultado do ensaio de resistência a tração para os dois experimentos.

LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO				
EXPERIMENTO	PROCESSO	CARGA (Kgf)	MPA	LOCAL DE ROMPIMENTO
1	Eletrodo Revestido	1877	565	Rompeu na solda
	Eletrodo Revestido	2133	700	Rompeu na solda
2	TIG	2471	736	Rompeu no metal de base
	TIG	2297	692	Rompeu na linha de fusão





**Figura 5.28** – Resultado do Ensaio de Tração referente aos dois experimentos.

O experimento 01 de acordo com a Norma ASME IX QW 153 não foi aprovado devido ao rompimento ter sido na solda e o valor exigido (690 MPa – linha amarela) de um dos corpos de prova ter sido abaixo. Ao analisar o corpo de prova, foi verificado inclusão de escória, comprometendo esse experimento nesse quesito.

O corpo de prova do experimento 02 apresentou um rompimento na linha de fusão, porém pela Norma ASME IX QW 153, como a resistência foi superior 95% da resistência especificada para o metal de base, ele foi aprovado (692 MPa).

Além disso, pode-se notar que os valores encontrados no experimento 02 (TIG) são melhores do que no experimento 01 (Eletrodo Revestido), principalmente quando analisado pelo ponto do rompimento de cada corpo de prova.

### 5.3.2 ENSAIO DE DOBRAMENTO LATERAL

Foram realizados dois ensaios de dobramento lateral para cada experimento. Os critérios de preparação e aceitação foram todos de acordo com a Norma ASME IX.

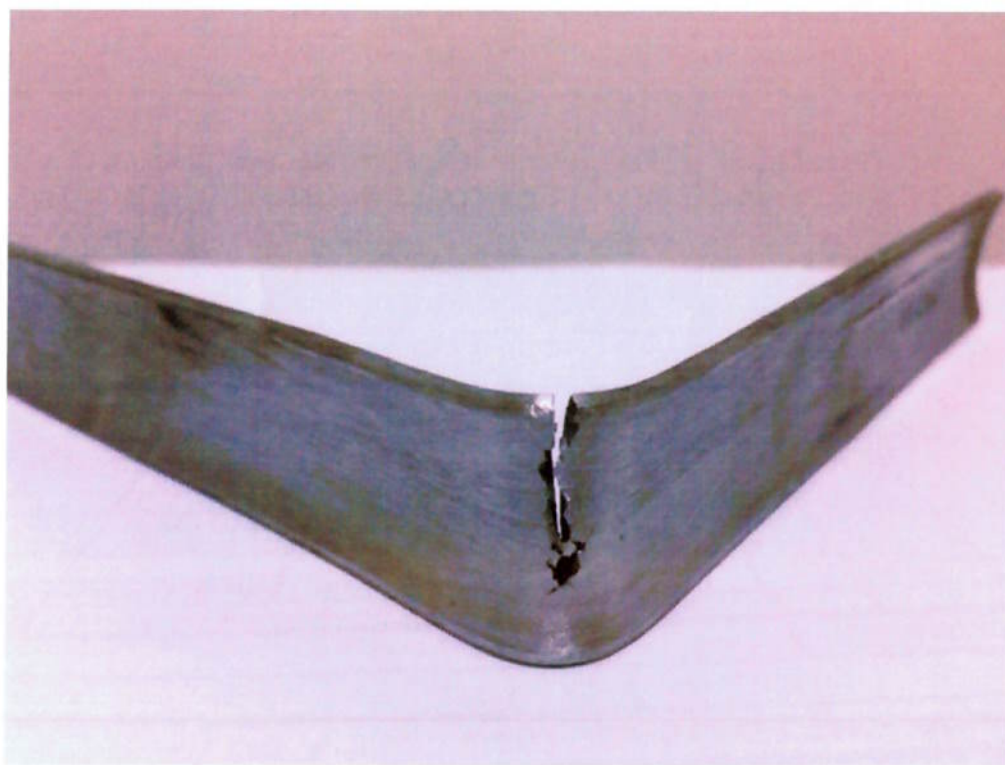
Os resultados estão apresentados todos na tabela 5.8:

**Tabela 5.8** - Resultado do Ensaio de Dobramento Lateral para os dois ensaios.

ENSAIO DE DOBRAMENTO LATERAL			
EXPERIMENTO	PROCESSO	ÂNGULO DE DOBRAMENTO	RESULTADO
1	Eletrodo Revestido	180°	Inseto de descontinuidade
	Eletrodo	99°	Apresentou abertura total da

	Revestido		solda
2	TIG	180°	Insento de descontinuidade
	TIG	180°	Insento de descontinuidade

Como verificado na tabela 5.8 o experimento 01 (Eletrodo Revestido) novamente apresentou falha em um dos corpos de prova durante o ensaio e, de acordo com o critério de aceitação da Norma ASME IX QW 163, como o corpo de prova apresentou uma trinca de 16mm na direção transversal e foi observado novamente inclusão de escória, esse ensaio para o experimento 01 também foi reprovado. Abaixo figura 5.29 do corpo de prova que sofreu abertura total da solda.



**Figura 5.29** – Corpo de prova do experimento 01 que sofreu rompimento na solda durante o ensaio.

O experimento 02 (TIG), de acordo com os resultados apresentados na tabela, não apresentou descontinuidade no ensaio e, de acordo com os critérios de aceitação da Norma ASME IX QW 163, foi aprovado.

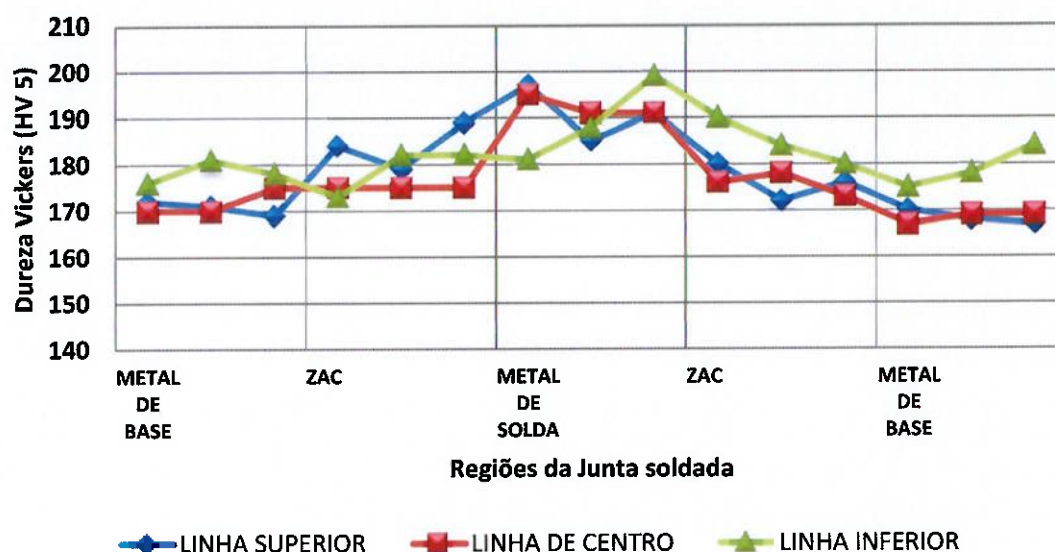
Para esse ensaio fica claro que os resultados obtidos para o experimento 02 (TIG) são superiores ao experimento 01 (Eletrodo Revestido). Esse resultado é devido a inclusão de escória encontrado no metal de solda.

### 5.3.3 ENSAIO DE DUREZA

Os resultados para o Ensaio de Dureza Vickers (HV 5) para o experimento 01 (Eletrodo Revestido) estão apresentados na tabela 5.9. As medidas foram tiradas por regiões da junta soldada e separadas por três linha: Central, linha inferior e superior. Essa divisão foi feita devido a espessura do material não termos tido muitos passes durante o processo de soldagem.

**Tabela 5.9** - Resultado do Ensaio de Dureza Vickers (HV 5) para o experimento 01 (Eletrodo Revestido).

ENSAIO DE DUREZA VICKERS (HV 5)															
AMOSTRA	METAL DE BASE			ZAC			METAL DE SOLDA			ZAC			METAL DE BASE		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
LINHA SUPERIOR	172	171	169	184	179	189	197	185	191	180	172	176	170	168	167
LINHA DE CENTRO	170	170	175	175	175	175	195	191	191	176	178	173	167	169	169
LINHA INFERIOR	176	181	178	173	182	182	181	188	199	190	184	180	175	178	184



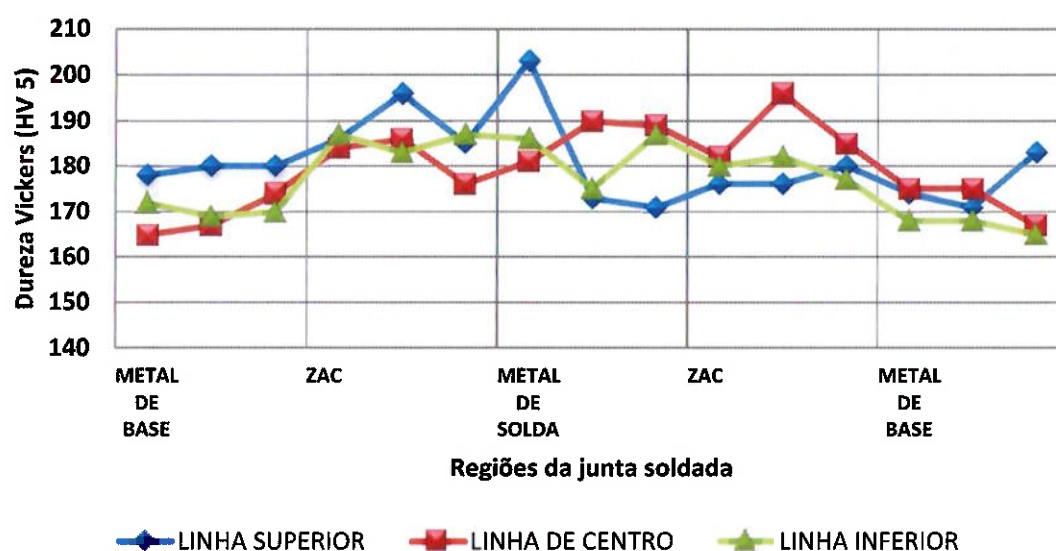
**Figura 5.30** – Medida de Dureza Vickers (HV 5) para o experimento 01 (Eletrodo Revestido).

Pode-se observar no experimento 1 através da figura 5.30 que não houve uma variação expressiva entre o metal de base e a ZAC, porém nota-se um aumento na dureza no metal de solda. Isso também é percebido através da contagem do tamanho do grão, onde não observamos um refino do grão na estrutura tanto no metal de base quanto na ZAC.

Para o experimento 2 (TIG) os resultados do ensaio de Dureza Vickers (HV 5) estão apresentados na tabela 5.10 e também pode-se ter uma ideia visual melhor através da figura 5.31. A forma como foi executado o ensaio e extraído as medidas segue o mesmo padrão do experimento 1.

**Tabela 5.10** - Resultado do Ensaio de Dureza Vickers (HV 5) para o experimento 02 (TIG).

ENSAIO DE DUREZA VICKERS (HV 5)															
AMOSTRA	METAL DE BASE			ZAC			METAL DE SOLDA			ZAC			METAL DE BASE		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
LINHA SUPERIOR	178	180	180	186	196	185	203	173	171	176	176	180	174	171	183
LINHA DE CENTRO	165	167	174	184	186	176	181	190	189	182	196	185	175	175	167
LINHA INFERIOR	172	169	170	187	183	187	186	175	187	180	182	177	168	168	165



**Figura 5.31** – Medida de Dureza Vickers (HV 5) para o experimento 02 (TIG).

Analisando a figura 5.31, nota-se que na região do metal de base os valores são inferiores na média, quando comparado com a ZAC e o metal de solda. Observa-se também que os maiores valores estão concentrados na ZAC.

Nessa região também foi percebida um aumento no tamanho do grão que passa do metal de base de número 3 para grão de tamanho número 4 na ZAC.

Comparando os dois experimentos observa-se que o experimento 02 tem maiores variações na dureza do que o experimento 01 e também se percebe que no experimento 01 a linha inferior foi o que apresentou maior dureza, enquanto que no experimento 02 foi a linha de centro.

## **6.CONCLUSÃO**

1. Pelo resultado da composição química pode-se verificar que o metal de solda para o experimento 01 (Eletrodo Revestido) apresentou baixo teor de molibdênio, quando comparado ao experimento 02 (TIG), apesar do processo de soldagem no experimento 01 ter sido de passe único, quando comparado ao experimento 02 que teve dois passes.

2. Através do ensaio de Cromatografia Gasosa via (LECO®) verifica-se uma grande diferença nas quantidades de nitrogênio e oxigênio do experimento 01 (Eletrodo Revestido) para o experimento 2 (TIG), onde conclui-se que a fragilização provocada pelo nitrogênio é muito menor no experimento 1 do que no experimento 2.

3. Quando comparado as micrografias, verifica-se que no experimento 2 (TIG) a linha de fusão é mais estreita e uniforme quando comparado ao experimento 01 (Eletrodo Revestido), conforme apresentado nas tabelas 5.5 e 5.6.

4. Os resultados obtidos através dos ensaios mecânicos (Ensaio de Tração, Ensaio de Dobramento e Dureza Vickers), apesar dos dois experimentos apresentarem valores próximos, fica claro que a qualidade e a confiabilidade no Processo TIG é muito maior do que no Processo Eletrodo Revestido, pois mesmo tendo todos os cuidados durante a preparação da junta soldada e a execução, tivemos problemas com a inclusão de escória.

4. Pode-se observar uma possível migração de Ni do metal de base para o metal de solda, porém não foi possível quantificar volumetricamente o valor

na ZAC em cada experimento. Além disso, também não foi possível avaliar os nitretos encontrados na ZAC e no metal de solda em cada experimento.

6. Apesar de serem utilizados os mesmos parâmetros de soldagem nos dois experimentos, fica claro que o Processo TIG é muito mais estável do que o Processo Eletrodo Revestido, quando avaliado as regiões de soldagem, principalmente a ZAC que é o ponto onde o material sofre mais alterações.

7. Por fim, pode-se concluir que a dureza na ZAC é maior no experimento 02 (TIG) do que no experimento 01 (Eletrodo Revestido), como mostrado nas figuras 5.30 e 5.31.



## **7.SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

1. Estudo da redução de molibdênio durante o processo de soldagem SMAW.
2. Estudo através de outras técnicas metalográficas para classificação dos nitretos encontrados na ZAC.
3. Soldabilidade do aço AL-6XN utilizando outros processos de soldagem.
4. Soldabilidade do aço AL-6XN com outras espessuras, para assim poder realizar outros ensaios e aumentar o nível de informação com relação as características mecânicas na ZAC.
5. Soldabilidade do aço AL-6XN com outros consumíveis.

## **8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:**

1. WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELO, F. D. H. Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgar Blücher, 2013.
2. FELIZARDO, I.; Estudo experimental e numérico do aquecimento de eletrodos Revestidos durante a soldagem – 2003 – Dissertação (Doutorado). Programa de Pós Graduação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Minas Gerais.
3. [http://soldatig.org/historia\\_do\\_processo\\_de\\_solda\\_TIG\\_tungsten\\_inert\\_gas.htm](http://soldatig.org/historia_do_processo_de_solda_TIG_tungsten_inert_gas.htm). Acesso em outubro 2015.
4. [http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo\\_soldagem\\_tig\\_gtaaw.cfm](http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_tig_gtaaw.cfm). Acessado em outubro 2015.
5. <http://www.algisoldas.com.br/imagens/produtos/tocha-tigalg26.jpg>. Acessado em Outubro 2015.
6. <http://www.algisoldas.com.br/imagens/produtos/tocha-tigalg26.jpg>. Acessado em Outubro 2015.
7. RODRIGUES, E. R.; Influência de parâmetros do processo FCAW-G nas características da solda do aço ASTM-A36 – 2010 (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
8. YUAN, R.; Trincamento assistido pelo ambiente em aços inoxidáveis. Um estudo comparativo entre os aços inoxidáveis Austeníticos, Superausteníticos, Duplex e Superduplex para uso em equipamentos e linhas de unidade de

- hidrotratamento – 2011 Dissertação (Mestrado). (COPPE) Universidade Federal do Rio de Janeiro.
9. Rocha, D. B. Estudo da Soldabilidade do tubo API 5L X80 utilizando os Processos de Soldagem: MAG com transferência controlada e Eletrodo Tubular, 2010, 218 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo: 2010.
  10. SOEIRO JÚNIOR, J. C.; Estudo da soldabilidade do tubo API 5L X80 utilizando os processos de soldagem Eletrodo Revestido e MAG com transferência controlada na raiz e enchimento com arame tubular autoprotetido – 2013 Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
  11. RAMIREZ – LONDOÑO, J. S.; Estudo da precipitação de nitreto de Cromo e fase sigma por simulação térmica na zona afetada pelo calor na soldagem multipasse de aços inoxidáveis duplex – 1997 Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
  12. GIRALDO, C. P. S.; Precipitação de fases intermetálicas na zona afetada pelo calor de temperatura baixa (ZACTB) na soldagem multipasse de aços inoxidáveis duplex – 2001 Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
  13. MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B.; Introdução a metalurgia da soldagem – 2012. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais.

14. Copson, H.R., Effect of Composition on Stress Corrosion Cracking of Some Alloys Containing Nickel. In: Physical Metallurgy of Stress Corrosion Fracture, Interscience, pp. 297, 1959.
15. DUPONT, J. N.; BANOVIC, S. W.; MARDER, A. R.; Microstructural Evolution and Weldability of dissimilar welds between a Super Austenitic Stainless Steel and Nickel-Based Alloys. The influence of filler metal composition and dilution on fusion zone microstructure and solidification cracking susceptibility is evaluated for AL- 6XN welded to IN 622 and IN625 – June 2003. Supplement to the welding Journal – American Welding Society.
16. COLPAERT, Humberto. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos. 5ª Edição. Editora LTC, Rio de Janeiro, 2008.
17. CAMPOS, Paulo Tancredo de. Caracterização Mecânica e microestrutural de juntas soldadas pelos processos MIG/MAG (GMAW) e Arame Tubular (FCAW). Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2005. Disponível em < [www.pucp.br](http://www.pucp.br). Acesso em 18 de agosto de 2009.
18. S.A. David, S.S. Babu, and J.M. Vitek. Welding: Solidification and Microstructure. Disponível em <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0306/David-0306.html>. Acesso em 01 de dezembro de 2009.
19. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM. A 312 – 2005.
20. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, ASME. SECTION IX – 2013.
21. AMERICAN WELDING SOCIETY, AWS. 2011.

22. Norma Petrobras® N-133.
23. Informações retiradas do site da Infosolda:  
<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos.html> -  
Acessado em Outubro 2015.
24. Informações sobre o materail AL-6XN: <http://www.band-it-idex.eu/en/literature/brochures/al6xn.pdf>; Acessado em Outubro 2015.

**ANEXO I – Relatório dos ensaios**



## RELATÓRIO DE ENSAIO

LB. Nº 10233/15

Folha: 1 / 8  
SHEET

TESTING REPORT

INTERESSADO: **Sergio Oliveira Alexandrio**  
CUSTOMER

### ENSAIOS FÍSICOS, QUÍMICO & METALOGRAFICOS

#### 1.0 **Informações fornecidas pelo interessado para execução do ensaio:**

- **Solicitação de Ensaio:** Pedido sem número de 02/12/2015
- **Identificação:** Monografia do Curso de Especialização em Engenharia de Soldagem – PEC-USP / Turma 06 (São Paulo/2015)
- **Tema da Pesquisa:** Estudo comparativo das características mecânicas do aço inoxidável AL6-XN (UNS N08367) na zona afetada pelo calor, quando submetido aos processos de soldagem TIG e Eletrodo Revestido.
- **Material de Base:** ASTM A 312 (tubo Ø externo de 50,8 mm / espessura de 2,77 mm)
- **Material de Adição:** ERNiCrMo-3 + E NiCrMo-3 (inconel 625)
- **Processo de Soldagem:** GTAW (Manual)
- **Posição de Soldagem:** 2G – GTAW
- **Normas de Referência:** ASME IX Ed. 2013; N-133 M

#### 2.0 **Ensaio de Tração - Junta Soldada:**

Amostra	Dimensões	Seção do CP	Limite Resistência Tração		Resultado
	{mm}	{mm²}	{Carga Kgf}	{Mpa}	
TP 1	2,54 x 12,96	32,92	2471	736	<i>C.P. rompeu no metal base</i>
TP 2	2,50 x 13,02	32,55	2297	692	<i>C.P. rompeu na linha de fusão</i>

- **Preparação dos CP's:** Conforme ASME IX/2013 QW 462.1 (a)
- **Método de Ensaio:** Conforme ASME IX/2013 QW 152
- **Critério de Avaliação:** Conforme ASME IX/2013 QW 153
- Ensaio realizado a temperatura ambiente do laboratório de 23°C, através da máquina universal de ensaio Tinius Olssen MTR-006, escala 60T, certificado de calibração 0385c/2015 em 07/04/2015, empresa emitente Dinateste Ltda. Paquímetro Nº 007, Micrometro MIE 020 e Termohigrometro THT 006.
- Incerteza de medição  $\pm 1\%$  do valor indicado.
- A incerteza declarada é baseada em uma incerteza padrão combinada, multiplicada pelo fator de abrangência  $k=2$ , fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo a publicação EA-4/02.

#### 3.0 **Ensaio de Dobramento - Junta Soldada:**

Realizados dois testes de dobramento, 01 de face e 01 de raiz, utilizando cutelo de 11 mm e com distância entre roletes de 19,6 mm.

Amostras	Dimensões {mm}			Resultados
	Espessura	Largura	Comprimento	
DF 1	2,77	25	300	<i>Isento de descontinuidades</i>
DR 1	2,77	25	300	<i>Isento de descontinuidades</i>

- **Preparação do CP:** Conforme Norma ASME IX Ed. 2013 QW 462.3a
- **Método de Ensaio:** Conforme Norma ASME IX Ed. 2013 QW 162
- **Critério de Aceitação:** Conforme Norma ASME IX Ed. 2013 QW 163



## RELATÓRIO DE ENSAIO

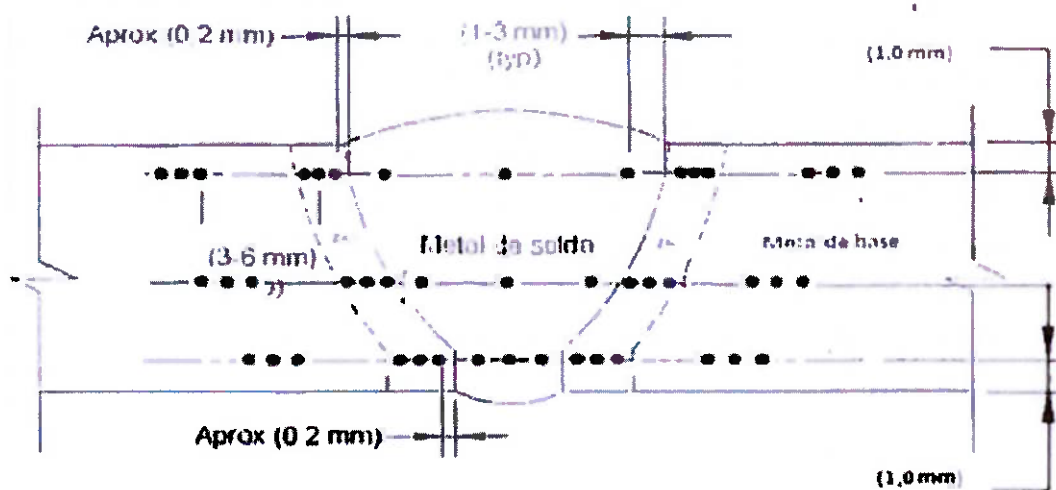
TESTING REPORT

LB. Nº 10233/15

Folha: 2 / 8  
SHEET

INTERESSADO: **Sergio Oliveira Alexandrio**  
CUSTOMER

### 4.0 Ensaio de Dureza – HV 5:

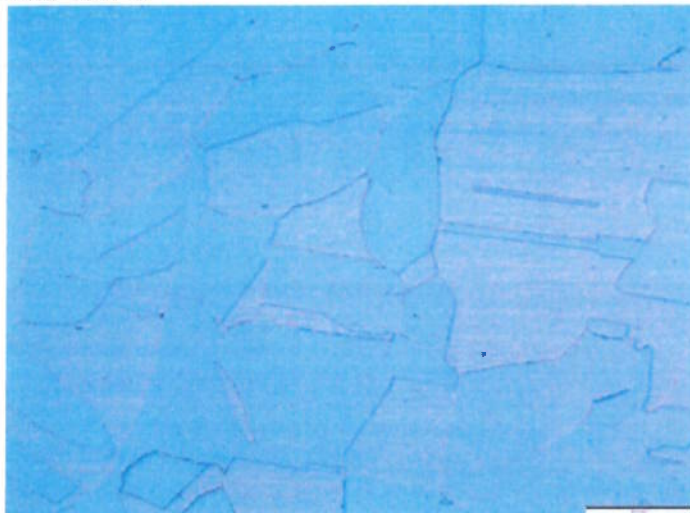


Metal Base I	ZTA I	Metal de Solda	ZTA II	Metal Base II
178 – 180 – 180	186 – 196 – 185	203 – 173 – 171	176 – 176 – 180	174 – 171 – 183
165 – 167 – 174	184 – 186 – 176	181 – 190 – 189	182 – 196 – 185	175 – 175 – 167
172 – 169 – 170	187 – 183 – 187	186 – 175 – 187	180 – 182 – 177	168 – 168 – 165

- **Preparação do CP:** Conforme Norma ASTM E 384/2011
- **Método de Ensaio:** Conforme Norma ASTM E 384/2011 e1
- Ensaio realizado no laboratório com temperatura ambiente de 24°C, através do Durômetro Pantec DUR-026, certificado de calibração Nº 19.073/2014 em 10/08/2015, empresa emitente HOLTERMANN – Comercial e Técnica Ltda. Amostra padrão utilizada, certificado 4984401.0613.

### 5.0 Ensaio Micrográfico da Junta Soldada:

#### 5.1 Metal base 1:



- **Ataque:** Kalling's
- **Aumento:** 200 X
- **Secção:** Transversal
- **Resultado:** Matriz de grãos austeníticos, com precipitados de carbonetos em contorno não contínuo de grãos.





## RELATÓRIO DE ENSAIO

TESTING REPORT

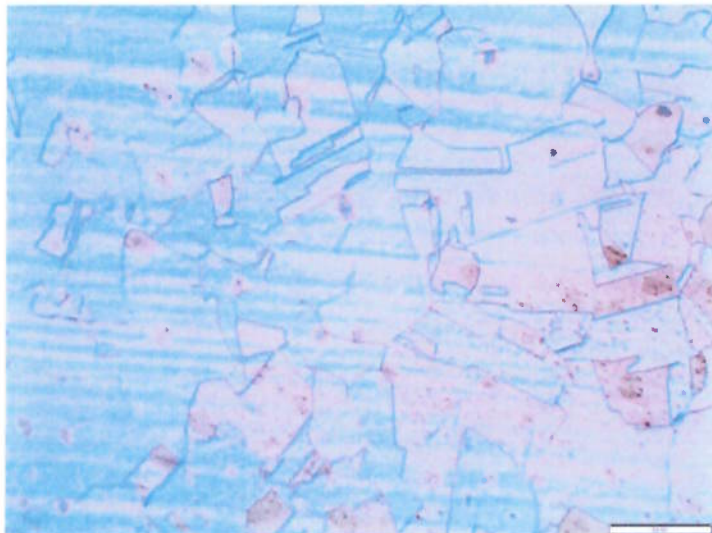
LB. Nº 10233/15

Folha: 3 / 8  
SHEET

INTERESSADO:  
CUSTOMER

**Sergio Oliveira Alexandrio**

### 5.2 ZTA 1:



- **Ataque:** Kalling's
- **Aumento:** 200 X
- **Secção:** Transversal
- **Resultado:** Matriz de grãos austeníticos, com migração de possíveis nitretos na linha de fusão.

### 5.3 Solda:



- **Ataque:** Kalling's
- **Aumento:** 200 X
- **Secção:** Transversal
- **Resultado:** Estrutura de solução sólida gama e partículas de nitretos dispersos na matriz.



## RELATÓRIO DE ENSAIO

TESTING REPORT

LB. Nº 10233/15

Folha: 4 / 8  
SHEET

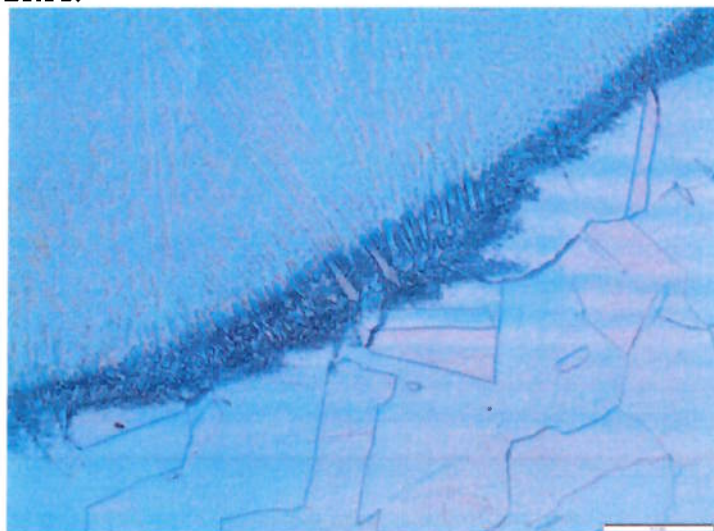
INTERESSADO: **Sergio Oliveira Alexandrio**  
CUSTOMER

### 5.4 Metal base 2:



- **Ataque:** Kalling's
- **Aumento:** 200 X
- **Secção:** Transversal
- **Resultado:** Matriz de grãos austeníticos, com precipitados de carbonetos em contorno não contínuo de grãos.

### 5.5 ZTA 2:



- **Ataque:** Kalling's
- **Aumento:** 200 X
- **Secção:** Transversal
- **Resultado:** Matriz de grãos austeníticos, com migração de possíveis nitretos na linha de fusão.

### 5.6 Informações pertinentes a realização do ensaio:

- **Preparação do C.P.:** Conforme ASTM E 3/2011
- **Método de Ensaio:** Conforme ASTM E 7/2009
- Ensaio realizado no microscópio Olympus GX 51 - MOM 001, certificado de calibração 18.899/2015 de 17/07/2015, executada por Holtermann Ltda.





## RELATÓRIO DE ENSAIO

TESTING REPORT

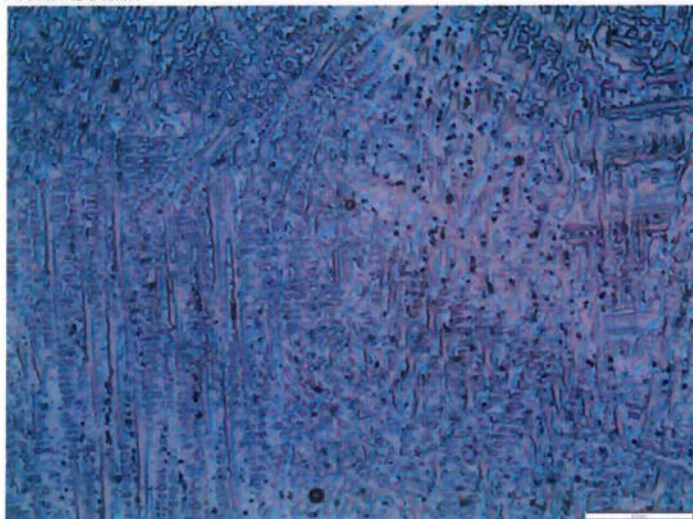
LB. Nº 10233/15

Folha: 5 / 8  
SHEET

INTERESSADO: **Sergio Oliveira Alexandrio**  
CUSTOMER

**6.0** *Ensaio para detectar corrosão intergranular, de acordo com a ASTM A 262/14 Prática A:*

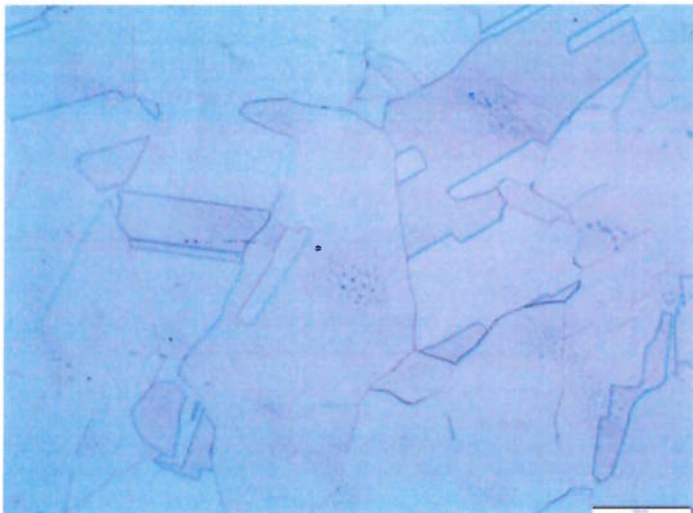
**6.1** *Metal Solda:*



- **Ataque:** Ácido oxálico 10%
- **Aumento:** 200 X
- **Secção:** Transversal
- **Tempo:** 1,5 minutos
- **Resultado:** Região isenta de corrosão.
- **Preparação CP:** Conforme ASTM E 3/11
- **Método Ensaio:** Conforme ASTM A 262/14
- Ensaio realizado no microscópio Olympus GX 51 MOM 001, certificado de calibração 18.899/2015 17/07/2015, executada por Holtermann Ltda.

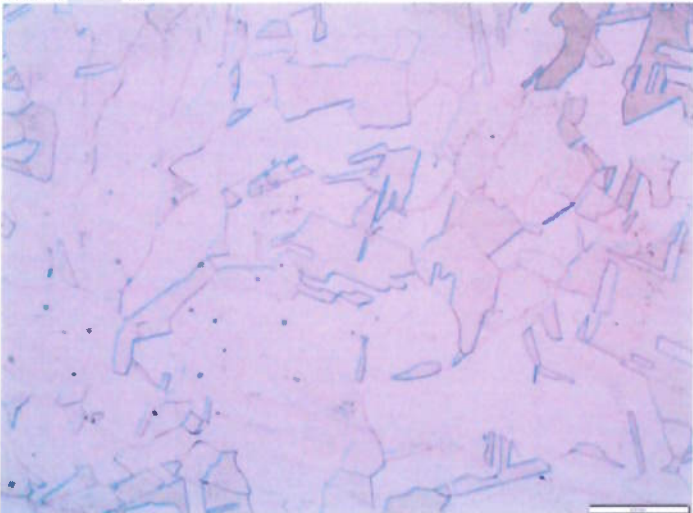
**7.0** *Ensaio para Determinar o Tamanho de Austenítico, conforme ASTM E 112/2013:*

**7.1** *Metal base 1:*



- **Resultado:** Grão austenítico de número 3.

**7.1** *Metal base 2:*



- **Resultado:** Grão austenítico de número 3.



## RELATÓRIO DE ENSAIO

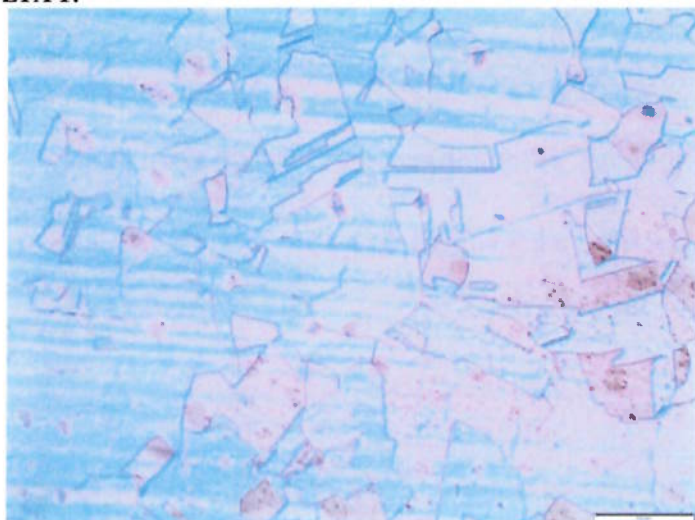
TESTING REPORT

LB. Nº 10233/15

Folha: 6 / 8  
SHEET

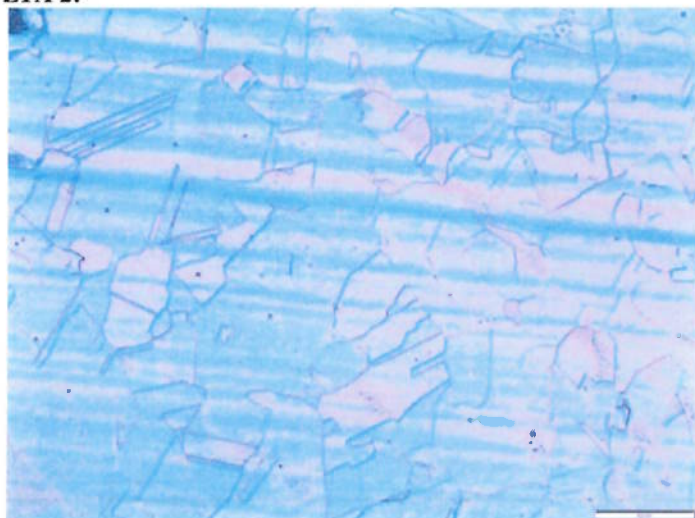
INTERESSADO: **Sergio Oliveira Alexandrio**  
CUSTOMER

### 7.3 ZTA 1:



- **Resultado:** Grão austenítico de número 4.

### 7.4 ZTA 2:



- **Resultado:** Grão austenítico de número 4.

### 7.5 Informações pertinentes a realização do ensaio:

- **Preparação do C.P.:** Conforme ASTM E 3/2011
- **Método de Ensaio:** Conforme ASTM E 112/2013
- Ensaio realizado no microscópio Olympus GX 51 - MOM 001, certificado de calibração 18.899/2015 de 17/07/2015, executada por Holtermann Ltda.



## RELATÓRIO DE ENSAIO

TESTING REPORT

LB. Nº 10233/15

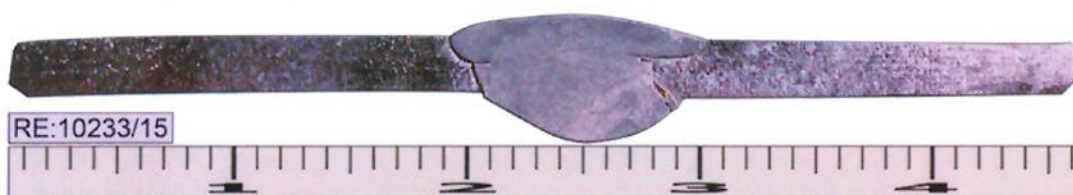
Folha: 7 / 8  
SHEET

INTERESSADO: **Sergio Oliveira Alexandrio**  
CUSTOMER

### 8.0 Ensaio para detectar percentual de ferrita delta, de acordo com a ASTM E 1245/08:

- **Ataque:** Kalling's      **Aumento:** 200 X      **Secção:** Transversal
- **Preparação CP:** Conforme ASTM E 3/11
- **Método Ensaio:** Conforme ASTM E 1245/08
- Ensaio realizado no microscópio Olympus GX 51 - MOM 001, certificado calibração 18.899/2015 de 17/07/2015, executada por Holtermann Ltda.
- **Resultado:** Metal base, ZAC e solda, isentos de ferrita delta

### 9.0 Exame Macrográfico da Seção Transversal da Junta Soldada:



- **Ataque:** Água Régia      **Inspeção:** Lupa 10x
- **Preparação do CP:** Conforme Norma ASME IX Ed. 2013 QW 470 / 471
- **Método de Ensaio:** Conforme Norma ASME IX Ed. 2013 QW 470 / 471
- **Critério de Aceitação:** Conforme Norma ASME IX Ed. 2013 QW 183
- Ensaio realizado no estéreo microscópio Leica - SMO 001, certificado de calibração 17.394/2014 de 22/07/2014, executado por Holtermann Ltda.
- **Resultado:** Não observado nenhuma anomalia como trincas, poros e falta de fusão, ensaio isento de discontinuidades





## RELATÓRIO DE ENSAIO

TESTING REPORT

LB. Nº 10234/15

Folha: 1 / 8  
SHEET

INTERESSADO: **Sergio Oliveira Alexandrio**  
CUSTOMER

### ENSAIOS FÍSICOS, QUÍMICO & METALOGRAFICOS

#### 1.0 Informações fornecidas pelo interessado para execução do ensaio:

- **Solicitação de Ensaio:** Pedido sem número de 02/12/2015
- **Identificação:** Monografia do Curso de Especialização em Engenharia de Soldagem – PECE-USP / Turma 06 (São Paulo/2015)
- **Tema da Pesquisa:** Estudo comparativo das características mecânicas do aço inoxidável AL6-XN (UNS N08367) na zona afetada pelo calor, quando submetido aos processos de soldagem TIG e Eletrodo Revestido.
- **Material de Base:** ASTM A 312 (tubo Ø externo de 50,8 mm / espessura de 2,77 mm)
- **Material de Adição:** ERNiCrMo-3 + E NiCrMo-3 (inconel 625)
- **Processo de Soldagem:** SMAW (Manual)
- **Posição de Soldagem:** 2G – SMAW
- **Normas de Referência:** ASME IX Ed. 2013; N-133 M

#### 2.0 Ensaios de Tração - Junta Soldada:

Amostra	Dimensões	Seção do CP	Limite Resistência Tração		Resultado
	{mm}	{mm <sup>2</sup> }	{Carga Kgf}	{Mpa}	
TP 1	2,49 x 13,09	32,59	1877	565	C.P. rompeu na solda
TP 2	2,27 x 13,04	29,60	2113	700	C.P. rompeu na solda

- **Preparação dos CP's :** Conforme ASME IX/2013 QW 462.1 (a)
- **Método de Ensaio:** Conforme ASME IX/2013 QW 152
- **Critério de Avaliação:** Conforme ASME IX/2013 QW 153
- Ensaio realizado a temperatura ambiente do laboratório de 23°C, através da máquina universal de ensaio Tinius Olssen MTR-006, escala 60T, certificado de calibração 0385c/2015 em 07/04/2015, empresa emitente Dinateste Ltda. Paquímetro N° 007, Micrometro MIE 020 e Termohigrometro THT 006.
- Incerteza de medição  $\pm 1\%$  do valor indicado.
- A incerteza declarada é baseada em uma incerteza padrão combinada, multiplicada pelo fator de abrangência k=2, fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo a publicação EA-4/02.

#### 3.0 Ensaios de Dobramento - Junta Soldada:

Realizados dois testes de dobramento, 01 de face e 01 de raiz, utilizando cutelo de 11 mm e com distância entre roletes de 19,6 mm.

Amostras	Dimensões {mm}			Resultados
	Espessura	Largura	Comprimento	
DF 1	2,77	25	300	Isento de descontinuidades
DR 1	2,77	25	300	Abertura total da solda com 99%

- **Preparação do CP:** Conforme Norma ASME IX Ed. 2013 QW 462.3a
- **Método de Ensaio:** Conforme Norma ASME IX Ed. 2013 QW 162
- **Critério de Aceitação:** Conforme Norma ASME IX Ed. 2013 QW 163



## RELATÓRIO DE ENSAIO

TESTING REPORT

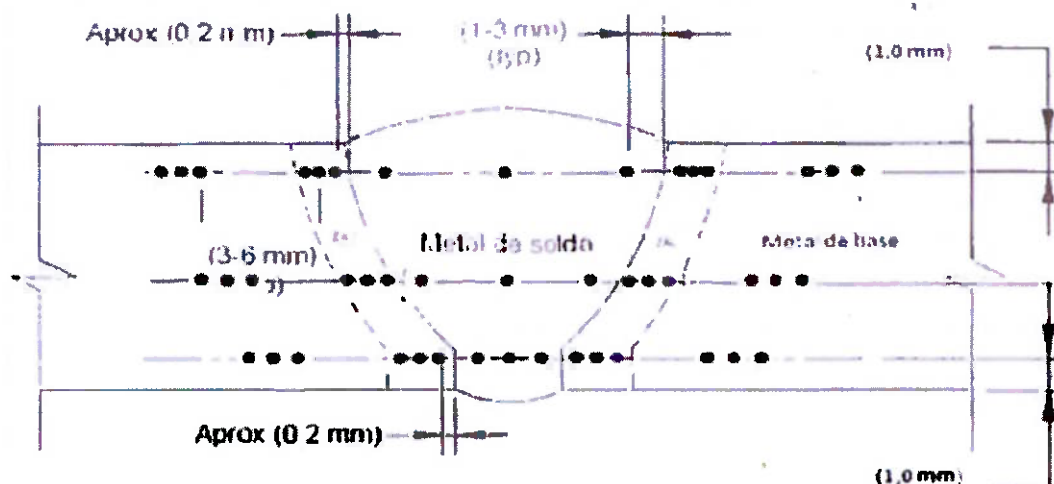
LB. Nº 10234/15

Folha: 2 / 8  
SHEET

INTERESSADO:  
CUSTOMER

**Sergio Oliveira Alexandrio**

### 4.0 Ensaio de Dureza – HV 5:

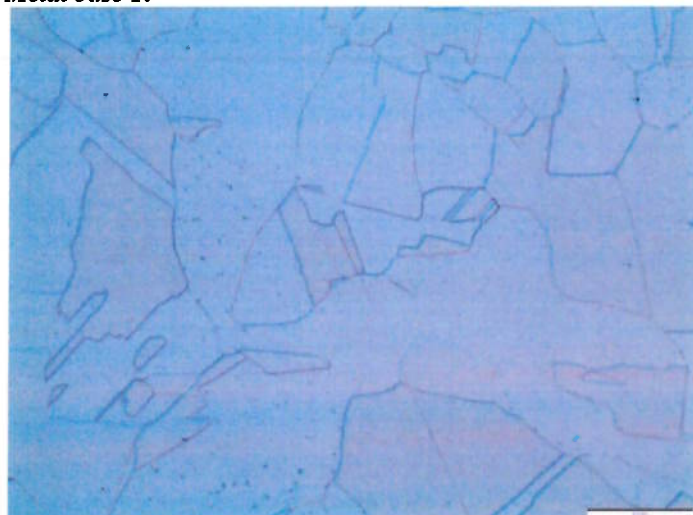


Metal Base I	ZTA I	Metal de Solda	ZTA II	Metal Base II
172 – 171 – 169	184 – 179 – 189	197 – 185 – 191	180 – 172 – 176	170 – 168 – 167
170 – 170 – 175	175 – 175 – 175	195 – 191 – 191	176 – 178 – 173	167 – 169 – 169
176 – 181 – 178	173 – 182 – 182	181 – 188 – 199	190 – 184 – 180	175 – 178 – 184

- **Preparação do CP:** Conforme Norma ASTM E 384/2011
- **Método de Ensaio:** Conforme Norma ASTM E 384/2011 e1
- Ensaio realizado no laboratório com temperatura ambiente de 24°C, através do Durômetro Pantec DUR-026, certificado de calibração Nº 19.073/2014 em 10/08/2015, empresa emitente HOLTERMANN – Comercial e Técnica Ltda. Amostra padrão utilizada, certificado 4984401.0613.

### 5.0 Ensaio Micrográfico da Junta Soldada:

#### 5.1 Metal base 1:



- **Ataque:** Kalling's
- **Aumento:** 200 X
- **Secção:** Transversal
- **Resultado:** Matriz de grãos austeníticos, com precipitados de carbonetos em contorno não contínuo de grãos.



**PROAQT** - Empreendimentos Tecnológicos Ltda.  
Av. Marechal Rondon, 1100 - Osasco - SP - CEP 06093-010  
Tel / Fax: (011) 3682-7946 - Tel: (011) 3699-3749 - e-mail: proaqt@proaqt.com.br  
Em Prol da Alta Qualidade e Tecnologia

CREA-SP nº 1137560

CRQ-IV nº 16915-F

Ensaios  
NBR ISO/IEC  
17025

N

CRL 0219

## RELATÓRIO DE ENSAIO

TESTING REPORT

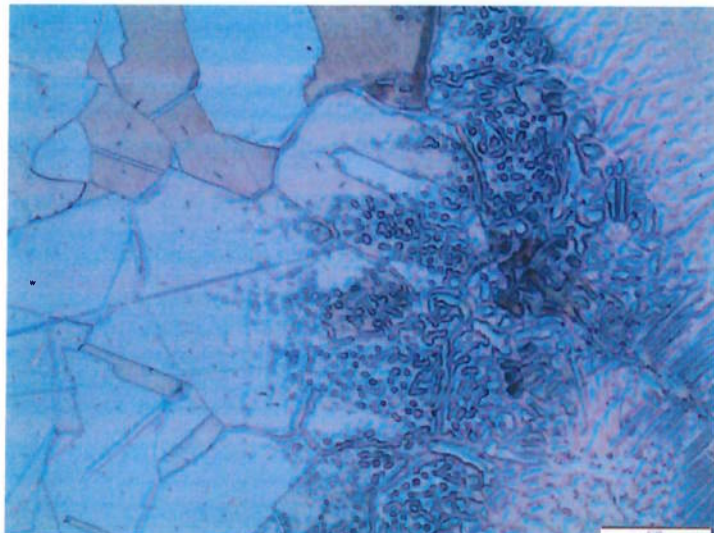
LB. Nº 10234/15

Folha: 3 / 8  
SHEET

INTERESSADO:  
CUSTOMER

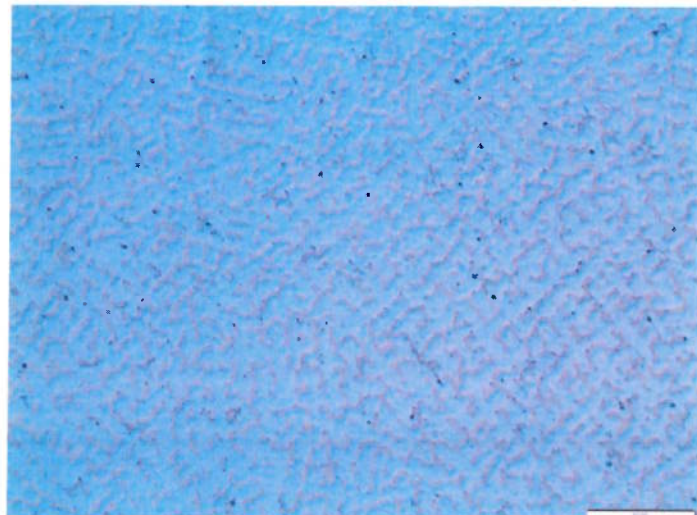
**Sergio Oliveira Alexandrio**

### 5.2 ZTA 1:



- **Ataque:** Kalling's
- **Aumento:** 200 X
- **Secção:** Transversal
- **Resultado:** Matriz de grãos austeníticos, com migração de possíveis nitretos na linha de fusão e em contornos de grãos da ZTA.

### 5.3 Solda:



- **Ataque:** Kalling's
- **Aumento:** 200 X
- **Secção:** Transversal
- **Resultado:** Estrutura de solução sólida gama e partículas de nitretos dispersos na matriz.





## RELATÓRIO DE ENSAIO

TESTING REPORT

LB. Nº 10234/15

Folha: 4 / 8  
SHEET

INTERESSADO:  
CUSTOMER

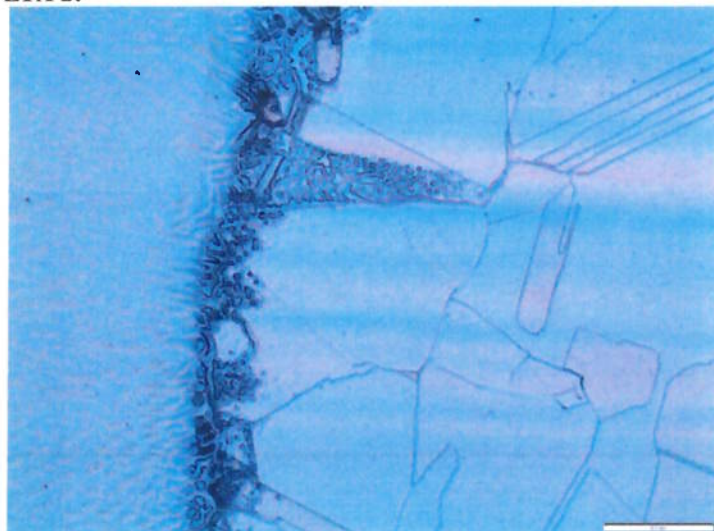
**Sergio Oliveira Alexandrio**

### 5.4 Metal base 2:



- **Ataque:** Kalling's
- **Aumento:** 200 X
- **Secção:** Transversal
- **Resultado:** Matriz de grãos austeníticos, com precipitados de carbonetos em contorno não contínuo de grãos.

### 5.5 ZTA 2:



- **Ataque:** Kalling's
- **Aumento:** 200 X
- **Secção:** Transversal
- **Resultado:** Matriz de grãos austeníticos, com migração de possíveis nitretos na linha de fusão e em contornos de grãos da ZTA

### 5.6 Informações pertinentes a realização do ensaio:

- **Preparação do C.P.:** Conforme ASTM E 3/2011
- **Método de Ensaio:** Conforme ASTM E 7/2009
- Ensaio realizado no microscópio Olympus GX 51 - MOM 001, certificado de calibração 18.899/2015 de 17/07/2015, executada por Holtermann Ltda.



## RELATÓRIO DE ENSAIO

TESTING REPORT

LB. Nº 10234/15

Folha: 5 / 8  
SHEET

INTERESSADO:  
CUSTOMER

**Sergio Oliveira Alexandrio**

**6.0** *Ensaio para detectar corrosão intergranular, de acordo com a ASTM A 262/14 Prática A:*

**6.1** *Metal Solda:*



- **Ataque:** Ácido oxálico 10%
- **Aumento:** 200 X
- **Secção:** Transversal
- **Tempo:** 1,5 minutos
- **Resultado:** Região isenta de corrosão.
- **Preparação CP:** Conforme ASTM E 3/11
- **Método Ensaio:** Conforme ASTM A 262/14
- Ensaio realizado no microscópio Olympus GX 51 MOM 001, certificado de calibração 18.899/2015 17/07/2015, executada por Holtermann Ltda.

**7.0** *Ensaio para Determinar o Tamanho de Austenítico, conforme ASTM E 112/2013:*

**7.1** *Metal base 1:*



- **Resultado:** Grão austenítico de número 4.

**7.2** *Metal base 2:*



- **Resultado:** Grão austenítico de número 4.





## RELATÓRIO DE ENSAIO

TESTING REPORT

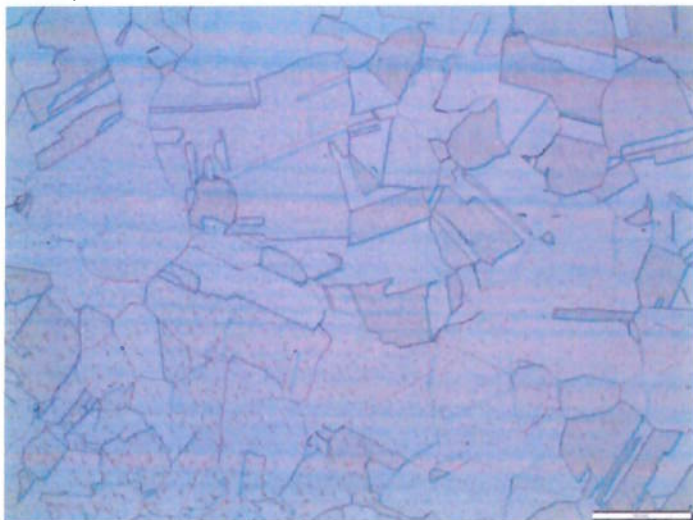
LB. Nº 10234/15

Folha: 6 / 8  
SHEET

INTERESSADO:  
CUSTOMER

**Sergio Oliveira Alexandrio**

### 7.3 ZTA 1:



- **Resultado:** Grão austenítico de número 4.

### 7.4 ZTA 2:



- **Resultado:** Grão austenítico de número 4.

### 7.5 Informações pertinentes a realização do ensaio:

- **Preparação do C.P.:** Conforme ASTM E 3/2011
- **Método de Ensaio:** Conforme ASTM E 112/2013
- Ensaio realizado no microscópio Olympus GX 51 - MOM 001, certificado de calibração 18.899/2015 de 17/07/2015, executada por Holtermann Ltda.



**PROAQT** - Empreendimentos Tecnológicos Ltda.  
Av. Marechal Rondon, 1100 - Osasco - SP - CEP 06093-010  
Tel / Fax: (011) 3682-7946 - Tel: (011) 3699-3749 - e-mail: proaqt@proaqt.com.br  
**Em Prol da Alta Qualidade e Tecnologia**

CREA-SP nº 1137560

CRQ-IV nº 16915-F

Ensaio  
NBR ISO/IEC  
17025

N

CRL 0219

## RELATÓRIO DE ENSAIO

TESTING REPORT

LB. Nº 10234/15

Folha: 7 / 8  
SHEET

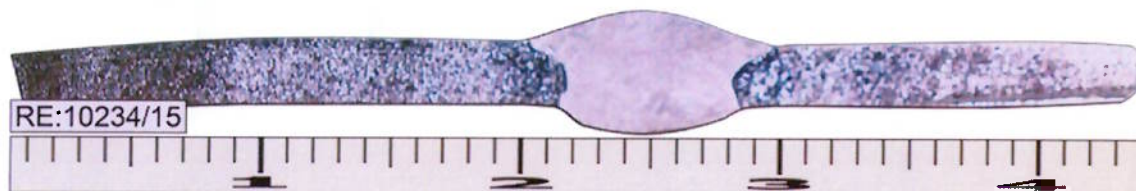
INTERESSADO:  
CUSTOMER

**Sergio Oliveira Alexandrio**

### 8.0 Ensaio para detectar percentual de ferrita delta, de acordo com a ASTM E 1245/08:

- **Ataque:** Kalling's      **Aumento:** 200 X      **Secção:** Transversal
- **Preparação CP:** Conforme ASTM E 3/11
- **Método Ensaio:** Conforme ASTM E 1245/08
- Ensaio realizado no microscópio Olympus GX 51 - MOM 001, certificado calibração 18.899/2015 de 17/07/2015, executada por Holtermann Ltda.
- **Resultado:** Metal base, ZAC e solda, isentos de ferrita delta

### 9.0 Exame Macrográfico do Junta Soldada :



- **Ataque:** Água Régia
- **Inspeção:** Lupa 10x
- **Secção:** Transversal
- **Preparação do CP:** Conforme Norma ASME IX Ed. 2013 QW 470 / 471
- **Método de Ensaio:** Conforme Norma ASME IX Ed. 2013 QW 470 / 471
- **Critério de Aceitação:** Conforme Norma ASME IX Ed. 2013 QW 183
- Ensaio realizado no estéreo microscópio Leica - SMO 001, certificado de calibração 17.394/2014 de 22/07/2014, executado por Holtermann Ltda.
- **Resultado:** Não observado nenhuma anomalia como trincas, poros e falta de fusão, ensaio isento de discontinuidades



## RELATÓRIO DE ENSAIO

TESTING REPORT

LB. Nº 10234/15

Folha: 8 / 8  
SHEET

INTERESSADO: **Sergio Oliveira Alexandrio**  
CUSTOMER

### 10.0 Composição Química:

Amostra	Elementos Obtidos em %							
	C	Fe	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
Solda	0,026	19,425	0,252	0,406	0,008	0,003	20,512	48,59
(S)	0,002	1,168	0,006	0,007	0,000	0,000	0,188	0,95

Amostra	Elementos Obtidos em %									
	C	Fe	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Mo
Metal de Base	0,014	48,02	0,447	0,382	0,020	10,001	20,458	23,316	0,076	5,817
(S)	0,000	0,04	0,003	0,002	0,000	0,000	0,030	0,060	0,000	0,028

Amostra	Elementos Obtidos em %										
	C	Fe	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Mo	Ti
Eletrodo	0,028	0,217	-0,016	0,026	0,002	0,003	22,013	63,46	0,031	9,599	0,049
(S)	0,003	0,014	0,001	0,000	0,000	0,000	0,061	0,10	0,006	0,068	0,006

### 10.1 Informações pertinentes a realização do ensaio:

- Preparação do CP: Conforme Norma ASTM E 415/2014 e ASME IX Ed. 2013 QW 462.5(a)
- Ensaio realizado numa temperatura ambiente de 22°C e umidade relativa de ~42%, através do aparelho Espectrômetro de emissão Ótica Marca ARL Modelo 3460, com certificado de calibração No. 2015-0731 em 31/07/2015, utilizando-se da instrução Proaqt Nº LB 10257 - Revisão 4 conforme norma ASTM E-415-2014 ou ASTM E 1086-2008.
- O desvio padrão relatado está associado predominantemente a não uniformidades da amostra testada. A incerteza de medição estimada corresponde ao desvio padrão relatado multiplicado pelo fator 2,62 (já expandida com k=4,53), limitada inferiormente em seis vezes a resolução da medição (já expandida, neste caso com k=2).
- \*: Os valores de flags como >, <, - e !, correspondem aos valores limites de nossa curva a qual a mesma não detecta a leitura.
- (S): Desvio Padrão Da Amostra

### 11.0 Composição Química Via Difusão:

Elemento		Valor Obtido em %
		Média do Resultado
Nitrogênio	{ N <sub>2</sub> }	0,118
Oxigênio	{ O <sub>2</sub> }	0,043

- Ensaio realizado na temperatura ambiente de 23°C e umidade relativa de ~51%, através do aparelho analisador Nitrogênio e Oxigênio da marca LECO modelo TC 400 ANO 001, com calibração RA/29/11 em 04/2013, utilizando-se da instrução Proaqt nº LB 10-271 - Revisão 2 Norma ASTM - E - 1019/2008.

### 12.0 Observações:

- 12.1 Os resultados obtidos e apresentados no presente relatório têm significação restrita e aplicam-se somente às amostras ensaiadas. A sua reprodução, total ou parcial, só poderá ser feita mediante prévia autorização da Proaqt.

Ensaios realizados entre 08 e 10 de Dezembro de 2015

&

Emissão de relatório em 11 de Dezembro de 2015

Sector Químico

Sector de Metalurgia

**ANEXO II – Certificado**



voestalpine Böhler Welding

voestalpine Böhler Welding Soldas do Brasil Ltda

Rua Arnaldo Magnicaro nº 371  
04691-080 - São Paulo - SP  
Tel: (11) 5694-8377 - Fax: (11) 5631-4882

E-mail: info.welding@voestalpine.com  
Site: www.voestalpine.com/welding

M.C.E.SUL ENGENHARIA LTDA

ROD.MS-395, KM 21 LOTE 06, S/N  
79601-970 TRÊS LAGOAS  
Brasil

## CERTIFICADO DA QUALIDADE

### Certificate Schedule F

conforme / as per : ASME/AWS A5.01

No. : No. : 2015-000128250-1-900001-004

Rev. 0

Página / Page : 1 / 1

Pedido No	PO no.	196.2015	de / of	01.07.2015
Ordem de Produção	Order no.	1005274529		
Fatura	Delivery note/pos./splitt	2005310035/000010/900001	de / of	01.07.2015
Produto	Product	Vareta (TIG) / GTAW rod/wire		254
Designação da Marca	Trade name	UTP A 6222 Mo		847
Classificação	Standard designation	AWS A5.14/5.14M ERNiCrMo-3		5N5625
				81
Dimensão	Dimension	2,4 X 1000 mm		
Corrida	Heat no.	1411003		
Quantidade	Quantity	0,5 KG		

#### Análise Química % do produto

#### Chemical composition in % of the product

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Ti	Al	Fe	Nb+Ta	Outros E
0,012	0,050	0,150	0,009	0,005	22,890	8,970	65,000	< 0,001	0,220	0,110	0,290	3,640	

OUTROS ELEMENTOS: A SOMATÓRIA NÃO EXCEDE 0,50%

Lugar / Town

Sao Paulo

Data / Date

02.07.2015

Representante da Qualidade Autorizado / Authorized representative

Impresso por computador, válido sem assinatura

This certificate was issued by DP-equipment and does not require signature.

voestalpine

ONE STEP AHEAD