

**UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**DIEGO SALGADO PRADO
DOUGLAS OLIVEIRA DE SOUZA
FÁBIO FERREIRA DE SOUZA
NILTON FERREIRA DA SILVA NETO**

**INFLUÊNCIA DOS PROCESSOS GTAW, SMAW, FCAW
PARA A SOLDAGEM DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX SAF
2205**

**Santos – SP
Dezembro / 2015**

**UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**DIEGO SALGADO PRADO
DOUGLAS OLIVEIRA DE SOUZA
FÁBIO FERREIRA DE SOUZA
NILTON FERREIRA DA SILVA NETO**

**INFLUÊNCIA DOS PROCESSOS GTAW, SMAW, FCAW
PARA A SOLDAGEM DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX SAF
2205**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentada à Universidade Santa Cecília
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheiro Mecânico, sob
orientação do Prof. Me. Willy Ank de Moraes.**

**Santos – SP
Dezembro / 2015**

**DIEGO SALGADO PRADO
DOUGLAS OLIVEIRA DE SOUZA
FÁBIO FERREIRA DE SOUZA
NILTON FERREIRA DA SILVA NETO**

**INFLUÊNCIA DOS PROCESSOS GTAW, SMAW, FCAW PARA A SOLDAGEM
DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX SAF 2205**

Trabalho de Conclusão de Curso elaborado por Diego Salgado Prado, Douglas Oliveira de Souza, Fábio Ferreira de Souza e Nilton Ferreira da Silva Neto, aprovado pela coordenação e avaliadores como exigência parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico à Universidade Santa Cecília.

Data de aprovação: ____/____/____.

Professor Orientador do TCC.
Me. Willy Ank de Moraes

Avaliadores:

_____	_____
_____	_____

Comentário do(s) Avaliador(es): _____

DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho primeiramente a Deus, aos nossos pais que nos ensinaram a aprender, se dedicar e respeitar ao próximo e aos educadores que nos conduziram a este caminho.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos acima de tudo a Deus e aos nossos pais e familiares que estiverem ao nosso lado em todo o momento nos incentivando e apoiando.

Ao nosso amigo e orientador **Prof. Me. Willy Ank de Moraes**, pela paciência, incentivo, dedicação e orientação que contribuiu para a elaboração deste trabalho.

Ao coorientador e **Prof. Me. Natal de Jesus Gaspar**, pela orientação na revisão bibliográfica, incentivo e apoio.

Ao coordenador do curso de engenharia mecânica **Dr. Carlos Alberto Amaral Moino**, que nos aconselhou e orientou durante toda a nossa trajetória, desde o início do curso até o término da nossa graduação.

À empresa **Voestalpine** (Engenheiro de Aplicação: **Alexandre Otsuka**) pela doação dos consumíveis.

À empresa **INOXPLASMA**, (Comprador Comercial: **Mario Sérgio Fernandes**) pela grande agilidade, atendimento e preocupação para o envio do material adquirido.

À empresa **INSPE//BRAS**, (Diretor Comercial: **Guilherme Geada Sampaio**), por ceder suas instalações, fornecer recursos, mão de obra especializada e apoio técnico para a realização da soldagem em nosso material e o ensaio de dobramento. A parceria de vocês foi fundamental para realização e conclusão do nosso trabalho, sem a ajuda e apoio constante de toda equipe, nosso trabalho não teria saído do papel.

Ao técnico metalográfico **Wilson Roberto de Oliveira Santos**.

À **UNISANTA - Universidade Santa Cecília** por ceder seu laboratório de metalografia e de ensaios mecânicos, para realização do ensaio de dureza, tração e metalográfico.

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.”
(CHARLES CHAPLIN).

RESUMO

O aço inoxidável duplex surgiu no mercado para atender as necessidades de um material que tivesse alta resistência a corrosão sob tensão e uma alta resistência mecânica. A estrutura deste material é constituída por 50% de fase austenita e 50% de fase ferrita, o que lhe confere as propriedades requeridas. Em contrapartida, os aços inoxidáveis duplex são de difícil soldabilidade, por quanto devem ser mantidos o balanço de fases ferrita/austenita e evitado o surgimento de fases fragilizantes no material, como a fase sigma.

O presente trabalho tem como objetivo realizar a soldagem de 3 (três) corpos de prova do aço inoxidável duplex SAF 2205 utilizando 3 (três) diferentes processos de soldagem, foram eles: Arame tubular (FCAW), TIG (GTAW) e Eletrodo revestido (SMAW), respeitando a temperatura entre passes menor que 150°C.

Após a soldagem, foram realizados ensaios mecânicos e macrografia dos corpos de prova. Assim, foi possível observar qual foi o comportamento da estrutura obtida por cada processo, bem como a resistência mecânica para cada corpo de prova.

PALAVRAS-CHAVE: Duplex; Processos de soldagem; Soldagem; Estrutura; Caracterização.

ABSTRACT

The duplex stainless steel was developed to full fill the needs of a material that has high resistance to stress corrosion and high mechanical strength. The structure of this material consists of 50% austenite and 50% ferrite, which gives the required properties. In contrast, the welding of the material becomes more difficult, because it should be kept ferrite / austenite balanced and avoid the onset of embrittlement in the material phases, such as sigma phase.

This study aimed to carry out welding three of test specimens of duplex steel SAF 2205 using the diferents welding process, Flux-cored arc welding (FCAW), TIG (GTAW) and Shielded metal arc welding, keeping the interpass temperature below to 150°C. After welding, mechanical tests were and macrograph was done. Thus, we observed what the behavior of the structure was in each welding process, as well mechanical properties of the material in each one.

KEYWORDS: Duplex; Welding process; Welding; Structure; Characterization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aplicações do aço inoxidáveis em itens de cozinha e arquitetura – a) Pia de cozinha; b) Panelas e tigelas; c) Revestimentos externos de edifícios; d) Estruturas urbanas (REVISTA INOX, 2015).	30
Figura 2 – Aplicações dos aços inoxidáveis x em processos industriais e tubulações – a) Indústria petroquímica; b) Trem revestido de aço inoxidável; c) Bobinas de aço inoxidável; d) Tubos (REVISTA INOX, 2015).	31
Figura 3 – Aplicações dos aços inoxidáveis em fornos, motores e trocadores – a) Utensílios para carros; b) Sistema de exaustão para veículos; c) Forno de indústria química; d) Forno para indústria farmacêutica (REVISTA INOX, 2015).	32
Figura 4 – Aplicações do inox em aviação, armamentos e elementos de máquinas – a) Porcas e parafusos; b) Rolamentos diversos; c) Indústria bélica; d) Avião (REVISTA INOX, 2015).	33
Figura 5 – Gráfico ilustrando a passividade do aço-cromo com o mínimo de teor para a resistência a corrosão em temperatura ambiente (CHIAVERINI, 1986).	35
Figura 6 – Gráfico ilustrando o cromo na resistência dos aços a oxidação a altas temperaturas (CHIAVERINI, 1986).	35
Figura 7 – Imagens de corrosão por fresta e por pite – a) Ilustração do mecanismo de corrosão por fresta entre duas chapas rebitadas; b) Foto de uma peça de aço com corrosão pite (CALLISTER, 2008).	36
Figura 8 – Fotomicrografia de uma trinca de corrosão sobtensão (CALLISTER, 2008).	37
Figura 9 – Esquema ilustrado da precipitação de carboneto de cromo nos contornos de grão de um aço inoxidável (CALLISTER, 2008).	37
Figura 10 – Foto de uma corrosão galvânica entre materiais de magnésio e aço de uma bomba de drenagem (CALLISTER, 2008).	38

Figura 11 – Representação do conversor AOD: a) Representação esquemática do conversor AOD ilustrando as tubeiras (SILVA; MEI 1988). b) Representação real do conversor AOD (PORTUGUESE ALIBABA, 2015).	47
Figura 12 – Representação do forno VOD: a) Demonstração esquemática (RIZZO,2006);.....	48
Figura 13 – Esquematização do fluxo de produção. a) matéria primas. b) Equipamento alto forno. c) Pré-tratamento de gusa. d) Lingotamento contínuo. e) Laminação a quente. f) Bobinas e chapas a quente de aço inoxidável. g) e h) Laminador Sendzimir. i) Recozimento e decapagem j) e k) Produto final (ACESITA apud OLIVEIRA, 2009).	49
Figura 14 – Diagrama de equilíbrio de fase binário ferro-cromo (BAIN; ABORN apud CHIAVERINI, 2012).	51
Figura 15 – Efeito do teor de cromo sobre o campo da austenita (CHIAVERINI, 2012).....	51
Figura 16 – Diagrama Fe-Cr-C com 6% de Cr (THUM apud CHIAVERINI, 2012). 52	
Figura 17 – Diagrama Fe-Cr-C com 12% de Cr (THUM apud CHIAVERINI, 2012).	52
Figura 18 – Diagrama Fe-Cr-C com 18% de Cr (THUM apud CHIAVERINI, 2012).	53
Figura 19 – Analogia dos diagramas Fe-Ni e Fe-Cr com presença alotrópica do ferro (BAIN apud CHIAVERINI, 2012).....	54
Figura 20 – Aço inoxidável ferrítico 409A lamando a frio com 85% redução e recozido a 850°C. Ferrita equiaxial. Ataque químico Vilella (CARRAMANHOS, 2006).....	55
Figura 21 – Aço inoxidável ferrítico 430A lamando a quente. Ferrita alongada. Presença de precipitados pequenos possivelmente carbonetos. Ataque químico Vilella (CARRAMANHOS, 2006).....	55

Figura 22 – Aço inoxidável austenítico AISI 304 solubilizado a 1050°C, resfriado em água.....	56
Figura 23 – Aço inoxidável austenítico 310 solubilizado a 1050°C. Microestrutura Austenítica com heterogeneidade de tamanho de grão. Ataque Glicerégia. Villares Metals S.A., Sumaré, SP, Brasil (COLPAERT, 2008).....	56
Figura 24 – Aço inoxidável martensítico AISI 410 temperado e revenido (revenido duplo a 730°C e 690°C). Microestrutura martensita revenida. Dureza aproximada 220 HB. Ataque Kalling. A. Zeemann, Tecmetal, Rio de Janeiro, Brasil (COLPAERT, 2008).....	57
Figura 25 – Aço inoxidável martensítico AISI 410 temperado e revenido (revenido excessivo). Microestrutura martensita revenida. Dureza aproximada 185 HB. Ataque Kalling. A. Zeemann, Tecmetal, Rio de Janeiro, Brasil (COLPAERT, 2008).	57
Figura 26 – Microestrutura de aço inoxidável dúplex UNS S31803 laminada e solubilizada a 1050°C por 30 minutos. Ferrita região escura e ilhas de austenita região clara. Microscopia ótica. Ataque eletrolítico (RAMIREZ,1997).....	58
Figura 27 – Resistência ao impacto aço inoxidável dúplex e aço inoxidável austenítico (REICH; POHL; PADILHA apud CHIAVERINI, 2012).....	62
Figura 28 – Representação esquemática do fenômeno sensitização no contorno de grão (FRISCO apud PLAINE, 2013).	63
Figura 29 – Transferência globular (WAINER, BRANDI, DE MELLO, 2004).	73
Figura 30 – Transferência por pulverização (WAINER, BRANDI, DE MELLO, 2004).	73
Figura 31 – Transferência por curto-circuito (WAINER, BRANDI, DE MELLO, 2004).	73
Figura 32 – Equipamento para soldagem com arame tubular (esquema) (SENAI, 2013).....	94
Figura 33 – Microscópio ótico Carl Zeiss Axioplan (USIMINAS, 2015).....	96
Figura 34 – MEV Tescan (SHIMADZU, 2015).	97

Figura 35 – Ângulo excessivo de reforço. A) ângulo normal; b) ângulo excessivo (N-1738, 2009).....	103
Figura 36 – Cavidade alongada. A) na raiz da solda; b) na solda (N-1738, 2009).	104
Figura 37 – Concavidade (N-1738, 2009).....	104
Figura 38 – Concavidade excessiva. A) perfil adequado; b) concavidade excessiva (N-1738, 2009).....	104
Figura 39 – Convexidade excessiva. A) perfil adequado; b) convexidade excessiva (N-1738, 2009).....	105
Figura 40 – Deformação angular. A) normal; b) excessiva (N-1738, 2009).	105
Figura 41 – Deformação linear ou desalinhamento (N-1738, 2009).	105
Figura 42 – Deposição insuficiente (N-1738, 2009).	106
Figura 43 – Embicamento (N-1738, 2009).....	106
Figura 44 – Falta de fusão. A) na zona de ligação; b) entre os passes; c) e d) na raiz da solda. (N-1738, 2009).	106
Figura 45 – Falta de Penetração. A) em junta de topo sem abertura de raiz; b) em junta de topo com abertura de raiz e com soldagem em ambos os lados; c) em junta de topo com abertura de raiz; d) em junta em ângulo (N-1738, 2009).....	107
Figura 46 – Inclusão de escória. A) e b) alinhada; c) isolada; d) agrupada (N-1738, 2009).....	107
Figura 47 – Mordedura (N-1738, 2009).	108
Figura 48 – Mordedura na raiz (N-1738, 2009).....	108
Figura 49 – Penetração excessiva (N-1738, 2009).....	108
Figura 50 – Perfuração (N-1738, 2009).	109
Figura 51 – Porosidade (N-1738, 2009).....	109
Figura 52 – Porosidade agrupada (N-1738, 2009).....	109

Figura 53 – Porosidade alinhada (N-1738, 2009).	110
Figura 54 – Porosidade vermiforme (N-1738, 2009).....	110
Figura 55 – Rechupe de cratera (N-1738, 2009).	110
Figura 56 – Sobreposição (N-1738, 2009).....	111
Figura 57 – Solda em ângulo assimétrica (N-1738, 2009).....	111
Figura 58 – Trinca de cratera. A) longitudinal; b) transversal; c) em estrela (N-1738, 2009).....	112
Figura 59 – Trinca interlamelar (N-1738, 2009).	112
Figura 60 – Trinca irradiante. A) na zona fundida; b) na zona afetada termicamente; c) no metal de base (N-1738, 2009).	113
Figura 61 – Trinca na margem (N-1738, 2009).....	114
Figura 62 – Trinca na raiz. A) na zona fundida; b) na zona afetada termicamente (N-1738, 2009).....	114
Figura 63 – Trinca ramificada. A) na zona fundida; b) na zona afetada termicamente; c) no metal de base (N-1738, 2009).	115
Figura 64 – Trinca sob cordão (N-1738, 2009).	115
Figura 65 – Trinca transversal. A) na zona fundida; b) na zona afetada termicamente; c) no metal de base (N-1738, 2009).	116
Figura 66 – Corpos de provas Charpy recomendados pela ASTM e ABNT para ensaio de impacto (ASTM 1978 apud SOUZA, 1982, p. 84).	118
Figura 67 – Contração e expansão do cristal quando submetido a uma alta tensão alternada na mesma frequência ultrassônica emitida pelo cristal. É um processo de transformação da energia elétrica em energia mecânica e vice-versa (ANDREUCCI, 2014).....	125
Figura 68 – Emissão de onda no sentido da descontinuidade (ANDREUCCI, 2014).	126

Figura 69 – Retorno da onda refletida (ANDREUCCI, 2014).	126
Figura 70 – Exemplo de exibição do ensaio no aparelho de ultrassom. a) Medição de espessura por ultrassom; b) Gráfico gerado na tela do aparelho de ultrassom (ANDREUCCI, 2014).	127
Figura 71 – Aplicação do revelador e observação da indicação (ANDREUCCI, 2014).	128
Figura 72 – Absorção do líquido, pelo revelador, de dentro da abertura (ANDREUCCI, 2014).	128
Figura 73 – Técnica Geral de Ensaio Radiográfico na Indústria (ANDREUCCI, 2014).	129
Figura 74 – IQI ASME ou ASTM tipo furo (ANDREUCCI, 2014).	130
Figura 75 – IQI ASME ou ASTM tipo fio (ANDREUCCI, 2014).	131
Figura 76 – Posicionamento de IQI tipo furo (ANDREUCCI, 2014).	131
Figura 77 – Posicionamento de IQI tipo fio (ANDREUCCI, 2014).	132
Figura 78 – Técnica de exposição parede simples - vista simples (ANDREUCCI, 2014).	132
Figura 79 – Técnica Radiográfica Panorâmica numa solda entre cilindro fundo de um vaso de pressão (ANDREUCCI, 2014).	133
Figura 80 – Técnica de exposição parede dupla e vista simples (ANDREUCCI, 2014).	134
Figura 81 – Espaço cedido pela INSPE///BRAS. a) Local onde são realizadas as soldagens; b) Recursos utilizados para realização da soldagem.	137
Figura 82 – Inspetor de soldagem orientando para realização da soldagem dos materiais.	137
Figura 83 – Alinhamento e marcação para iniciação das soldagens.	138
Figura 84 – Peça chanfrada por esmerilhamento.	138

Figura 85 – Discos utilizados para esmerilhamento do material.....	139
Figura 86 – Travamento das peças para diminuição da deformação.	139
Figura 87 – Utilização do lápis de fusão para verificação da temperatura.....	140
Figura 88 – Peça após a goivagem.	140
Figura 89 – Realização de limpezas entre passes.....	141
Figura 90 – Consumível E2209, com diâmetro de 1,2mm, com classificação AWS A5.22, do fabricante Böhler Welding.....	142
Figura 91 – Esquema utilizado na soldagem pelo processo FCAW.	142
Figura 92 – Consumível ER316L, com diâmetro de 3,25mm, com classificação AWS A5.9, do fabricante Weld-inox.	143
Figura 93 – Esquema utilizado na soldagem pelo processo GTAW.	143
Figura 94 – Consumível E310-16, com diâmetro de 2,5mm e comprimento de 250mm, com classificação AWS A5.4-92, do fabricante Böhler Welding.	144
Figura 95 – Esquema utilizado na soldagem pelo processo SMAW.....	145
Figura 96 – Equipamento utilizado para corte de CP's para ensaios.	146
Figura 97 – Preparação dos corpos de prova para ensaio – a) Tarefa de esmerilhamento; b) Tarefa de lixamento.....	147
Figura 98 – Corpos de prova prontos para ensaio.....	147
Figura 99 – Realização do ensaio de dobramento – a) Manômetro indicador de carga; b) Momento da dobra do corpo de prova.	148
Figura 100 – Corpo de prova dobrado do processo SMAW - (a) Face; (b) Raiz.	149
Figura 101 – Corpo de prova dobrado do processo GTAW - (a) Face; (b) Raiz. .	150
Figura 102 – Corpo de prova dobrado do processo FCAW - (a) Face; (b) Raiz. .	151
Figura 103 – Aspecto do cordão de solda do corpo de prova soldado pelo processo GTAW.	151

Figura 104 – Aspecto do cordão de solda do corpo de prova soldado pelo processo SMAW.....	152
Figura 105 – Aspecto do cordão de solda do corpo de prova soldado pelo processo FCAW.	152
Figura 106 – Máquina de ensaio de tração utilizado.....	153
Figura 107 – Conjunto para ensaio efetuando a curva no momento da tração. ..	154
Figura 108 – Corpo de prova 1 de GTAW do ensaio de tração mostrando o limite de resistência na curva.	155
Figura 109 – Curvas de tração dos 3 corpos de prova do processo GTAW	156
Figura 110 – Curvas de tração dos 3 corpos de prova do processo SMAW.....	156
Figura 111 – Curvas de tração dos 3 corpos de prova do processo FCAW.	157
Figura 112 – Curvas de tração de todos os ensaios.....	158

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química de alguns aços inoxidáveis duplex e em destaque os aços inoxidáveis superduplex (LIMA, 2006).....	46
Tabela 2 - Propriedades mecânicas típicas dos aços inoxidáveis ferríticos. Adaptado do Metals Handbook para CHIAVERINI (2012).	60
Tabela 3 - Relação de propriedade mecânica com intensidade de encruamento (Adaptado de DI CAPRIO para CHIAVERINI, 2012)	61
Tabela 4 - Propriedades mecânicas resultantes dos tratamentos térmicos (CHIAVERINI, 2012).	61
Tabela 5 - Parâmetros para operação de recristalização de alguns aços inoxidáveis ferríticos (Adaptado de DI CAPRIO para CHIAVERINI, 2012).....	64
Tabela 6 - Intervalos de temperaturas de solubilização para aços inoxidáveis austeníticos (Adaptado de DI CAPRIO para CHIAVERINI, 2012).	65
Tabela 7 - Dureza resultante após tratamento térmico de recozimento pleno e isotérmico em aços inoxidáveis martensíticos (Adaptado de DI CAPRIO para CHIAVERINI, 2012).	66
Tabela 8 - Tratamento térmico dos aços inoxidáveis martensíticos e suas propriedades mecânicas (Adaptado de DI CAPRIO para CHIAVERINI, 2012).	67
Tabela 9 - Classificação dos processos de soldagem de acordo com a fonte de energia e o tipo de proteção (WAINER, BRANDI, DE MELLO, 2004).	68
Tabela 10 - Classificação dos processos de soldagem a partir da natureza da união (Adaptado de WAINER, BRANDI, DE MELLO, 2004).	70
Tabela 11 - Especificações AWS para eletrodos revestidos (SENAI, 2013).....	79
Tabela 12 - Propriedades de Metais Típicos (FBTS, 2013).	102
Tabela 13 - Velocidade de propagação das ondas longitudinais (ANDREUCCI, 2014).....	125

Tabela 14 – Composição química do material UNS S31803 (adaptador de ASTM A 240/A 240M – 08)	135
Tabela 15 – Limites para ensaios mecânicos	135
Tabela 16 – Tabela de cotações para aquisição do material SAF 2205.	136
Tabela 17 - Parâmetros utilizados e aporte térmico em cada passe - FCAW.....	142
Tabela 18 - Parâmetros utilizados e aporte térmico em cada passe - GTAW.	144
Tabela 19 - Parâmetros utilizados e aporte térmico em cada passe - SMAW.....	145
Tabela 20 – Resultados de dureza do corpo de prova soldado pelo processo GTAW.	152
Tabela 21 – Resultados de dureza do corpo de prova soldado pelo processo SMAW.	152
Tabela 22 – Resultados de dureza do corpo de prova soldado pelo processo FCAW.	153
Tabela 23 – Resultados de tração dos corpos de prova de todos os processos de soldagem.	158
Tabela 24 – Tabela comparativa entre valores obtidos nos CP x valores normalizados pela ASME IX.	160
Tabela 25 – Tabela comparativa entre valor de dureza no metal de base obtido no laboratório UNISANTA X valor de dureza no metal de base indicado no certificado do fabricante.	161
Tabela 26 – Valores médios de dureza encontrados nos CPs.	161
Tabela 27 – Cotação realizada junto à empresa TORK - Controle Tecnológico de Materiais.	164
Tabela 28 – Cotação realizada junto à empresa LABTESTE - Análises e Ensaios de Materiais Metálicos	165

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI - American Iron and Steel Institute

AOD - Argon Oxygen Decarburization

ASM International – The materials Information Society

ASME - American Society of Mechanical Engineers

ASTM - American Society for Testing and Materials

AWS – American Welding Society

CP – Corpo de Prova

Cr – Cromo

Cu – Cobre

END – Ensaios Não Destrutivos

EPS – Especificação do Procedimento de Soldagem

FBTS - Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem

FCAW - Flux-Cored Arc Welding

Fe – Ferro

FEA – Forno Elétrico a Arco

GMAW – Gas Metal Arc Welding

GTAW – Gas Tungsten Arc Welding

h – hora

HB – Dureza Brinell

HV – Dureza Vickers

IQI - Indicadores de Qualidade de Imagem

kg – quilograma

l – litros

MAG – Metal Active Gas

MB – Metal Base

MEV - Microscópio eletrônico de Varredura

MIG – Metal Inert Gas

min – minutos

mm – milímetro

Mo – Molibdênio

MS – Metal de Solda

N – Nitrogênio

Ni – Níquel

SAE - Society of Automotive Engineers

SAF – Sandvik Austenitic Ferritic

SMAW – Shielded Metal Arc Welding (ER – Eletrodo Revestido)

TCC - Tetragonal de Corpo Centrado

TIG – Tungsten Inert Gas

UNS - Unified Numbering System

VOD - Vacuum Oxygen Decarburization

W – Tungstênio

ZF – Zona Fundida

ZTA – Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	27
1. OBJETIVO	28
2. O AÇO INOXIDÁVEL.....	29
2.1. Aplicações destinadas ao aço inoxidável	29
2.2. Características do aço inoxidável.....	33
2.2.1. Corrosão em aços inoxidáveis.....	36
2.2.1.1. Corrosão por pite e frestas	36
2.2.1.2. Corrosão sobtensão.....	37
2.2.1.3. Corrosão intergranular	37
2.2.1.4. Corrosão galvânica	38
2.2.1.5. Influência dos elementos de liga.....	38
2.2.2. Propriedades físicas e mecânicas	40
2.3. Classificações e Normas:.....	41
2.3.1. Austeníticos (AISI Série 200 e 300).....	42
2.3.2. Martensíticos e Endurecíveis por Precipitação (AISI Série 400 e 500).....	42
2.3.3. Ferríticos (AISI Série 400)	43
2.3.4. Duplex	43
2.3.5. Aços inoxidáveis da categoria “Super”	44
2.3.5.1. Super duplex.....	45
3. METALURGIA DO AÇO INOXIDÁVEL	47
3.1. Processos de fabricação	47
3.1.1. Método AOD (<i>Argon Oxygen Decarburization</i>).....	47
3.1.2. Método VOD (<i>Vacuum Oxygen Decarburization</i>).....	48
3.2. Fabricação em usinas integradas e semi integradas	48
3.2.1. Processos de fabricação em usina integrada	48
3.2.2. Processos de fabricação em usina semi integrada.....	50
3.3. Microestrutura dos aços inoxidáveis	50
3.3.1. Efeito dos elementos cromo e níquel.....	50
3.3.1.1. Efeito do cromo.....	50
3.3.1.2. Efeito do níquel.....	53
3.3.1.3. Microestrutura dos aços inoxidáveis ferríticos	54

3.3.1.4. Microestrutura dos aços inoxidáveis austeníticos	55
3.3.1.5. Microestrutura dos aços inoxidáveis martensíticos	56
3.3.1.6. Microestrutura dos aços inoxidáveis duplex	57
3.3.1.7. Fase sigma	58
3.4. Propriedades mecânicas	59
3.4.1. Propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis ferríticos	60
3.4.2. Propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis austeníticos	61
3.4.3. Propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis martensíticos	61
3.4.4. Propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis duplex	62
3.5. Problemas que podem ocorrer nos aços inoxidáveis	63
3.5.1. Sensitização dos aços inoxidáveis	63
3.6. Tratamento térmico	64
3.6.1. Tratamento térmico dos aços inoxidáveis ferríticos	64
3.6.2. Tratamento térmico dos aços inoxidáveis austeníticos	64
3.6.3. Tratamento térmico de solubilização	65
3.6.4. Tratamento térmico de alívio de tensões	65
3.6.5. Tratamento térmico de estabilização	66
3.6.6. Tratamento térmico para aços inoxidáveis martensíticos	66
4. SOLDAGEM	68
4.1. Processos de soldagem	68
4.1.1. Classificação pelo tipo de fonte de energia	69
4.1.2. Classificação pela natureza da união	69
4.2. Soldagem com arco elétrico	71
4.2.1. Conceitos do arco elétrico	71
4.2.1.1. Calor	71
4.2.1.2. Ionização	71
4.2.1.3. Emissão termoiônica	72
4.2.2. Tipos de transferência metálica	72
4.2.2.1. Transferência globular	72
4.2.2.2. Transferência por pulverização	73
4.2.2.3. Transferência por curto-circuito	73
4.2.2.4. Transferência por arco pulsado	74

4.3. Processo de Soldagem com Eletrodo Revestido (SMAW)	74
4.3.1. Aplicação	74
4.3.2. Eletrodo revestido	75
4.3.2.1. Eletrodos celulósicos	76
4.3.2.2. Eletrodos rútilicos	77
4.3.2.3. Eletrodos ácidos	77
4.3.2.4. Eletrodos básicos.....	78
4.3.2.5. Classificação dos eletrodos revestidos	78
4.3.3. Parâmetros de soldagem.....	79
4.3.4. Equipamento	80
4.4. Processo de Soldagem com Eletrodo de Tungstênio (TIG/GTAW)	80
4.4.1. Características do processo	81
4.4.2. Aplicação	82
4.4.3. Eletrodo	82
4.4.4. Consumíveis – Metais de Adição e Gases	82
4.4.5. Equipamento	83
4.4.6. Variantes do processo TIG	84
4.5. Processo de Soldagem MIG/MAG (GMAW)	84
4.5.1. Características do processo	85
4.5.2. Aplicação	85
4.5.3. Modos de transferência	86
4.5.4. Consumíveis	87
4.5.5. Equipamento	89
4.6. Processo de Soldagem com Arame Tubular (FCAW)	89
4.6.1. Características do processo	89
4.6.2. Aplicação	90
4.6.3. Parâmetros de soldagem.....	91
4.6.4. Modos de transferência	92
4.6.5. Consumíveis	93
4.6.6. Equipamento	94
4.7. Soldagem dos aços inoxidáveis	94
4.7.1. Soldagem dos aços inoxidáveis duplex.....	95

5. CONFIABILIDADE NAS UNIÕES SOLDADAS	96
5.1. Análise microestrutural.....	96
5.1.1. Análise via Microscopia ótica.....	96
5.1.2. Análise via Microscopia eletrônica de varredura	96
5.2. Controle de temperatura	97
5.2.1. Pré-Aquecimento	98
5.2.2. Temperatura entre passes.....	98
5.2.3. Pós-aquecimento.....	99
5.3. Controle de deformação.....	100
5.3.1. Os principais fatores que influenciam na deformação	100
5.3.2. Energia de soldagem.....	100
5.3.3. Grau de restrição	101
5.3.4. Tensões internas ou tensões residuais	101
5.3.5. Propriedades dos materiais	101
5.3.6. Prevenção e controle da deformação	102
5.4. Descontinuidades em juntas soldadas	103
5.4.1. Tipos de descontinuidades	103
5.5. Ensaio mecânicos em juntas soldadas.....	116
5.5.1. Tração.....	116
5.5.2. Dobramento	117
5.5.3. Charpy	118
5.5.4. Micrografia.....	119
5.5.4.1. Preparação do corpo de prova (amostra)	119
5.5.4.2. Seção a ser estudada	119
5.5.4.3. Embutimento do corpo de prova	120
5.5.4.4. Lixamento	120
5.5.4.5. Polimento	120
5.5.4.6. Ataque químico	120
5.5.5. Macrografia	121
5.5.6. Dureza	122
5.5.6.1. Dureza <i>Brinell</i> (HB).....	122
5.5.6.2. Dureza <i>Rockwell</i> (HR)	122

5.5.6.3. Dureza <i>Vickers</i>	123
5.5.6.4. Dureza por choque e dureza <i>Shore</i>	123
5.5.7. Análise química.....	123
5.5.8. Ultrassom	124
5.5.8.1. Princípios do ensaio	124
5.5.8.2. Vantagens e desvantagens	127
5.5.9. Líquido penetrante.....	128
5.5.9.1. Princípio do ensaio	128
5.5.9.2. Vantagens e desvantagens.....	129
5.5.9.2.1. Vantagens	129
5.5.9.2.2. Desvantagens.....	129
5.5.10. Raio X.....	129
5.5.10.1. Princípios do ensaio.....	130
5.5.10.2. Técnica de parede simples (PSVS)	132
5.5.10.3. Exposição panorâmica.....	133
5.5.10.4. Técnica de parede dupla vista simples (PDVS)	133
5.5.10.5. Vantagens e desvantagens.....	134
5.5.10.5.1. Vantagens	134
5.5.10.5.2. Desvantagens.....	134
6. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	135
6.1. Aquisição do material	136
6.2. Procedimento de soldagem.....	136
6.3. Processo de soldagem FCAW:	141
6.4. Processo de soldagem GTAW:	143
6.5. Processo de soldagem SMAW:.....	144
7. ENSAIOS MECÂNICOS	146
7.1. Ensaio de Dobramento:.....	146
7.2. Ensaio de Dureza:.....	151
7.3. Ensaio de Tração:	153
8. DISCUSSÃO.....	159
8.1. Produtividade entre os processos de soldagem.....	159
8.2. Resultados dos ensaios mecânicos	159

8.2.1. Dobramento	159
8.2.2. Tração	160
8.2.3. Dureza	160
9. CONCLUSÃO:	162
10. PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	164
11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:.....	166
ANEXOS:.....	172

INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis duplex são materiais que possuem alta resistência mecânica, aproximadamente o dobro da encontrada nos aços inoxidáveis austeníticos, e alta resistência à corrosão. A composição química é baseada no sistema Fe-Cr-Ni, podendo ter adições de Mo, N, W e Cu.

Dentre esta categoria de materiais, os aços inoxidáveis duplex são amplamente aplicados na indústria, em processos onde o material deve trabalhar em condições mais agressivas. A proporção balanceada entre austenita e ferrita lhe confere propriedades superiores comparados aos aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos.

Por conta da sua estrutura química, quando os aços inoxidáveis duplex são submetidos a altos ciclos térmicos, o material fica suscetível ao surgimento de fases intermetálicas, principalmente sigma, chi e epsilon, além de carbonetos e nitretos. A presença destes precipitados causa uma intensa queda nas propriedades de tenacidade ao impacto e resistência à corrosão. Essas transformações ocorrem principalmente nos contornos dos grãos ferrita/ferrita e austenita/ferrita.

Um grande desafio da soldagem destes materiais está na obtenção de uma junta com balanço proporcional de austenita e ferrita e isenta de precipitados. Isso basicamente é possível com o controle da composição química na poça de fusão e dos ciclos térmicos.

1. OBJETIVO

O objetivo deste estudo foi verificar o desempenho dos 3 (três) processos de soldagem na soldagem do aço inoxidável duplex SAF 2205 e verificar a resistência mecânica obtida após cada um dos processos.

Para elaborar este estudo, foram soldados três corpos de prova do aço inoxidável duplex SAF 2205 utilizando os processos arame tubular (FCAW), TIG (GTAW) e eletrodo revestido (SMAW), mantendo a temperatura entre passes inferior a 150°C. Após a soldagem, foi verificada a resistência mecânica através dos ensaios de dobramento, tração e dureza, a fim de analisar os resultados obtidos, comparando e correlacionando com cada processo de soldagem que foi realizado.

2. O AÇO INOXIDÁVEL

Os aços inoxidáveis surgiram primeiramente a partir de uma investigação de uma liga metálica com boa resistência ao desgaste. Segundo a Revista INOX nº 39 de 2012, publicada pela Associação Brasileira do Aço Inoxidável, há muitas controvérsias sobre a primeira descoberta do aço inoxidável, devido às pesquisas relacionadas com ferro, cromo e níquel iniciarem em 1904 com Alexandre Leon Guillet, seguido da dupla Albert Marcel Portevin e W. Giesen, porém não conseguiram êxito em descrever a camada passiva (característica do aço inoxidável). Outros pesquisadores conseguiram patentes do aço inoxidável, que são os alemães Philipp Monnartz e William Borchers, enquanto outra dupla Frederick M. Becket e Christian Dantsizen é considerada a descobridora dos aços inoxidáveis ferríticos.

Em 1912 na Alemanha, Eduardo Maurer e Benno Strauss conseguiram bons progressos na pesquisa, até patentes de aços inoxidáveis. No mesmo ano o inglês Harry Brearley a pedido de um fabricante de armas, começou essa investigação devido o interior dos canos das armas de fogo se desgastarem muito, pois havia a queima de gases liberados do disparo do projétil. O início de sua pesquisa obteve ênfase na investigação de uma liga com resistência a corrosão, quando realizou uma experiência de ataque químico para revelar a microestrutura desses novos aços com altos teores de cromo. Foi notado por Brearley, que o ácido nítrico (um reativo comum para os aços), não surtia efeito algum.

Outro pesquisador do aço inoxidável é o americano Elwood Haynes, que não gostava da corrosão em seu barbeador. Mais tarde, em 1919 patenteou o aço inoxidável martensítico (Revista INOX nº 39, 2012).

2.1. Aplicações destinadas ao aço inoxidável

As tendências mundiais que indicam um aumento cada vez maior da utilização e uso dos aços inoxidáveis são sua aparência, resistência à corrosão, resistência a oxidação e resistência mecânica.

Sua aparência brilhante e atraente dos aços inoxidáveis, ligado a boa resistência mecânica ao longo do tempo, é o que torna esses materiais adequados

para uso na arquitetura e construção, fabricação de móveis, objetos domésticos e utensílios semelhantes. A seguir, a figura 1 (a) e (b) mostram itens domésticos, (c) e (d) obras de arquitetura.



Figura 1 – Aplicações dos aços inoxidáveis em itens de cozinha e arquitetura – a) Pia de cozinha; b) Panelas e tigelas; c) Revestimentos externos de edifícios; d) Estruturas urbanas (REVISTA INOX, 2015).

A resistência à corrosão dos aços inoxidáveis em meio à agressividade química faz com que o torne vantajoso à empregabilidade em recipientes, tubulações e componentes de equipamentos de processos alimentícios, farmacêuticos, de papel e celulose, de produtos de petróleo e produtos químicos em geral, em exemplo a figura 2.



Figura 2 – Aplicações dos aços inoxidáveis x em processos industriais e tubulações – a) Indústria petroquímica; b) Trem revestido de aço inoxidável; c) Bobinas de aço inoxidável; d) Tubos (REVISTA INOX, 2015).

Sua boa resistência à oxidação em temperaturas elevadas emprega-o em componentes de fornos, câmaras de combustão, motores térmicos e trocadores de calor, como mostra a figura 3.

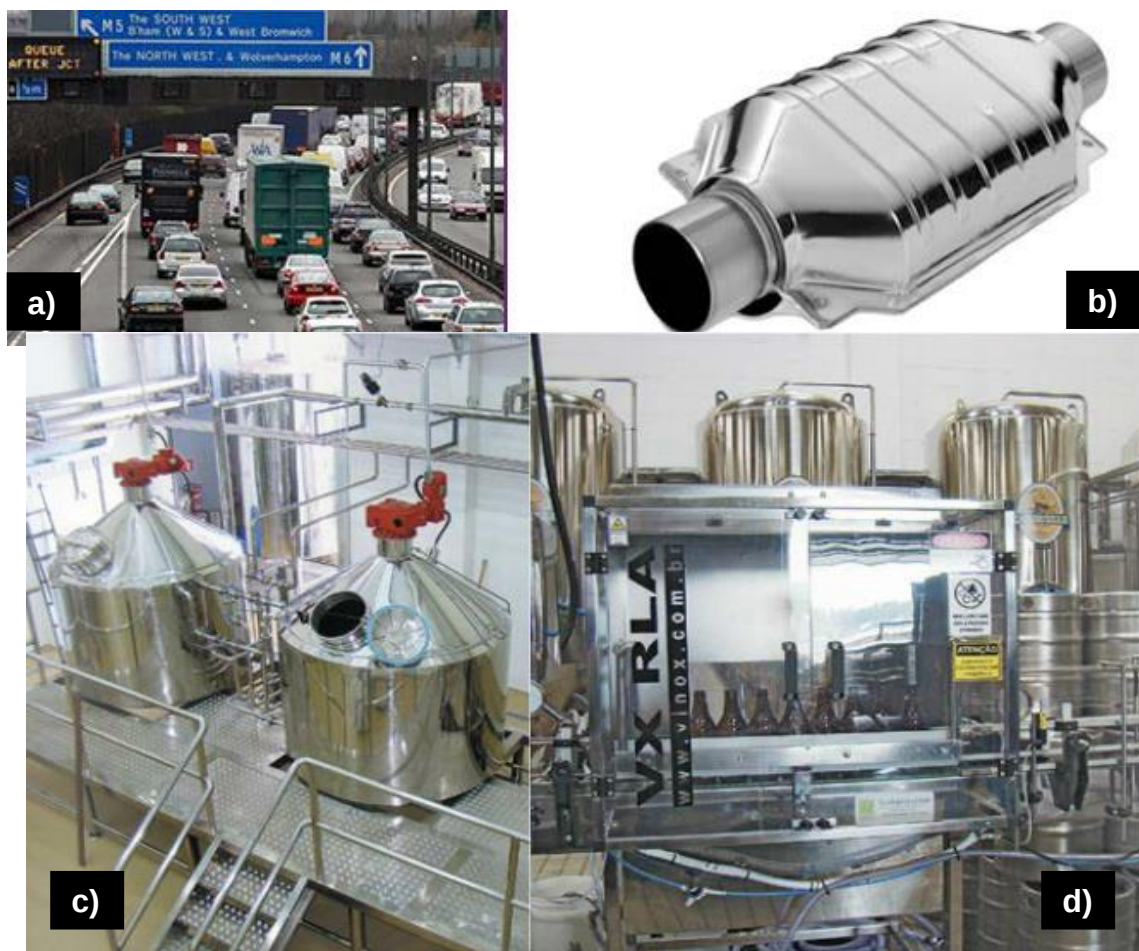


Figura 3 – Aplicações dos aços inoxidáveis em fornos, motores e trocadores – a) Utensílios para carros; b) Sistema de exaustão para veículos; c) Forno de indústria química; d) Forno para indústria farmacêutica (REVISTA INOX, 2015).

A resistência mecânica alta, em temperatura ambiente e temperaturas criogênicas, elege-se o uso do aço inoxidável em elementos de máquinas e equipamentos com alta confiabilidade, tais como, vasos de pressão, partes de aeronaves e mísseis, e componentes estruturais menores como haste e parafusos, mostrados na figura 4.



Figura 4 – Aplicações do inox em aviação, armamentos e elementos de máquinas – a) Porcas e parafusos; b) Rolamentos diversos; c) Indústria bélica; d) Avião (REVISTA INOX, 2015).

O aço inox também é utilizado na área hospitalar, adornos humanos e veiculares, ferramentas em geral e componentes para eletrônicos devido a sua adequação de limpeza e resistência (REVISTA INOX, 2015).

2.2. Características do aço inoxidável

Com relação à resistência baixa dos aços-carbono à corrosão e à oxidação, limita a utilização desses aços em ambientes agressivos como em contato com água salobra por exemplo. Nesses casos, usam-se os aços inoxidáveis.

Os aços inoxidáveis são produzidos a partir do processo de fabricação de fundição ou trabalho mecânico, apresentando as propriedades a seguir:

- Alta resistência à corrosão;
- Resistência mecânica adequada;
- Facilidade de limpeza;
- Baixa rugosidade superficial;
- Aparência higiênica;
- Material inerte;
- Facilidade de conformação;
- Facilidade de união;
- Resistência a altas e baixas (criogênica, abaixo de 0 °C) temperaturas;
- Resistência a variações bruscas de temperatura;
- Acabamentos superficiais e formas variadas;
- Relação custo/benefício favorável;
- Baixo custo de manutenção;
- Material reciclável.

Resistência à corrosão é o resultado da deposição de uma película fina de óxido na superfície do metal, que é estabilizado pelo cromo, protegendo esse metal. Os aços adquirem passividade (propriedade de permanecer inalterado no meio circunvizinho) quando ligados com outros elementos metálicos, além do cromo que é o principal responsável no aumento à resistência à corrosão, pode-se ligar também com o níquel que melhora a resistência da liga às altas temperaturas, ductibilidade e soldabilidade, e em menor grau o cobre e molibdênio para resistência a corrosão por vias úmidas, o silício ou alumínio aumenta a resistência à oxidação em altas temperaturas. Além destes, outros elementos também podem ser adicionados como: nióbio, nitrogênio, cobalto, boro, manganês, etc.

Adições de cromo entre 1% e 10,5% aumentam progressivamente a resistência à oxidação a temperaturas ambientes e elevadas, mas é insuficiente para resistir em ambientes químicos muito corrosivos. Por isso adiciona-se no mínimo 11% de cromo para ter uma resistência a corrosão válida a um ambiente mais agressivo (SOUZA, 1989).

A figura 5 mostra em uma atmosfera industrial, um metal de grande corrosibilidade a um metal praticamente indestrutível pela corrosão:

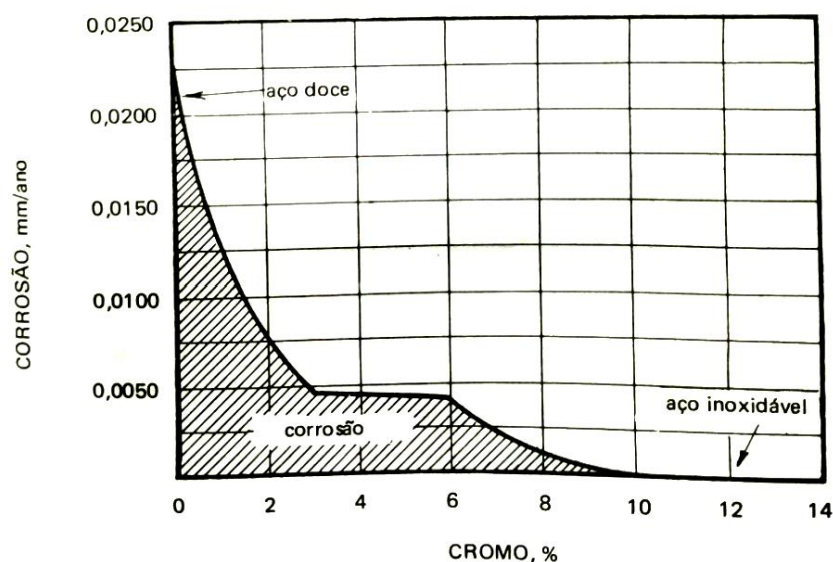


Figura 5 – Gráfico ilustrando a passividade do aço-cromo com o mínimo de teor para a resistência a corrosão em temperatura ambiente (CHIAVERINI, 1986).

Em altas temperaturas ocorre o mesmo para oxidação, devendo, entretanto, o teor de cromo ser mais elevado, em média acima de 18%, para o material ter resistência ao calor, ou seja, combinação de resistência à oxidação e resistência mecânica. Como mostra a figura 6.

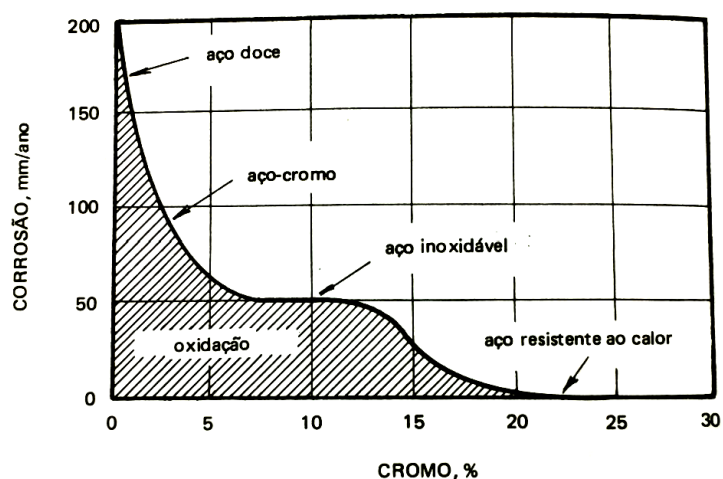


Figura 6 – Gráfico ilustrando o cromo na resistência dos aços a oxidação a altas temperaturas (CHIAVERINI, 1986).

2.2.1. Corrosão em aços inoxidáveis

Corrosão é geralmente entendida como uma destruição parcial ou total de um metal ou liga metálica, por via química ou eletroquímica. Uma corrosão normal ou generalizada vai se desenvolvendo uniformemente em toda superfície da peça atacada, porém não significa destruição em igualdade em toda a área devido à heterogeneidade do material, à temperatura e diferenças de composição química. Existem as corrosões localizadas, que podem ser intersticiais ou também chamados de pites e sob tensão (DAVIM; MAGALHÃES, 2010).

2.2.1.1. Corrosão por pite e frestas

Em principal ocorre em soluções aquosas contendo cloretos. Pode ocorrer em condições neutras, mas é mais suscetível em condições ácidas e em aumentos de temperaturas, promovendo corrosão por pite e frestas. A corrosão por pites é localizada em pontos discretos na superfície, o meio agressivo consegue quebrar o filme passivo protetor, para depois progredir em profundidade e volume.

Para diminuir esta forma de corrosão, é introduzido molibdênio como elemento de liga. A corrosão por fresta pode ocorrer em frestas ou reentrâncias de estrutura (SILVA; MEI, 2010).

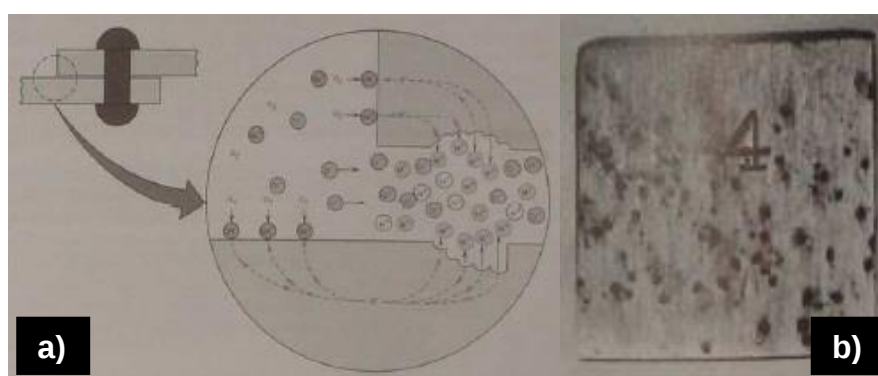


Figura 7 – Imagens de corrosão por fresta e por pite – a) Ilustração do mecanismo de corrosão por fresta entre duas chapas rebitas; b) Foto de uma peça de aço com corrosão pite (CALLISTER, 2008).

2.2.1.2. Corrosão sobtensão

É uma forma localizada de corrosão caracterizada pelo aparecimento de trincas em materiais sujeitos a tensão de serviço elevadas em ambiente corrosivo, normalmente ocorre na presença de cloreto de sódio, magnésio, cálcio, zinco e lítio e em temperaturas elevada acima de 50°C (CHIAVERINI, 2012).



Figura 8 – Fotomicrografia de uma trinca de corrosão sobtensão (CALLISTER, 2008).

2.2.1.3. Corrosão intergranular

A corrosão intergranular pode ocorrer em aços inoxidáveis cromo-níquel (chamados “austeníticos”), quando aquecidos para trabalho a quente ou tratamento térmico, ou devido à operação de soldagem entre 400° e 800°C, fenômenos conhecidos como sintetização, a essa temperatura o cromo e o carbono se combinam formando carboneto de cromo (Cr_{23}C_6), que se precipitam nos contornos de grão, removendo grande quantidade de cromo e fragilizando a região (CHIAVERINI, 1986).

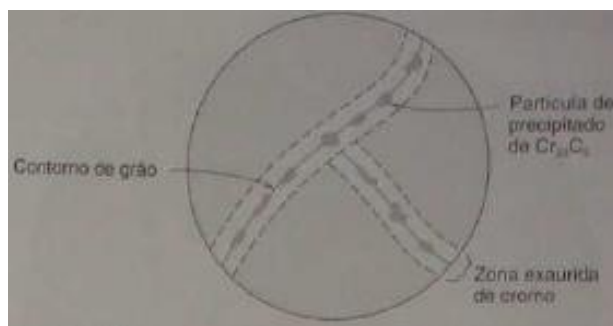


Figura 9 – Esquema ilustrado da precipitação de carboneto de cromo nos contornos de grão de um aço inoxidável (CALLISTER, 2008).

2.2.1.4. Corrosão galvânica

Ocorre quando dois metais dessemelhantes estão em contato em presença de um eletrólito. A diferença de potencial entre ambos, em função de um meio corrosivo ou de uma solução condutora, produzirá um fluxo de elétrons entre eles.

O material menos resistente corroerá com maior intensidade, tornando-se anódico. A força impulsora para a circulação da corrente e, conseqüentemente da corrosão, é a diferença de potencial entre os dois metais (CHIAVERINI, 2012).

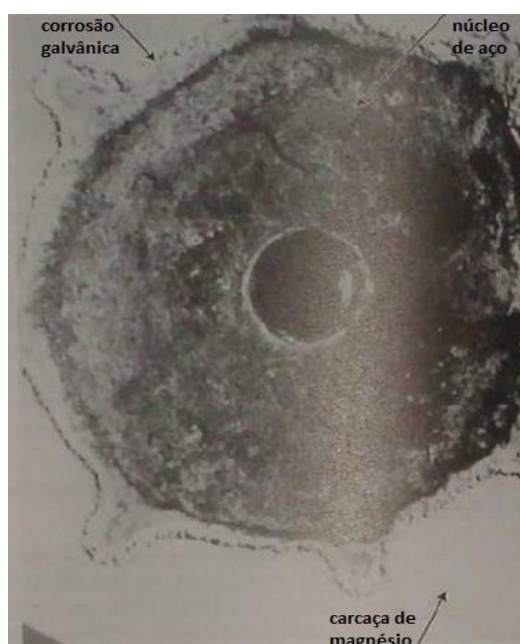


Figura 10 – Foto de uma corrosão galvânica entre materiais de magnésio e aço de uma bomba de drenagem (CALLISTER, 2008).

2.2.1.5. Influência dos elementos de liga

Além do cromo e níquel, outros elementos possuem influência agindo em maior ou menor escala em uma estrutura, modificando as propriedades do aço inoxidável. Esses elementos podem ser divididos em dois grupos: os gamagênicos (elementos propícios a ser austenitizantes) como níquel, carbono, nitrogênio, manganês, cobre e etc., e alfa-gênicos (elementos propícios a ser ferritizantes) como cromo, silício, molibdênio, tungstênio, titânio dentre outros (BAULY, 2000).

O cromo como principal elemento do aço inoxidável propicia dependendo do seu teor (mínimo 11%) a melhora na resistência a corrosão, a soldabilidade e aplicações envolvendo exposição a certas temperaturas.

Aumentando a quantidade de níquel, aumentam-se gradativamente as propriedades mecânicas com a estabilização da austenita. Aumenta a resistência a corrosão geral em meios não oxidantes e em pequenas quantidades, melhora a tenacidade e a solubilidade de ligas ferríticas e martensíticas.

O manganês em certas quantidades desempenha funções em associação ao níquel. Aumentando seu teor evidencia a resistência ao desgaste.

Com teores de carbono, aumenta-se a dureza do aço, melhora a resistência em aplicações a temperaturas elevadas e permite o endurecimento por tratamento térmico. Porém aumentando o carbono propicia a reação com o cromo, prejudicando na resistência a corrosão.

Nitrogênio retarda a formação de fase sigma e endurece o aço. Esse elemento evita a segregação do cromo e molibdênio elevando a resistência à corrosão na fase austenítica e corrosão por pite, muito importante nos aços inoxidáveis duplex.

O molibdênio melhora a resistência por pite e em frestas. Faz o aumento da passividade e resistência química dos aços inoxidáveis.

O elemento titânio hoje muito importante na aplicabilidade dos materiais principalmente na manutenção da inoxidabilidade dos aços, evita a ação de combinação do carbono com o cromo e a perda de resistência a corrosão (PEREIRA, 2009).

O alumínio e silício melhoram a resistência à oxidação e corrosão respectivamente para elevadas temperaturas, mas o excesso do alumínio dissolvido na ferrita fragiliza o material.

Fósforo pode ser usado em aços inoxidáveis para o fornecimento de boa usinabilidade.

Faz-se uso de cobre para melhora de resistência a corrosão por via úmida e cede condutividade térmica, elétrica e boa usinabilidade (BAULY, 2000).

2.2.2. Propriedades físicas e mecânicas

A resistência mecânica dos aços inoxidáveis aumenta ou diminui de acordo com adições de elementos de liga, há também as diferenças de estrutura atômica desses aços.

Os aços inoxidáveis martensíticos e os chamados endurecíveis por precipitação aumentam a sua resistência por tratamento térmico, porém utilizam processos diferentes. O tratamento térmico dos aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação consiste na solubilização seguida pelo envelhecimento. Na solubilização os compostos intermetálicos são dissolvidos na matriz austenítica, seguida por resfriamento rápido o suficiente para manter a solução sólida supersaturada metaestável (martensítica ou austenítica). Durante o envelhecimento subsequente (em temperatura mais baixa do que a solubilização) ocorre a precipitação controlada (temperatura e tempo: tamanho ótimo de precipitados), que aumenta a dureza do aço, sem provocar distorções, empenos e trincas como na têmpera (CALLISTER, 2008).

Outros aços como os ferríticos, austeníticos e duplex não podem ter suas resistências aumentada ou serem endurecidos pelo tratamento térmico, porém respondem em vários níveis no mecanismo de aumento de resistência por conformação a frio.

Os aços inoxidáveis ferríticos têm propriedades mecânicas boas em temperatura ambiente, mas tem uma limitada ductilidade comparável aos aços austeníticos. Sua resistência diminui nas temperaturas elevadas acima de 600° e não são usados em processos criogênicos.

Os aços inoxidáveis austeníticos com sua característica de arranjo atômico de cubo com face centrado têm propriedades totalmente distintas. Em contrapartida dos aços ferríticos, são mais dúcteis e tenazes em temperaturas criogênicas.

A principal propriedade física que diferencia outros tipos de aço, dos aços inoxidáveis é que não são magnéticos, sua permeabilidade magnética é baixa desde que estejam totalmente amolecidos. Possuem condutividade térmica mais baixa e nível de expansão térmica mais elevada que outros tipos de aço inoxidável (TELLES, 2003).

O aço inoxidável dúplex que tem uma estrutura austeno-ferrita e compartilha propriedades de outros tipos de aços, mas fundamentalmente são mecanicamente mais resistentes que os aços ferrítico ou austenítico (CHIAVERINI, 2012).

2.3. Classificações e Normas:

Os aços inoxidáveis são mencionados por numerações padronizadas ou pelo próprio fabricante da liga, exemplos desses sistemas são a AISI (*American Iron and Steel Institute*) e UNS (*Unified Numbering System*). Entre estes, o sistema AISI é o mais utilizado, sendo esta classificação designada por um conjunto de três dígitos.

Há uma maior quantidade de ligas classificadas na série UNS, sistema conjunto da ASTM (*American Society for Testing and Materials*) e SAE (*Society of Automotive Engineers*), do que o sistema AISI, devido a UNS incorporar todos os da série AISI além dos desenvolvimentos mais recentes (PEREIRA, 2009).

A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) acompanha a norma America ASTM, como descrito nos exemplos dos aços inoxidáveis nos anexos.

Existem inúmeros tipos de aço carbono estrutural e de engenharia, com diferentes variedades de resistência mecânica, soldabilidade e tenacidade. Também há uma grande variedade de aços inoxidáveis com grandes níveis de resistência a corrosão e resistência mecânica. Essas variações provêm da adição de elementos de liga, originando características específicas de resistências em diferentes meios ambientes.

Os tipos de aço inoxidável podem ser classificados em famílias: austeníticos, superausteníticos, martensíticos e endurecíveis por precipitação, supermartensíticos, ferríticos, superferríticos, duplex e superduplex (PEREIRA, 2009).

2.3.1. Austeníticos (AISI Série 200 e 300)

Essa classe de inoxidáveis são os maiores em números de ligas e utilização. Pode-se dizer que esse grupo são ligas de ferro-cromo-níquel. Iguais aos ferríticos, não podem ser endurecidos por tratamento térmico, seu teor de carbono é restrito e com adições principalmente de níquel mudam a estrutura em temperatura ambiente num rearranjo cúbico de face centrada, que é também não magnético (baixa permeabilidade magnética).

De acordo com o teor de níquel, o aço austenítico responde ao trabalho a frio aumentando a resistência mecânica, conseguindo utilizações de trabalhos severos evitando ruptura prematura e trincas. O endurecimento por encruamento é acompanhado pelas mudanças parciais na estrutura, com a conformação de uma fase de martensita ferro magnética, o que explica porque com a deformação a frio podem ocorrer os aços austeníticos magnéticos.

Nos aços austeníticos, o níquel também acarreta estabilidade química, especialmente em ácidos; o molibdênio dá maior resistência à corrosão em soluções clorídricas; e o cobre ajuda o molibdênio no aumento da resistência à corrosão de ácidos sulfúricos e fosfóricos (SOUZA, 1989).

2.3.2. Martensíticos e Endurecíveis por Precipitação (AISI Série 400 e 500)

Os aços inoxidáveis martensíticos são ligas de ferro e cromo com alto teor de carbono, devido a essa adição podem ser endurecidos por tratamento térmico e a sua resistência à corrosão aumentada, mas diminui a ductilidade e tenacidade. Quando recozidos não apresentam bom comportamento frente à corrosão atmosférica. São classificados também como ferro magnético duro.

A melhor resistência à corrosão é obtida por tratamento térmico, elevando a temperatura até a fase austenítica e resfriando rapidamente na têmpera e posterior revenido.

Já os aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação, são endurecidos por tratamento de envelhecimento e assim tem algumas familiaridades com os aços martensíticos, entretanto o processo metalúrgico para endurecimento é diferente. Também são estruturalmente martensíticos e ferro magnéticos.

Seu teor de carbono pode ser (0,04% a 0,10%), manganês (0,40 a 0,75%), silício (0,35 a 0,50%) e cromo (15 a 17%). Alguns tipos contêm titânio e alumínio, ou nióbio e cobre ou somente alumínio ou somente nitrogênio, eventualmente podem apresentar molibdênio (CHIAVERINI, 1986).

2.3.3. Ferríticos (AISI Série 400)

São ligas de ferro-cromo contendo de 11,5 a 18% de cromo na maioria dos aços desse grupo e de um modo geral com baixo teor de carbono de 0,08 a 0,12%. São aços de resistência mecânica mais baixa e também tenacidade, consequentemente sua ductilidade é mais aparente.

O tipo de melhor resistência à corrosão é o 446, conforme tabela do anexo I, que contém um máximo de 0,20% de carbono e 23 a 27% de cromo. Possuem esses tipos, ainda, boa resistência à oxidação até a temperatura da ordem de 1150°C. Utilizados em componentes de fornos, queimadores, radiadores etc.

Não são endurecíveis por tratamento térmico, sendo usados na condição recozida e são considerados ferro magnéticos. Uma forma de aumento de resistência mecânica é trabalhar o aço a frio, a fim de evitar a tendência de crescimento dos grãos que acontece quando o teor de cromo é mais que 15% (CHIAVERINI, 1986).

2.3.4. Duplex

Os aços inoxidáveis duplex, também chamados ferríticos-austeníticos contêm uma estrutura de grãos de uma matriz de ferrita com ilhas de austenita, e como resultado possuem características desses dois tipos de aços.

Os aços inoxidáveis duplex são ligas de uso relativamente recente, e nos últimos anos tem-se visto uma crescente utilização principalmente onde se exigem maior resistência à corrosão, maior resistência à oxidação, resistência mecânica elevada e alta tenacidade, quando em comparação a dos aços inoxidáveis austeníticos (BORSATO; apud PEREIRA, 2009).

Aços duplex assim como os ferríticos é ferro magnético, mas tem uma boa soldabilidade e conformabilidade dos aços austeníticos. Duplex são endurecíveis por tratamento térmico, mas são mais duros que os ferríticos e austeníticos na condição recozida mole.

Pelas suas características, os aços inoxidáveis duplex são materiais que podem trazer uma elevada redução de custos de matéria-prima e mão de obra nas construções em que são empregados. Porém, deve-se tomar muito cuidado na sua aplicação devido à complexidade das suas estruturas e à possível formação de fases indesejáveis durante os processos pelos quais são submetidos, principalmente na soldagem e tratamentos térmicos.

Existem categorias de aço inox duplex, ligas de ferro-cromo-níquel que não contém molibdênio, onde são categorias mais baratas. Ligas com composição onde há a adição de molibdênio, que são considerados aço inox duplex padrão (NUNES; KREISCHER, 2010).

2.3.5. Aços inoxidáveis da categoria “Super”

Os aços inoxidáveis da categoria super, contêm as características normais dos austeníticos, ferríticos e martensíticos, porém com aumento de teor de um ou mais elementos de liga, melhorando suas características de resistência mecânica e à corrosão (ANDRADE, 2006).

No caso dos superausteníticos apresentam um aumento da quantidade de molibdênio, cromo, níquel, nitrogênio e manganês na sua composição química, assim comparada aos austeníticos são melhores na resistência a corrosão principalmente por pites (Revista Escola de Minas vol.60, 2007).

Os aços inoxidáveis superferríticos serviram de alternativa para alguns materiais como titânio, níquel e molibdênio inclusos em petroquímicas e instalações de dessalinização. São bons materiais para uso em meios contendo cloreto, salobro e água do mar. São excelentes em resistência a corrosão sobtensão, pites e frestas. Tudo isso devido à combinação de alto teor de cromo com adição de molibdênio e baixo teor de carbono, assim podendo adicionar níquel sem a desestabilização da ferrita. Com o aumento do custo do níquel e as iniciações de uso dos superferríticos,

tornaram-no mais vantajoso a fabricação. São mais tenazes e dúcteis, dão aos tubos resistência a vibração em meios contendo água do mar (ANDRADE, 2006).

Aços inoxidáveis martensíticos são excelentes em resistência mecânica para altas temperaturas e pressões, mas com moderada resistência à corrosão. Para novas e melhores gerações desses aços, encontra-se o supermartensítico, com aumento de melhoria das propriedades mecânicas em combinação com a resistência à corrosão e soldabilidade. Os aços supermartensíticos são caracterizados com base no sistema Fe-Cr-Ni-Mo com baixos teores de carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre (SILVA, 2010).

2.3.5.1. Super duplex

Outra categoria é a liga denominada superduplex com elevados valores de resistência a corrosão principalmente por pites, liga na qual os valores de cromo, níquel e molibdênio são mais altos que os do duplex padrão, podendo ter também adição de cobre e tungstênio. Com isso, significa que esses materiais tem uma resistência maior a ataques químicos primeiramente em soluções aquosas com íons halogênios (elementos pertencentes à família 7A da tabela periódica), principalmente o íon cloreto encontrado em abundância na água do mar (MARTINS, 2006). São aços feitos para aplicações marinhas, indústrias químicas e petroquímicas, onde há alta resistência mecânica e à corrosão envolvida, em meios agressivos.

A diferença entre duplex e superduplex está na composição química somente, sem levar em consideração sua estrutura ou tratamento, conforme tabela 1.

Tabela 1 - Composição química de alguns aços inoxidáveis duplex e em destaque os aços inoxidáveis superduplex (LIMA, 2006).

Nome Comercial	Denominação UNS	Cr	Mo	Ni	N	C	Outros Elementos
SAF 2304	S32304	23	0,2	4	0,1	0,03	-
UR35N	S32304	23	0,2	4	0,1	0,03	-
3RE60	S31500	18,5	2,7	5	0,07	0,03	1,5 Si
UR 45	S31803	22	3	5,3	0,17	0,03	-
SAF 2205	S31803	22	3	5,3	0,17	0,03	-
2205	S31803	22	3	5,3	0,17	0,03	-
FALC 223	S31803	22	3	5,3	0,17	0,03	-
AF 22	S31802	22	3	5,3	0,17	0,03	-
VS 22	S31803	22	3	5,3	0,17	0,03	-
10RE51	S32900	25	1,5	4,5	-	0,08	-
DP3	S31260	25	3	6,5	0,16	0,03	0,5 Cu - 0,3 W
UR52N	S32550	25	3	6,5	0,18	0,04	1,6 Cu
FERRALIUM 255	S32550	25	3	6,5	0,18	0,04	1,6 Cu
UR 47N	S32200	25	3	6,5	0,18	0,03	-
UR52N+	S32550	25	3,8	6	0,25	0,04	1,5 Cu
ZERON 100	S32760	25	3,6	7	0,25	0,03	0,7 Cu – 0,7 W
SAF 2507	S32750	25	3,8	7	0,27	0,03	-

3. METALURGIA DO AÇO INOXIDÁVEL

Devido à grande demanda de fabricação de aços inoxidáveis de extra baixo carbono, como exemplo o tipo 304L e outros. Houve uma grande evolução tecnológica em relação aos processos de fabricação de aços inoxidáveis nos métodos AOD e VOD (ARAÚJO apud OLIVEIRA, 2009).

3.1. Processos de fabricação

Existe uma grande dificuldade na fabricação de aços inoxidáveis devido à diminuição do teor de carbono por oxidação pelo cromo. O cromo combina-se com um elemento oxigênio e associando-se com a escória, perdendo cromo e o rendimento durante o processo de fabricação (SILVA; MEI, 1988).

3.1.1. Método AOD (*Argon Oxygen Decarburization*)

É o método Baseado na injeção de mistura de oxigênio e argônio sobrados em banho através de tubeiras (SILVA; MEI, 1988).

A figura 11 ilustra o conversor do método AOD.

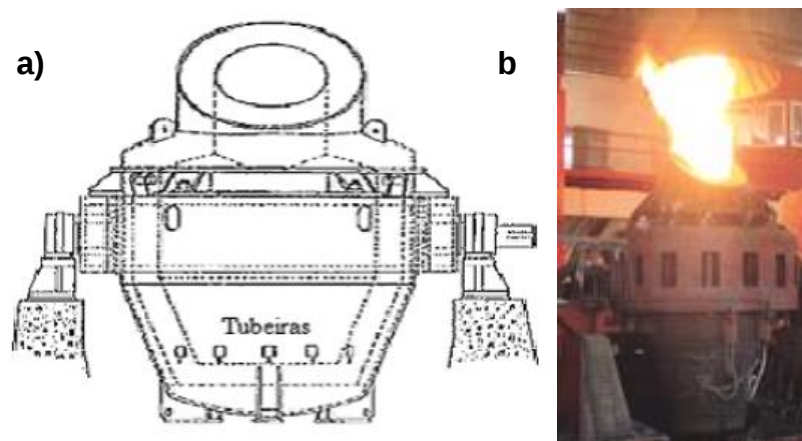


Figura 11 – Representação do conversor AOD: a) Representação esquemática do conversor AOD ilustrando as tubeiras (SILVA; MEI 1988). b) Representação real do conversor AOD (PORTUGUESE ALIBABA, 2015).

3.1.2. Método VOD (*Vacuum Oxygen Decarburization*)

É um método baseado para obtenção de aço inoxidável com taxas de concentrações de carbono, hidrogênio e nitrogênio relativamente pequenas. O sopro é feito sobre injeção de oxigênio sob vácuo. A figura 12 ilustra o forno VOD (SILVA; apud OLIVEIRA, 2009).

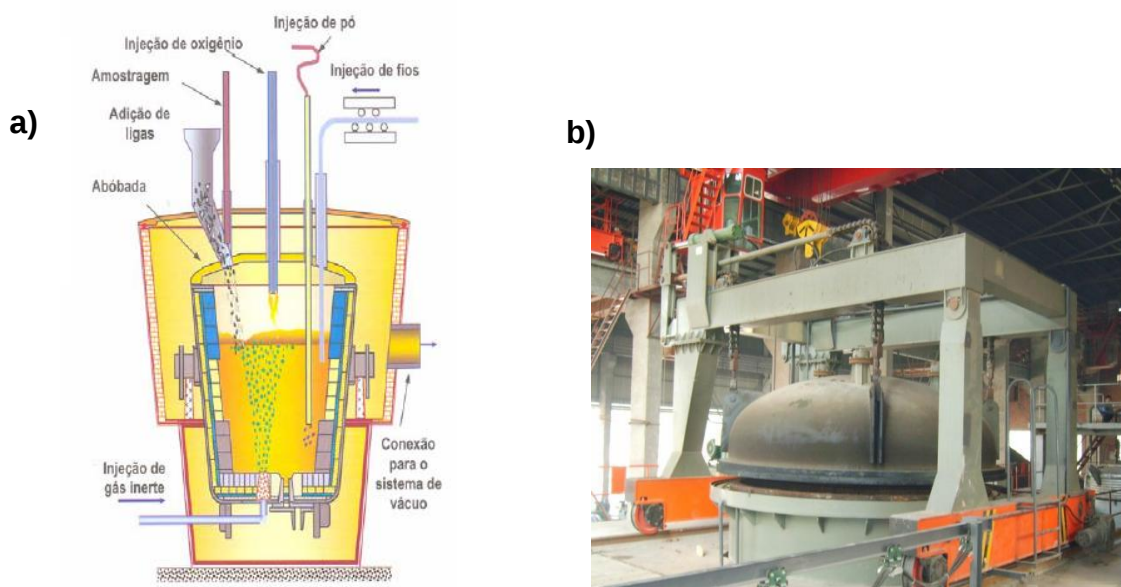


Figura 12 – Representação do forno VOD: a) Demonstração esquemática (RIZZO,2006);
b) Demonstração real (ALMEIDA, 2012).

3.2. Fabricação em usinas integradas e semi integradas

A fabricação de aços inoxidáveis se dá em usinas integradas e semi-integradas. As usinas integradas são operadas em etapas de redução, refino e laminação. As usinas semi-integradas são operadas em etapas de refino e laminação (SILVA; MEI apud OLIVEIRA, 2009).

3.2.1. Processos de fabricação em usina integrada

Os processos de redução feitos no alto forno, por onde as matérias primas são transformadas em ferro gusa, são enviadas a aciaria passando pelo processo de tratamento de dessiliciação, desfosforação e dessulfuração. O metal no estado

líquido é vazado no convertedor de sopro combinado AOD (descarburação com oxigênio e argônio através de tubeiras) de modo a ter a menor perda de cromo por oxidação durante a descarburação. O metal na fase líquida é vazado no forno panela (forno utilizado para acerto final da composição química e manutenção da temperatura), por meio do lingotamento contínuo, o metal na fase líquida é transformado em placas, lingotes ou tarugos na forma sólida dando forma ao produto final.

A destinação dos lingotes é a laminação de barras no qual são laminados nos trens de laminação, as placas provenientes do lingotamento contínuo são enviadas para laminação a quente onde são transformadas em bobinas e chapas. As bobinas a quente produzidas na laminação a quente são enviadas para laminação a frio, onde são laminadas no equipamento Sendzimir, esmeriladora de bobinas e laminador de encruamento, logo após, as chapas são beneficiadas e cortadas, A figura 13 ilustra esquematicamente o fluxo de produção do aço inoxidável (SILVA; MEI apud OLIVEIRA, 2009).

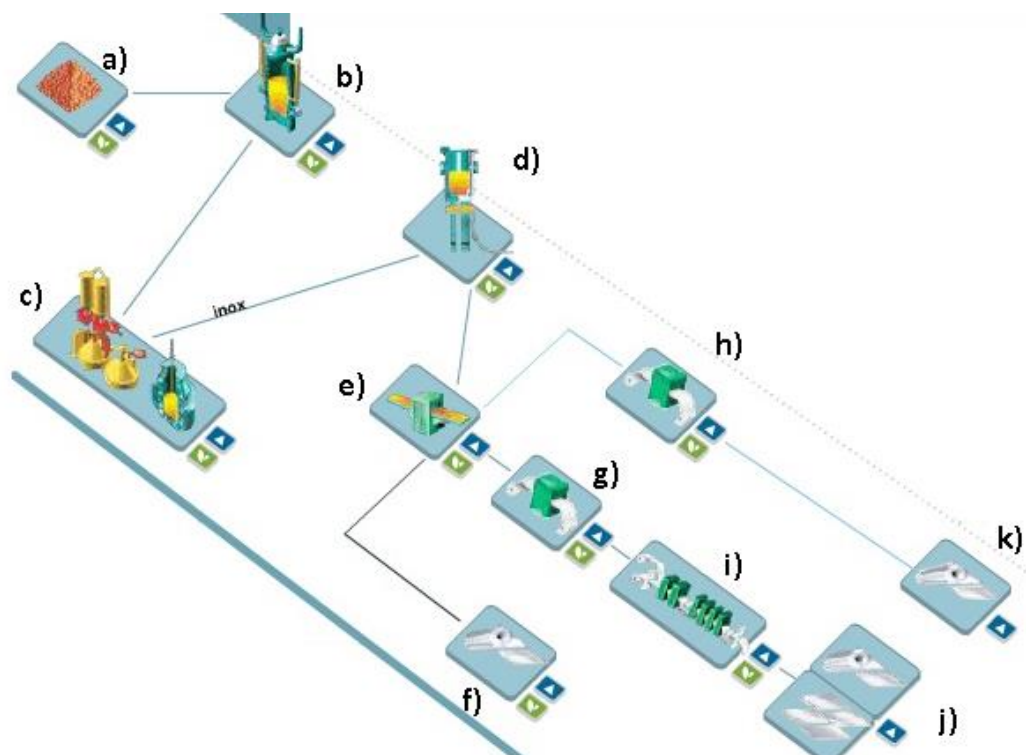


Figura 13 – Esquemática do fluxo de produção. a) matéria primas. b) Equipamento alto forno. c) Pré-tratamento de gusa. d) Lingotamento contínuo. e) Laminação a quente. f) Bobinas e chapas a quente de aço inoxidável. g) e h) Laminador *Sendzimir*. i) Recozimento e decapagem j) e k) Produto final (ACESITA apud OLIVEIRA, 2009).

3.2.2. Processos de fabricação em usina semi integrada

A fabricação de aços inoxidáveis em usinas semi-integradas inicia-se em fornos elétricos a arco, onde é responsável pela fundição da sucata do aço inoxidável e outras ligas. Suas grandes vantagens para a utilização dos métodos VOD e AOD é a redução do teor de carbono, redução do tempo de operação e redução de temperatura de processo comparada ao FEA. O uso do método VOD e AOD deixa o FEA disponível para a operação de fusão da sucata. Após o metal na fase líquida ter passado no VOD e AOD, os processos de laminação de barras, laminação a quente e laminação a frio são idênticos aos processos de usinas integradas (SILVA; MEI apud OLIVEIRA, 2009).

3.3. Microestrutura dos aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são classificados em função da sua microestrutura apresentada, podendo ser visualizada através de análise metalográfica pela técnica de microscopia ótica.

3.3.1. Efeito dos elementos cromo e níquel

Adições de cromo aumentam à resistência a oxidação e à corrosão dos aços inoxidáveis. A seguir será descrito os principais elementos químicos Cromo (Cr) e Níquel Ni.

3.3.1.1. Efeito do cromo

Todas as ligas a sua direita, ou seja, aproximadamente 12% de Cr solidificam na forma de fase ferrita. Presença da fase sigma entre 42 % e 48% de Cr, a esquerda do campo da fase sigma observa-se região bifásica (ferrita + sigma). Alguns aços inoxidáveis ferríticos já podem apresentar a fase sigma, que é uma fase dura, que provoca danos as propriedades mecânicas do aço inoxidável (CHIAVERINI, 2012).

Verificando-se que a presença da fase sigma é realmente prejudicial, pode atenuar esse inconveniente pelo aquecimento do aço acima da máxima temperatura de estabilidade da fase sigma, de modo a

dissolvê-la na austenita ou convertê-la em ferrita delta. Assim, são restauradas as propriedades normais. As temperaturas recomendadas são superiores a 900°C (CHIAVERINI, 2012).

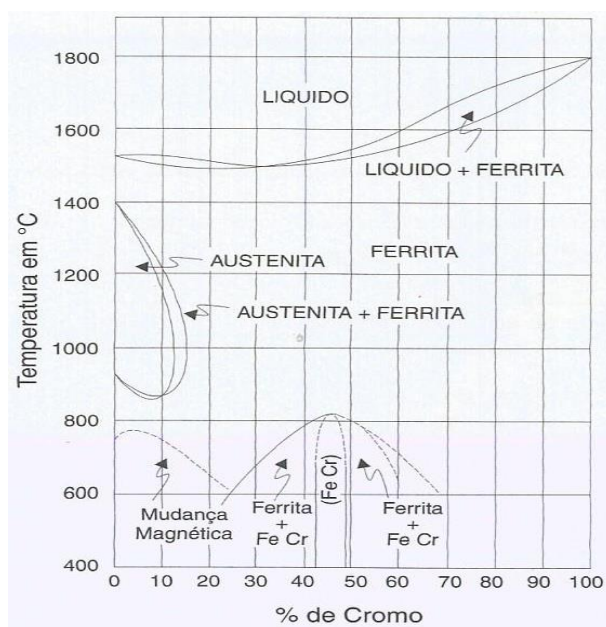


Figura 14 – Diagrama de equilíbrio de fase binário ferro-cromo (BAIN; ABORN apud CHIAVERINI, 2012).

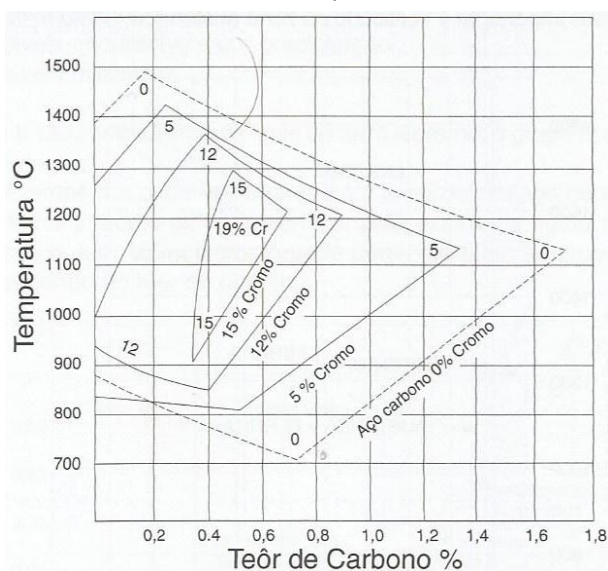


Figura 15 – Efeito do teor de cromo sobre o campo da austenita (CHIAVERINI, 2012).

As conclusões a serem consideradas no diagrama da figura 15 é que à medida que o teor de cromo aumenta, os intervalos do campo da austenita diminuem.

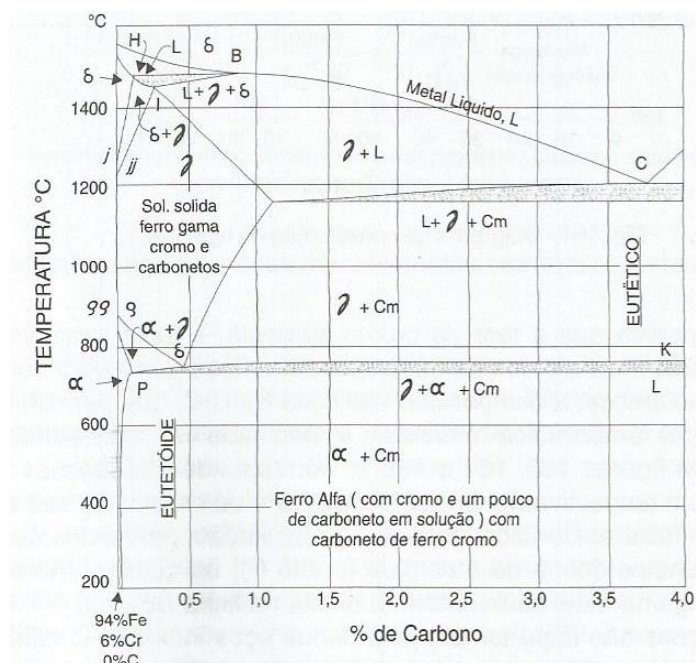


Figura 16 – Diagrama Fe-Cr-C com 6% de Cr (THUM apud CHIAVERINI, 2012).

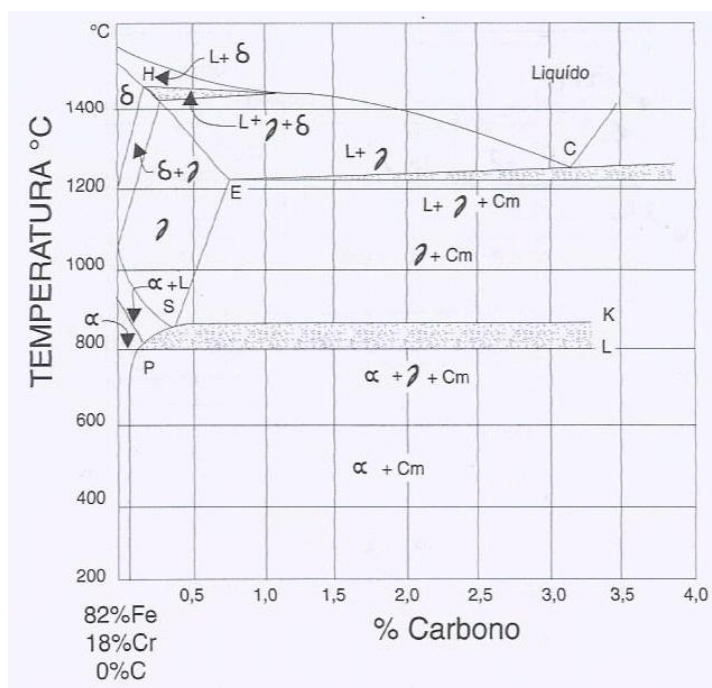


Figura 17 – Diagrama Fe-Cr-C com 12% de Cr (THUM apud CHIAVERINI, 2012).

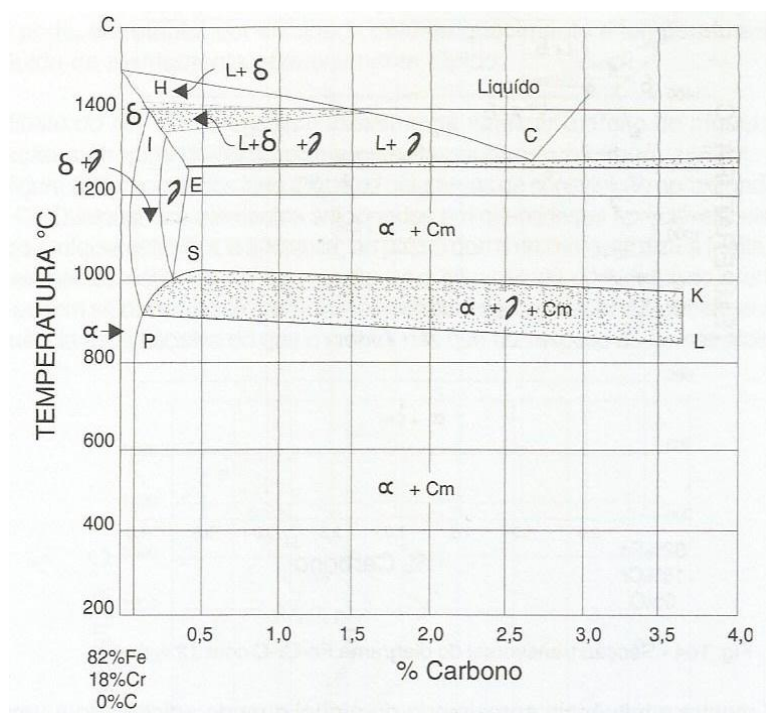


Figura 18 – Diagrama Fe-Cr-C com 18% de Cr (THUM apud CHIAVERINI, 2012).

Os diagramas das figuras 16, 17, e 18 correspondem às seções transversais do diagrama Fe-Cr-C com respectivamente 6%, 12% e 18% de cromo. Do seu exame além da paulatina redução da faixa austenítica, nota-se a precipitação pelo esfriamento muito lento, de excesso de carbonetos acima do eutetóide (ponto P), os quais serão encontrados em equilíbrio no campo “gama mais carbonetos”, à direita na linha SE. Essas considerações são importantes, pois certos aços inoxidáveis com teores de cromo elevados entre 16% e 20% podem tornar-se quebradiços pelo esfriamento muito lento, admitindo-se que esse fenômeno seja associado a uma precipitação de carbonetos. Essa fragilidade pode, entretanto, ser eliminada pelo reaquecimento a temperatura entre 790 °C e 850°C seguido de resfriamento razoavelmente rápido (CHIAVERINI, 2012, p.395 e 396).

3.3.1.2. Efeito do níquel

O efeito do elemento níquel será ilustrado na figura 19.

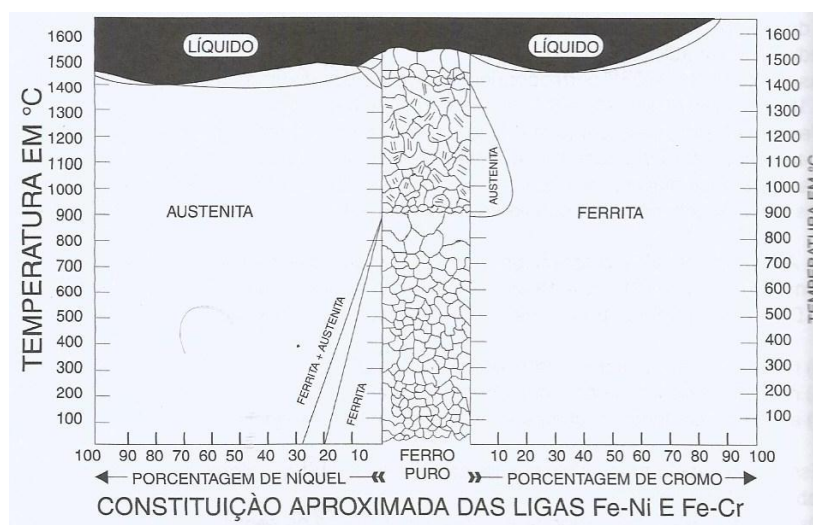


Figura 19 – Analogia dos diagramas Fe-Ni e Fe-Cr com presença alotrópica do ferro (BAIN apud CHIAVERINI, 2012).

A figura 19 ilustra dois diagramas Fe-Ni e Fe-Cr, o acréscimo de elementos em quantidade relativamente pequenas no diagrama Fe-Ni deixa a austenita estável, enquanto o diagrama Fe-Cr deixa a ferrita estável, em caso de acréscimo de ambos os elementos ocorre à alotropia do ferro (CHIAVERINI, 2012).

3.3.1.3. Microestrutura dos aços inoxidáveis ferríticos

Os aços inoxidáveis ferríticos estão situados à direita da lupa austenítica no diagrama Fe-Cr. Sua microestrutura é composta de microconstituente ferrita à temperaturas inferiores à linha de líquido (COLPAERT, 2008).

Surpreendentemente, entretanto, a maioria dos aços chamados ferríticos não atende a esta definição. Por exemplo, o AISI 430 (0,1% C máx, 17% Cr, o mais popular dos aços inoxidáveis ferríticos) pode apresentar de 30-50% de austenita, se aquecido acima de 800°C.

Durante o resfriamento, a austenita pode transformar em martensita, de forma que a estrutura bruta de forjado deste aço consistirá de uma mistura de martensita e ferrita. Mesmo os aços ferríticos de alto cromo (como AISI 446, 27% Cr) podem apresentar alguma austenita à alta temperatura. As figuras 20 e 21 apresentam exemplos de microestruturas de aços inoxidáveis ferríticos (COLPAERT, 2008).

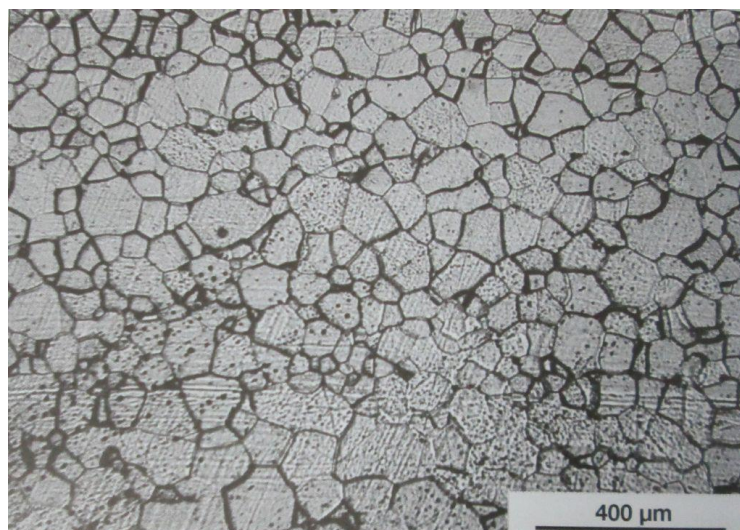


Figura 20 – Aço inoxidável ferrítico 409A lamiando a frio com 85% redução e recozido a 850°C. Ferrita equiaxial. Ataque químico Vilella (CARRAMANHOS, 2006).

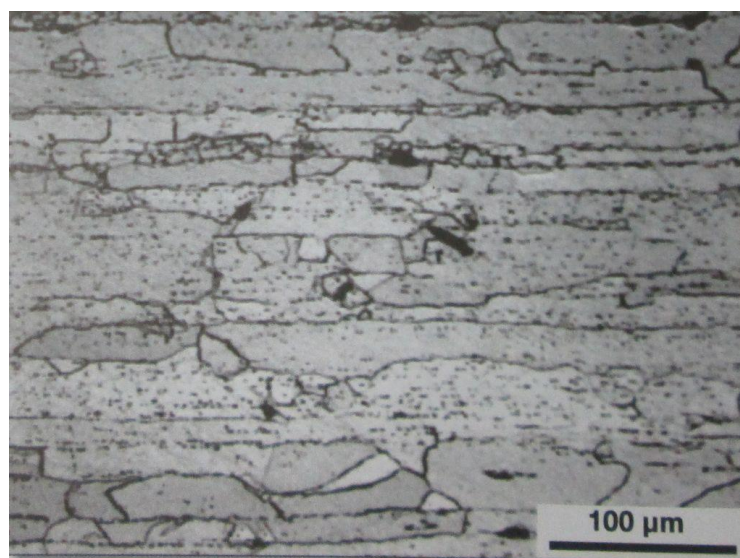


Figura 21 – Aço inoxidável ferrítico 430A lamiando a quente. Ferrita alongada. Presença de precipitados pequenos possivelmente carbonetos. Ataque químico Vilella (CARRAMANHOS, 2006).

3.3.1.4. Microestrutura dos aços inoxidáveis austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos, no qual predomina a estrutura austenítica, essa classe de aço possui alta tenacidade (capacidade de absorver energia), boa resistência a ambientes corrosivos e bom comportamento à soldabilidade. Após a conformação mecânica à quente deste aço, a austenita não se decompõe no

resfriamento mantendo a estrutura austenítica. A presença de maclas é evidente nos grãos austeníticos no estado solubilizado. As figuras 22 e 23 ilustram exemplos de microestruturas de aços inoxidáveis austeníticos (COLPAERT, 2008).

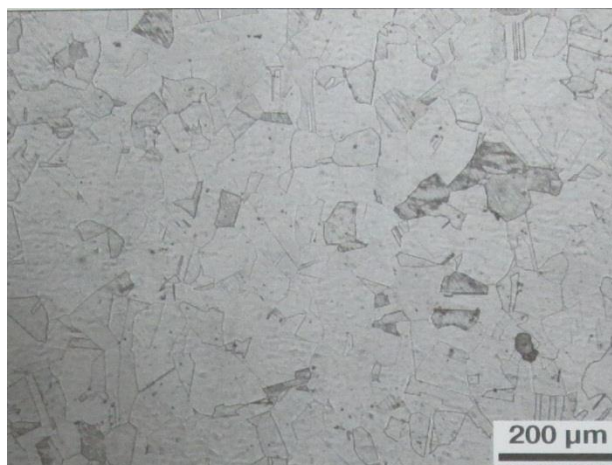


Figura 22 – Aço inoxidável austenítico AISI 304 solubilizado a 1050°C, resfriado em água. Austenita. Ataque químico oxálico. *Villares Metals S.A.*, Sumaré, SP, Brasil (COLPAERT, 2008).

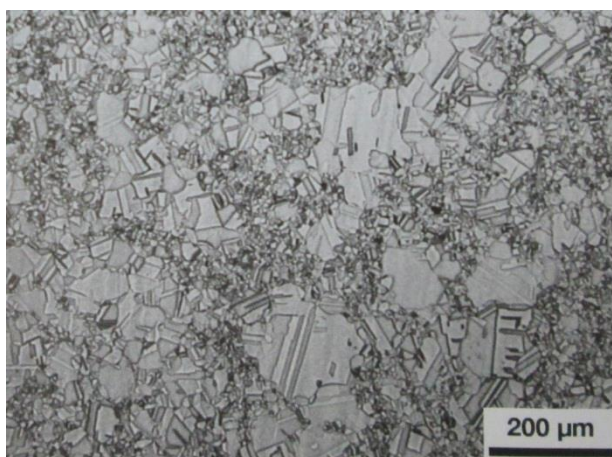


Figura 23 – Aço inoxidável austenítico 310 solubilizado a 1050°C. Microestrutura Austenítica com heterogeneidade de tamanho de grão. Ataque Glicerégia. *Villares Metals S.A.*, Sumaré, SP, Brasil (COLPAERT, 2008).

3.3.1.5. Microestrutura dos aços inoxidáveis martensíticos

Os aços inoxidáveis martensíticos são aços seguidos de têmpera e revenimento, fazendo uma associação aos aços carbonos com características distintas no valor do teor de cromo (Cr). A obtenção martensítica é obtida austenitizando a temperaturas de 925°C a 1070°C dissolvendo os carbonetos para

obtenção de uma fase austenítica uniforme. As figuras 24 e 25 ilustram exemplos de microestruturas de aços inoxidáveis martensíticos (COLPAERT, 2008).

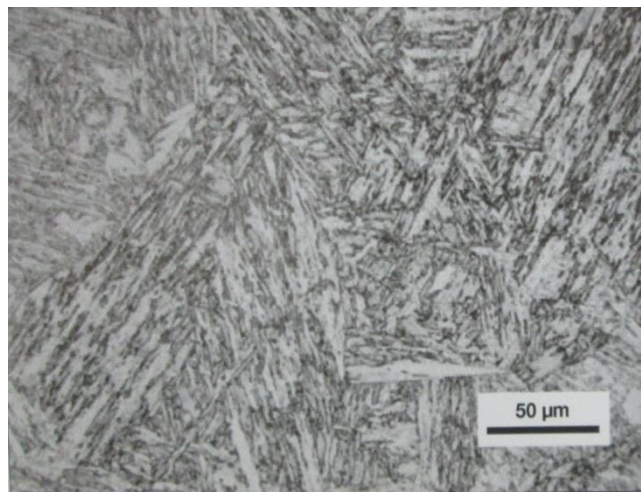


Figura 24 – Aço inoxidável martensítico AISI 410 temperado e revenido (revenido duplo a 730°C e 690°C). Microestrutura martensita revenida. Dureza aproximada 220 HB. Ataque *Kalling*. A. Zeemann, Tecmetal, Rio de Janeiro, Brasil (COLPAERT, 2008).

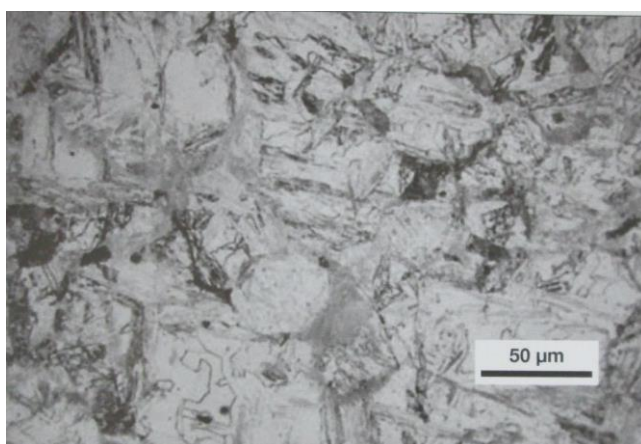


Figura 25 – Aço inoxidável martensítico AISI 410 temperado e revenido (revenido excessivo). Microestrutura martensita revenida. Dureza aproximada 185 HB. Ataque *Kalling*. A. Zeemann, Tecmetal, Rio de Janeiro, Brasil (COLPAERT, 2008).

3.3.1.6. Microestrutura dos aços inoxidáveis duplex

Os aços inoxidáveis duplex com microestruturas constituídas de ferrita-austenita e frações destas fases aproximadamente iguais, aliando-se as suas propriedades. A microestrutura austenítica-ferrítica é obtida pelo aumento do teor de

cromo, molibidênio e nitrogênio. O cromo e molibidênio atuam na resistência a corrosão e o nitrogênio na resistência mecânica, deixando a fase sigma estável e surgindo a fase chi. Essas fases são deletérias ao aço inoxidável dúplex deixando o material suscetível a fragilidade e diminuição da resistência à corrosão (COLPAERT, 2008).

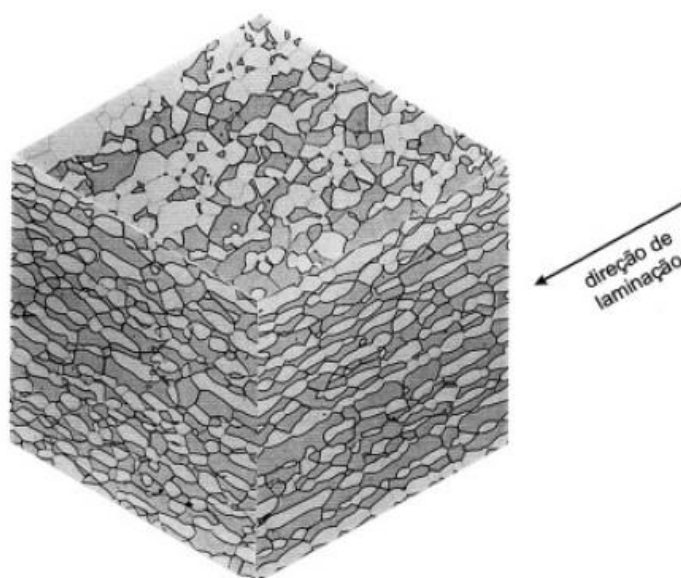


Figura 26 – Microestrutura de aço inoxidável dúplex UNS S31803 laminada e solubilizada a 1050°C por 30 minutos. Ferrita região escura e ilhas de austenita região clara. Microscopia ótica. Ataque eletrolítico (RAMIREZ,1997).

3.3.1.7. Fase sigma

Em meados de 1927, ao estudarem o diagrama Fe-Cr-Ni descobriram a fase sigma, a qual é caracterizada pela sua elevada dureza e grande fragilidade (HALL; ALGIE apud RABECHINI, 2014, p.27).

A fase sigma é formada por 30 átomos por célula unitária, sua estrutura é a TCC (tetragonal de corpo centrado), não magnética à temperatura ambiente, sua presença no aço inoxidável afeta resistência à corrosão, tenacidade e alongamento nas propriedades mecânicas (BRANDI; PADILHA apud RABECHINI, 2014, p.27).

A presença da fase sigma empobrece o elemento cromo nas suas adjacências, diminuindo a resistência à corrosão (PADILHA apud PLAINE, 2013, p.7).

A presença da fase sigma é devido os mecanismos de nucleação e crescimento a partir da ferrita, decomposição do eutetóide da ferrita resultando em austenita pobre em elemento de liga como o cromo, molibdênio e crescimento a partir da austenita após todo o consumo de ferrita (MAGNABOSCO apud RABECHINI, 2014, p.27).

Em aços inoxidáveis austeníticos com 100% de austenita a velocidade para formação da fase sigma é muito lenta, as explicações desse mecanismo são que a formação da fase sigma se dá após a precipitação de carbonetos/ou nitretos, se dá por elemento de solução sólida substitucional, e à difusão é muito lenta na austenita, e por fim, sua estrutura cristalina complexa ocasiona uma formação mais lenta do precipitado.

A precipitação da fase sigma corre nos contornos de grão de ferrita ou austenita. A fase sigma não dissolve elementos como carbono boro e nitrogênio, pelo contrário ela atrasa sua formação podendo formar outras fases como nitreto de cromo (CORTIE apud PEREIRA, 2009, p.24).

Os elementos que podem ser dissolvidos pela fase sigma são o molibdênio, silício e cromo facilitando a sua formação.

Deformação plástica seguido de recuperação promove e despromove a formação da precipitação da fase sigma, a promoção da formação de núcleos da fase sigma se dá pela movimentação dos átomos.

Temperaturas elevadas no tratamento térmico de solubilização ocasiona um volume maior em fração volumétrica de ferrita, perdendo cromo, molibdênio da ferrita, retardando a precipitação da fase sigma.

Na fabricação de aços inoxidáveis duplex o aumento de cromo é essencial para a promoção da resistência à corrosão, em contrapartida, esse aumento pode provocar a formação indesejável da fase sigma (MACHADO apud PEREIRA, 2009, p.26).

3.4. Propriedades mecânicas

Os aços inoxidáveis além de serem resistentes a corrosão, também apresentam boa resistência mecânica e ductilidade.

3.4.1. Propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis ferríticos

O aço inoxidável do tipo 430 é o mais utilizado e conhecido devido às suas propriedades mecânicas de encruamento serem menores que as do aço inoxidáveis austeníticos. A tabela 2 apresenta as propriedades mecânicas típicas dos aços inoxidáveis ferríticos (CHIAVERINI, 2012).

Tabela 2 - Propriedades mecânicas típicas dos aços inoxidáveis ferríticos. Adaptado do *Metals Handbook* para CHIAVERINI (2012).

TIPO AISI	Forma do produto	Condição	Limite resistência à tração		Limite de escoamento		Alongamento %	Estricção %	Dureza RB
			kgf/mm ²	Mpa	kgf/mm ²	Mpa			
405	fio	recozida	49,0	480	28,0	275	20	45	-
		recozida							
		estirada a frio	49,0	480	28,0	275	16	45	-
409	chapa, folha	recozida	42,0	415	17,5	170	20	-	88 max.
		barra	45,5	450	24,5	240	25	-	75 max.
		chapa, folha	42,0	415	21,0	205	22	-	80 max.
429	barra	recozida	49,7	490	31,5	310	30	65	-
		chapa, folha	45,5	450	21,0	205	22	-	88 max.
430	barra	recozida							
		acaba a quente	49,0	480	28,0	275	20	45	-
430	barra	recozida							
		acabada a frio	49,0	480	28,0	275	16	45	-
430	fio	recozida	49,0	480	28,0	275	20	45	-
430	fio	recozida							
		estira a frio	49,0	480	28,0	275	16	45	-
		recozida	45,5	450	21,0	205	22	-	88 max.
430 F	fio	recozida	59,5	585	-	-	-	-	-
430 Ti	barra	recozida	87,5	860					
		recozida	52,5	515	31,5	310	30	65	-
		recozida	55,3	545	42,0	415	33	78	90 max.
434	folha	recozida	53,9	530	37,1	465	23	-	83 max.
436	folha	recozida	53,9	530	37,1	365	23	-	85 max.
442	barra	recozida	56,0	550	31,5	310	20	40	90 max.
442	chapa, folha	recozida	52,5	515	28,0	275	20	-	95 max.
444	chapa, folha	recozida	42,0	415	28,0	275	20	-	95 max.
446	barra	recozida							
		acabada a quente	49,0	480	28,0	275	20	45	-
		recozida							
446	barra	acabada a frio	49,0	480	28,0	275	16	45	-
		recozida	49,0	480	28,0	275	20	45	-
446	fio	recozida	49,0	480	28,0	275	20	45	-
446	fio	recozida							
		estirada a frio	49,0	480	28,0	275	16	45	-
446	chapa, folha	recozida	52,5	515	28,0	275	20	-	95 max.

3.4.2. Propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos quando encruado apresentam dureza superior se comparado a outros aços inoxidáveis seguidos pela mesma conformação mecânica, ou seja, o aumento da dureza e da resistência mecânica é obtido pelo encruamento. A tabela 3 apresenta as propriedades mecânicas de um aço inoxidável austenítico encruado (CHIAVERINI, 2012).

Tabela 3 - Relação de propriedade mecânica com intensidade de encruamento (Adaptado de DI CAPRIO para CHIAVERINI, 2012)

Grau do encruamento	Redução de secção aproximada, %	Limite de resistência à tração		Limite de escoamento		Alongamento mínimo, em 25 mm%
		kgf/mm ²	Mpa	kgf/mm ²	Mpa	
1/4 duro	10 a 15	88,0	860	53,0	520	25
1/2 duro	20	105,0	1030	77,0	760	15
3/4 duro	30	123,0	1210	95,0	930	10
totalmente encruado (duro)	40	130,0	1280	98,0	960	8
Os valores de alongamento são para espessura superior a 0,38 mm.						

3.4.3. Propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis martensíticos

Suas propriedades mecânicas desejadas para esta classe são de elevada dureza, razoável tenacidade e elevada resistência mecânica.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas resultantes dos tratamentos térmicos (CHIAVERINI, 2012).

Tipo	Têmpera			Revenido		Propriedades mecânicas médias, após o tratamento térmico				
	Temperatura °C	Tempo de aquecimento, minutos	Meio de resfriamento	Temperatura °C	Tempo Horas	Dureza Brinell	Limite de resistência à tração kg/mm ²	Limite de escoamento kg/mm ²	Alogamento %	Resiliência kgm
403	925-1000	15 - 30	Óleo	225 - 375	1 - 3	360 - 380	130	98	15	2,8 - 6,2
410	925-1000	15 - 30	Óleo	225 - 375	1 - 3	360 - 380	130	98	15	2,8 - 6,2
414	975-1050	15 - 30	Óleo ou ar	225 - 400	1 - 3	370 - 400	137	102	15	4,1 - 8,3
416	925-1000	15 - 30	Óleo	225 - 375	1 - 3	360 - 380	130	98	12	2,8 - 6,2
431	975-1075	15 - 30	Ar, óleo ou água	225 - 400	1 - 3	370 - 400	137	102	17	4,1 - 8,3
420	975-1050	15 - 30	Ar, ou óleo quente	150 - 375	1 - 2	470 - 530	175	158	8	1,1 - 2,1
440A	1000-1075	15 - 30	"	150 - 375	1 - 2	500 - 560	189	182	5	0,4 - 0,8
440B	1000-1075	15 - 30	"	150 - 375	1 - 2	520 - 590	196	189	3	0,3 - 0,7
440C	1000-1075	15 - 30	"	100 - 375	1 - 2	540 - 620	200	193	2	0,3 - 0,7

3.4.4. Propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis duplex

As propriedades mecânicas obtidas no aço inoxidável dúplex como, por exemplo, a resistência mecânica se torna superior quando comparada aos aços inoxidáveis austeníticos, devido a granulação da ferrita ser mais refinada, apresenta boa capacidade de absorção de energia (tenacidade), e essa boa tenacidade é obtida após tratamento térmico de solubilização seguido de resfriamento relativamente rápido. Em contrapartida, a tenacidade é diminuída pela presença de elementos precipitadores no qual favorece o aumento da dureza e da resistência mecânica aos aços inoxidáveis. A figura 27 ilustra a comparação entre aço inoxidável dúplex e o aço inoxidável austenítico, nota-se para o aço inoxidável dúplex a temperatura de -50°C localizado no eixo da abscissa queda dos valores de energia, essa queda corresponde à transição dúctil-frágil da ferrita (CHIAVERINI, 2012).

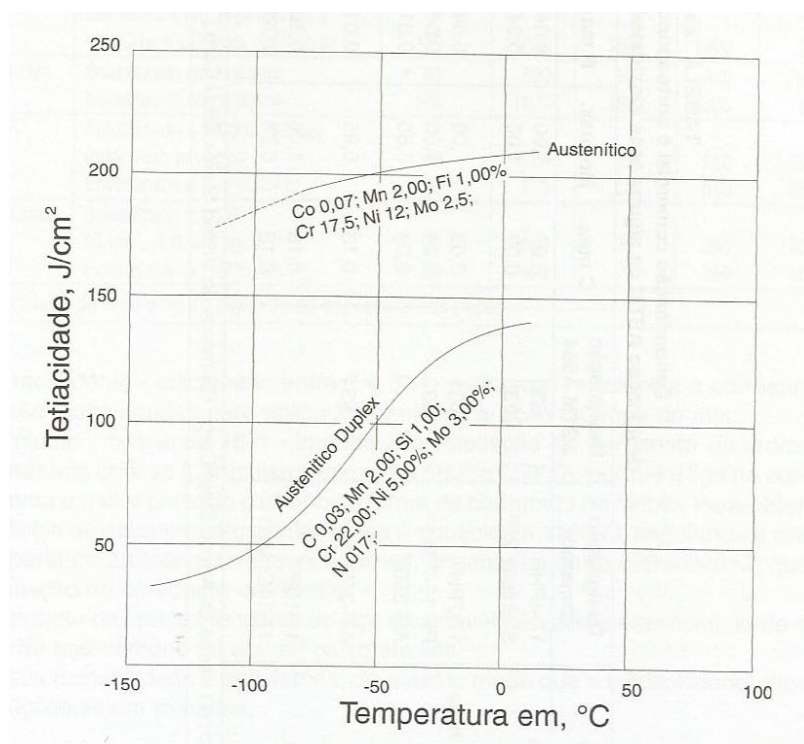


Figura 27 – Resistência ao impacto aço inoxidável dúplex e aço inoxidável austenítico (REICH; POHL; PADILHA apud CHIAVERINI, 2012).

3.5. Problemas que podem ocorrer nos aços inoxidáveis

São basicamente três: presença de fase sigma, precipitação indesejável e formação de martensita que são reversíveis por tratamento térmico. O carbono possui maior influência para a formação da martensita que é uma fase supersaturada em carbono e fragilizante.

A presença da fase sigma se dá pelo aumento do teor de cromo, sua presença fragiliza a microestrutura afetando as propriedades mecânicas e a sua resistência a corrosão. A adição de elementos de liga pode facilitar a formação de precipitados indesejáveis, afetando as propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis (CHIAVERINI, 2012).

3.5.1. Sensitização dos aços inoxidáveis

A formação de carbonetos de cromo (Cr_{23}C_6) nos contornos de grãos pode levar à corrosão intergranular, devido à carência de cromo e diminuindo a resistência à corrosão. A região pobre em cromo é chamada de sensitização, pois o aço inoxidável fica sensível à corrosão intergranular.

Os aços inoxidáveis ferríticos sofrem esse fenômeno denominado sensitização a temperatura acima de 925°C , enquanto os aços inoxidáveis austeníticos sofrem sensitização entre 400°C a 900°C . A figura abaixo esquematiza o efeito da sensitização (PLAINE, 2013).

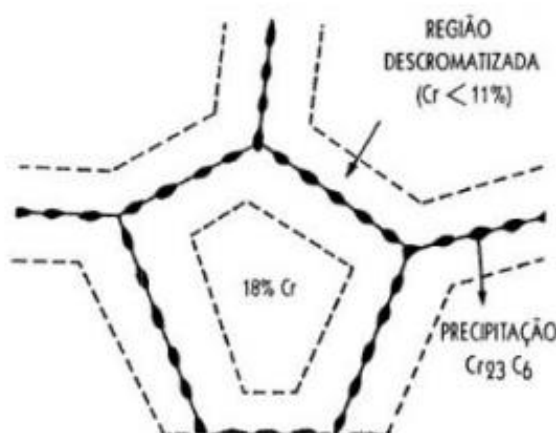


Figura 28 – Representação esquemática do fenômeno sensitização no contorno de grão (FRISCO apud PLAINE, 2013).

3.6. Tratamento térmico

O tratamento térmico consiste em aquecer e resfriar o material para que se obtenha as propriedades mecânicas como dureza, elasticidade, ductibilidade, resistência à tração, que são as chamadas propriedades mecânicas.

3.6.1. Tratamento térmico dos aços inoxidáveis ferríticos

O tratamento indicado para esse tipo de aço é o alívio de tensões (recozimento), devido à deformação a frio provocada pela conformação mecânica durante o processo de fabricação. Os aços inoxidáveis ferríticos estão suscetíveis ao fenômeno conhecido como fragilidade a 475°C proveniente da fase sigma (Fe-Cr). A fase sigma aparece entre 25 % e 30% de cromo nos aços inoxidáveis ferríticos, sua eliminação é feita com reaquecimento a temperatura superior a 600°C seguida de resfriamento relativamente rápido. A tabela 5 apresenta os parâmetros para realização de tratamento térmico em aços inoxidáveis ferríticos (CHIAVERINI, 2012).

Tabela 5 - Parâmetros para operação de recristalização de alguns aços inoxidáveis ferríticos
(Adaptado de DI CAPRIO para CHIAVERINI, 2012).

Tipo AISI	Tempo' Horas	Temperatura °C	Resfriamento
405	1 a 2	650/820	ar ou água no forno" até 590°C, depois no ar
430	1 a 2	710/790	
ou	1 a 2	820/900	
430 F	1 a 2	710/790	ar ou água
442	1 a 2	760/830	ar ou água
446	1 a 2	760/830	ar ou água
' É função da espessura e da forma das secções; para chapas aconselha-se 3 a 5 minutos para cada 2,5 mm de espessura. " Velocidade de resfriamento 15 a 25°C/h			

3.6.2. Tratamento térmico dos aços inoxidáveis austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos são submetidos ao tratamento térmico de solubilização, alívio de tensão e estabilização (CHIAVERINI, 2012).

3.6.3. Tratamento térmico de solubilização

É o tratamento semelhante a têmpera, deve-se aquecer o aço inoxidável austenítico até a temperatura de austenitização, ou um pouco acima dessa temperatura, até que ocorra a dissolução dos carbonetos, por um determinado tempo de encharque, seguido de resfriamento ligeiramente rápido para evitar a formação de precipitados que causam diminuição das propriedades mecânicas (CHIAVERINI, 2012).

Tabela 6 - Intervalos de temperaturas de solubilização para aços inoxidáveis austeníticos
(Adaptado de DI CAPRIO para CHIAVERINI, 2012).

TIPO	TEMPERATURA, °C
201, 202	1010 / 1120
301, 302, 302B	
303, 305, 308	1010 / 1120
304 L	1010 / 1120
309, 309 S	1040 / 1120
310, 310 S	1040 / 1165
314	1040 / 1120
316	1040 / 1120
317	1065 / 1120
316L, 317L	1040 / 1105
321	955 / 1065
347, 348	980 / 1065

3.6.4. Tratamento térmico de alívio de tensões

É o tratamento térmico que retira as tensões internas provocadas pela conformação plástica, soldagem ou aumento da capacidade de deformação plástica. Esquemáticamente para realizar esse tipo de tratamento térmico deve-se aquecer a aço inoxidável austenítico a temperaturas inferiores entre 350°C e 430°C a fim de evitar a formação dos precipitados como o carboneto de cromo, obedecendo ao tempo de encharque de 30 minutos variando até 2 horas, seguido por resfriamento ao ar (CHIAVERINI, 2012).

Os aços inoxidáveis martensíticos possuem alto teor de elemento de liga como é o caso do cromo, sua adição facilita a transformação da martensita, podendo ser obtida uma microestrutura martensítica por meio de resfriamento ao ar. Geralmente se realiza o resfriamento em óleo e água para carbono baixo. Realiza-se o revenimento a baixa temperatura entre 150°C e 400°C para aliviar as tensões internas geradas pela martensita supersaturada em carbono. A tabela 8 ilustra as propriedades mecânicas obtidas após o tratamento térmico de têmpera e revenimento (CHIAVERINI, 2012).

Tabela 8 - Tratamento térmico dos aços inoxidáveis martensíticos e suas propriedades mecânicas
(Adaptado de DI CAPRIO para CHIAVERINI, 2012).

Tipo AISI	Têmpera			Revenido			Propriedades mecânicas médias, após o tratamento térmico						
	Temperatura a °C	Tempo min.	Meio de resfriamento	Temperatura °C	Tempo h	Dureza Brinell	Limite de resistência		Limite de escoamento		Alogamento %	Resistência ao choque	
							kgf/mm ²	MPa	kgf/mm ²	MPa		kgfm	J
403	925 / 1000	15 a 30	óleo	225 / 375	1 a 3	360 / 380	130	1280	98	960	15	2,8 / 6,2	27,5 / 60,8
410	925 / 1000	15 a 30	óleo	225 / 375	1 a 3	360 / 380	130	1280	98	960	15	2,8 / 6,2	27,5 / 60,8
414	975 / 1050	15 a 30	óleo ou ar	225 / 400	1 a 3	370 / 400	137	1340	102	1000	15	4,1 / 8,3	40,2 / 81,4
416	925 / 1000	15 a 30	óleo	225 / 375	1 a 3	360 / 380	130	1280	98	960	12	2,8 / 6,2	27,5 / 60,8
431	975 / 1075	15 a 30	ar, óleo, água	225 / 400	1 a 3	370 / 400	137	1340	102	1000	17	4,1 / 8,3	40,2 / 81,4
420	975 / 1050	15 a 30	ar, óleo quente	150 / 375	1 a 2	470 / 530	175	1720	158	1550	8	1,1 / 2,1	10,8 / 20,6
440A	1000 / 1075	15 a 30	idem	150 / 375	1 a 2	500 / 560	189	1850	182	1790	5	0,4 / 0,8	3,8 / 8,85
440B	1000 / 1075	15 a 30	idem	150 / 375	1 a 2	520 / 590	196	1920	189	1850	3	0,3 / 0,7	2,9 / 6,9
440C	1000 / 1075	15 a 30	idem	100 / 375	1 a 2	540 / 620	200	1960	193	1890	2	0,3 / 0,7	2,9 / 6,9

4. SOLDAGEM

É chamado de soldagem o processo de união entre duas partes metálicas, com ou sem aplicação de pressão, utilizando uma fonte de calor. A solda é o resultado desse processo (WAINER, BRANDI, DE MELLO, 2004).

4.1. Processos de soldagem

Os processos de soldagem são utilizados, principalmente, para a fabricação de aviões, navios, estruturas metálicas, oleodutos, gasodutos, etc..

Cada processo de soldagem deve atender alguns requisitos, tais quais (WAINER, BRANDI, DE MELLO, 2004):

- Gerar quantidade de calor necessária para fundir os materiais;
- Evitar a contaminação causada pelo ar atmosférico durante a soldagem;
- Promover o controle da transformação de fase, facilitando alcançar as propriedades desejadas, tanto químicas, mecânicas ou físicas.

Tabela 9 - Classificação dos processos de soldagem de acordo com a fonte de energia e o tipo de proteção (WAINER, BRANDI, DE MELLO, 2004).

Fonte de Energia		Tipo de proteção				
		Vácuo	Gás inerte	Gás	Fluxo (escória)	Sem proteção
Mecânica					N	Explosão Atrito Ultra-som
Química	Chama	N		Oxiacetilênica		
	Reação exotérmica	N			Aluminotermia	
Elétrica	Resistência elétrica		N	N	N	Eletroescória Topo-a-topo Ponto Ressalto Costura
	Arco elétrico	Eletrodo consumível	MIG	Eletrodo tubular		Soldagem de prisioneiros
				MAG	Eletrodo revestido Arco submerso	
		Eletrodo não consumível	TIG			Eletrodo de carbono
Energia radiante	Eletromagnética		Laser		N	N
	Partículas		Feixe de elétrons	N	N	N

Os processos de soldagem são desenvolvidos e/ou aperfeiçoados quando há a interação de três áreas: projeto de equipamentos soldados, aperfeiçoamento e desenvolvimento dos equipamentos de soldagem e a área de materiais, procurando sempre obter boa soldabilidade. Um material que não possua boa soldabilidade, não possui grande lugar no mercado de hoje.

Estes processos são classificados pelo tipo de fonte de energia ou pela natureza da união (WAINER, BRANDI, DE MELLO, 2004).

4.1.1. Classificação pelo tipo de fonte de energia

As fontes utilizadas nos processos de soldagem são: elétrica, química, mecânica e radiante.

Na fonte elétrica o calor é gerado ou pela passagem de corrente elétrica ou com a formação de um arco elétrico. No caso da passagem de corrente elétrica, o aquecimento é dado pelo efeito Joule, já na formação de um arco elétrico é através do potencial de ionização, correntes e outros parâmetros de soldagem.

Na fonte química o calor é gerado por reações químicas exotérmicas como, a queima de um combustível ou a reação de oxidação do alumínio.

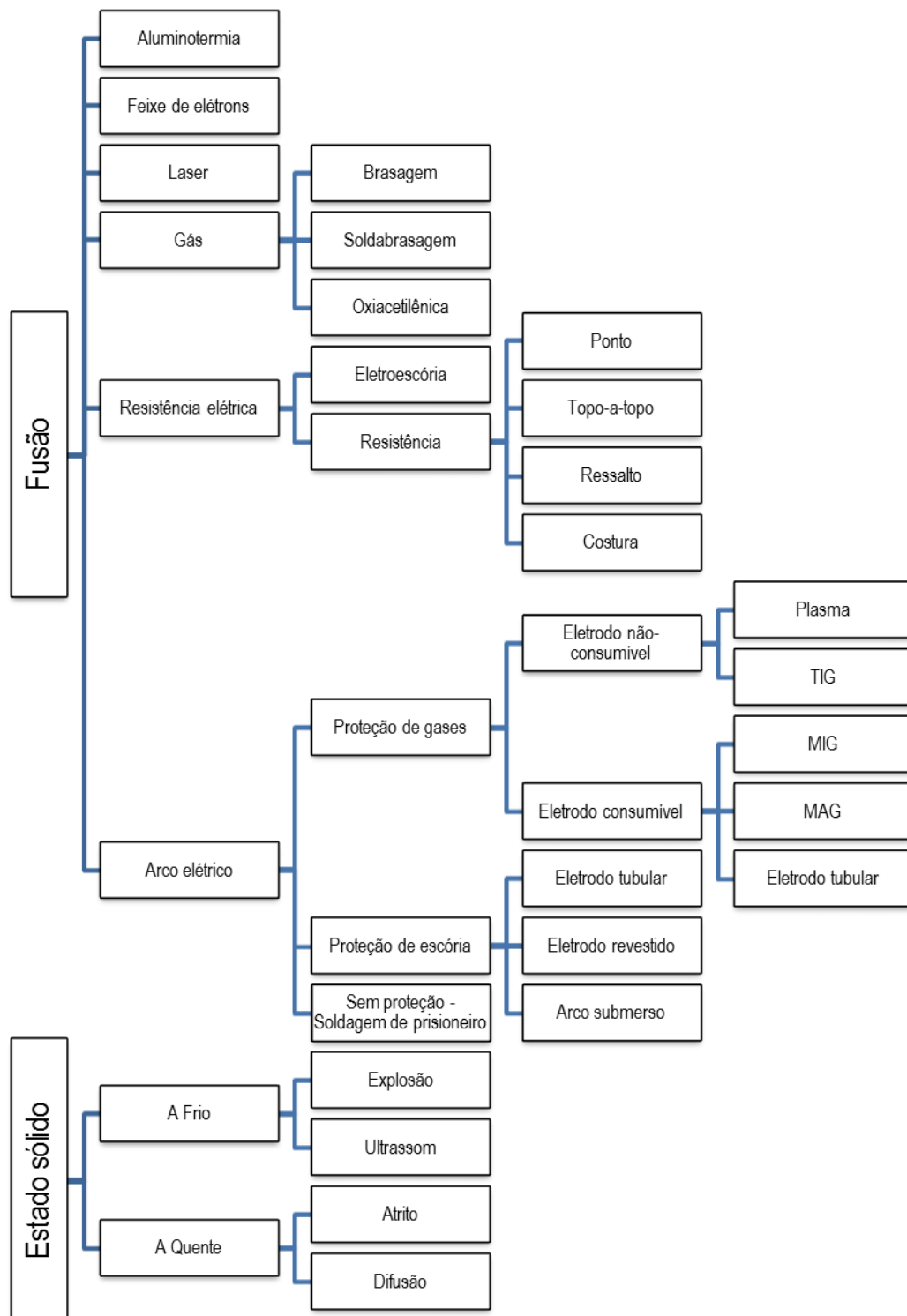
Na fonte mecânica o calor é gerado por atrito ou por ondas de choque, ou por deformação plástica do material.

Na fonte radiante o calor é gerado por radiação eletromagnética (laser) ou por um feixe de elétrons acelerados através de um potencial (WAINER, BRANDI, DE MELLO, 2004).

4.1.2. Classificação pela natureza da união

A classificação dos processos de soldagem, pela natureza da união, parte da distinção entre soldagem no estado sólido e por fusão.

Tabela 10 - Classificação dos processos de soldagem a partir da natureza da união (Adaptado de WAINER, BRANDI, DE MELLO, 2004).



4.2. Soldagem com arco elétrico

Os fenômenos envolvidos na transferência metálica por arco elétrico são bastante complexos e por esse motivo não são muito estudados, principalmente no processo por eletrodo revestido. Conhecer os fenômenos proporciona um melhor controle do processo de soldagem, diminuir quantidade de respingos, obtenção de cordões de solda sem defeitos, prever a penetração do passe, avaliar a quantidade de calor no metal de base, controlar a distorção da estrutura soldada, etc (WAINER, BRANDI, DE MELLO, 2004).

4.2.1. Conceitos do arco elétrico

O arco elétrico é definido como a descarga elétrica mantida através de um gás ionizado, iniciada por uma quantidade de elétrons emitidos do eletrodo aquecido. No arco elétrico para a soldagem a descarga elétrica tem alta intensidade e baixa tensão. Há três conceitos importantes para conhecimento do arco elétrico: calor, ionização e emissão (WAINER, BRANDI, DE MELLO, 2004).

4.2.1.1. Calor

O calor ocorre durante a movimentação das cargas elétricas no arco elétrico de um eletrodo permanente. No arco, os íons positivos são considerados imóveis quando comparados com a velocidade dos elétrons, sendo estes, os responsáveis pelo calor gerado. No arco elétrico gerado por um eletrodo consumível, além do choque entre íons, há o choque entre íons e átomos gerados na fusão do eletrodo e entre íons e as gotas que atravessam o arco (WAINER, BRANDI, DE MELLO, 2004).

4.2.1.2. Ionização

A ionização ocorre quando um elétron localizado em uma órbita recebe quantidade de energia, é forçado para órbita de maior energia. Dependendo da energia que o elétron recebe, ele pode ou não sair da influência do campo eletromagnético do átomo e tornar-se um elétron livre.

No arco elétrico de soldagem, é de interesse a ionização térmica, que nada mais é que a ionização por colisão entre partículas bem aquecidas. Quando ocorre o fenômeno de ionização, tem-se um íon positivo e um elétron livre, formando-se um meio condutor de eletricidade (WAINER, BRANDI, DE MELLO, 2004).

4.2.1.3. Emissão termoiônica

Chama-se de emissão termoiônica o processo de liberação de elétrons de uma superfície aquecida. Quando aberto o arco elétrico para a soldagem são necessários o aquecimento e o bombardeamento com elétrons do gás em volta do eletrodo. A tensão em vazio, diferença de potencial característica da fonte de energia, favorece a abertura de arco. Ao encostar o eletrodo no metal de base, essa tensão, tensão em vazio, cai rapidamente para um valor aproximado de zero.

A região do eletrodo que tocou o metal de base fica incandescente, favorecendo a emissão termoiônica. A emissão dos elétrons fornece mais energia térmica, fazendo com que ocorra a ionização térmica tanto no gás como do vapor metálico da poça de fusão. Quando conseguido a ionização térmica, o eletrodo pode ser afastado sem que o arco elétrico seja extinto (WAINER, BRANDI, DE MELLO, 2004).

4.2.2. Tipos de transferência metálica

Há várias classificações quanto aos tipos de transferência metálica, pode-se dizer que elas são quatro: globular, por pulverização, por curto-circuito e por arco pulsado.

4.2.2.1. Transferência globular

O metal é transferido em forma de glóbulos com diâmetros aproximados ao do eletrodo nu, ou da alma do eletrodo. Não é recomendado para soldagem fora de posição.

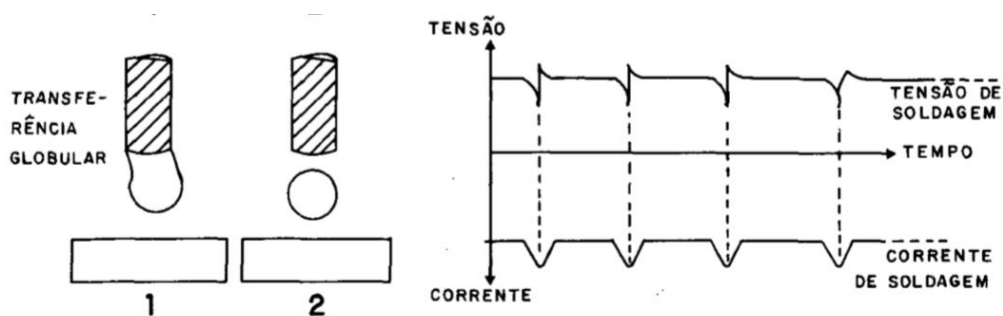


Figura 29 – Transferência globular (WAINER, BRANDI, DE MELLO, 2004).

4.2.2.2. Transferência por pulverização

O metal é transferido em pequenas gotas, menores que o diâmetro do eletrodo nu, ou alma do eletrodo. Na soldagem na posição plana ou horizontal esse tipo de transferência pode ser utilizado.

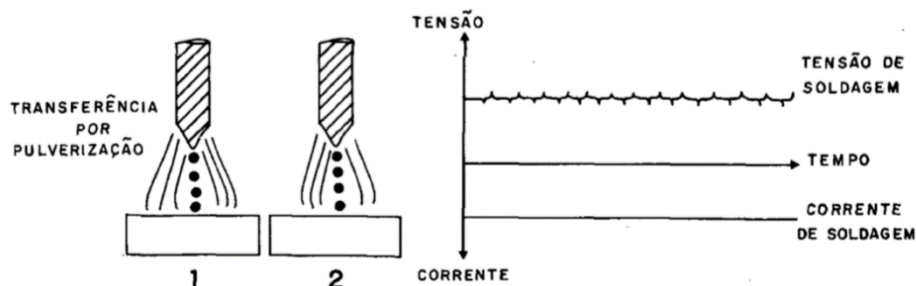


Figura 30 – Transferência por pulverização (WAINER, BRANDI, DE MELLO, 2004).

4.2.2.3. Transferência por curto-circuito

O metal é transferido diretamente pelo contato do eletrodo com a poça de fusão através de uma gota. Pode ser utilizado em qualquer posição.

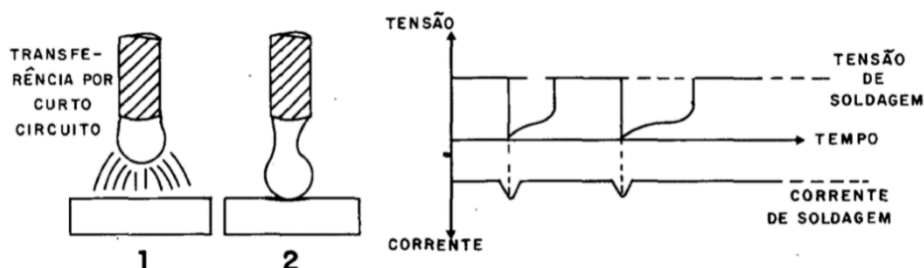


Figura 31 – Transferência por curto-circuito (WAINER, BRANDI, DE MELLO, 2004).

4.2.2.4. Transferência por arco pulsado

É similar à transferência por pulverização, a diferença é que uma gota é transferida por pulso. Recomendado para todas as posições.

4.3. Processo de Soldagem com Eletrodo Revestido (SMAW)

O processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido consiste na abertura e manutenção do arco elétrico gerado entre o eletrodo revestido e a peça, fazendo com que fundam simultaneamente. Quando fundido, o metal do eletrodo é transferido para a peça, gerando uma poça fundida que é protegida pelos gases formados pela queima do revestimento do eletrodo. O metal transferido do eletrodo para peça além de ser protegido pelos gases acima citados, recebem uma proteção adicional da escória gerada por alguns componentes provenientes da queima do revestimento (SENAI, 2013).

4.3.1. Aplicação

A soldagem por eletrodo revestido é o processo de soldagem mais utilizado, tendo sua aplicação na montagem de equipamentos e estruturas, oficinas, e até debaixo d'água, para materiais com espessuras entre 1,5mm a 30mm e em qualquer posição. Predominantemente esse processo é utilizado manualmente, podendo ser admitida uma versão mecanizada, conhecida como soldagem por gravidade, que tem seu maior emprego em estaleiros. Pode ser utilizados na soldagem de diversos materiais, como aço carbono, aços de baixa, média e alta liga, aços inoxidáveis, ferros fundidos, etc.

Materiais com baixo ponto de fusão, metais refratários ou muito reativos, não são aplicados o processo por eletrodo revestido. Por se tratar de um processo eminentemente manual, a qualidade da solda depende muito da habilidade do soldador (SENAI, 2013).

4.3.2. Eletrodo revestido

Ao utilizar na soldagem um eletrodo sem revestimento e nenhum outro tipo de proteção, o material que é depositado perde parte dos seus elementos após a fusão e deposita um metal nitretado e oxidado, fazendo com que as propriedades mecânicas tenham um valor significativamente inferior. Isso ocorre pela grande quantidade de oxigênio e nitrogênio que constitui nosso ar atmosférico, esses dois elementos são os que mais influenciam a deterioração das propriedades (SENAI, 2013).

O eletrodo revestido é um condutor elétrico que permite a passagem da corrente. É constituído por um núcleo metálico, também chamado de alma, envolvido por um revestimento composto de matérias orgânicas e/ou minerais, que são adicionados, como aglomerantes, outros compostos com finalidades específicas. Para considerar que o eletrodo revestido cumpra todas as finalidades, ele deve possuir um número de propriedades simultâneas (WAINER, BRANDI, DE MELLO, 2004):

- O metal depositado deve atender aos requisitos de propriedades mecânicas e metalúrgicas requeridas;
- A composição química do cordão de solda deve ser homogênea em toda sua extensão;
- A remoção da escória deve ser de fácil realização;
- O metal depositado deve ser livre de descontinuidades como poros, trincas, etc.;
- Emitir poucos respingos;
- Facilitar a abertura e manutenção do arco elétrico;
- Permitir uma boa penetração;
- Ter uma alta taxa de deposição;
- O eletrodo não deve superaquecer;
- O revestimento não deve absorver umidade;
- Deve gerar o mínimo de odores e fumos;
- O revestimento deve ser fixo à alma e ser flexível.

Alguns dos itens citados acima são antagônicos entre si, e por esse motivo deve haver um balanço destas propriedades. Definir o efeito de cada um dos constituintes dos revestimentos na soldagem pode ser uma tarefa complexa, pois na maioria das vezes eles possuem mais de uma atribuição. Além do mais, os efeitos de cada constituinte podem sofrer alterações na presença de outros, devido à interação entre eles. Podem-se agrupar, de maneira simplificada, as finalidades principais dos constituintes em (WAINER, BRANDI, DE MELLO, 2004):

- Estabilização do arco;
- Formação de gases protetores da poça;
- Formação de escória e atuação como agentes desoxidantes;
- Adição de componentes de ligas ao metal depositado;
- Melhorar as propriedades do revestimento, aderência, ductilidade, etc.

Os principais tipos de revestimento de eletrodos para soldagem de aços baixa e média liga estão divididos em quatro grupos: celulósico, rutílico, ácido e básico.

4.3.2.1. Eletrodos celulósicos

O revestimento destes eletrodos possui em sua composição mais de 20% de materiais celulósicos, que quando se decompõe geram grandes quantidades de hidrogênio. Estes gases fornecem a proteção para a poça de fusão (WAINER, BRANDI, DE MELLO, 2004).

A quantidade de escória é pequena e o arco é muito forte, causando excesso de respingos e uma alta penetração quando comparado com os outros revestimentos. O aspecto do cordão não é dos melhores, apresentando irregularidades. As características mecânicas são boas, embora possa ser fragilizado pelo hidrogênio. Os eletrodos com este tipo de revestimento são recomendados para soldagem fora da posição plana, tendo grande aplicação na soldagem de juntas circunferenciais de tubulação e passe de raiz em geral. Devido a sua alta penetração e a elevada quantidade de respingos, não é adequada para enchimento de juntas chanfradas (SENAI, 2013).

O uso é geralmente restrito para a soldagem com corrente contínua e polaridade inversa, por conta de sua baixa estabilidade do arco. Quando adicionado elementos estabilizadores como: silicato e titanato de potássio, pode-se estender sua aplicação para a polaridade direta, ou corrente alternada (WAINER, BRANDI, DE MELLO, 2004).

4.3.2.2. Eletrodos rutilicos

Estes eletrodos possuem no revestimento mais de 20% de óxido de titânio, obtido através da adição de areia de rutilo ou ilmenita. Estes componentes são responsáveis por conferirem uma alta estabilidade de arco, com baixas tensões, pequena quantidade de respingos e um bom aspecto superficial.

O gás protetor gerado pela queima do revestimento contém hidrogênio e, talvez nitrogênio. Pode ser adicionado materiais celulósicos em teores de até 15% para proporcionar uma melhor proteção gasosa. A resistência mecânica e ductilidade obtida são boas, e quando adicionado pó de ferro ao revestimento, possibilita alta taxas de deposição. Pode ser usado em ambas correntes, contínua e alternada (WAINER, BRANDI, DE MELLO, 2004).

4.3.2.3. Eletrodos ácidos

O revestimento ácido tem como seus principais constituintes o óxido de ferro, manganês e o silício. Produz uma escória ácida, em grande quantidade, porosa e de fácil remoção. Pode ser utilizado nos dois tipos de corrente, apresentando uma penetração média e alta taxa de fusão causa uma poça de fusão volumosa. Por conta destas características, é indicada para soldagem nas posições plana e de filete horizontal.

As propriedades obtidas na soldagem são consideráveis boas para várias aplicações, no entanto sua resistência à formação de trincas de solidificação seja baixa. Esse revestimento permite a produção de um cordão com bom aspecto (SENAI, 2013).

4.3.2.4. Eletrodos básicos

O revestimento básico contém alta quantidade de carbonatos de cálcio ou outro material e fluorita. A escória com características básicas é obtida através destes componentes que, adicionada ao dióxido de carbono resultante da decomposição do carbonato, protege a soldagem do contato da atmosfera.

A escória formada possui a ação de dessulfurizar e reduzir o risco de trincas de solidificação. Quando manuseados e armazenados corretamente, esse revestimento é capaz de produzir soldas com baixos teores de hidrogênio e minimiza os problemas de fissuração e fragilização induzidos por esse elemento. Possui uma penetração média e um cordão com boas propriedades mecânicas, principalmente uma boa tenacidade.

São indicados para soldagens de alta responsabilidade, para soldagem de aços de pouca soldabilidade, como os aços com alto teor de carbono e/ou enxofre. É considerado o mais higroscópico dentre todos os revestimentos e, por essa razão, exige cuidados especiais com o armazenamento e manuseio (SENAI, 2013).

4.3.2.5. Classificação dos eletrodos revestidos

A Sociedade Americana de Soldagem (AWS) criou um padrão para a identificação dos eletrodos revestidos que é amplamente utilizado em todo o mundo.

A AWS especificou as identificações dos eletrodos revestidos numerando-os de acordo com o material que se pretende classificar. A mais comum entre as especificações é a AWS A5.1 (aço carbono), AWS A5.5 (aço baixa liga) e AWS 5.4 (aço inoxidável). A tabela a seguir mostra a especificação AWS para eletrodos revestidos para determinados materiais (SENAI, 2013).

Tabela 11 - Especificações AWS para eletrodos revestidos (SENAI, 2013).

Especificação AWS para eletrodos revestidos	
REF. AWS	Eletrodos para
A5.1	Aços carbono
A5.3	Alumínio e suas ligas
A5.4	Aços inoxidáveis
A5.5	Aços de baixa liga
A5.6	Cobre e suas ligas
5.11	Níquel e suas ligas
A5.13	Revestimento (alma sólida)
A5.15	Ferros fundidos
A5.21	Revestimento (alma tubular com carbonetos de tungstênio)

4.3.3. Parâmetros de soldagem

Alguns aspectos devem ser considerados na soldagem com eletrodos revestidos como o tipo e o diâmetro do eletrodo, a polaridade, intensidade de corrente, comprimento do arco, velocidade da soldagem e o manuseio do eletrodo.

A escolha do diâmetro do eletrodo, o tipo e a espessura do revestimento deve levar em consideração a espessura do metal a ser soldado, a posição de soldagem e o tipo de junta.

Um eletrodo com diâmetro maior que o necessário pode ocasionar perfuração da peça, pois o quanto maior o diâmetro, maior será a corrente mínima para a soldagem, com isso, maior será o calor para o metal de base.

Para soldagem fora da posição plana exige a utilização de eletrodos de menores diâmetros devido à dificuldade de controlar a poça de fusão. Quando utilizado junta chanfrada, deve-se levar em consideração a medida do chanfro para que o eletrodo possa ter acesso à raiz da junta. A polaridade possui grande influência na forma e na dimensão da poça de fusão, além de alterar o tipo de transferência e a estabilidade do arco. A polaridade direta (-) permite uma penetração baixa com uma alta taxa de fusão, enquanto a polaridade inversa (+)

produz maior penetração. Na soldagem com corrente alternada ($\pm$), as taxas de penetração e de fusão são médias (SENAI, 2013).

4.3.4. Equipamento

O equipamento para a soldagem com eletrodo revestido consiste em:

- Fonte de energia: transformadores, geradores ou retificadores;
- Cabos de soldagem: cabo de solda que interliga o porta-eletrodo à fonte de energia, cabo terra ou cabo de retorno que faz a ligação entre o metal de base e o outro terminal da fonte;
- Porta-eletrodo: dispositivo para prender o eletrodo revestido durante a soldagem, também responsável por conduzir a energia para o eletrodo;
- Grampo: utilizado para prender o cabo terra à peça a ser soldada.

4.4. Processo de Soldagem com Eletrodo de Tungstênio (TIG/GTAW)

O TIG “*Tungsten Inert Gas*” é um processo de soldagem a arco elétrico entre um eletrodo não consumível de tungstênio ou ligas a base de tungstênio sob uma proteção gasosa ou gás usualmente inerte ou misturas de gases.

Durante a soldagem, a proteção da poça de fusão e do metal de adição que está sendo fundida e que, portanto, está sendo adicionada à poça, é feita por uma cortina de gás de proteção, injetado continuamente, com uma vazão controlada, a partir do bocal da pistola ou tocha de soldagem.

O arco elétrico do processo resulta da passagem da corrente elétrica através do próprio gás de proteção, fato que ocorre quando o mesmo é submetido a uma determinada diferença de potencial (voltagem), sofrendo o que chamamos de ionização. As cargas elétricas positivas, íons, irão para o polo negativo, e as negativas, elétrons, para o polo positivo, estabelecendo-se assim o arco.

A soldagem TIG, dependendo da aplicação, pode ser feita com ou sem o emprego de metal de adição. Quando é feita com metal de adição, este não é transferido através do arco elétrico de soldagem, mas sim, fundido sob a ação do

arco, visto que o referido metal de adição não faz parte do circuito elétrico da soldagem, razão pela qual não há passagem de corrente através dele. Não ocorrem projeções, respingos, e há pouquíssima ou nenhuma geração de fumos durante a soldagem. O cordão de solda é suave e uniforme, não requerendo normalmente nenhum acabamento posterior.

A soldagem TIG propicia a execução de soldas de alta qualidade na maioria dos metais e ligas. Não há nenhuma escória, e o processo pode ser usado em todas as posições. Este processo é o mais lento dos processos manuais (FBTS, 2013).

4.4.1. Características do processo

O processo de soldagem TIG é aplicado principalmente para a soldagem de seções finas, uma vez que o arco elétrico apresenta elevada potência por concentrar muita energia e calor numa área diminuta do metal de base, para a qual está sendo dirigido.

A concentração de calor causa um rápido aparecimento da poça de fusão. Por ser extremamente localizado, o restante do metal de base permanece numa temperatura relativamente baixa, próxima a ambiente, resultando em pouquíssimo ou, mais frequentemente, nenhum empeno na junta soldada.

No processo TIG, com a devida regulagem dos parâmetros elétricos, o soldador consegue facilmente manter o arco estável durante a soldagem. O ótimo controle do arco e, conseqüentemente da poça de fusão, aliado ao controle da adição da vareta de solda e de pouquíssimos fumos de soldagem, favorece ao soldador uma ótima visão e um perfeito domínio para executar com precisão soldas regulares e de excelente acabamento.

Este processo pode também unir parede espessas de chapas e tubos de aço e de ligas metálicas. É usado tanto para soldagem de metais ferrosos como de não ferrosos. Os passes de raiz de tubulações de aço carbono e aço inoxidável, especialmente aquelas de aplicações críticas, são frequentemente soldadas pelo processo TIG (FBTS, 2013).

4.4.2. Aplicação

A soldagem TIG possibilita soldar alumínio, magnésio, titânio, cobre e aços inoxidáveis, como também metais de soldagem difícil e outros de soldagem relativamente fácil como os aços carbono.

Embora a soldagem TIG, devido à sua baixa produtividade, tenha um custo de produção de soldas relativamente alto quando comparada a outros processos, tal fato é compensado pela possibilidade de utilizar o processo para diversos tipos de metais, incluindo juntas de metais dissimilares, em todos os tipos de juntas, posições de soldagem e, numa ampla faixa de espessuras, desde as finíssimas, resultando em soldas de alta qualidade e resistência (SENAI, 2013).

4.4.3. Eletrodo

Os eletrodos de tungstênio utilizados na soldagem TIG são enquadrados em várias classificações, e os requisitos para seu uso constam na norma AWS A 4.12. Basicamente, temos:

- EWP - Tungstênio puro (99,5 %);
- EWCe -2 - Tungstênio com 1,8 a 2,2 % de Ce O₂;
- EWLa -1 - Tungstênio com 0,9 a 1,2 % de La₂ O₃;
- EWTh -1 - Tungstênio com 0,8 a 1,2 % de ThO₂;
- EWTh -2 - Tungstênio com 1,7 a 2,2 % de ThO₂;
- EWG - Tungstênio (94,5 %) com adição de alguns elementos não identificados;
- A adição de tório e zircônio ao tungstênio permite a este emitir elétrons mais facilmente quando aquecido (FBTS, 2013).

4.4.4. Consumíveis – Metais de Adição e Gases

Uma ampla variedade de metais e ligas estão disponíveis para utilização como metais de adição no processo de soldagem TIG.

Os metais de adição, se utilizados, normalmente são similares quanto à composição química em relação ao metal de base.

Os gases de proteção comumente empregados para soldagem TIG são: o gás Argônio (Ar), o gás Hélio (He), ou uma mistura destes dois gases. O argônio é muitas vezes preferido em relação ao hélio, porque apresenta algumas vantagens, tais como:

- Ação do arco mais suave e sem turbulências;
- Menor tensão no arco para uma dada corrente e comprimento de arco;
- Maior ação de limpeza na soldagem de materiais como alumínio e magnésio, em corrente alternada;
- Menor custo e maior disponibilidade;
- Menor vazão de gás para uma boa proteção (na posição plana);
- Melhor resistência à corrente de ar transversal;
- Mais fácil à iniciação do arco.

O uso do hélio como gás de proteção resulta em uma tensão de arco mais alta para um dado comprimento de arco e mesma corrente em relação ao argônio, produzindo mais calor, e, assim, é o gás recomendado para a soldagem de materiais espessos (especialmente metais de alta condutividade térmica, tais como alumínio, cobre e suas ligas).

Por outro lado, a densidade do hélio é menor que a do argônio, o que requer maiores vazões de gás para obter um arco mais estável e uma proteção adequada da poça de fusão, durante a soldagem na posição plana. Isso acaba resultando num substancial aumento do custo na soldagem, o que justifica o emprego do gás hélio, principalmente nos casos específicos mencionados anteriormente (FBTS, 2013).

4.4.5. Equipamento

O equipamento necessita ter:

- Um porta-eletrodo, denominado pistola ou tocha, dotada de um bocal refratário, e um difusor por onde o gás de proteção passa e é direcionado ao redor do arco;

- Um bico de contato interno na tocha contém e, ao mesmo tempo, transfere a corrente elétrica para o eletrodo de tungstênio;
- Um suprimento de gás de proteção;
- Um fluxímetro e regulador-reductor de pressão do gás;
- Uma fonte de energia, com características volt-ampere idênticas ao do eletrodo revestido;
- Uma fonte de alta frequência;
- Um suprimento de água de refrigeração, se a pistola for refrigerada a água (SENAI, 2013).

4.4.6. Variantes do processo TIG

As variáveis que mais afetam este processo são as variáveis elétricas (corrente tensão e características da fonte de energia). Elas interferem na quantidade, distribuição e no controle de calor produzido pelo arco. Também desempenham um papel importante na estabilidade do próprio arco e, finalmente, na remoção de óxidos refratários da superfície de alguns metais leves e suas ligas (por ex: alumínio) (SENAI, 2013).

4.5. Processo de Soldagem MIG/MAG (GMAW)

No Processo de Soldagem MIG/MAG (Gas Metal Arc Welding – GMAW) é estabelecido um arco elétrico entre um eletrodo consumível nu alimentado continuamente (arame-eletrodo) e o metal de base, sob a proteção constante de uma atmosfera gasosa (gás de proteção). A atmosfera gasosa pode ser de gás inerte, ativo ou uma mistura dos dois.

O metal de adição (arame - eletrodo nu), ao se fundir, é transferido à poça na forma de gotas. As características da transferência quanto à forma, quantidade e dimensões das gotas, permitem classificá-las em três tipos: transferência por spray, globular ou curto-circuito.

O gás empregado é injetado durante toda a soldagem, numa vazão pré-regulada, através do bocal da pistola ou tocha de solda. O gás empregado

desempenha o papel principal de proteger o metal líquido da poça de fusão e as gotas fundidas do metal de adição contra a contaminação pelo ar atmosférico.

O processo de soldagem MIG/MAG, pode ser semiautomático ou automático. No processo semiautomático o arame-eletrodo é alimentado automaticamente através de uma pistola. O soldador controla a inclinação da pistola conforme os ângulos de trabalho e de deslocamento, o comprimento do arco, a velocidade de deslocamento e a técnica de deposição. No processo automático toda a operação é controlada através de comandos ajustados pelo operador de soldagem.

O processo de soldagem MIG/MAG pode ser empregado tanto para uniões quanto para aplicação de revestimento superficial (FBTS, 2013).

4.5.1. Características do processo

O processo de soldagem MIG/MAG produz soldas de alta qualidade com procedimentos de soldagem apropriados. Como não é utilizado fluxo, a possibilidade de inclusão de escória é bem menor se comparada com os processos a arco com eletrodo revestido e arco submerso. Por outro lado, conforme mencionamos antes, há necessidade de remoção da escória dependendo da combinação gás de proteção/arame-eletrodo utilizada. O hidrogênio na solda é praticamente inexistente (FBTS, 2013).

4.5.2. Aplicação

A soldagem MIG/MAG é um processo de soldagem aplicável a todas as posições, dependendo do eletrodo e do gás ou mistura de gases empregados. Pode soldar a maioria dos metais e ser utilizado inclusive para a deposição de revestimentos superficiais. Tem capacidade para soldar espessuras maiores de 0,5 mm com transferência por curto circuito. A taxa de deposição pode chegar a 15 kg/h dependendo do eletrodo, do modo de transferência e do gás usado (FBTS, 2013).

4.5.3. Modos de transferência

Os fatores que influenciam na transferência do metal depositado para a poça de fusão são:

- Gás de proteção;
- Intensidade e tipo de corrente;
- Tensão do arco elétrico;
- Diâmetro do arame;
- Composição química do arame;
- Extensão do arame (*“stick-out”*).

As transferências na soldagem pelo processo MIG/MAG do tipo globular ou tipo curto-circuito, podem ser obtidas normalmente na medida em que se faz variar os parâmetros listados anteriormente, independentemente do gás de proteção que está sendo utilizado.

Exemplos de gases ou misturas utilizados para obtenção da transferência por curto-circuito e globular são apresentados a seguir:

- CO₂;
- CO₂ + 5 a 10% de O₂;
- Argônio + 15 a 30% de CO₂;
- Argônio + 5 a 15% de O₂;
- Argônio + 25 a 30% de N₂.

No caso da transferência em spray o mesmo procedimento não se aplica, pois, dependendo do gás que for utilizado, mesmo com emprego de elevadas intensidades de corrente, não será possível obter o spray. Em outras palavras, isso significa que a obtenção do spray está condicionada à utilização de determinados gases de proteção.

A seguir, são apresentados exemplos de alguns gases com os quais é possível obter a transferência em spray, além das transferências globular e curto-circuito (FBTS, 2013).

- Argônio;
- Hélio;
- Argônio + Hélio;
- Argônio + 1% de O₂;
- Argônio + 3% de O₂;
- Argônio + 5% de O₂;
- Argônio + (até) 15% CO₂.

4.5.4. Consumíveis

Gás de proteção:

A finalidade principal do gás de proteção na soldagem MIG/MAG é a de excluir a atmosfera do contato com o metal de solda fundido. Isso é necessário porque a maioria dos metais, quando aquecidos aos seus pontos de fusão e em contato com o ar, apresentam fortes tendências de formar óxidos e, numa menor extensão, nitretos. Essas reações são indesejáveis porque podem resultar em deficiências na solda como escória retida, porosidade e fragilização.

Adicionalmente, a proteção que o gás oferece contra a contaminação, principalmente pelo oxigênio e nitrogênio, também tem efeito pronunciado nos seguintes fatores:

- Características do arco;
- Tipo de transferência metálica;
- Penetração e formato do cordão;
- Velocidade de soldagem;
- Na tendência ao aparecimento de mordeduras;
- Ação de limpeza;
- Propriedades mecânicas do metal de solda.

Os gases de proteção utilizados no processo MIG/MAG, pode ser inerte, ativo ou misturas de gases. O argônio puro é utilizado em muitas aplicações de soldagem de metais não ferrosos. Misturas argônio com hélio (Ar + 50 a 75 % He) aumentam a voltagem do arco (para o mesmo comprimento do arco) para valores superiores aos obtidos com argônio puro. Essas misturas são usadas para soldagem de seções espessas do alumínio, magnésio e cobre, bem como ligas desses metais, porque o maior calor aportado (devido as maiores voltagens) reduz o efeito da alta condutividade térmica desses metais.

Por outro lado, argônio puro não é recomendável para soldagem de metais ferrosos (aços carbono, aços baixa liga, etc.) porque o arco elétrico é errático e existem tendências à formação de mordeduras e ângulo excessivo de reforço do cordão de solda.

São ainda utilizadas misturas com 1 a 5 % de oxigênio e 3 a 25 % de CO₂. Misturas tríplexes com 2% de oxigênio e 8 a 10 % de CO₂ apresentam em geral ótimos resultados.

O gás CO₂ é um gás reativo muito utilizado na sua forma pura como gás de proteção na soldagem dos aços carbono e baixa liga. Elevadas velocidades de soldagem, grande penetração da junta e baixo custo são características que encorajam extensivamente o uso deste gás. Com o CO₂ as transferências metálicas são dos tipos globulares e curto-circuito. Devido à natureza oxidante do arco produzido com o CO₂ às propriedades mecânicas da solda poderão ser afetadas, o que é contornado com o emprego de arame-eletrodo com formulação específica, contendo elementos químicos desoxidantes (FBTS, 2013).

Eletrodos:

Os eletrodos para soldagem MIG/MAG são similares ou idênticos em composição aos dos outros processos de soldagem que utilizam eletrodos nus, sendo que, para o caso específico da soldagem com atmosfera rica em CO₂, os mesmos devem conter elementos desoxidantes tais como silício e manganês em percentuais determinados.

Como uma regra geral, as composições químicas do eletrodo e do metal de base devem ser tão similares quanto possível, incluindo também à similaridade quanto às propriedades mecânicas de resistência, ductilidade e tenacidade. Contudo, deve-se lembrar que, com emprego do CO₂, a composição do eletrodo será acrescida de elementos desoxidantes (FBTS, 2013).

4.5.5. Equipamento

O equipamento para soldagem com o processo MIG/MAG consiste de:

- Pistola / tocha de soldagem;
- Cabeçote de alimentação do arame;
- Painel de controle;
- Fonte de energia;
- Fonte de suprimento regulada de gás de proteção;
- Bobina de arame-eletrodo;
- Cabos e mangueiras;
- Sistema de refrigeração (para tochas refrigeradas a água) (SENAI, 2013).

4.6. Processo de Soldagem com Arame Tubular (FCAW)

Esse processo de soldagem também conhecido como FCAW (*Flux-Cored Arc Welding*), produz junção de partes metálicas, através do aquecimento pelo arco elétrico, fundindo o metal de adição, arame tubular consumível com fluxo de proteção, e um metal base. O cordão de solda e o arco elétrico sofrem proteção de um gás de fonte externa (opcional) e o próprio fluxo interno do arame tubular (FBTS, 2013).

4.6.1. Características do processo

Esse tipo de processo de soldagem requer coalescer vantagens de outros tipos de soldagem que são a MIG/MAG, automatizar deslocamento da tocha e

deposição de material, e do processo com eletrodo revestido, escória proveniente de reação química benéfica na poção de fusão, formação de gases de proteção, adição de elementos de liga.

A soldagem por arame tubular pode ser com ou sem proteção gasosa, tem como principal característica grande taxa de deposição de material de adição. Nas primeiras utilizações deste processo, eram utilizados arames com grandes diâmetros dificultando usá-lo em qualquer posição de solda. Com o melhoramento de tecnologia a fabricação de arames também melhorou, com a diminuição dos diâmetros, possibilitando a soldagem em qualquer tipo de junta e posição.

Cuidado especial tem que ser tomado pelo soldador na remoção de escória formada em cada passe, removendo-a antes que um novo cordão seja feito, para evitar inclusões nas deposições da junta soldada. Algumas escórias são de fácil remoção, se quebrando após resfriamento, outras são tão aderentes ao filete de solda que necessitam ser retiradas com golpes manuais (SENAI, 2013).

4.6.2. Aplicação

Por ser mais produtivo e haver novos tipos de consumíveis que o processo de soldagem por eletrodo revestido, o processo por arame tubular tem aumentado o seu uso em grande escala. Sua aplicabilidade é forte em indústrias em geral, porém tem mais campo em construções e fabricações estruturais, tem um grande campo nas indústrias navais e nuclear, além do uso em soldagem de metais de aços inoxidáveis, aços e baixa liga e aços carbonos.

Com a melhora da tecnologia do arame tubular, a soldagem é variada, possível em qualquer junta, peça ou tubo, em qualquer posição e também com larga escala de espessuras de chapas. Outra boa aplicação é a facilidade de montagens irregulares, isso significa fazer a solda em locais difíceis como cantos de peças, isso é possível devido à variação do *stick-out* (distância entre a ponta do eletrodo e o início do arco elétrico) podendo variar de arame para arame. Aumentando a extensão do eletrodo, aumenta o aquecimento por efeito Joule (transformação da energia elétrica em térmica quando a corrente elétrica aquece um condutor),

reduzindo a tensão do arco elétrico e a intensidade de corrente, agindo na diminuição de energia de soldagem.

A soldagem de arame tubular tem muitas vantagens com a aplicação do gás de proteção, como menor vazão do mesmo, melhor estabilização do arco melhorando o aspecto do cordão, alta taxa de deposição, qualidade da solda e produtividade. Há vantagens em relação ao arame consumível como, versatilidade devido à troca dos carretéis de arame e a escolha das variadas composições químicas do cordão, além de fácil operação em campo (SENAI, 2013).

4.6.3. Parâmetros de soldagem

Neste tipo de soldagem muitos parâmetros tem que ser levados em consideração, tais como a tensão do arco elétrico, intensidade da corrente, velocidade de soldagem, *stick-out*, taxa de deposição e vazão do gás de proteção.

A tensão do arco elétrico está diretamente ligada ao comprimento do arco. Tensões mais elevadas têm maiores comprimentos de arco, então menores tensões diminuem seu comprimento. Seleção de tensão modifica condições do aspecto de cordão, capacidade do material de adição em fusão e penetração no material base, e descontinuidades como porosidade. Tensões muito elevadas com comprimento de arco maior causam cordões irregulares provenientes de salpicos do arame na poça de fusão, formação de nitretos e porosidade. Tensões baixas com menor comprimento de arco faz geração de cordões convexos de pouca penetração. Devido essas importâncias é recomendado usar tensões adequadas ao trabalho, de acordo com indicações do fabricante.

Intensidade de corrente é proporcional à velocidade de alimentação de arame consumível. Com os parâmetros de trabalho constantes a influência da corrente é notável, aumentando-a, eleva à taxa de deposição, a penetração e cordões com mau aspecto, diminuindo a intensidade de corrente aumenta respingos, pois diminui a velocidade de alimentação e o arame frio não penetra na poça de fusão quente sendo expulso do local, causa porosidade e acúmulo de nitretos.

A velocidade de soldagem influencia na aprovação final do trabalho de solda, pois esse parâmetro se não usado dentro de uma relação de faixas de velocidade,

tipo de consumível e intensidade de corrente não permitirá boa penetração dos passes de soldagem, ocasionando descontinuidades como mordedura e inclusões de escória.

O *stick-out* é padronizado para cada tipo de consumível segundo fabricante. Quanto maior o *stick-out* (comprimento da ponta do arame) mais calor é desenvolvido no arame e no fluxo interno pela corrente elétrica, causando excesso de respingos, aumento da taxa de deposição, cordões convexos e falta de penetração. Em contrapartida comprimento muito pequeno causa porosidade, também excesso de respingos e oxidação da poça de fusão.

Para aumentar ou diminuir a taxa de deposição (quantidade de metal fundido por unidade de tempo) depende de outros parâmetros como, diâmetro e tipo de material do arame, *stick-out*, tensão do arco, intensidade da corrente.

A vazão do gás serve para a proteção do arco elétrico e cordão de solda, se não estiver bem regulada numa vazão adequada, com posição de soldagem e distância de *stick-out* correta, tipo de gás provenientes, ocorrerá problemas porosidade e oxidação do cordão de solda e ponto do eletrodo (SENAI, 2013).

4.6.4. Modos de transferência

Transferências metálicas na soldagem por arame tubular é semelhante ao processo de MIG/MAG convencional. Esses modos de transferência são em função das misturas gasosas e dos parâmetros de soldagem. Existem três tipos: por *spray*, globular e por curto-circuito.

Transferência metálica por *spray* é restrita somente para posição plana devido à alta taxa de deposição de material, pois recorre a elevadas tensões e correntes em relação a um determinado diâmetro de arame. Por esses altos valores as chapas a soldar deve ser maior que 3,0 mm. Os gases utilizados são importantes, pois só o argônio e CO₂ permitem produzir esse tipo de transferência.

Transferência metálica globular atinge correntes menores que por *spray*, também deve ser utilizada somente na posição plana já que é transferido grandes glóbulos fundidos de metal por gravidade.

Transferência por curto-circuito utiliza a menor taxa de deposição entre as anteriores mencionadas, as faixas de corrente e diâmetros de arame são menores consequentemente usadas em chapas de seção fina e usado fora da posição plana. Sua taxa de respingos é excessiva (FBTS, 2013).

4.6.5. Consumíveis

É utilizado no processo de soldagem por arame tubular, consumíveis que são gases e arames contendo fluxo em seu interior.

O gás de proteção ou mistura de gases é feito externamente conectado ao equipamento do processo, semelhante ao processo MIG/MAG faz proteção ao cordão de solda e arco elétrico e tem como principal gás o dióxido de carbono (CO_2), e pode ser misturado com Argônio.

Existem tipos variados de arames tubulares de acordo com o tamanho do diâmetro e conformação interna.

De acordo com alguns dados de trabalho e parâmetros de soldagem, como uso de gás de proteção ou não, soldagem monopasse ou multipasse, propriedade mecânica desejada no cordão de solda, tipo de corrente e posição de soldagem, há normas que regem a escolha do arame tubular e suas composições químicas para cada tipo de trabalho desejado, essa norma é a AWS (*American Welding Society*).

O arame tubular tem formato oco com fluxo metálico responsável pela proteção do arco elétrico e cordão de solda, além dos gases gerados pela queima do eletrodo que auxiliam nessa proteção, e pode ser complementado um gás adicional de cilindros externos ligados à tocha. Outro arame opcional é o autoprotetido, onde a proteção do arco e da poça de fusão é feita unicamente pela combustão e decomposição do fluxo em pó contido no núcleo do arame (SENAI, 2013).

4.6.6. Equipamento

O equipamento para o processo de soldagem de arame tubular é semelhante aquele utilizado no processo MIG/MAG, sendo composto de fonte de energia, alimentador de arame, tocha, cilindro de gás, cabos e tubos de ligação.

Há algumas diferenças como a fonte de energia gerar uma mais intensidade de corrente, as pistolas podem ser refrigeradas com ar ou água e inexistência de um sistema de gás de proteção se o processo for com arames autoprotegidos (FBTS, 2013).

A seguir, exemplo de um conjunto de soldagem de arame tubular.

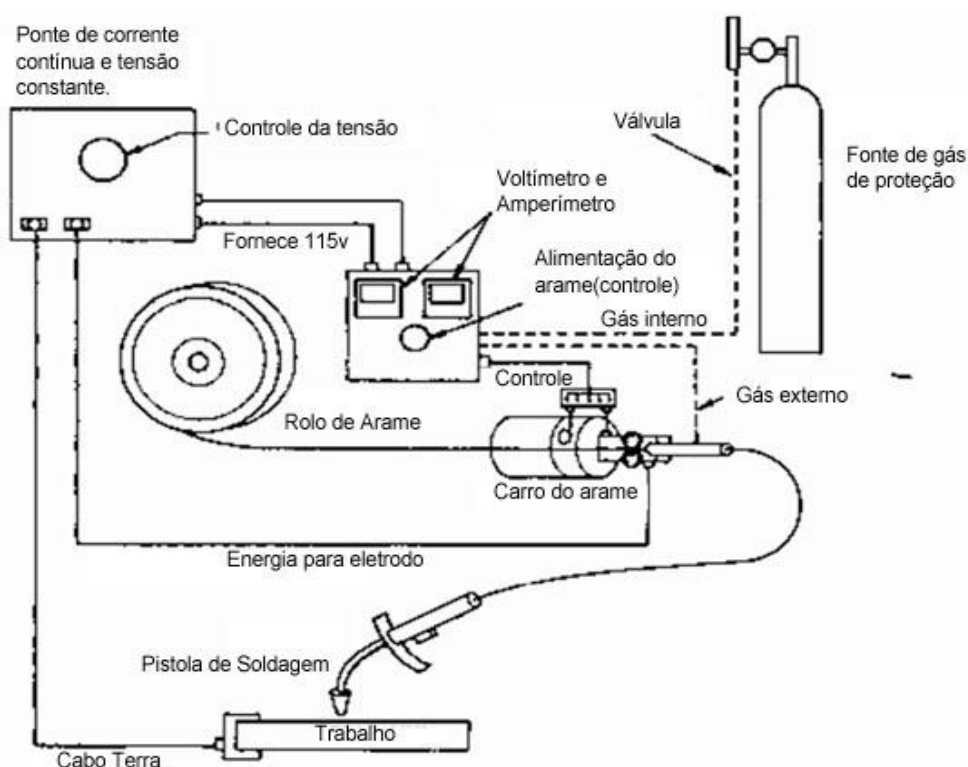


Figura 32 – Equipamento para soldagem com arame tubular (esquema) (SENAI, 2013)

4.7. Soldagem dos aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis também são conhecidos por sua dificuldade na soldagem quando comparados com os aços carbonos, porém, essa dificuldade varia dependendo do tipo do aço em questão. Uma informação importante sobre a

soldagem dos aços inoxidáveis, é que deve-se limpar a peça antes da soldagem, a fim de minimizar contaminações que prejudiquem a sua resistência a corrosão. O cuidado com o aspecto do cordão de solda também deve ser tomado, caso haja irregularidades na superfície, pode gerar acúmulo de sujeira, causando início de corrosão. Além destes cuidados, as diferenças das propriedades devem ser levadas em consideração, tais quais (MODENESI, 2011):

- Menor temperatura de fusão;
- Menor condutividade térmica;
- Maior coeficiente de expansão térmica;
- Maior resistência elétrica.

4.7.1. Soldagem dos aços inoxidáveis duplex

Estes aços podem ser facilmente soldáveis quando os cuidados necessários são tomados. Caso o material seja resfriado muito rapidamente, potencializa um teor elevado de ferrita e a geração da precipitação de nitretos de cromo na ZTA e ZF, e isso prejudica a tenacidade e a resistência a corrosão da solda. Se o material for resfriado muito lentamente e a manutenção por tempos longos, as temperaturas entre 600°C e 1000°C podem levar ao surgimento de precipitados de compostos intermetálicos, tais como as fases sigma, chi e epsilon, o que também prejudica a resistência mecânica e a resistência a corrosão da solda.

Assim, o controle da temperatura de pré-aquecimento e da energia de soldagem é de extrema importância para esse tipo de material. É utilizado uma mistura de Ar-N₂ como gás de proteção para reduzir a quantidade de ferrita na Zona fundida (MODENESI, 2011).

5. CONFIABILIDADE NAS UNIÕES SOLDADAS

5.1. Análise microestrutural

Umas das principais técnicas utilizadas na caracterização de materiais são a microscopia ótica e a microscopia eletrônica de varredura.

5.1.1. Análise via Microscopia ótica

Quando se deseja observar elementos microestruturas que auxiliem no estudo dos metais, utiliza-se a técnica de microscopia ótica. Nessa técnica é usado o microscópio ótico que emite luz na superfície da amostra, geralmente com aspecto polido, essa luz incide para ocular do microscópio, permitindo a visualização da microestrutura, inclusões, tamanho de grão, precipitados e fases. A figura a seguir ilustra o microscópio ótico com ampliação de até 1000X de aumento.



Figura 33 – Microscópio ótico *Carl Zeiss Axioplan* (USIMINAS, 2015).

5.1.2. Análise via Microscopia eletrônica de varredura

É uma técnica atual para investigação microestrutural com ampliação de até 50.000X de aumento. A técnica consiste em emitir o feixe de elétrons sobre a

superfície da amostra no qual é refletido formando a imagem que é visualizada por meio de telas. A técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) permite realizar, morfologia, associação de presença de fases e composição química. A figura XX ilustra o microscópio eletrônico de varredura (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

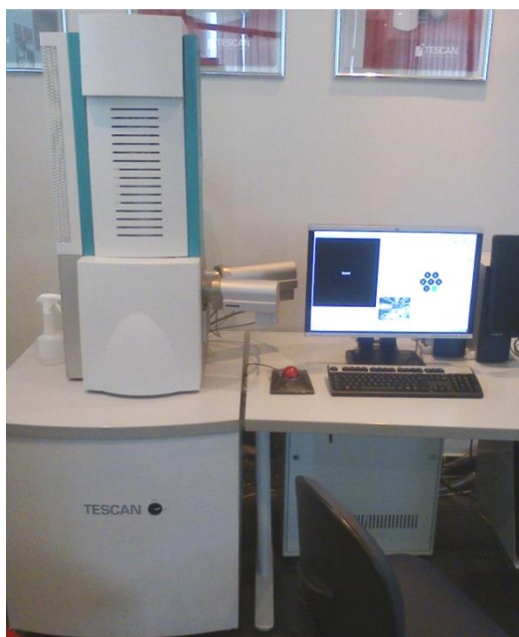


Figura 34 – MEV Tescan (SHIMADZU, 2015).

5.2. Controle de temperatura

O calor é o principal fator para se obter uma soldagem com qualidade, mas se não utilizado com cautela pode causar influência direta na transformação de fases metalúrgicas e fenômenos mecânicos na solda.

Durante o processo de soldagem ocorrem ciclos térmicos, em um mesmo ponto, que variam de acordo com o tempo e da distância entre o ponto estudado e a fonte de calor. Essa variação de temperatura, se não controlada, pode gerar tensões residuais não desejadas.

Então, é necessário conhecer os picos de temperatura e velocidades de resfriamento em que o material está exposto, já que essas variáveis têm influência direta na estrutura final da soldagem. A temperatura inicial da peça (pré-aquecimento) e a velocidade de avanço da fonte de calor (eletrodo) são fatores essenciais para controle da velocidade de resfriamento do material soldado.

A utilização de um aquecimento após a soldagem (pós-aquecimento) é importante para aliviar as tensões residuais internas e auxiliar na remoção do hidrogênio que possa estar na solda (WAINER, BRANDI, DE MELLO, 2004).

5.2.1. Pré-Aquecimento

O pré-aquecimento é aplicação de calor antes da soldagem, brasagem ou corte. A temperatura depende de diversos fatores, como a composição química e espessura do metal de base, a temperatura ambiente e o processo de soldagem.

O pré aquecimento é utilizado para (ASM, 1993):

- Reduzir a tensão gerada pela contração da solda e do metal de base adjacente, o que é importante para juntas com alto grau de restrição;
- Proporcionar uma baixa taxa de resfriamento durante a passagem pelas temperaturas críticas (aproximadamente entre 720 e 879°C), o que previne uma dureza excessiva e baixos valores de ductilidade na solda, na zona afetada pelo calor e no metal de base;
- Proporcionar uma baixa taxa de resfriamento até 205°C, permitindo maior tempo para a difusão do hidrogênio na solda e nas partes adjacentes, evitando a trinca a frio.

5.2.2. Temperatura entre passes

A temperatura entre passes está envolvida na soldagem de matérias na qual são realizados mais que um passe de solda. É representado pelo a mínima e a máxima temperatura no metal de solda depositado e no metal de base adjacente antes de iniciar o próximo passe.

Usualmente, um aço que requer pré-aquecimento para determinada temperatura, também deverá manter essa mesma temperatura entre os passes de solda. Em muitas soldagens, o aporte térmico, calor inserido no material durante o processo de soldagem, é suficiente para manter a temperatura entre passes. Mas na maioria dos casos, é provável que o aporte térmico não seja suficiente para

alcançar a temperatura entre passes requerida. Neste caso, um aquecimento pode ser requerido.

Uma vez que os componentes tenham sido pré-aquecidos e a soldagem tenha iniciado, é desejado concluir a soldagem o quanto antes, a fim de evitar a necessidade de um aquecimento entre os passes.

Como dito anteriormente, a proposta do pré-aquecimento é reduzir a taxa de resfriamento, e a mesma lógica é seguida para todos os passes. Isso só pode ser alcançado mantendo uma temperatura entre passes no mínimo igual à temperatura de pré-aquecimento.

A temperatura mínima requerida, baseada na especificação do aço, no processo de soldagem e na espessura do material deve ser considerada. Quando o acúmulo de calor se torna excessivo, deve ser permitido o resfriamento da solda, mas não abaixo da temperatura mínima de pré-aquecimento. A temperatura da área sendo soldada deve ser mantida entre a temperatura mínima e máxima requerida entre passes (ASM, 1993).

5.2.3. Pós-aquecimento

O pós-aquecimento é geralmente considerado necessário para soldas em peças espessas, a fim de reduzir as tensões residuais, melhorar a dureza e diminuir as deformações das juntas. Muitas normas de fabricação oferecem parâmetros para o tempo e a temperatura de pós aquecimento, contudo algumas divergências entre as várias normas existem.

A máxima temperatura é relacionada à composição química do aço, o tempo de aquecimento (na máxima temperatura) é relacionada à espessura do material e a taxa de resfriamento é relacionada a particularidade de cada tratamento e da norma utilizada (ASM, 1993).

5.3. Controle de deformação

A deformação é um dos maiores problemas enfrentado na fabricação de estruturas e equipamentos soldados. Os equipamentos, estruturas são projetados para serviços, dimensões e tolerâncias específicas. Caso a deformação não seja controlada, as dimensões requeridas podem não ser obtidas, podendo gerar problemas no produto ou no processo no qual será utilizado.

Vários fatores influenciam na deformação durante a soldagem, e, dentre eles, o aquecimento não uniforme da junta soldada pelo arco ou chama é o mais importante.

Nas juntas soldadas, forças de contração e dilatação atuam no metal de base e na zona fundida. Quando o metal de adição se funde com o metal de base, ele está no seu estado de máxima expansão. No resfriamento, o metal de solda tende a contrair, mas como ele está ligado ao metal de base, esta contração fica restrita.

Se o esforço de contração for suficiente para “puxar” todo o material de base, ocorrerá uma grande deformação (FBTS, 2013).

5.3.1. Os principais fatores que influenciam na deformação

Os principais fatores que influenciam na deformação são os seguintes:

- Energia de soldagem;
- Grau de restrição;
- Tensões internas ou tensões residuais;
- Propriedades dos materiais.

5.3.2. Energia de soldagem

Se duas chapas fossem aquecidas de maneira uniforme e com total liberdade de movimento, ao resfriar, também uniformemente, elas retornariam à sua forma original. Porém, a soldagem realiza um aquecimento localizado, e o resfriamento é desigual entre o metal de solda e o metal de base.

As áreas um pouco mais distantes das adjacentes à área de soldagem recebem uma quantidade de calor relativamente baixa quando comparado à área

de soldagem. Esta diferença causa expansões não uniformes, gerando movimentação no metal de base ou deformações, caso as peças não estejam devidamente “travadas”.

Uma vez que a poça de fusão avança, o metal de solda resfria e se contrai igualmente o que ocorre com o metal de base. Se o metal ao redor da poça restringe a contração, tensões internas ou tensões residuais se desenvolvem.

Em suma, para minimizar a deformação resultante da energia de soldagem, devemos utilizar a menor energia de soldagem possível (FBTS, 2013).

5.3.3. Grau de restrição

Durante a contração do metal de solda e do metal de base, eles buscam o alívio das tensões na deformação. Ao restringir essas deformações utilizando acessórios, o nível de tensão interna aumenta e, no caso de grandes espessuras, o surgimento de trincas pode ser inevitável.

5.3.4. Tensões internas ou tensões residuais

As tensões internas ou tensões residuais estão presentes nos componentes de uma estrutura, mesmo antes de sua fabricação. Durante a soldagem, o calor gerado tende a aliviar estas tensões, mas durante o resfriamento estas tensões retornam. Quando as tensões do material se opõem à deformação causada pela soldagem, reduz a deformação resultante. Caso contrário, se as deformações geradas pelas tensões se somarem com a deformação causada pela soldagem, o que será visto é uma grande deformação nesta peça.

É difícil quantificar como as secções irão reagir à energia de soldagem, já que as tensões internas ou residuais são desconhecidas (FBTS, 2013).

5.3.5. Propriedades dos materiais

Cada material expande em quantidades diferentes quando aquecidos. É importante conhecer o coeficiente de dilatação de cada material, pois quanto maior for este coeficiente, maior deverá ser a deformação deste.

A condutividade térmica é outro fator importante a ser conhecido. A condutividade térmica é a capacidade de dissipar calor através de um material. Logo, quando soldado materiais de baixa condutividade térmica tem-se uma menor zona de transição de temperatura entre o metal de solda e o metal de base, o que gera o aumento dos efeitos de contração na solda e áreas adjacentes.

Tabela 12 - Propriedades de Metais Típicos (FBTS, 2013).

METAL	COEF. DE DILATAÇÃO TÉRMICA (micro pol./pol./ °F)	CONDUTIVIDADE (cal/cm ² /cm/°C)
Aço Carbono	7	0,12
Aço Inoxidável	10	0,04
Ligas de Alum.	12	0,50
Ligas de Cobre	9	0,90

Analizando a tabela mostrada anteriormente, podemos notar que o coeficiente de dilatação do aço inoxidável é maior que o do aço carbono, e a condutividade térmica do aço inoxidável é apenas um terço da do aço carbono. Isso nos permite prever que soldar um aço inoxidável gerará deformações maiores quando comparado à soldagem de um aço carbono (FBTS, 2013).

5.3.6. Prevenção e controle da deformação

Para prevenir deformações indesejáveis na peça, deve-se pensar em medidas desde o projeto até a montagem final. Algumas destas medidas são (FBTS, 2013):

- Evitar soldagem excessiva;
- Usar chanfros duplos, quando possível;
- Efetuar soldas intermitentes;
- Utilizar o menor número de passes possíveis;
- Soldar próximo à linha neutra;
- Balancear as soldas em torno da linha neutra;
- Utilizar soldagem com passe a ré;

- Empregar gabaritos e dispositivos auxiliares de fixação e montagem;
- Planejar sequência de soldagem;
- Minimizar o tempo de soldagem;
- Planejar a sequência de montagem dos equipamentos e estruturas.

5.4. Descontinuidades em juntas soldadas

Segundo a norma PETROBRÁS N-1738, descontinuidade é a interrupção das estruturas típicas de uma peça, no que se refere à homogeneidade de características físicas, mecânicas ou metalúrgicas. Não é necessariamente um defeito. A descontinuidade só deve ser considerada defeito, quando, por sua natureza, dimensões ou efeito acumulado tornar a peça inaceitável por não satisfazer os requisitos mínimos da norma técnica aplicável.

5.4.1. Tipos de descontinuidades

Abertura de arco: Imperfeição local na superfície do metal de base resultante da abertura do arco elétrico.

Ângulo excessivo de reforço: Ângulo excessivo entre o plano da superfície do metal de base e o plano tangente ao reforço de solda, traçado a partir da margem da solda.

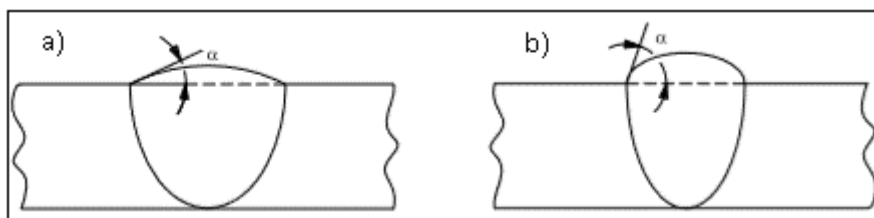


Figura 35 – Ângulo excessivo de reforço. A) ângulo normal; b) ângulo excessivo (N-1738, 2009)

Cavidade alongada: Vazio não arredondado com a maior dimensão paralela ao eixo da solda.

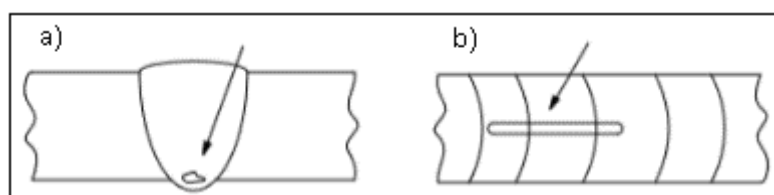


Figura 36 – Cavidade alongada. A) na raiz da solda; b) na solda (N-1738, 2009).

Concavidade: Reentrância na raiz da solda.

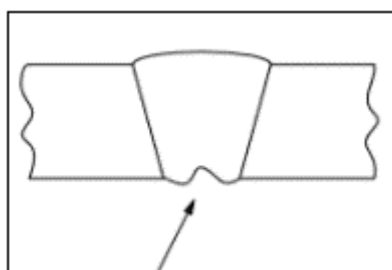


Figura 37 – Concavidade (N-1738, 2009).

Concavidade excessiva: Solda em ângulo com a face excessivamente côncava.

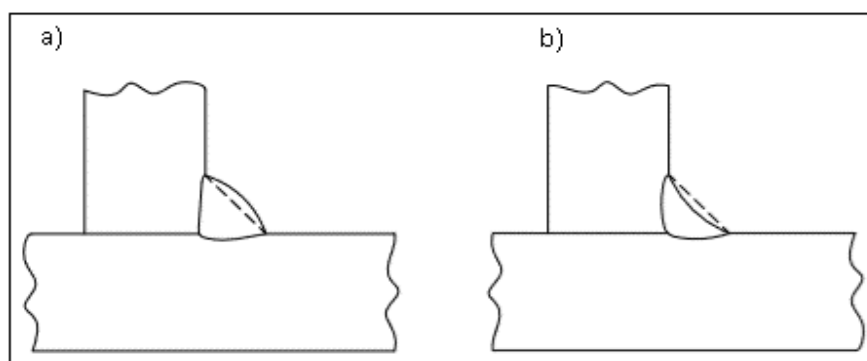


Figura 38 – Concavidade excessiva. A) perfil adequado; b) concavidade excessiva (N-1738, 2009).

Convexidade excessiva: Solda em ângulo com a face excessivamente convexa.

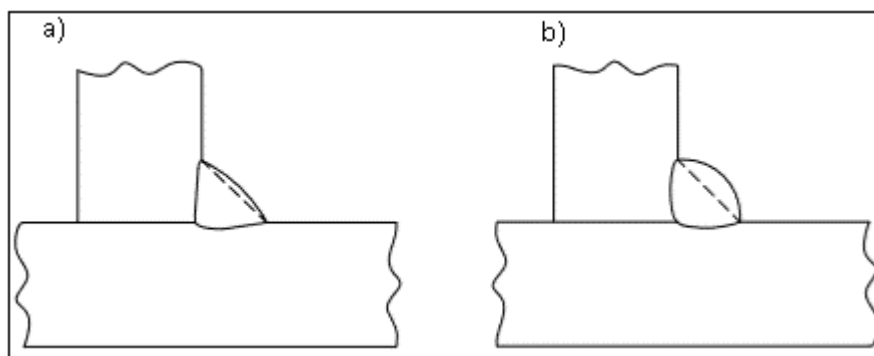


Figura 39 – Convexidade excessiva. A) perfil adequado; b) convexidade excessiva (N-1738, 2009).

Deformação angular: Distorção angular da junta soldada em relação à configuração de projeto, exceto para junta soldada de topo.

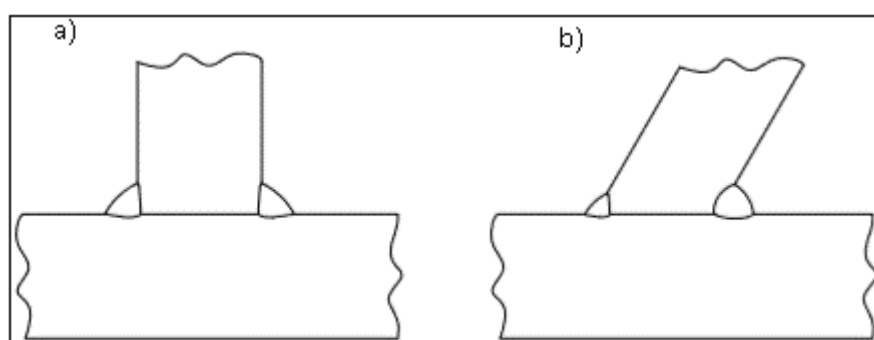


Figura 40 – Deformação angular. A) normal; b) excessiva (N-1738, 2009).

Deformação linear e desalinhamento: Junta soldada de topo, cujas superfícies das peças, embora com orientações paralelas, apresentam-se desalinhadas, excedendo à configuração de projeto.

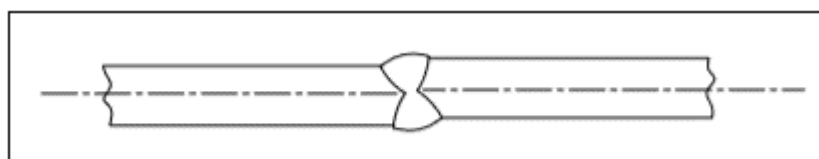


Figura 41 – Deformação linear ou desalinhamento (N-1738, 2009).

Deposição insuficiente: Insuficiência de metal na face da solda.

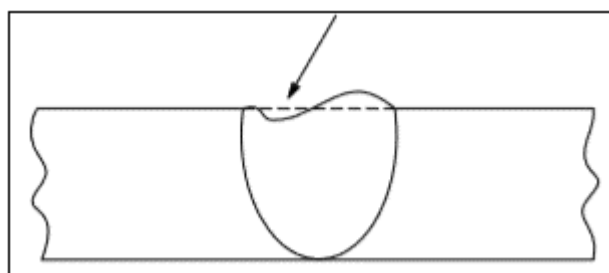


Figura 42 – Deposição insuficiente (N-1738, 2009).

Embicamento: Deformação angular de junta soldada de topo.

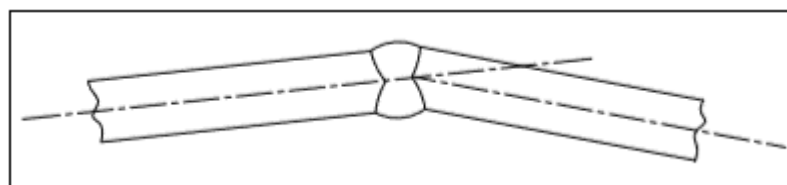


Figura 43 – Embicamento (N-1738, 2009).

Falta de fusão: Fusão incompleta entre a zona fundida e o metal de base ou entre passes da zona fundida.

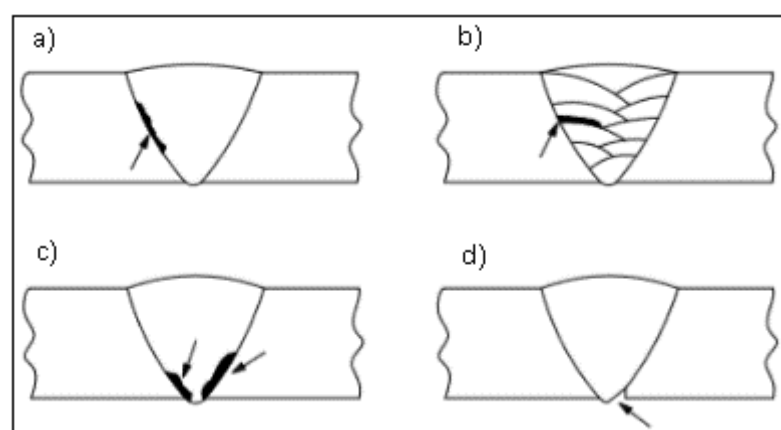


Figura 44 – Falta de fusão. A) na zona de ligação; b) entre os passes; c) e d) na raiz da solda. (N-1738, 2009).

Falta de penetração: Insuficiência de metal na raiz da solda.

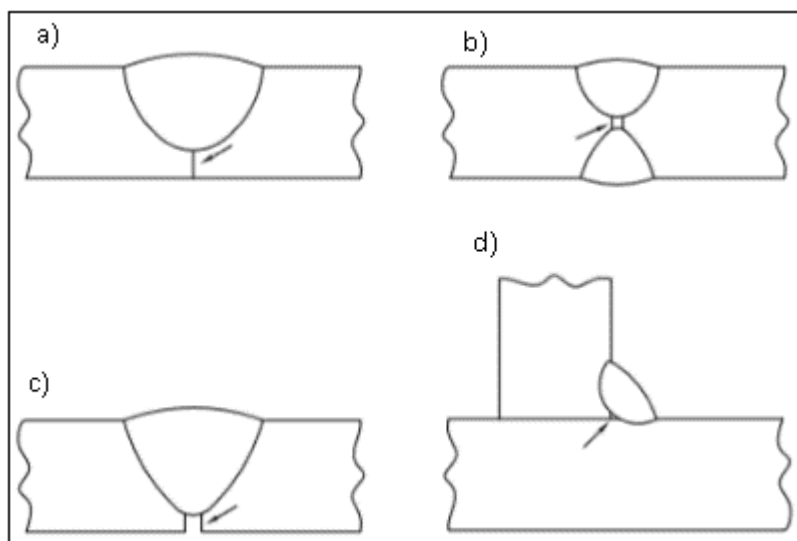


Figura 45 – Falta de Penetração. A) em junta de topo sem abertura de raiz; b) em junta de topo com abertura de raiz e com soldagem em ambos os lados; c) em junta de topo com abertura de raiz; d) em junta em ângulo (N-1738, 2009).

Fissura: Ver termo preferencial: trinca (ver os termos definindo trinca).

Inclusão de escória: Material não metálico retido na zona fundida, podendo ser:

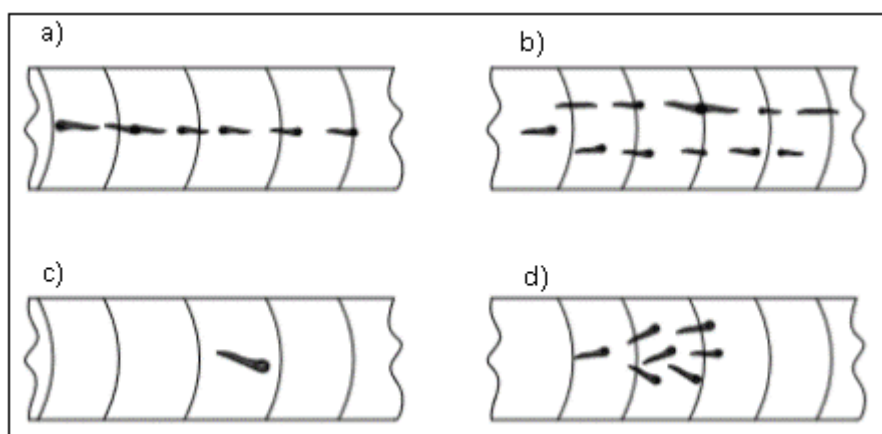


Figura 46 – Inclusão de escória. A) e b) alinhada; c) isolada; d) agrupada (N-1738, 2009).

Inclusão metálica: Metal estranho retido na zona fundida.

Micro-trinca: Trinca com dimensões microscópicas.

Mordedura: Depressão sob a forma de entalhe, no metal de base acompanhando a margem da solda.

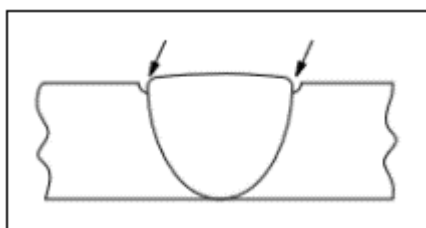


Figura 47 – Mordedura (N-1738, 2009).

Mordedura na raiz: Mordedura localizada na margem da raiz da solda.

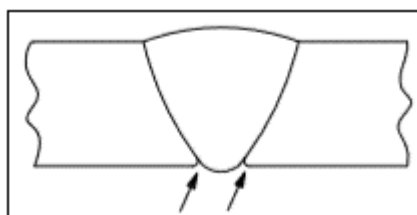


Figura 48 – Mordedura na raiz (N-1738, 2009).

Passe oco: Porosidade linear e alongada que ocorre no passe de raiz.

Penetração excessiva: Metal da zona fundida em excesso na raiz da solda.

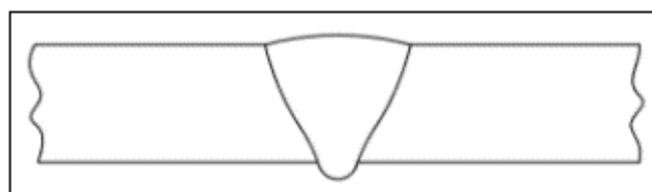


Figura 49 – Penetração excessiva (N-1738, 2009).

Perfuração: Furo na solda ou penetração excessiva localizada, resultante da perfuração do banho de fusão durante a soldagem.

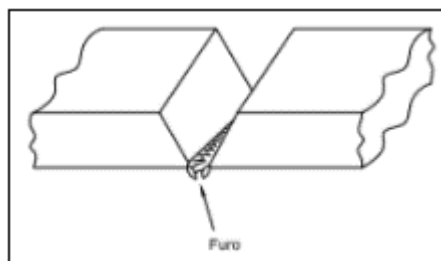


Figura 50 – Perfuração (N-1738, 2009).

Poro: Vazio arredondado, isolado e interno à solda.

Poro superficial: Poro que emerge a superfície da solda.

Porosidade: Conjunto de poros distribuídos de maneira uniforme, entretanto não alinhado.

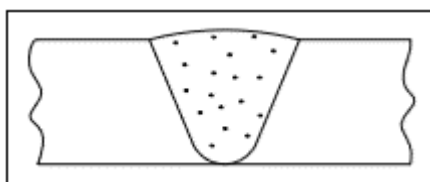


Figura 51 – Porosidade (N-1738, 2009).

Porosidade agrupada: Conjunto de poros agrupados.

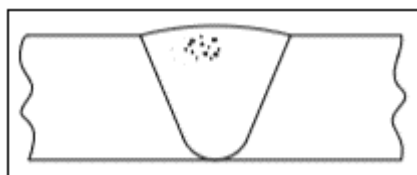


Figura 52 – Porosidade agrupada (N-1738, 2009).

Porosidade alinhada: Conjunto de poros dispostos em linha, segundo uma direção paralela ao eixo longitudinal da solda.

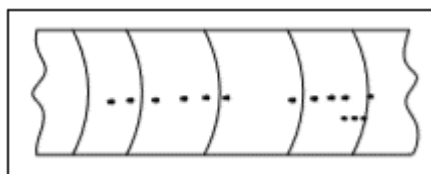


Figura 53 – Porosidade alinhada (N-1738, 2009).

Porosidade vermiforme: Conjunto de poros alongados ou em forma de espinha de peixe situados na zona fundida.

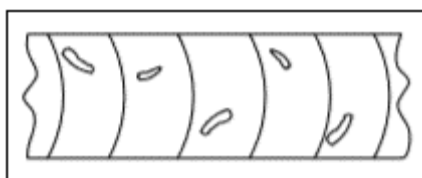


Figura 54 – Porosidade vermiforme (N-1738, 2009).

Rechupe de cratera: Falta de metal resultante da contração da zona fundida, localizada na cratera do cordão de solda.

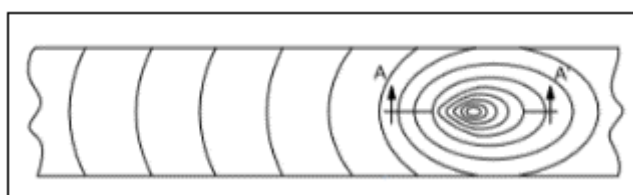


Figura 55 – Rechupe de cratera (N-1738, 2009).

Rechupe interdendrítico: Vazio alongado situado entre dendritas da zona fundida.

Respingos: Glóbulos de metal de adição transferidos durante a soldagem e aderidos à superfície do metal de base ou à zona fundida já solidificada.

Sobreposição: Excesso de metal da zona fundida sobreposto ao metal de base na margem da solda, sem estar fundido ao metal de base.

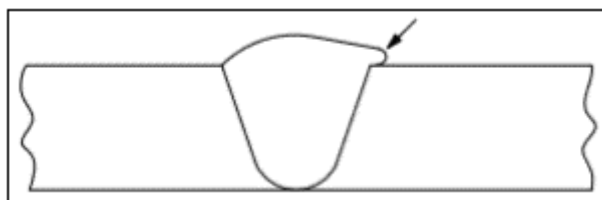


Figura 56 – Sobreposição (N-1738, 2009).

Solda em ângulo assimétrica: Solda em ângulo, cujas pernas são significativamente desiguais em desacordo com a configuração de projeto.

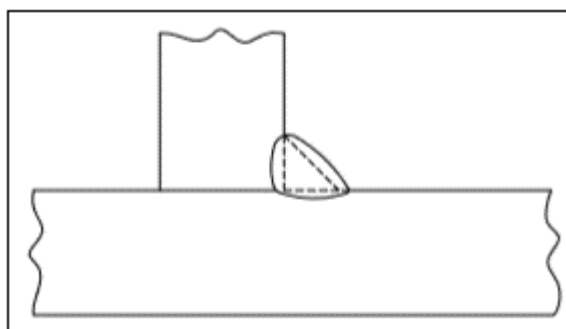


Figura 57 – Solda em ângulo assimétrica (N-1738, 2009).

Trinca: Descontinuidade bidimensional produzida pela ruptura local do material.

Trinca de cratera: Trinca localizada na cratera do cordão de solda.

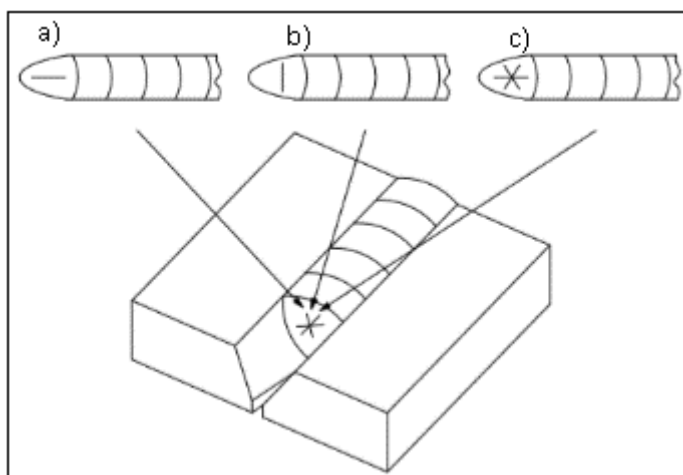


Figura 58 – Trinca de cratera. A) longitudinal; b) transversal; c) em estrela (N-1738, 2009).

Trinca em estrela: Trinca irradiante de tamanho inferior à largura de um passe da solda considerada (ver **trinca irradiante**).

Trinca interlamelar: Trinca em forma de degraus, situados em planos paralelos à direção de laminação, localizada no metal de base, próxima à zona fundida.

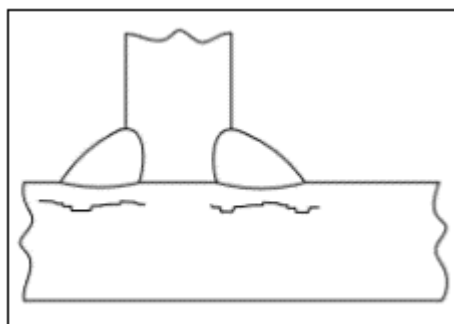


Figura 59 – Trinca interlamelar (N-1738, 2009).

Trinca irradiante: Conjunto de trincas que partem de um mesmo ponto.

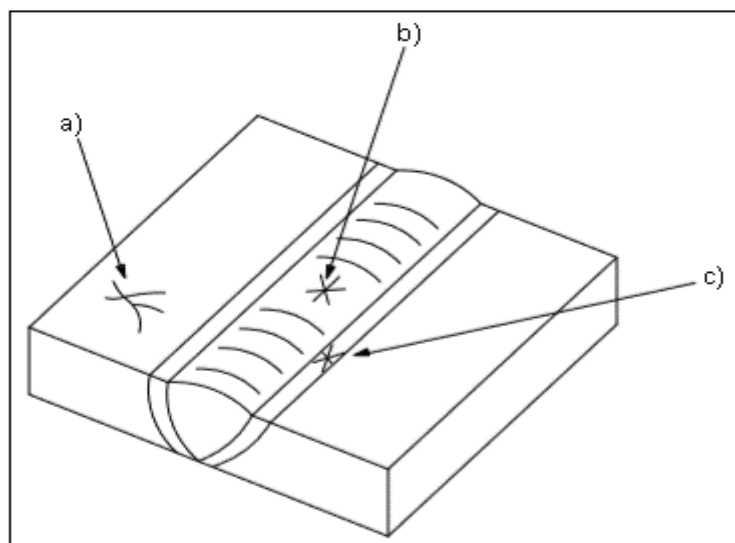


Figura 60 – Trinca irradiante. A) na zona fundida; b) na zona afetada termicamente; c) no metal de base (N-1738, 2009).

Trinca longitudinal: Trinca com direção aproximadamente paralela ao eixo longitudinal do cordão de solda, podendo estar localizada:

- a) na zona fundida;
- b) na zona de ligação;
- c) na zona afetada termicamente;
- d) no metal de base.

Trinca na margem: Trinca que se inicia na margem da solda, localizada geralmente na zona afetada termicamente.

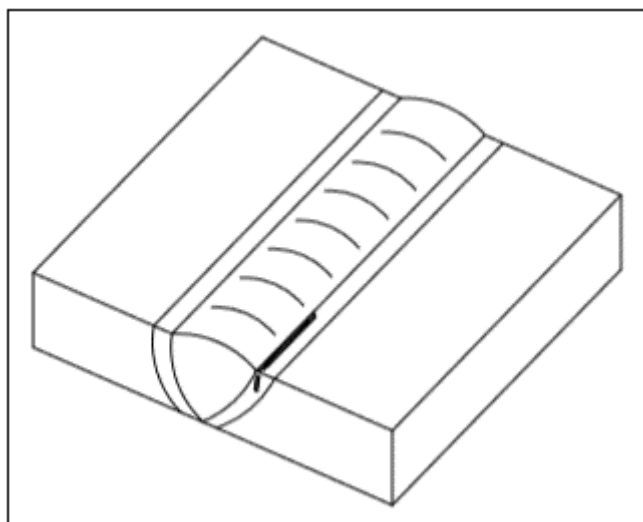


Figura 61 – Trinca na margem (N-1738, 2009).

Trinca na raiz: Trinca que se inicia na raiz da solda.

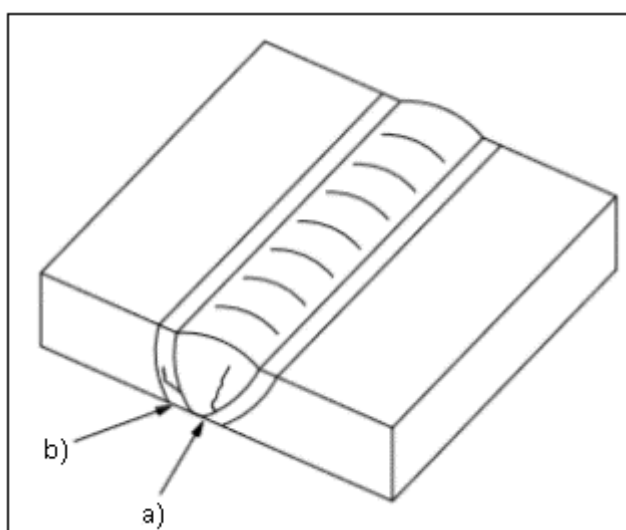


Figura 62 – Trinca na raiz. A) na zona fundida; b) na zona afetada termicamente (N-1738, 2009).

Trinca ramificada: Conjunto de trincas que partem de uma trinca.

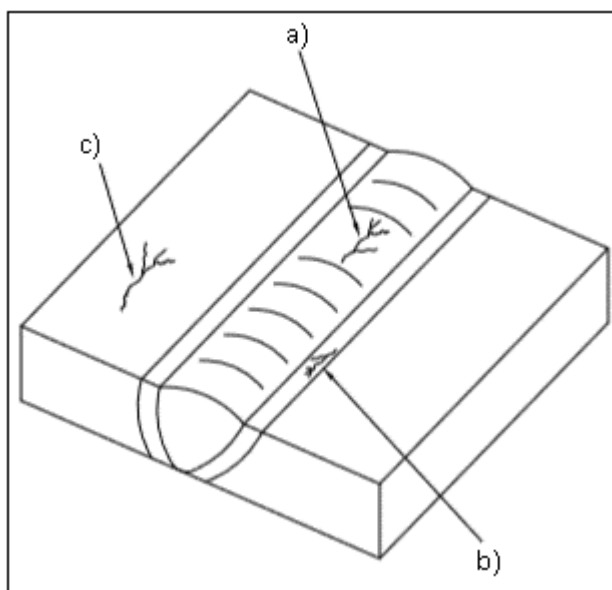


Figura 63 – Trinca ramificada. A) na zona fundida; b) na zona afetada termicamente; c) no metal de base (N-1738, 2009).

Trinca sob cordão: Trinca localizada na zona afetada termicamente não se estendendo à superfície da peça.

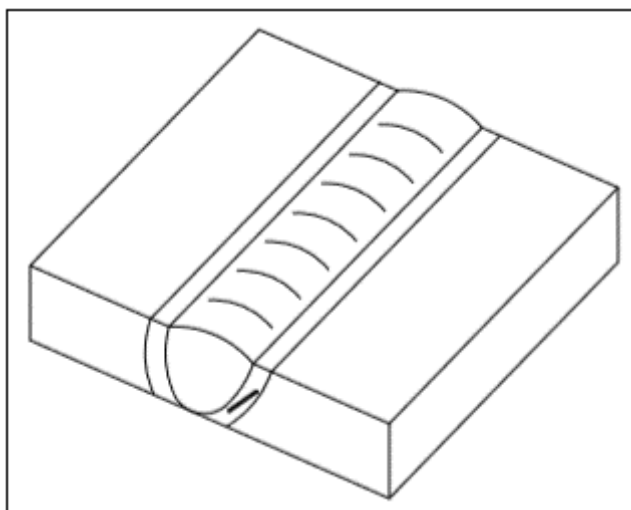


Figura 64 – Trinca sob cordão (N-1738, 2009).

Trinca transversal: Trinca com direção aproximadamente perpendicular ao eixo longitudinal do cordão de solda, podendo estar localizada:

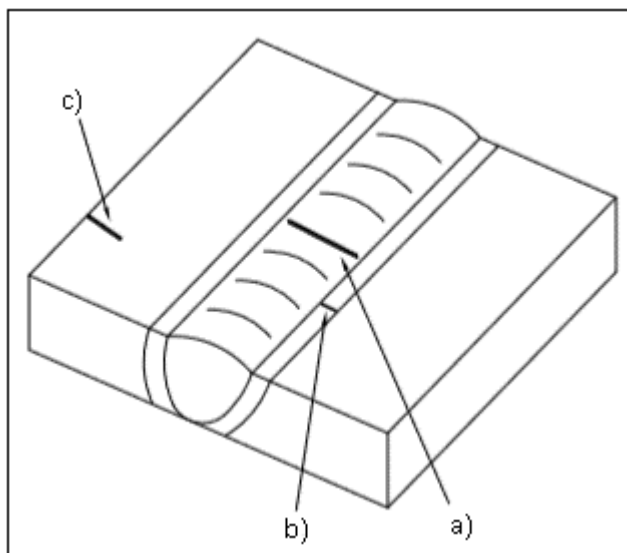


Figura 65 – Trinca transversal. A) na zona fundida; b) na zona afetada termicamente; c) no metal de base (N-1738, 2009).

5.5. Ensaios mecânicos em juntas soldadas

5.5.1. Tração

O ensaio de tração consiste em submeter um material a esforços em sua direção axial que tende a estica-lo ou alonga-lo. Geralmente, o ensaio é realizado num corpo de prova de forma e dimensões padronizadas, para que os resultados possam ser comparados ou se necessário reproduzidos.

Para aplicação dos esforços, a amostra é fixada numa máquina de ensaio que por intermédio de um extensômetro realiza os registros das medidas de deformações que ocorrem na peça. Com este tipo de ensaio, pode-se afirmar que as deformações são promovidas no material uniformemente distribuída em todo seu corpo, pelo menos até ser atingida uma carga máxima próxima do final do ensaio. Neste ensaio é possível fazer com que a carga aplicada na peça cresça numa velocidade razoavelmente lenta no decorrer do teste, assim o ensaio de tração permite medir satisfatoriamente a resistência do material.

O objetivo deste ensaio em juntas soldadas é verificar em qual local ocorrerá à iniciação da falha. Deseja-se que a solda possua uma maior resistência mecânica que o material de base. Assim, o resultado esperado neste ensaio é que a falha não inicie na área soldada (SOUZA, 1982).

5.5.2. Dobramento

É uma operação de conformação plástica para avaliação de vários produtos tais como chapas, barras, tubos ou arames e juntas soldadas.

Esse processo fornece indicações qualitativas da ductilidade dos materiais, informações sobre propriedades de rigidez e resistência em flexão, porém em ensaios de dobramento comum não determina valores numéricos.

De um modo geral, o ensaio relaciona a dobragem de um corpo de prova colocado em dois apoios com uma distância estabelecida, de acordo com o tamanho do corpo de prova. Uma força é aplicada (esta força não precisa ter valor estimado) num ponto de comprimento qualquer do corpo através de um cutelo até atingir um ângulo α desejado. O diâmetro do cutelo pode variar de acordo com a necessidade de severidade do ensaio (quanto menor o diâmetro do cutelo, mais severo o ensaio), podendo ser atingido 90°, 120° e 180° de ângulo no ensaio.

O exame pós-processo de dobramento é feito a olho nu, na procura de trincas, fissuras ou fendas e alongamento de fibras na parte convexa do corpo de prova (SOUZA, 1982).

Como citados os ensaios em vários tipos de produtos, dois deles são:

- Dobramento em juntas soldadas, muito importante geralmente para avaliação da ductilidade do cordão de solda executado e qualificação de soldadores;
- Dobramento de tubos e/ou barras, onde se faz ensaios de solicitação de dobramento até o ângulo de 180° e prensagem, como resultados não deve ter fissuras e fendas na zona tracionada do corpo de prova. Deve-se minimizar a ovalização do tubo durante o ensaio.

São considerados reprovados os corpos de provas que apresentarem trincas ou fissuras com comprimento superior a 3 mm (ASME IX, 2015).

5.5.3. Charpy

O ensaio mecânico *Charpy* é um ensaio de impacto em metais, para verificação de sua resistência mecânica e da energia absorvida para romper um corpo de prova, servindo assim para controle de qualidade de materiais.

Existem tipos de corpo de prova este ensaio *Charpy* conforme figura mostrada a seguir.

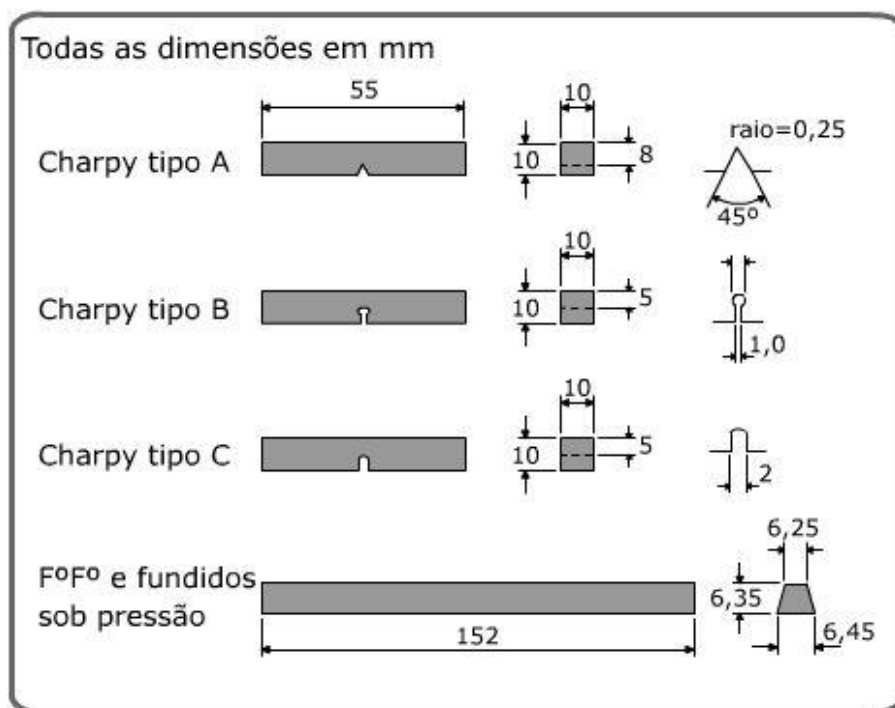


Figura 66 – Corpos de provas *Charpy* recomendados pela ASTM e ABNT para ensaio de impacto (ASTM 1978 *apud* SOUZA, 1982, p. 84).

Segundo Souza (1982, p. 86) este corpo de prova é apoiado numa máquina de ensaio de impacto, na qual a um martelo montado na extremidade de um pêndulo. É largado à energia cinética para atingir o chanfro determinado do corpo de prova. Este impacto rompe o material entalhado, mas devido à energia cinética do martelo e ele continua seu trajeto ganhando assim uma altura que é inversamente proporcional à energia absorvida para deformar e romper o corpo de prova. Só é válido o ensaio quando há separação total das partes rompidas do corpo de prova.

No ensaio de impacto a massa do martelo e aceleração da gravidade são conhecidas, altura inicial também é conhecida, a única variável desconhecida é altura que é obtida pelo ensaio.

O mostrador da máquina simplesmente registrar a diferença entre altura inicial e a altura final, após o rompimento do corpo de prova, numa escala relacionada com a unidade de medida de energia adotada (SOUZA, 1982).

5.5.4. Micrografia

Ensaio micrográfico ou micrografia consiste em estudos e análise de materiais metálicos, utilizando microscópios ópticos. Tamanho de grão, teores de carbono aproximadamente, fases presentes, microconstituintes (austenita, ferrita, cementita, etc) e defeitos, são as observações que podem ser feitas neste tipo de ensaio mecânico.

Existe uma sequência correta nesse processo que deve ser seguido cuidadosamente para que as análises dos corpos de prova não sejam mascaradas e não permitam conclusões devidamente imprecisas (ROHDE, 2010).

5.5.4.1. Preparação do corpo de prova (amostra)

A amostra escolhida não deve sofrer qualquer modificação em sua estrutura, portanto deve-se evitar um aquecimento demasiado, deformações plásticas no material ou formação de novos grãos por recristalização (ROHDE, 2010).

5.5.4.2. Seção a ser estudada

Deve-se escolher o tipo de corte a ser feito na amostra para verificar a seção de estudo. Quando é escolhido um corte longitudinal, se pode observar se a peça é fundida, forjada ou laminada, se foi torneada ou estampada, verificar extensão de tratamentos térmicos superficiais e solda de barras. Para um corte transversal, verifica-se a natureza do material, homogeneidade, formas e dimensões das dendritas e profundidades de têmperas (ROHDE, 2010).

5.5.4.3. Embutimento do corpo de prova

Para a facilidade do manuseio da amostra, principalmente em peças com dimensões relativamente pequenas, já que a superfície que será analisada não pode sofrer contaminações durante o processo (ROHDE, 2010).

5.5.4.4. Lixamento

A superfície da amostra deve ser ideal para ser feita uma análise de boa qualidade. Essa etapa do processo objetiva a eliminação de riscos e marcas profundas, dando um acabamento a esta superfície. A técnica consiste em sequências de lixamentos de maior grana para a menor, mudando em 90° a direção da seção para que as imperfeições saiam gradativamente (ROHDE, 2010).

5.5.4.5. Polimento

Consiste na obtenção de uma superfície isenta de risco, do modo a se obter uma imagem clara ao microscópio. Para isto, inicia-se por polir a amostra com material de granulação cada vez menor. A limpeza pode ser feita simplesmente por lavagem com água, porém, aconselha-se usar líquidos de baixo ponto de ebulição como o álcool (ROHDE, 2010).

5.5.4.6. Ataque químico

Quando uma superfície polida é submetida uniformemente à ação de um reativo, acontece em algumas ocasiões que certas regiões são atacadas (corroídas) com maior intensidade do que outras. Essa diferença de “atacabilidade” provém habitualmente de duas causas principais, diversidades de composição químicas ou de estrutura cristalina. Existem vários tipos e reagentes para o ataque químico, exemplos os ácidos clorídricos e ácidos nítricos (Nital).

Após esses processos, leva-se o corpo de prova para um microscópio e é feita as análises e devidas conclusões (ROHDE, 2010).

5.5.5. Macrografia

A macrografia consiste em analisar uma amostra metálica, segundo uma seção plana polida, em geral a peça é atacada por um reativo apropriado. O aspecto obtido chama-se macroestrutura. A análise realizada é feita a vista desarmada ou com o auxílio de uma lupa.

A macrografia é empregada para designar os documentos que reproduzem a macroestrutura em tamanho real ou com ampliação de 10 vezes. Para maiores ampliações emprega-se o termo de micrografia que são obtidos através da utilização de microscópio

Para ser feito a avaliação do corpo de prova, a área a ser estudada precisa ser localizada, a superfície plana deve ser devidamente polida e realizado ataque na superfície escolhida, por um reagente químico adequado.

A análise das características macroestruturais para as quais o corte em seção transversal é o preferido como:

- Verificação da homogeneidade do material ao longo de sua seção;
- Caracterização da forma e intensidade da segregação;
- Avaliação da posição, forma e dimensões de eventuais porosidades e trincas;
- Caracterização de dendritas;
- Verificação da existência de restos de vazios ou rechupe;
- Verificação da profundidade da têmpera;
- Verificação de se tubos são “sem costura” ou produzidos por solda ou caldeamento;
- Avaliação da extensão da zona termicamente afetada, zona de fusão etc. em juntas soldadas (macrografia transversal à solda).

Para obter-se a superfície adequada para a avaliação do corpo de prova segue essas duas etapas:

- 1) Corte ou desbaste: O corte normalmente é feito com serra ou com cortador de disco abrasivo e em seguida localização da superfície a examinar.

Quando esses meios não são viáveis, recorresse ao desbaste por usinagem ou com esmeril, até atingir a região de interesse para estudo.

- 2) Polimento: O polimento é geralmente feito atritando a superfície a ser polida sobre a lixa, quando a peça tem grandes dimensões ela pode ser presa por uma morsa (COLPAERT, 2008).

5.5.6. Dureza

O ensaio de dureza pode-se dividir em três tipos principais, que dependem da maneira com que o ensaio é conduzido, sendo eles, 1) por penetração; 2) por risco; 3) por choque. O segundo tipo é raramente usado para os materiais metálicos (SOUZA, 1982).

5.5.6.1. Dureza *Brinell* (HB)

O ensaio de dureza *Brinell* consiste em comprimir lentamente uma esfera de aço, sobre a superfície plana, polida e limpa de um material através de uma carga, durante um tempo.

O diâmetro da impressão é a média de duas leituras tomadas em ângulo reto. O uso de uma tabela de Número de Dureza *Brinell* (HB) pode simplificar a determinação da dureza.

Este método é o melhor para a medição da dureza de um material, especialmente para materiais com estruturas heterogêneas (SOUZA, 1982).

5.5.6.2. Dureza *Rockwell* (HR)

A dureza *Rockwell*, elimina o tempo necessário para a medição de qualquer dimensão da impressão causada, pois o resultado é lido diretamente e automaticamente na máquina de ensaio. Sendo assim um ensaio mais rápido e livre de erros pessoais.

Muito utilizado para linhas de produção por se tratar de um ensaio rápido.

O ensaio é baseado na profundidade de penetração de uma ponta, subtraída da recuperação elástica devida à retirada de uma carga maior e da profundidade causada pela aplicação de uma carga menor (SOUZA, 1982).

5.5.6.3. Dureza *Vickers*

Para este ensaio é usado como penetrador uma pirâmide de diamante de base quadrada, com um ângulo de 136° entre as faces opostas. Esse ângulo produz valores de impressões semelhantes à dureza *Brinell*.

As principais vantagens deste método são: 1) grande precisão de medida; 2) deformação nula do penetrador; 3) existência de apenas uma escala de dureza; 3) aplicação em qualquer espessura de material;

O ensaio é, porém, o mais demorado e exige uma preparação cuidadosa do material a ser ensaiado. Utiliza-se muito para pesquisas, estudo e mais especificamente para determinação de profundidade de têmpera nos aços (SOUZA, 1982).

5.5.6.4. Dureza por choque e dureza *Shore*

A dureza por choque é um ensaio dinâmico que produz a impressão num corpo de prova por meio de um penetrador que bate na superfície plana. Este choque é produzido por queda livre de um êmbolo, tendo na ponta o penetrador.

A dureza *Shore* foi introduzida para ensaios em aços endurecidos, onde o método *Brinell* não podia ser usado por danificar a esfera penetradora. Este método utiliza um martelo de aço em forma de uma barra com uma ponta arredondada de diamante, que cai de certa altura dentro de um tubo de vidro graduado de 0 a 140. A altura de ressalto após o choque é tomado como a dureza do material (SOUZA, 1982).

5.5.7. Análise química

Durante o processo de soldagem, além das transformações metalúrgicas podem ocorrer também mudanças químicas no material soldado. Logo, ao soldar

ligas especiais, como os aços inoxidáveis duplex, é necessário verificar se após a execução da soldagem a composição química do material se manteve.

Para analisar os materiais as técnicas mais utilizadas são:

- Espectometria de emissão ótica;
- Absorção atômica;
- Combustão direta;
- Fluorescência por Raios-X.

5.5.8. Ultrassom

O ensaio por ultrassom é um método não destrutivo que tem como objetivo detectar descontinuidades internas no material seja ele ferroso ou não ferroso. Assim, aumentando, ou diminuindo, o grau de confiabilidade do material a ser utilizado (ANDREUCCI, 2014).

5.5.8.1. Princípios do ensaio

Este método consiste na emissão de ondas mecânicas geradas a partir de um cristal piezelétrico conectado à uma fonte de energia. Os cristais piezelétricos têm a propriedade de, quando excitado por energia elétrica, transformar essa energia elétrica em ondas mecânica. O inverso também é verdadeiro, ou seja, se aplicarmos uma onda mecânica no cristal piezelétrico, no lado oposto teremos uma carga elétrica.

Estes cristais são instalados no que chamamos de transdutores, ou cabeçotes. São eles os responsáveis pela geração de ondas e pela transformação da mesma em sinais elétricos enviados para o aparelho de ultrassom.



Figura 67 – Contração e expansão do cristal quando submetido a uma alta tensão alternada na mesma frequência ultrassônica emitida pelo cristal. É um processo de transformação da energia elétrica em energia mecânica e vice-versa (ANDREUCCI, 2014).

O aparelho de ultrassom produz um pulso através do cristal. Este pulso se transforma em onda mecânica e se propaga pela peça, neste instante o aparelho começa a contagem do tempo. Este tempo é calculado com base na velocidade de propagação de onda em um material. O aparelho deve ser informado da espessura do material e do material a ser analisado, para que ele possa calcular o tempo de retorno da onda.

Tabela 13 - Velocidade de propagação das ondas longitudinais (ANDREUCCI, 2014).

Material	Velocidade m/s
Ar	330
Alumínio	6300
Cobre	4700
Ouro	3200
Aço	5900
Aço inoxidável	5800
Nylon	2600
Óleo(SAE30)	1700
Água	1480
Prata	3600
Titânio	6100
Níquel	5600
Tungstênio	5200
Magnésio	5.800
Acrílico	2.700
Aço Inoxidável	5.800
Aço Fundido	4.800

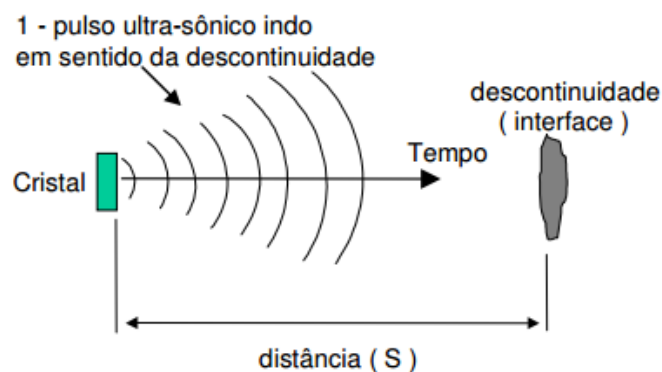


Figura 68 – Emissão de onda no sentido da descontinuidade (ANDREUCCI, 2014).

Quando a onda atinge a descontinuidade, ocorre a reflexão da onda. A onda refletida retornará à superfície onde está o cristal foi acoplado, originando um sinal elétrico que é identificado e amplificado pelo aparelho.

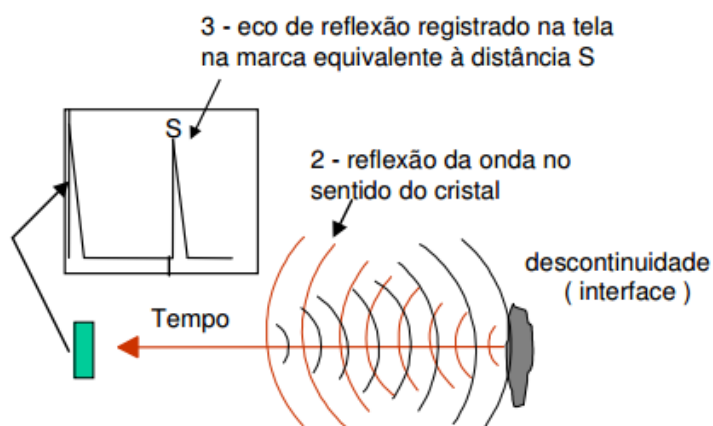


Figura 69 – Retorno da onda refletida (ANDREUCCI, 2014).

Os resultados são exibidos na tela do aparelho e os resultados são obtidos através da análise do profissional responsável pelo ensaio (ANDREUCCI, 2014).

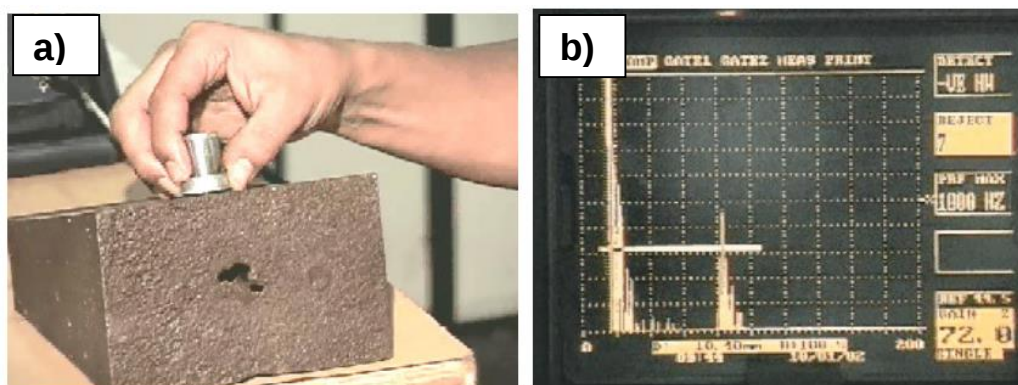


Figura 70 – Exemplo de exibição do ensaio no aparelho de ultrassom. a) Medição de espessura por ultrassom; b) Gráfico gerado na tela do aparelho de ultrassom (ANDREUCCI, 2014).

5.5.8.2. Vantagens e desvantagens

Vantagens

- O método possui alta sensibilidade na detecção de pequenas descontinuidades interna;
- Método rápido, podendo ser feito em diversos locais, necessitando apenas ter acesso ao inspetor;
- Os aparelhos possuem baterias carregáveis, não necessitando de fontes de energia na hora do ensaio;
- Não necessita de isolamento de área ou outros requisitos especiais de segurança.

Desvantagens

- Requer profissional com grandes conhecimentos teóricos e práticos;
- Não é recomendado para espessuras pequenas;
- Necessita de preparo da superfície. Em alguns casos, requer a remoção do reforço da solda, o que demanda tempo.

5.5.9. Líquido penetrante

O ensaio por líquido penetrante tem a finalidade de detectar discontinuidades superficiais em que haja abertura na superfície. É capaz de detectar discontinuidades como poros, trincas e dobras, etc. Pode ser aplicado em qualquer material sólido, desde que este não seja poroso ou com grosseira superfície (ANDREUCCI, 2014).

5.5.9.1. Princípio do ensaio

O método consiste em aplicar um líquido, de cor geralmente vermelha, na superfície a ser analisada e deixar que o líquido penetre na discontinuidade.

Após a penetração, é removido o excesso do líquido, e, por um efeito chamado de capilaridade, o líquido que penetrou na discontinuidade permanece. Este líquido é removido da discontinuidade quando aplicado o revelador. Ficando desenhada a imagem da discontinuidade, conforme ilustrado nas figuras 71 e 72 (ANDREUCCI, 2014).



Figura 71 – Aplicação do revelador e observação da indicação (ANDREUCCI, 2014).

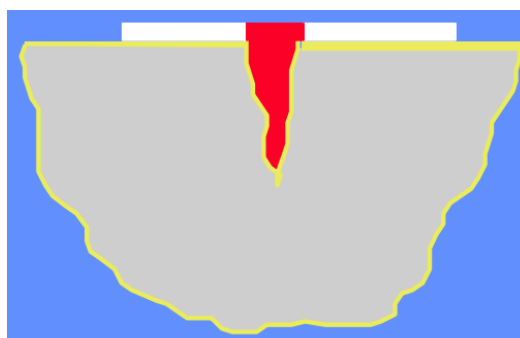


Figura 72 – Absorção do líquido, pelo revelador, de dentro da abertura (ANDREUCCI, 2014).

5.5.9.2. Vantagens e desvantagens

5.5.9.2.1. Vantagens

É um ensaio simples, de fácil interpretação dos resultados e requer pouco tempo de treinamento.

5.5.9.2.2. Desvantagens

Capaz apenas de detectar descontinuidades superficiais, por isso é necessária uma limpeza para desobstruir as descontinuidades caso existam. É recomendado que a temperatura da peça a ser ensaiada esteja entre 5°C e 52°C (ANDREUCCI, 2014).

5.5.10. Raio X

A radiografia é um ensaio não destrutivo usado para a inspeção de materiais. O método se baseia na absorção diferenciada da radiação recebida pelo material inspecionado. Para visualizar essa absorção diferenciada da radiação, é utilizado um filme. A diferença da quantidade absorvida pelo material irá revelar, entre outras coisas, a presença de descontinuidades no material (ANDREUCCI, 2014).

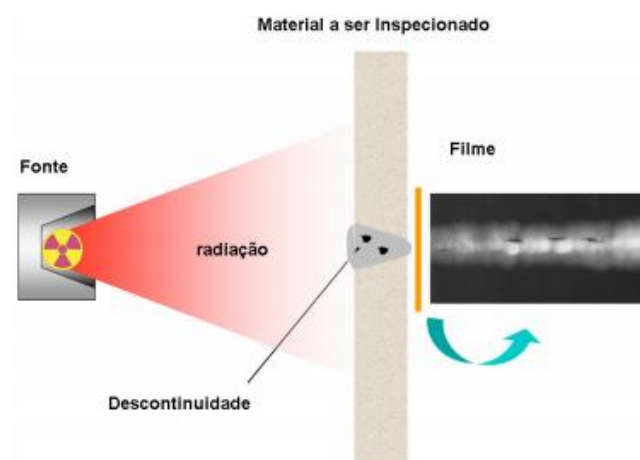


Figura 73 – Técnica Geral de Ensaio Radiográfico na Indústria (ANDREUCCI, 2014).

5.5.10.1. Princípios do ensaio

O ensaio consiste em expor o material a ser inspecionado à uma fonte radiativa. As fontes radiativas mais utilizadas atualmente são:

- Cobalto – 60;
- Irídio – 192;
- Túlio – 170;
- Césio – 137;
- Selênio – 75.

Para garantir a qualidade das imagens obtidas nos filmes após a exposição do material à radiação, são utilizadas pequenas peças chamadas Indicadores de Qualidade de Imagem (IQI).

Os IQI's adotados pelas normas ASME, Sec V SE-1025 ou ASTM E-1025, possuem três furos com diâmetro 4T, 2T e 1T, onde "T" é a espessura do IQI. Já a norma ASTM E-747 descreve um tipo de IQI denominado tipo fios, que são 5 fios de material similar ao que será ensaiado com diferentes diâmetros.

Para avaliar a imagem obtida, é verificado o menor furo visto no filme ou o fio de menor diâmetro, dependendo da norma aplicada, com isso é possível determinar a qualidade da imagem, e conferir se está de acordo com o especificado para o ensaio.

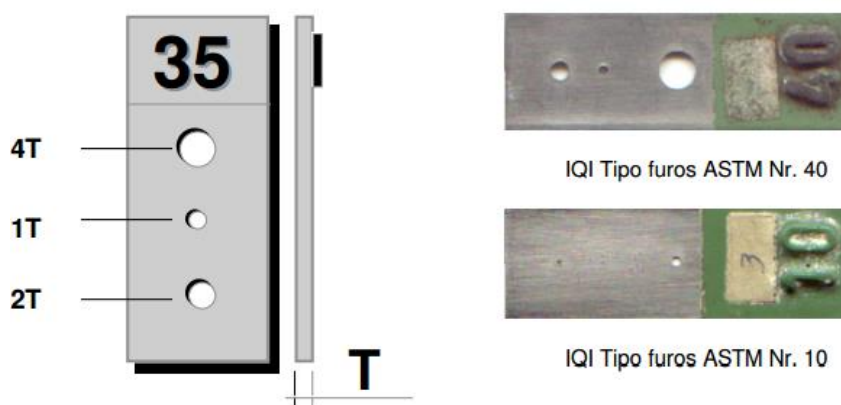


Figura 74 – IQI ASME ou ASTM tipo furo (ANDREUCCI, 2014).

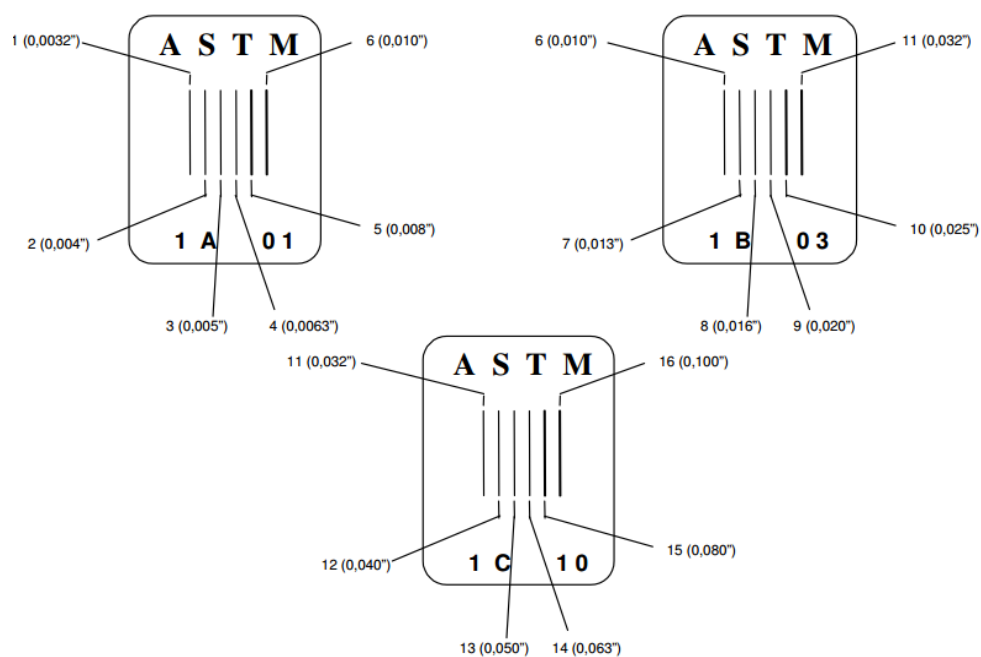


Figura 75 – IQI ASME ou ASTM tipo fio (ANDREUCCI, 2014).

Os IQI's são colocados sobre a peça a ser ensaiada, com a face voltada para a fonte.



Figura 76 – Posicionamento de IQI tipo furo (ANDREUCCI, 2014).



Figura 77 – Posicionamento de IQI tipo fio (ANDREUCCI, 2014).

Algumas técnicas radiográficas são amplamente utilizadas e recomendadas por normas e especificações internacionais e nacionais.

5.5.10.2. Técnica de parede simples (PSVS)

Esta é a técnica mais utilizada para a inspeção radiográfica e também é considerada como a principal. Ela possui este nome, pois no arranjo entre a fonte de radiação, peça e filme, apenas uma seção da peça, a que está mais próxima ao filme, será inspecionada e a projeção dos raios será apenas a espessura do material (ANDREUCCI, 2014).

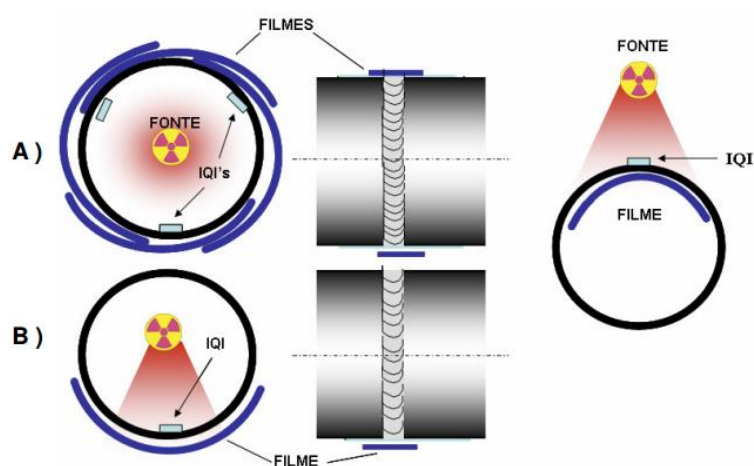


Figura 78 – Técnica de exposição parede simples - vista simples (ANDREUCCI, 2014).

5.5.10.3. Exposição panorâmica

A técnica panorâmica consiste em centralizar a fonte de radiação no ponto equidistante das peças e dos filmes, caso a peça seja circular, a fonte deverá estar no meio da circunferência. Este método faz com que em uma única exposição da fonte, todos os filmes que estão dispostos a 360° sejam irradiados (ANDREUCCI, 2014).

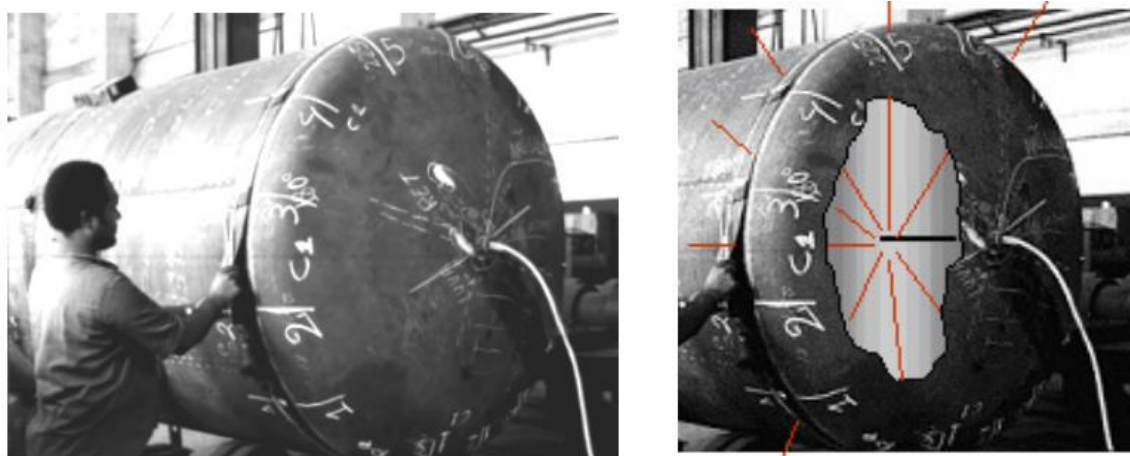


Figura 79 – Técnica Radiográfica Panorâmica numa solda entre cilindro fundo de um vaso de pressão (ANDREUCCI, 2014).

5.5.10.4. Técnica de parede dupla vista simples (PDVS)

Nesta técnica a radiação proveniente da fonte atravessa duas espessuras do material, no entanto é projetado no filme apenas a que se encontra mais próxima à fonte. Está técnica é muito utilizada para inspeção de juntas soldadas em tubulações, vasos de pressão fechado e outros matérias que o acesso interno seja difícil.

Como a radiação deverá atravessar as duas espessuras, o tempo de exposição da radiação deverá ser maior (ANDREUCCI, 2014).

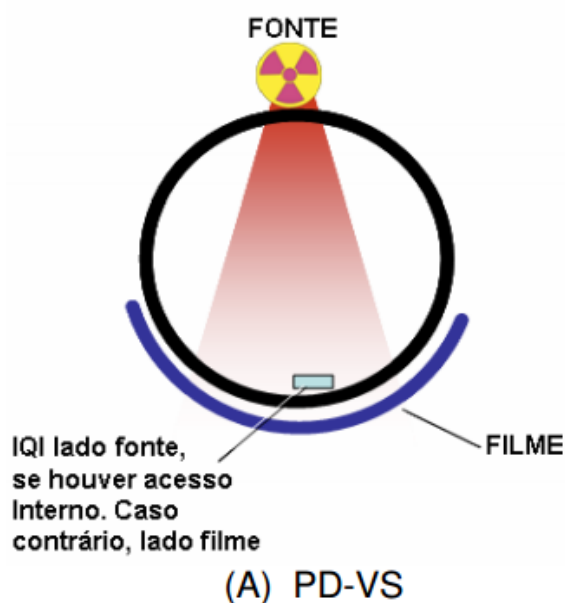


Figura 80 – Técnica de exposição parede dupla e vista simples (ANDREUCCI, 2014).

5.5.10.5. Vantagens de desvantagens

5.5.10.5.1. Vantagens

- É um ensaio de alta confiabilidade;
- Pode ser aplicado à maioria dos materiais aplicados nas indústrias;
- Ensaio rápido, dependendo da espessura da peça.

5.5.10.5.2. Desvantagens

- Alto custo do equipamento e pessoal qualificado;
- Alto risco à saúde do operador, caso não siga corretamente os procedimentos de segurança;
- Requer isolamento de área quando for realizado o ensaio, este é um dos motivos pelo qual os ensaios radiográficos são feitos à noite na maioria das empresas.

6. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo vamos apresentar e detalhar passo a passo todos os procedimentos e processos de soldagem realizados e também os ensaios destrutivos para comparação do desempenho entre cada processo utilizado.

Para nosso estudo foi utilizado o aço inoxidável duplex SAF 2205 (UNS S31803), que na tabela 14, conforme a norma ASTM A 240/A 240M – 08 apresentam os valores de composição química normalizados, e na tabela 15 os limites para os ensaios mecânicos para cada tabela acrescentaram uma linha com os valores para o material que adquirimos para o nosso estudo (certificado controle de qualidade – ver anexo G).

Tabela 14 – Composição química do material UNS S31803 (adaptador de ASTM A 240/A 240M – 08)

Referência	Carbono C	Manganês Mn	Fósforo P	Enxofre S	Silício Si	Cromo Cr	Níquel Ni	Molibdenium Mo	Nitrogênio N	Cobre Cu	Niobium Nb	Cobalto Co
UNS S31803 Designation	0,030	2,00	0,030	0,020	1,00	21,0 - 23,0	4,5 - 6,5	2,5 - 3,5	0,08 - 0,20	-	-	-
Metal Base	0,021	1,51	0,020	0,001	0,39	22,39	5,69	3,19	0,172	0,26	0,016	0,10

Tabela 15 – Limites para ensaios mecânicos

Referência	Limite de Resistência, min		Limite de escoamento, min		Alongamento 2 pol. ou 50 mm, min, %	Dureza, max	
	ksi	MPa	ksi	MPa		Brinell	Rockwell B
UNS S31803 Designation	90	620	65	450	25	293	31
Metal Base Adquirido	95 ~ 119	655 ~ 820	65 ~ 95	450 ~ 653	25 ~ 29	264 ~ 293	29 ~ 31

Pode-se verificar que os valores de composição química e limites de resistência do material para estudo estão dentro dos valores normalizados.

6.1. Aquisição do material

Para aquisição do material fizemos algumas cotações, mas tivemos dificuldades para adquirir o material. Tentamos meios para conseguir doações de empresas, porém é um material difícil de encontrar em nossa região e com alto custo para compra. Muitos fornecedores não trabalham com este material, alguns não possuíam em estoque, outros só vendem em grandes quantidades. O grupo custeou o valor e analisou a melhor empresa para fornecimento.

A tabela 16 apresenta os valores cotados (três mais recentes) e em destaque a empresa em que compramos o material para nosso estudo, o SAF 2205.

Tabela 16 – Tabela de cotações para aquisição do material SAF 2205.

Cotações

Fornecedor		Quant:	Unid:	Valor unit:	Preço Total:
1	INOXFIT - AÇOS E METAIS				
1.1	CHAPA DUPLEX UNS S31803 (2205) 105mm x 135mm x 10,5mm	6,0	Peça	R\$ 717,89	R\$ 4.307,34
2	LOSINOX - AÇO INOX				
2.1	CHAPA DUPLEX UNS S31803 (2205) 105mm x 135mm x 9,52mm	6,0	Peça	R\$ 840,00	R\$ 5.040,00
3	INOXPLASMA				
3.1	AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX SAF 2205 - 105x 135x 8mm	6,0	Peça	R\$ 279,42	R\$ 1.676,52
3.2	AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX SAF 2205 - 105x 135x 9,53mm	6,0	Peça	R\$ 303,00	R\$ 1.818,00
OBSERVAÇÃO: - VALOR REFERENTE DO TRANSPORTE (NÃO INCLUSO) - ICM S 18% INCLUSO - IPI 5% (NÃO INCLUSO) - ICM S 18% INCLUSO					

6.2. Procedimento de soldagem

Para execução da parte prática do nosso trabalho, contamos com a parceria da empresa **INSPE///BRAS** que nos forneceu os consumíveis para soldagem, o espaço, a mão de obra qualificada e todos os equipamentos e recursos necessários.

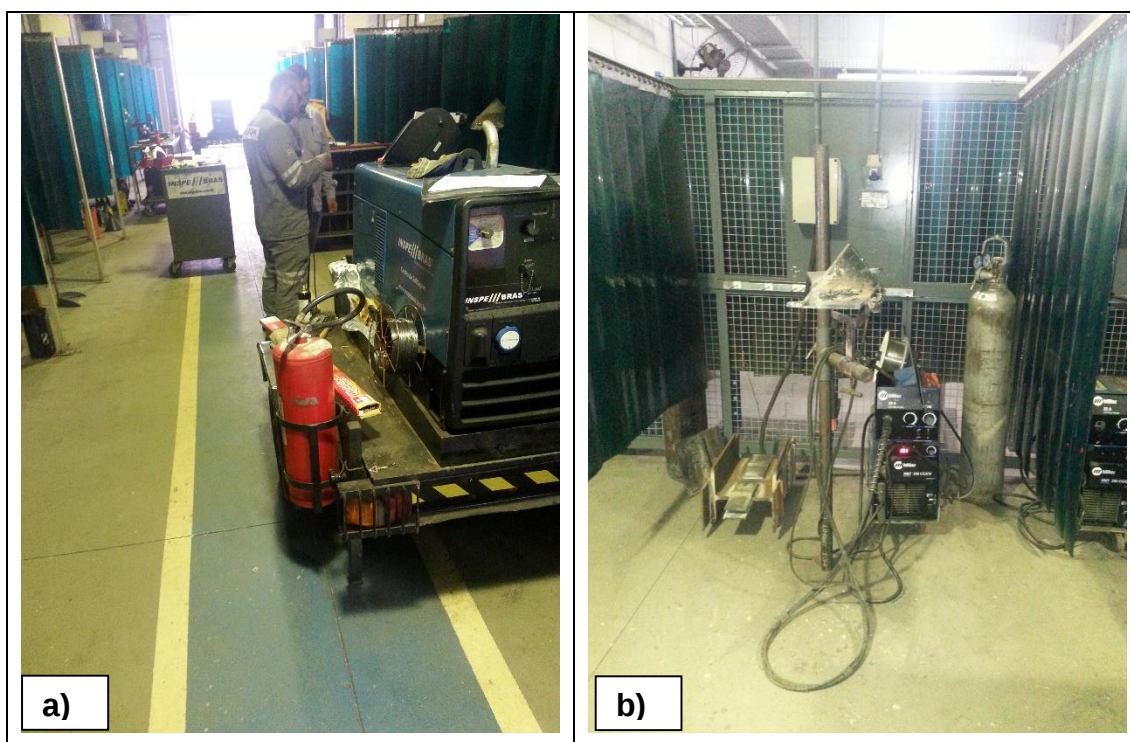


Figura 81 – Espaço cedido pela INSPE///BRAS. a) Local onde são realizadas as soldagens; b) Recursos utilizados para realização da soldagem.

Primeiramente, o inspetor de soldagem nível 2 (dois) da INSPE///BRAS instruiu o soldador de como deveria ser realizado as soldagens no nosso material, bem como os cuidados necessários que deveriam ser tomados.

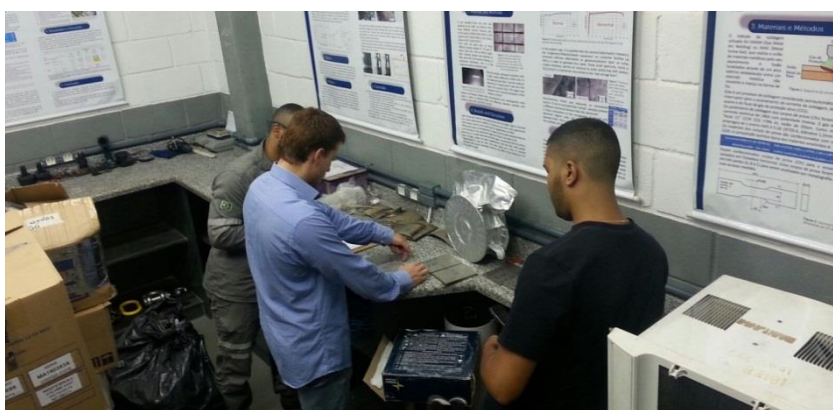


Figura 82 – Inspetor de soldagem orientando para realização da soldagem dos materiais.

Após instruir o soldador, separamos os materiais que foram utilizados, como lápis de fusão, disco de corte/desbaste e os consumíveis que foram utilizados, os consumíveis serão especificados nos tópicos para os processos em que foram utilizados.

Separamos as chapas e selecionamos as que seriam soldadas conforme o melhor alinhamento entre elas.

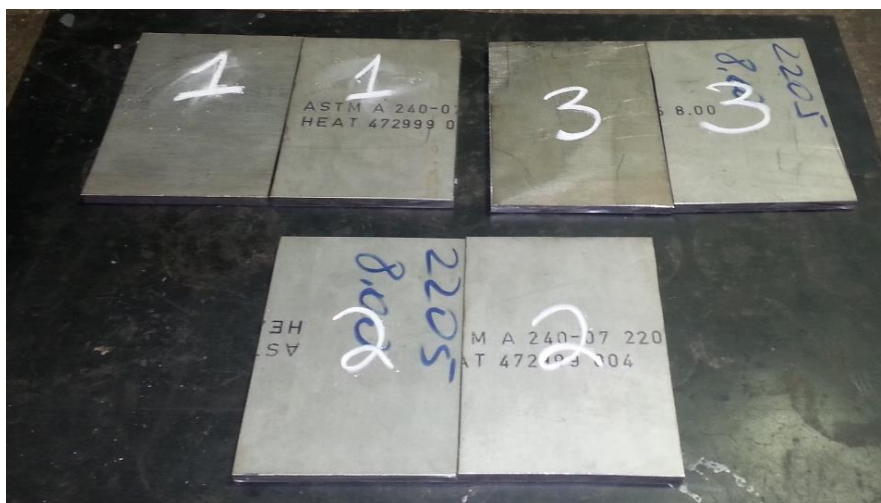


Figura 83 – Alinhamento e marcação para iniciação das soldagens.

A peça foi preparada de forma angular, um bisel, segundo a definição da norma AWS A3.0 – 2010, com um ângulo de 35 graus por esmerilhamento utilizando discos apropriados para trabalho com aços inoxidáveis.



Figura 84 – Peça chanfrada por esmerilhamento.



Figura 85 – Discos utilizados para esmerilhamento do material.

Para todos os processos de soldagem, utilizamos o mesmo processo de travamento das chapas para diminuir a deformação da peça, conforme mostrado na figura 86.



Figura 86 – Travamento das peças para diminuição da deformação.

Em todos os processos utilizamos o mesmo tipo de chanfro, goivamos (retiramos a raiz por esmerilhamento) e soldamos a raiz. Entre cada passe,

utilizamos o lápis de fusão para verificar a temperatura antes de iniciarmos o passe seguinte. Caso a temperatura fosse maior que 150°C, esperamos o resfriamento da peça, e quando a temperatura atingia os 150°C, iniciamos o próximo passe. Todos os cordões de solda tiveram 135 mm de comprimento, que é equivalente ao comprimento da peça soldada.



Figura 87 – Utilização do lápis de fusão para verificação da temperatura



Figura 88 – Peça após a goivagem.

Entre cada passe, foi executada a limpeza do cordão de solda e áreas adjacentes, removendo respingos e escórias formadas pelos processos FCAW e SMAW. A cada passe verificamos a presença de descontinuidades visíveis, e quando encontradas, as mesmas foram removidas por esmerilhamento.

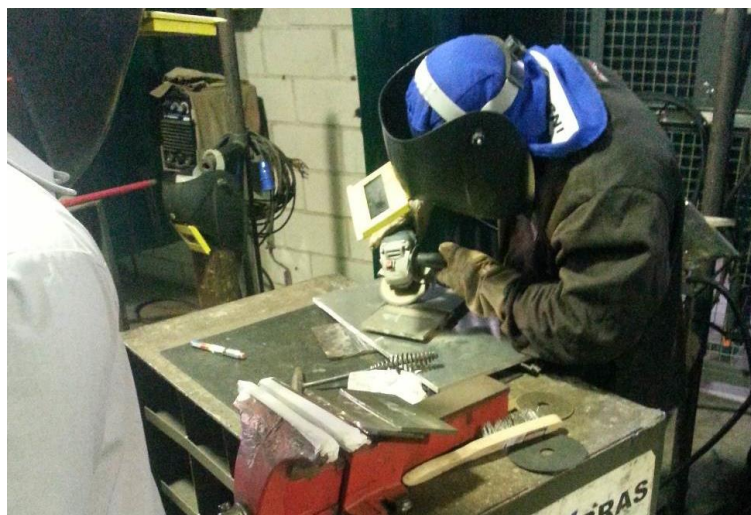


Figura 89 – Realização de limpezas entre passes.

Para calcularmos o Aporte Térmico (*Heat Input*), utilizamos a fórmula apresentada por Wainer, Brandi e Melo (2004).

$$Ht = 60 \cdot \frac{V \cdot I}{v} \left(\frac{J}{cm} \right)$$

Onde:

V = Tensão do arco (V)

I = Corrente de soldagem (A)

v = Velocidade de avanço (cm/min)

6.3. Processo de soldagem FCAW:

Para o processo de soldagem FCAW, utilizamos o consumível E2209, com diâmetro de 1,2mm, com classificação AWS A5.22, doado especialmente para este estudo pelo fabricante *Böhler Welding*. Foi utilizado CO₂ como gás de proteção, com vazão de 18 l/min, conforme indicação do fabricante do arame utilizado. Para consulta o *datasheet* do consumível, conforme anexo D.



Figura 90 – Consumível E2209, com diâmetro de 1,2mm, com classificação AWS A5.22, do fabricante *Böhler Welding*.

Foram depositados 3 (três) passes de solda distribuídos em 2 camadas iniciais e uma última camada obtida por um passe de solda feito posteriormente à goivagem na raiz. Não utilizamos abertura de raiz, o motivo de não utilizarmos espaçamento entre as peças foi pela possibilidade de que a alta corrente gerasse calor suficiente para perfurar o material.

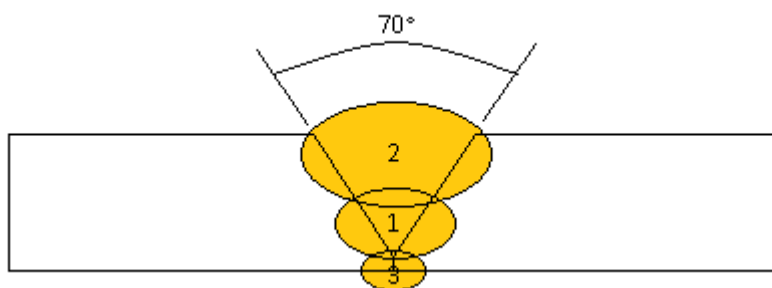


Figura 91 – Esquema utilizado na soldagem pelo processo FCAW.

Tabela 17 - Parâmetros utilizados e aporte térmico em cada passe - FCAW.

Passe	Tipo de Corrente e Polaridade	Intensidade de Corrente (A)	Tensão (V)	Comprimento soldado (mm)	Tempo de soldagem (seg)	Aporte térmico (kJ/cm)
1	CC+	155	25	135	31	8,9
2	CC+	155	25	135	45	12,92
3	CC+	155	25	135	33	9,47

6.4. Processo de soldagem GTAW:

Para o processo de soldagem GTAW, utilizamos o consumível ER316L devido à disponibilidade da parceira INSPE///BRAS e ser de composição química mais próximo do metal base conforme *datasheet*, vide anexo E, com diâmetro de 3,25mm, com classificação AWS A5.9, do fabricante *Weld-inox*. Foi utilizado argônio como gás de proteção, com vazão de 10 l/min.



Figura 92 – Consumível ER316L, com diâmetro de 3,25mm, com classificação AWS A5.9, do fabricante *Weld-inox*.

Foram depositados 4 passes de solda distribuídos em 3 camadas iniciais e uma última camada obtida por um passe de solda feito posteriormente à goivagem na raiz. Em um chanfro de 70° e com abertura de raiz de 3mm.

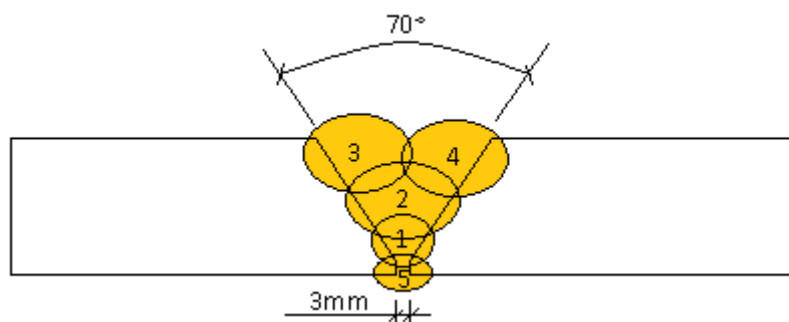


Figura 93 – Esquema utilizado na soldagem pelo processo GTAW.

Tabela 18 - Parâmetros utilizados e aporte térmico em cada passe - GTAW.

Passe	Tipo de Corrente e Polaridade	Intensidade de Corrente (A)	Tensão (V)	Comprimento soldado (mm)	Tempo de soldagem (seg)	Aporte térmico (kJ/cm)
1	CC-	125	30	135	96	26,67
2	CC-	125	30	135	83	23,06
3	CC-	125	30	135	95	26,39
4	CC-	125	30	135	77	21,39
5	CC-	125	30	135	91	25,28

6.5. Processo de soldagem SMAW:

Para o processo de soldagem SMAW, utilizamos o consumível E310-16 devido disponibilidade da parceira INSPE///BRAS e ser de composição química mais próxima do metal base conforme *datasheet* no anexo F, com diâmetro de 2,5mm e comprimento de 250mm, com classificação AWS A5.4-92, do fabricante *Böhler Welding*.



Figura 94 – Consumível E310-16, com diâmetro de 2,5mm e comprimento de 250mm, com classificação AWS A5.4-92, do fabricante *Böhler Welding*.

Foram depositados 4 passes de solda distribuídos em 3 camadas iniciais e uma última camada obtida por um passe de solda feito posteriormente à goivagem na raiz. Em um chanfro de 70° e com abertura de raiz de 3 mm.

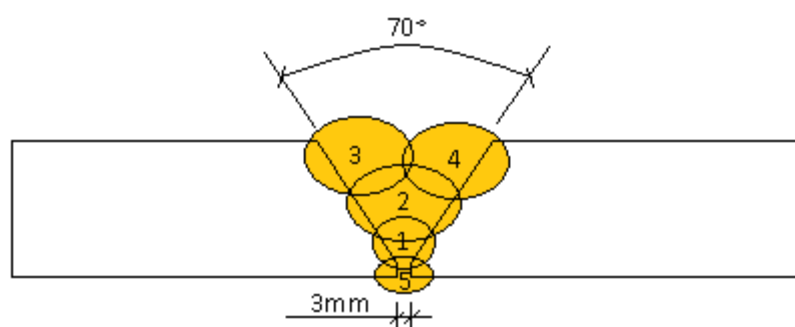


Figura 95 – Esquema utilizado na soldagem pelo processo SMAW.

Tabela 19 - Parâmetros utilizados e aporte térmico em cada passe - SMAW.

Passe	Tipo de Corrente e Polaridade	Intensidade de Corrente (A)	Tensão (V)	Comprimento soldado (mm)	Tempo de soldagem (seg)	Aporte térmico (kJ/cm)
1	CC+	70	26	135	52	7,01
2	CC+	70	26	135	60	8,09
3	CC+	70	26	135	61	8,22
4	CC+	70	26	135	63	8,49
5	CC+	70	26	135	48	6,47

7. ENSAIOS MECÂNICOS

Para verificarmos a qualidade das soldas obtidas nos três processos de soldagens, foram realizados ensaios de dobramento, tração e dureza.

7.1. Ensaio de Dobramento:

Com este ensaio de dobramento obtivemos resultados qualitativos da junta soldada dos três tipos de processos de soldagem (SMAW, FCAW e GTAW), que foi evidenciado a presença ou não de defeitos.

Primeiramente os corpos de prova foram cortados na serra rotativa por um profissional capacitado com a devida segurança.



Figura 96 – Equipamento utilizado para corte de CP's para ensaios.

Para efetuar o ensaio de dobramento foi retirado o excesso dos cordões de solda e foram devidamente removidos os cantos vivos e rebarbas, através de esmerilhamento e lixamento.

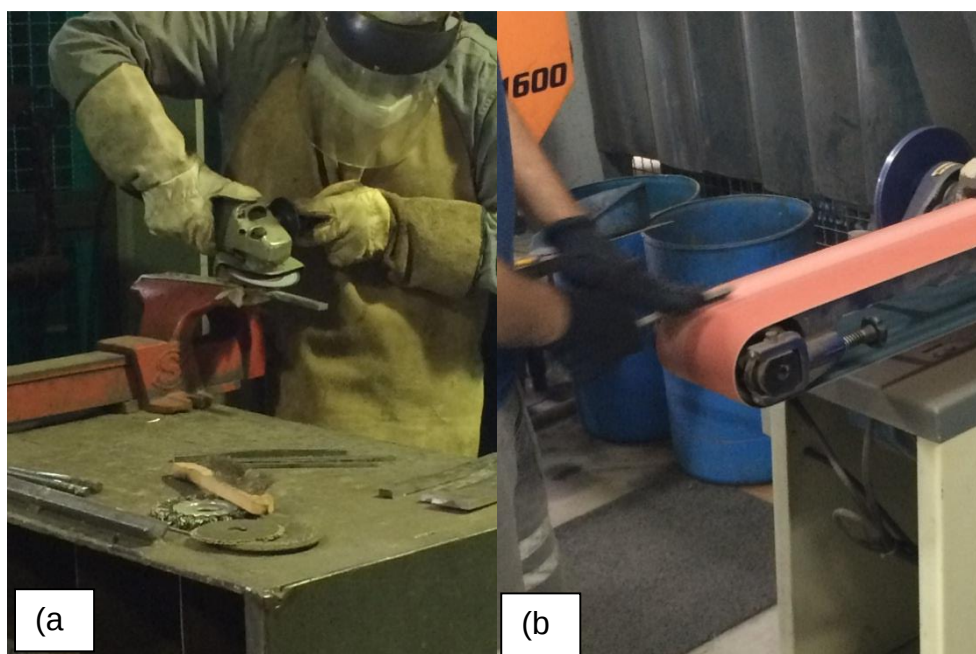


Figura 97 – Preparação dos corpos de prova para ensaio – a) Tarefa de esmerilhamento; b) Tarefa de lixamento.



Figura 98 – Corpos de prova prontos para ensaio.

Foram cortados e preparados dois corpos de prova para cada processo de soldagem efetuado. Cada corpo de prova tem 210 mm de comprimento, 19 mm de

largura e 8 mm de espessura, foi realizado dobramento transversal de face, onde a superfície que contém a face (acabamento) de solda se torne a superfície convexa (tracionada) e outro corpo de prova se fará dobramento transversal de raiz, ou seja, a raiz será a superfície convexa (tracionada).

Como parâmetros, o ângulo de dobramento a ser alcançado é o valor próximo de 180° aumentando assim a severidade do ensaio. O diâmetro interno de dobramento é em função do diâmetro do cutelo a ser usado que no nosso estudo foi de 38 mm. A distância entre os roletes que servem de apoio para o corpo de prova foi de 56 mm, pré-estabelecidos em relação ao diâmetro do cutelo mais duas vezes a espessura do corpo de prova mais 2 mm de folga. Desse modo o ensaio de dobramento será guiado.

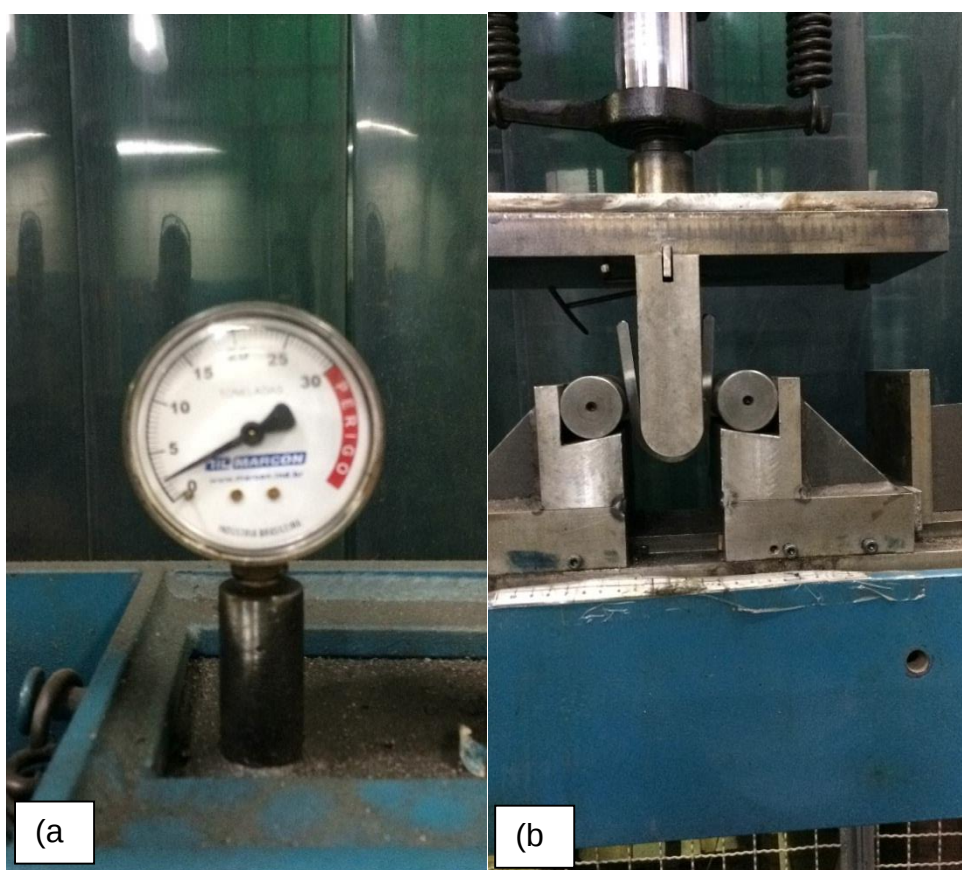


Figura 99 – Realização do ensaio de dobramento – a) Manômetro indicador de carga; b) Momento da dobra do corpo de prova.

A força de carga foi aumentando gradativamente exercendo dobra do material chegando aproximadamente a 2 toneladas, isso para os seis corpos de prova igualmente.

O corpo de prova do processo SMAW foi aprovado no ensaio de dobramento, observou-se um alongamento da região soldada porém nenhuma trinca ou fissura, conforme mostrado na figura 100.

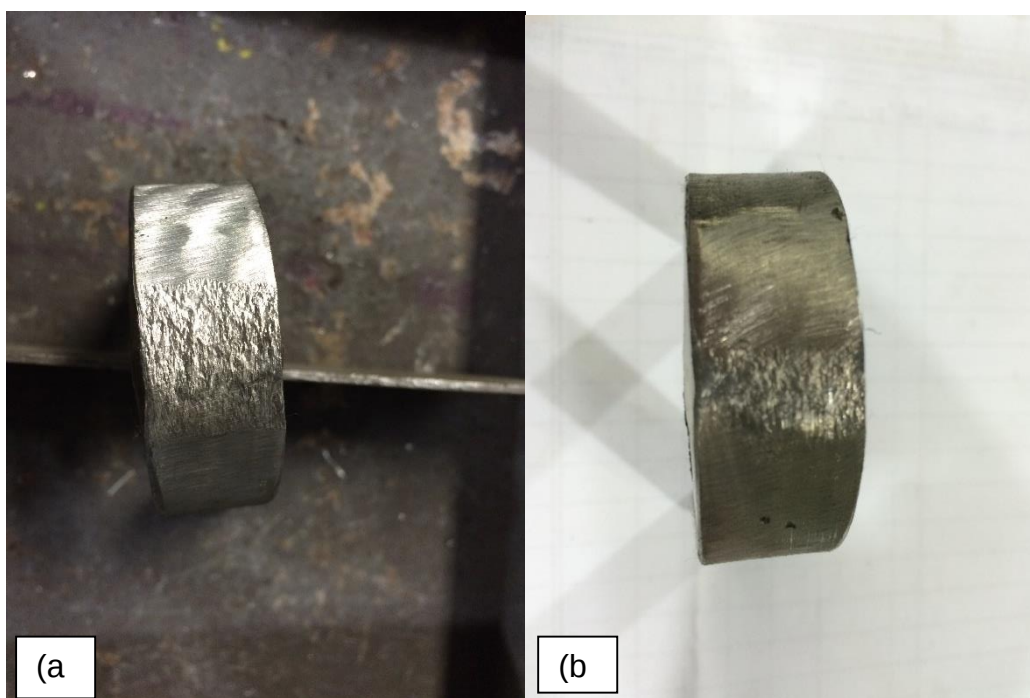


Figura 100 – Corpo de prova dobrado do processo SMAW - (a) Face; (b) Raiz.

O corpo de prova do processo GTAW foi aprovado no teste de dobramento. Não apresentando descontinuidades visíveis, conforme mostrado na figura 101.

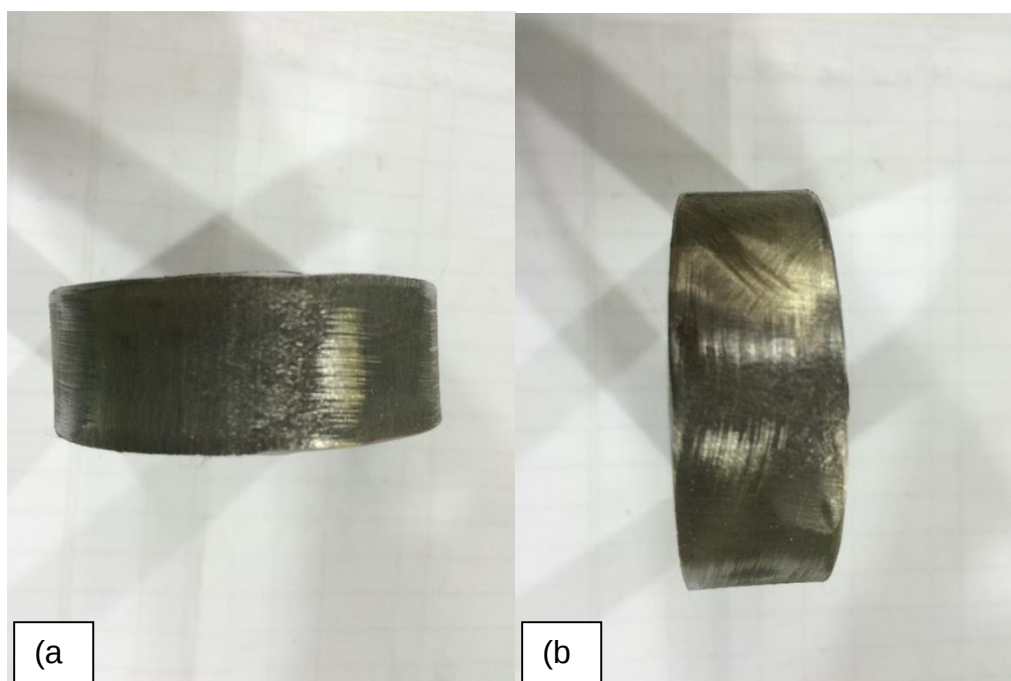


Figura 101 – Corpo de prova dobrado do processo GTAW - (a) Face; (b) Raiz.

O corpo de prova do processo FCAW foi aprovado no ensaio de dobramento. Na superfície dos dois corpos de prova aparece um ponto confundindo com uma fissura, conforme apresentado na figura 102.

O inspetor de solda nível 2 (dois) avaliou as peças e concluiu que não é uma trinca, e mesmo se fosse, a norma ASME IX (2015) indica que para reprovar um corpo de prova a trinca ou fissura não pode ser maior que 3 mm e esse fator de relevância não se englobou nas peças observadas. A superfície de observação e aprovação é a tracionada (convexa).

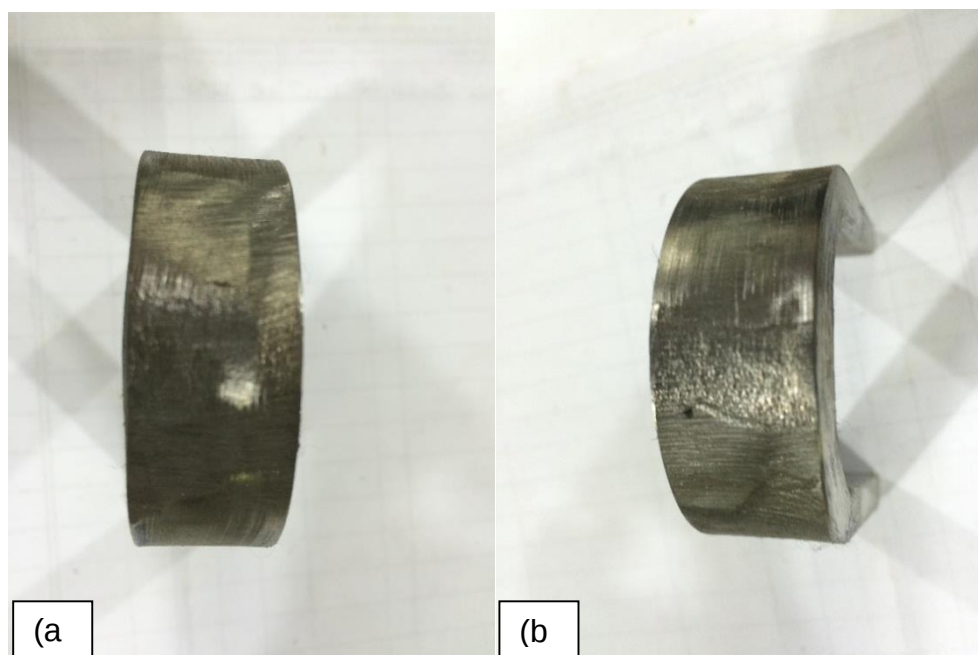


Figura 102 – Corpo de prova dobrado do processo FCAW - (a) Face; (b) Raiz.

7.2. Ensaio de Dureza:

Os três corpos de prova foram seccionados através da serra, na posição transversal aos cordões de solda mantendo uma superfície plana em ambas as faces. Foi executado lixamento fino com lixa d'água de grana 220 nas superfícies nas quais foram realizadas as durezas.

Foi realizado ataque químico com reagente *Marble* para revelação dos cordões de solda para posterior ensaio de dureza. As figuras 103, 104 e 105 ilustram os corpos de provas atacados quimicamente com reagente *Marble* e as regiões soldadas.



Figura 103 – Aspecto do cordão de solda do corpo de prova soldado pelo processo GTAW.



Figura 104 – Aspecto do cordão de solda do corpo de prova soldado pelo processo SMAW.



Figura 105 – Aspecto do cordão de solda do corpo de prova soldado pelo processo FCAW.

Executado nos três corpos de prova soldados pelos processos (GTAW, SMAW e FCAW) ensaio de dureza *Rockwell* na escala B, no durômetro *Heckert* do laboratório de ensaios mecânicos da Universidade Santa Cecília, com carga de 100kgf e com penetrador de esfera de aço com diâmetro de 1/16". As tabelas 20, 21 e 22 ilustram os valores obtidos no ensaio de dureza.

Tabela 20 – Resultados de dureza do corpo de prova soldado pelo processo GTAW.

Região	Dureza 1 (HRB)	Dureza 2 (HRB)	Dureza 3 (HRB)	Valor Médio (HRB)
Metal base	97	99	99	98,3
Z.T.A.	101	101	101	101
Metal de adição	92	96	94	94

Tabela 21 – Resultados de dureza do corpo de prova soldado pelo processo SMAW.

Região	Dureza 1 (HRB)	Dureza 2 (HRB)	Dureza 3 (HRB)	Valor Médio (HRB)
Metal base	99	98	98	98,3
Z.T.A.	100	99	101	100
Metal de adição	86	87	89	87,3

Tabela 22 – Resultados de dureza do corpo de prova soldado pelo processo FCAW.

Região	Dureza 1 (HRB)	Dureza 2 (HRB)	Dureza 3 (HRB)	Valor Médio (HRB)
Metal base	97	95	99	97,0
Z.T.A.	99	100	101	100
Metal de adição	97	97	99	97,7

7.3. Ensaio de Tração:

A curva tensão x deformação, nos apresenta o comportamento do material soldado sob carga de tração uniaxial. Nestes ensaios de tração a carga foi submetida à aumento gradativo até sua ruptura, e para cada processo de soldagem realizado usamos 3 (três) corpos de provas para analisarmos individualmente cada resultado obtido.

Assim como os ensaios de dobramento e dureza os corpos de prova foram devidamente preparados (corte, esmerilhamento e lixamento).

Os ensaios de tração foram feitos através de um equipamento eletromecânico EMIC-DL-10000 que se encontra no laboratório de ensaios mecânicos da Universidade Santa Cecília.

**Figura 106** – Máquina de ensaio de tração utilizado.

Para os testes foram utilizados corpos de prova subsize aplainados e retificados de tal maneira que a superfície de área útil era completamente homogênea, plana e com mesmo acabamento superficial de tal forma que o objetivo disso foi verificar a continuidade, homogeneidade e integridade da junta soldada em face do metal base.

Os ensaios foram executados a uma taxa de 10 mm/min com emprego de extensometria eletrônica, através da qual foram registrados deformações da ordem de 1 milésimo de milímetro e uma célula de carga usando ponte *Wheatstone* registrando a carga com precisão de um décimo de quilo. As curvas de tração obtidas foram através do sistema Tesk do computador anexado a máquina de tração enquanto as curvas foram sendo reproduzidas, como na figura 107.



Figura 107 – Conjunto para ensaio efetuando a curva no momento da tração.

É possível observar pelas curvas o comportamento diferente entre os corpos de prova soldados por SMAW, GTAW e FCAW. Somente os corpos de prova de arame tubular (FCAW) romperam no metal base, o que é desejado para esse tipo de aplicação, os corpos de prova de soldagem TIG (GTAW) e eletrodo revestido (SMAW) sofreram ruptura no metal de adição, ou seja, na junta soldada.

Conforme critério da ASME IX (2015) o corpo de prova de tração em uma junta soldada pode romper no metal de adição desde que a resistência mecânica

dele apresente-se igual ou superior a do metal base, neste caso em particular apenas um único corpo de prova do processo GTAW conforme gráfico da figura 108, ele deu abaixo da resistência mecânica mínima do metal base, este dado que pode ser observado na norma ASME IX (2015).

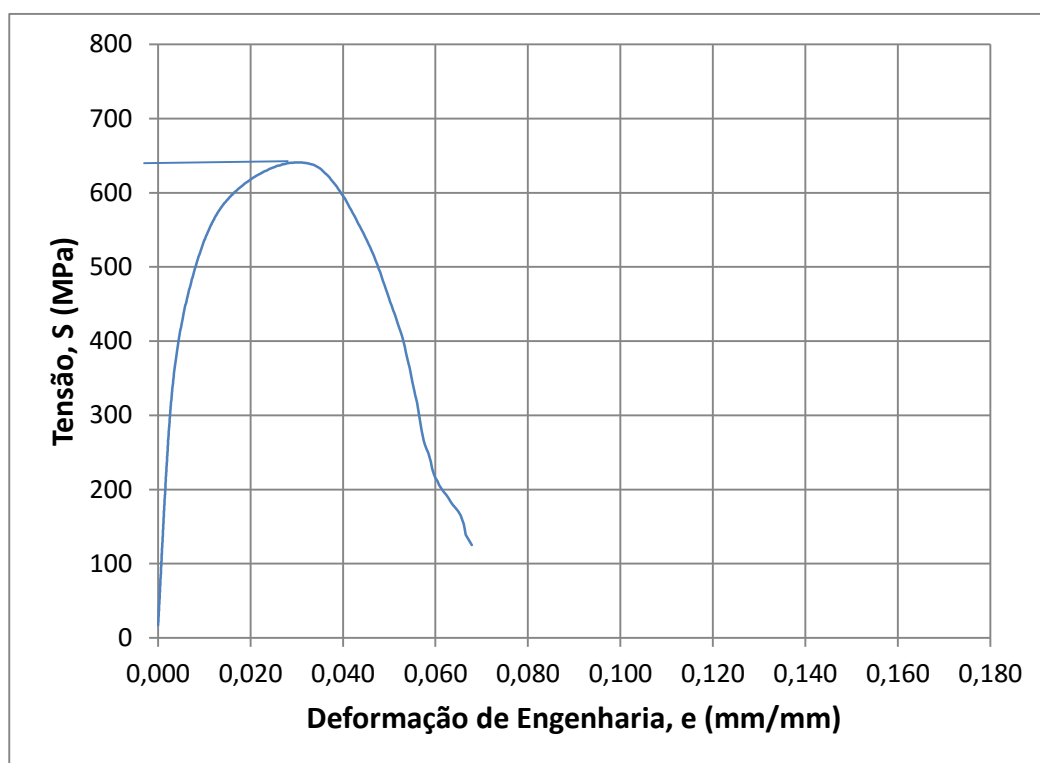


Figura 108 – Corpo de prova 1 de GTAW, do ensaio de tração, mostrando o limite de resistência na curva.

A seguir as figuras 109, 110 e 111 mostram as 3 (três) curvas juntamente de cada processo de soldagem para comparativos.

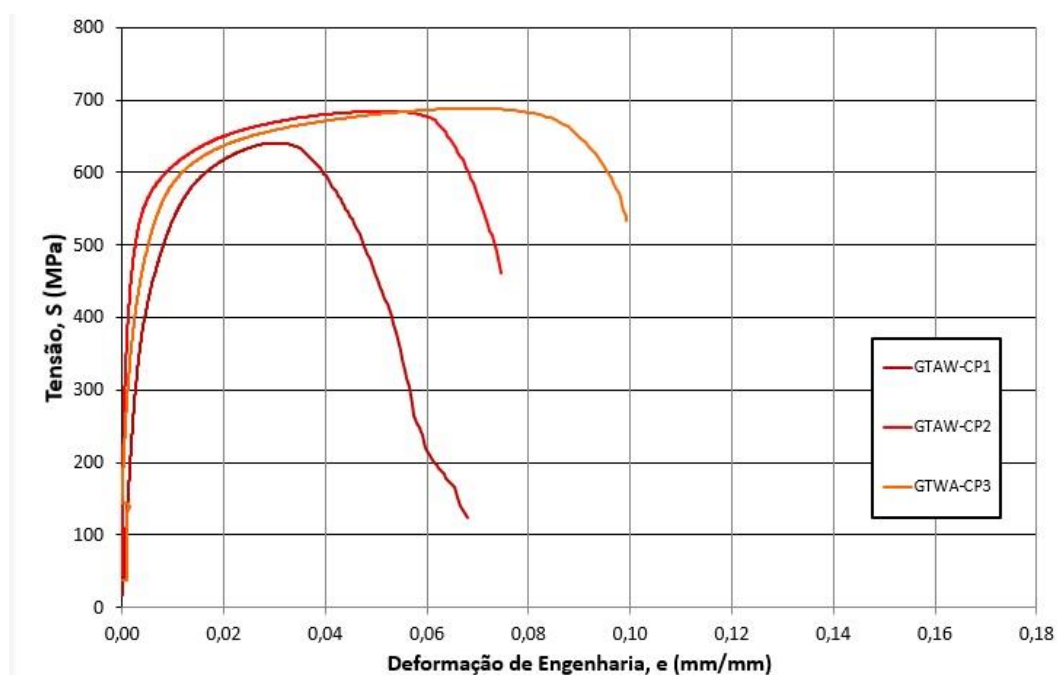


Figura 109 – Curvas de tração dos 3 corpos de prova do processo GTAW

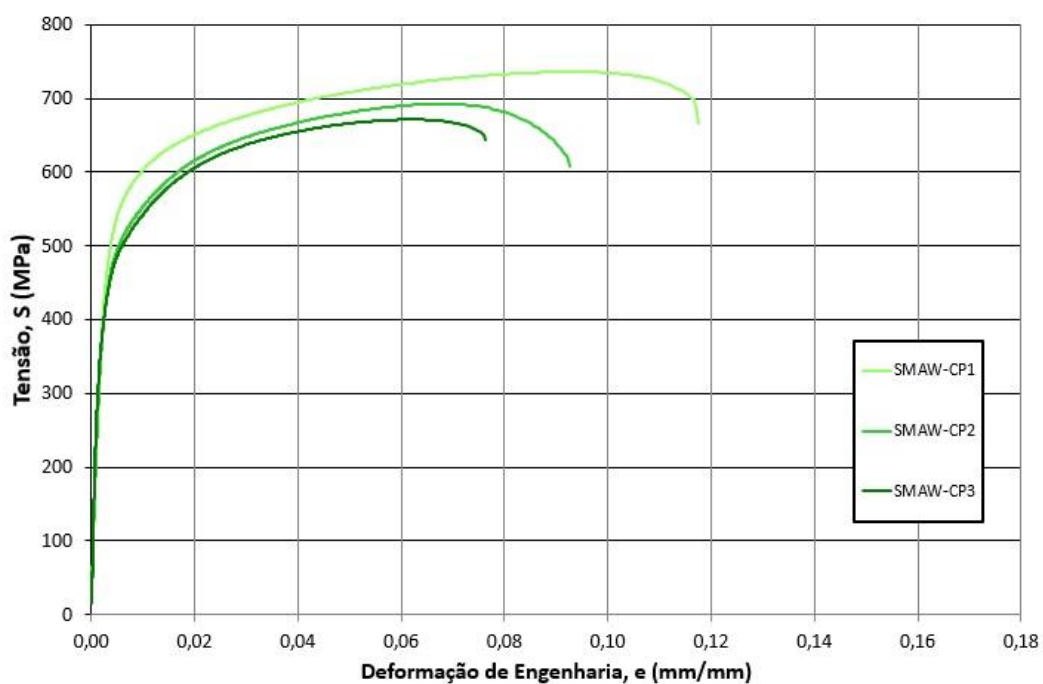


Figura 110 – Curvas de tração dos 3 corpos de prova do processo SMAW.

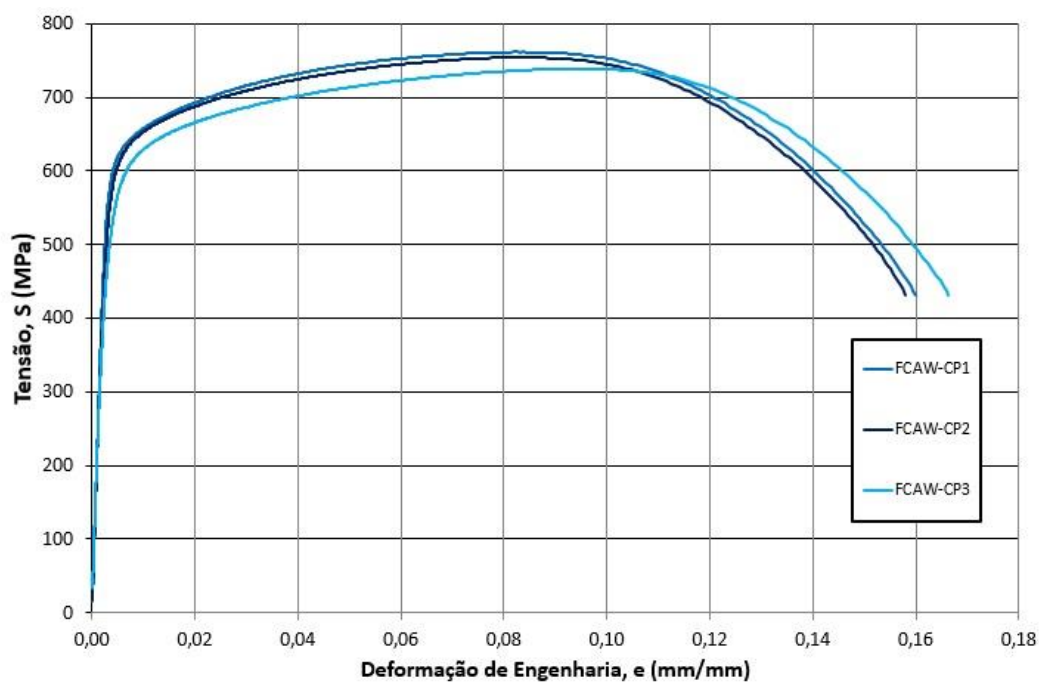


Figura 111 – Curvas de tração dos 3 corpos de prova do processo FCAW.

Para efeito de melhor visualização dos resultados a figura 112 mostra todas as curvas dos 3 (três) processos de soldagem juntas para melhor avaliação dos resultados. Foi feito uma tabela com os valores relevantes das curvas dos ensaios de tração, conforme a seguir.

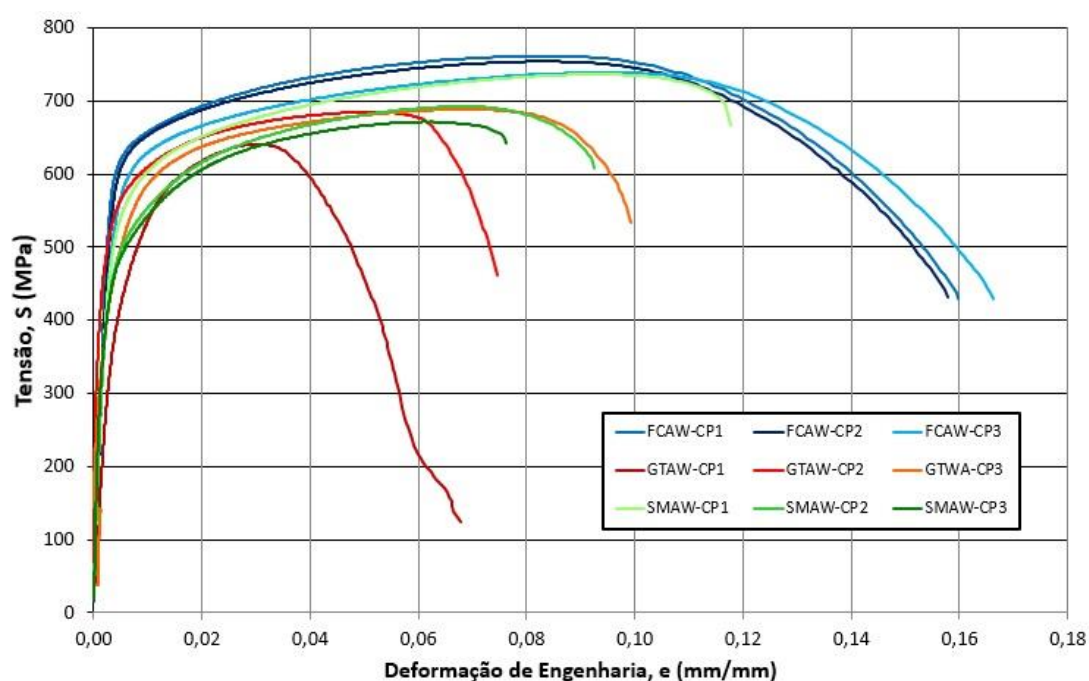


Figura 112 – Curvas de tração de todos os ensaios.

Planilhamos todos os dados obtidos nos ensaios de tração em cada corpo de prova, divididos por processo, mostrando os valores do limite de escoamento, limite de resistência a tração e deformação de engenharia, conforme tabela 23.

Tabela 23 – Resultados de tração dos corpos de prova de todos os processos de soldagem.

	FCAW			GTAW			SMAW		
	CP-1	CP-2	CP-3	CP-1	CP-2	CP-3	CP-1	CP-2	CP-3
Limite Escoamento (Mpa)	640	630	610	520	550	590	580	510	490
Limite Resistência (Mpa)	760	760	745	645	685	690	740	695	680
Deformação (mm/mm)	0,16	0,158	0,175	0,068	0,073	0,099	0,118	0,085	0,075

8. DISCUSSÃO

Neste capítulo serão abordados alguns pontos relevantes levantados e analisados durante o decorrer da parte experimental do nosso trabalho.

Um fator importante que deve ser levado em consideração é a experiência do soldador com cada um dos processos executados, no qual, o mesmo possui maior experiência nos processos SMAW, seguido por GTAW, e depois FCAW.

8.1. Produtividade entre os processos de soldagem

Durante os processos de soldagem, pode-se observar uma produtividade alta durante a soldagem com o processo por arame tubular (FCAW). Foram utilizados apenas 3 passes de solda, que quando somados, foram gastos 1 minuto e 49 segundos com arco aberto, o que foram suficientes para total soldagem da peça.

Para o processo TIG (GTAW), foram necessários 5 passes de solda, que totalizaram um tempo total de 7 minutos e 22 segundos com arco aberto, o que gerou um alto aporte térmico e consequentemente, deformação na peça soldada.

Durante o processo por eletrodo revestido (SMAW), apesar de o soldador ter maior tempo de experiência com este processo, foi o que ele encontrou maior dificuldade de execução. Para realizar 1 passe de solda completo, foi necessário a utilização de aproximadamente 3 eletrodos, e entre cada troca de eletrodo é necessário realizar a remoção da escória e aguardar a temperatura estar inferior a 150°C. Foram executados 5 passes de solda, em um tempo total de 4 minutos e 44 segundos com arco aberto.

8.2. Resultados dos ensaios mecânicos

8.2.1. Dobramento

As juntas soldadas foram aprovadas no teste de dobramento, pois segundo o critério da ASME IX (2015), não apresentaram descontinuidades com comprimentos superiores a 3 mm.

8.2.2. Tração

A tabela 24 apresenta os valores do metal de base normalizado comparados com os valores médios de resistência obtido no teste de tração.

Tabela 24 – Tabela comparativa entre valores obtidos nos CP x Valores normalizados pela ASME IX (2015).

VALORES NORMALIZADOS		ENSAIO DE TRAÇÃO (MPa) / COMPARATIVO					
	UNS S31803 Designation	GTAW		SMAW		FCAW	
		ENSAIADO	VARIÇÃO	ENSAIADO	VARIÇÃO	ENSAIADO	VARIÇÃO
Limite de Resistência MPa	620	673	53	705	85	755	135
Limite de Escoamento MPa	450	553	103	527	77	627	177

Observa-se a partir da tabela apresentada que os valores da resistência a tração obtidos para todas as juntas soldadas foram superiores aos valores mínimos especificado para cada um dos materiais, assim todas as juntas foram aprovadas neste teste, segundo aceitação da norma ASME IX (2015).

Os CPs do processo de soldagem por arame tubular (FCAW) tiveram seu rompimento no metal de base. Os CPs dos processos TIG (GTAW) e eletrodo revestido (SMAW) tiveram seu rompimento do metal de solda, porém, a resistência encontrada foi superior ao mínimo especificado na norma, justificando assim a aprovação das juntas.

8.2.3. Dureza

Os resultados de dureza medidos no metal de base no laboratório de metalografia da Universidade Santa Cecília foram diferentes dos valores fornecidos pelo fabricante do material. Deduzimos que o motivo desta divergência dá-se a falta de calibração do durômetro utilizado em nosso trabalho.

Tabela 25 – Tabela comparativa entre valor de dureza no metal de base obtido no laboratório UNISANTA X Valor de dureza no metal de base indicado no certificado do fabricante. Resultados na escala *Brinell*.

Dureza realizada UNISANTA	Dureza indicada pelo fabricante
227	265

A tabela 26 apresenta os valores médios de dureza obtidos em cada processo. Foram medidos a dureza no metal de base, metal de solda e na ZTA.

Tabela 26 – Valores médios de dureza encontrados nos CPs.

Região	GTAW (HB)	SMAW (HB)	FCAW (HB)
Metal base	229	229	223
Z.T.A.	245	241	241
Metal de adição	202	170	229

9. CONCLUSÃO:

O presente trabalho de avaliação dos diferentes processos de soldagem no material do aço inoxidável duplex permitiu obter as seguintes conclusões diretas:

- O processo por arame tubular apresentou melhor desempenho, apesar de que os outros dois processos dariam desempenho suficiente para serem aprovados conforme norma ASME IX (2015).
- O ensaio de dobramento não apresentou trincas com dimensões suficientes para serem reprovadas.
- O soldador não possuía grande experiência no processo FCAW, mesmo assim obteve-se um desempenho estruturalmente superior aos outros processos.
- Visualmente a superfície do processo TIG foi a que apresentou melhor acabamento.
- O processo de eletrodo revestido, apesar de mais trabalhoso, apresentou um desempenho melhor do que o processo TIG.
- O melhor desempenho estrutural obtido em um dos CPs soldados por TIG foi apenas similar à média obtida nos CPs soldados pelo processo de eletrodo revestido, conforme os resultados de tração.
- As juntas soldadas analisadas não apresentaram trincas nem poros, que produziram uma curva de tração suave, ou seja, sem mudanças bruscas no comportamento mecânico da relação tensão deformação registrada pelo equipamento de testes.

No ensaio de tração os corpos de prova romperam no metal de base para o processo de arame tubular (FCAW) e no metal de solda para os processos por eletrodo revestido (SMAW) e TIG (GTAW), porém, todos os valores obtidos foram superiores ao especificado na norma ASME IX (2015).

Apesar da divergência encontrada nos valores de dureza, os valores obtidos são comparáveis entre si, assim não houve grande variação da dureza entre o metal de base, o metal de solda e ZTA.

A má visualização do cordão de solda do processo arame tubular, se dá pelo material de adição ter sido aço inoxidável duplex, no qual o reagente utilizado (*Marble*) não é adequado para este material.

O processo de soldagem TIG gerou um maior aporte térmico durante a execução da solda, o que gerou maior deformação da peça quando comparados com outros processos.

A deformação plástica foi relativamente homogênea sem grandes variações no comportamento mecânico. Conforme ilustrado nos gráficos de tração, não houve queda dos valores de escoamento e resistência comparados aos valores fornecidos no certificado, isso sugere que não houve a presença de fases intermetálicas, pois essas fases fragilizam os materiais e são causadoras de falhas frágeis no material.

10. PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Quando os aços inoxidáveis duplex são submetidos à alta temperatura, a fase sigma pode surgir nos contornos de grão ferrita/ferrita e austenita/ferrita. O surgimento da fase sigma compromete as propriedades mecânicas do material, tais como tenacidade e ductilidade, o que pode resultar em falhas frágeis e diminuição da resistência a corrosão.

Para entender melhor este comportamento nossa proposta para trabalhos futuros será realizar análise química, análise metalográfica e ensaios não destrutivos nos corpos de prova soldados.

Para realizarmos estes ensaios, havíamos feito duas cotações em empresas especializadas em metalografia, sendo:

TORK - Controle Tecnológico de Materiais Ltda.

LABTESTE - Análises e Ensaios de Materiais Metálicos Ltda.

Abaixo os valores das cotações por amostra (são 3 amostras, uma para cada processo de soldagem).

Tabela 27 – Cotação realizada junto à empresa TORK - Controle Tecnológico de Materiais.

COTAÇÃO TORK

Descrição:		Preço / Amostra:	Preço Total:
1	Macrografia	R\$ 740,00	R\$ 2.220,00
2	Microestruturas		
3	Percentual de fases do metal base		
4	Percentual de fases do metal de adição		
5	Percentual de fases da ZTA		
6	Identificação da FASE SIGMA		
		TOTAL >>>	R\$ 2.220,00

Tabela 28 – Cotação realizada junto à empresa LABTESTE - Análises e Ensaios de Materiais Metálicos

COTAÇÃO LABTESTE

Descrição:		Preço / Amostra:	Preço Total:
1	Macrografia	-	R\$ 2.894,79
2	Microestruturas		
3	Percentual de fases do metal base		
4	Percentual de fases do metal de adição		
5	Percentual de fases da ZTA		
6	Identificação da FASE SIGMA		
		TOTAL >>>	R\$ 2.894,79

Infelizmente, não tivemos tempo hábil para a realização destes testes, e estudar com maiores detalhes a fase sigma e sua influência na resistência mecânica.

Estamos procurando outras empresas do ramo para nos ajudar com esta parte importante do nosso futuro trabalho, caso não seja possível ou não conseguirmos, vamos continuar procurando empresas com cotações menores que sejam mais acessíveis para o grupo.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

Associação Brasileira do Aço Inoxidável. Artigo Técnico – **Principais Características: Propriedades Mecânicas e Físicas dos aços inoxidáveis**. <http://www.abinox.org.br/biblioteca-tecnica-artigos-tecnicos-detalhes.php?bsc=ativar&codItem=96&q=PRINCIPAIS+CARACTER%CDSTICAS> Acesso em maio/2015.

ANDRADE, Thiago Fontoura de. **Precipitação de fase de laves no aço inoxidável superferrítico 28%Cr – 4%Ni – 2%Mo-Nb**, 85f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e Materiais), Área de Engenharia Metalúrgica e Materiais – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2006.

ANDREUCCI, R, **Ensaio por Ultrassom**, Associação Brasileira de Ensaaios Não Destrutivos e Inspeção, 2014

ANDREUCCI, R, **Líquidos Penetrantes**, Associação Brasileira de Ensaaios Não Destrutivos e Inspeção, 2014.

ANDREUCCI, R, **Radiologia Industrial**, Associação Brasileira de Ensaaios Não Destrutivos e Inspeção, 2014.

ASM – **Metal Handbook** – Welding, Brazing and Soldering, vol. 6, 9ª ed. Metals Park, Ohio, USA, 1993.

ASME section IX – Boiler and Pressure Vessel Code, 2015

Associação Brasileira do Aço Inoxidável. 100 anos de aço inox no Brasil e no mundo. **Revista INOX**, São Paulo, Janeiro/Março, nº 39, p. 14-15, 2012. <http://www.abinox.org.br/revista-inox-edicoes.php?e=1&bsc=&ret=V&returl=http%3A%2F%2Fwww.abinox.org.br%2Frevista-inox-edicoes.php&slcRevista=144> - Acesso em maio/2015.

BAULY, Júlio Cesar. **Caracterização Microestrutural e Propriedades de Juntas Dissimilares Entre Aços Inoxidáveis Fabricadas Por Processos de Fusão**, 147f. Dissertação (Mestrado em Ciências), na Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear – Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2000.

CALLISTER Jr, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução**. 7. Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2008.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D.G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8º edição. Editora LTC, Rio de Janeiro. 2012.

CARRAMANHOS, D.M. **Texturas de deformação e recristalização de aços inoxidáveis ferríticos dos tipos AISI 430 e 409**. Tese de Mestrado - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2006.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7º edição. Publicação da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. São Paulo, 2012.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica – Materiais de Construção Mecânica**. 2. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1986.

DAVIM, J. P.; MAGALHÃES, A. G. **Ensaaios Mecânicos e Tecnológicos**. 3. ed, Porto: Publíndustria Edições Técnicas, 2010.

ACIARIANEWS - <http://aciarianews.blogspot.com.br/2012/12/desgaseificadores-vacuo-vd-e-vod.html> - Acesso em março/2015.

ALIBABA - http://portuguese.alibaba.com/promotion/promotion_oxygen-furnace-promotion-list.html - Acesso em abril/2015.

SHIMADZU do Brasil - <http://www.shimadzu.com.br/> - Acesso em maio/2015 .

Efeito da usinagem na estrutura e propriedades mecânicas do aço superausteníticos ASTM A351 CN3MN. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, Janeiro/Março, vol. 60, 2007.

GRAVALOS, Márcio; MARTINS, Marcelo; DINIZ, Anselmo; ROBERTO, Paulo. **Efeito da usinagem na estrutura e propriedades mecânicas do aço**. SCIELO - http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672007000100013 Acesso em maio/2015.

FLUXO DE PRODUÇÃO ACESITA. http://www.acesita.com.br/pop_fluxos.html - Acesso em maio/2015.

FUNDAÇÃO BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, **Curso de Inspetor em Soldagem – CIS – Volume 1**, 2ª edição, Publicado, 2013.

LIMA, Daniela Bianchi Ponce Leon de. **Avaliação da Soldabilidade do Aço Inoxidável Superduplex UNS S32750**, 136f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia – Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR, 2006.

MARTINS, Marcelo. **Caracterização microestrutural-mecânica e resistência à corrosão do aço inoxidável super duplex ASTM A890 / A890M Grau 6ª**, 260f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Metais), Área de Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais – USP Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2006.

Metals Handbook - **Metallography, Structure and Phase Diagrams**. 8º volume, ASM, Metals Park, Ohio, USA, 1973.

Norma PETROBRÁS N-1738, Rev C, maio de 2009.

Núcleo Inox – **Coletânea de Informações Técnicas, Aço Inoxidável – Noções Básicas.**

http://www.nucleoinox.com.br/upfiles/arquivos/downloads/acoinoxidavel_nocoessbasicas.pdf - Acesso em abril/2015.

Núcleo Inox – **Coletânea de Informações Técnicas, Aço Inoxidável – Composição Química e Aplicações dos Aços Inoxidáveis.**

<http://www.nucleoinox.com.br/upfiles/arquivos/downloads/composicaoquimicapropriedadeseaplicacoes.pdf> - Acesso em abril/2015.

NUNES, Laerce de Paula; KREISCHER, Anderson Teixeira. **Introdução à Metalurgia e aos Materiais Metálicos.** 1. ed.: Interciência, 2010.

OLIVEIRA, R. G. **Produção e reciclagem de aços inoxidáveis.** Monografia - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

PEREIRA, Patrícia Apicelo de Souza. **Efeito da Energia de Soldagem na Microestrutura de um Aço Inoxidável Duplex e Super Duplex**, 134f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais), Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais – UENF, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campo dos Goytacazes/RJ, 2009;

PLAINE, A.H. **Soldagem por fricção e mistura (FSW) no aço inoxidável austenítico AISI 304.** Dissertação de Mestrado. São Carlos. Universidade Federal de São Carlos, 2013.

RABECHINI, F. M. **Investigação das transformações de fase durante envelhecimento isotérmico de um aço inoxidável hiperdúplex.** Dissertação de Mestrado. São Bernardo do Campo: FEI, 2014.

RAMIREZ, A. J. **Estudo da precipitação de nitreto de corno e fase sigma por simulação térmica da zona afetada pelo calor na soldagem multipasse de aços inoxidáveis dúplex**. Dissertação de Mestrado. São Paulo: USP, 1997.

REVISTA INOX – Associação Brasileira do Aço Inoxidável (ABINOX), 2015.

RIZZO, E.M.S. **Introdução ao processo de refino secundário dos aços**. Publicação da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. São Paulo, 1959.

ROHDE, Regis Almir. **Metalografia Preparação de Amostras: Uma abordagem prática**. Versão 3.0, LEMM Laboratório de Ensaios Mecânicos e Materiais, 2010.

SILVA, André, COLPAERT, Hubertus - **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. São Paulo, 2008.

SILVA, André, MEI, Roberto; **Aços e Ligas Especiais**. São Paulo, 1988.

SILVA, André; MEI, Roberto. **Aços e Ligas Especiais**. 3.ed. São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda, 2010.

SILVA, Ricardo Rodrigues. **Avaliação da zona termicamente afetada de um aço inoxidável supermartensítico**, 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas), Área de Metalurgia da Transformação – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG, 2010.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Composição Química dos Aços**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 1989.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaaios Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos Teóricos e Práticos**. 5. ed, Editora Edgard Blucher Ltda, 1982.

TEBECHERANI, Ciro de Toledo Piza. **Aços inoxidáveis – Artigo Técnico**. http://www.shimmer.com.br/smi/pg_art_tec/Artigo_para_pipesystem_sobre_inox1.pdf - Acesso em maio/2015.

TELLES, Pedro C. Silva. **Materiais para Equipamentos de Processo**. 6.ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2003.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; DE MELLO, Fábio Décourt, **Soldagem: processos e metalurgia** – São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

ANEXOS:

ANEXO A - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AÇOS INOXIDÁVEIS.
AÇOS AUSTENÍTICOS, %MÁXIMA.

Tipos de aço ABNT	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Outros
201	0,15	5,50	1,00	0,06	0,03	16,00	3,50	N
		7,50				18,00	5,50	0,25
202	0,15	7,50	1,00	0,06	0,03	17,00	4,00	N
		10,00				19,00	6,00	0,25
205	0,12	14,00	1,00	0,06	0,03	16,50	1,00	N
	0,25	15,50				18,00	1,75	0,32 / 0,40
301	0,15	2,00	1,00	0,045	0,03	16,00	6,00	
						18,00	8,00	
302	0,15	2,00	1,00	0,045	0,03	17,00	8,00	
						19,00	10,00	
302 B	0,15	2,00	2,00	0,045	0,03	17,00	8,00	
			3,00			19,00	10,00	
303	0,15	2,00	1,00	0,20	0,15	17,00	5,00	M0 (A)
					mín.	19,00	10,00	0,60
303 Se	0,15	2,00	1,00	0,20	0,06	17,00	8,00	Se
						19,00	10,00	0,15 mín.
304	0,08	2,00	1,00	0,045	0,03	18,00	8,00	
						20,00	10,50	
304 L	0,03	2,00	1,00	0,045	0,03	18,00	8,00	
						20,00	12,00	
304 N	0,08	2,00	1,00	0,045	0,03	18,00	8,00	N
						20,00	10,50	0,10 / 0,16
305	0,12	2,00	1,00	0,045	0,03	17,00	10,50	
						19,00	13,00	
308	0,08	2,00	1,00	0,045	0,03	19,00	10,00	
						21,00	12,00	
309	0,20	2,00	1,00	0,045	0,03	22,00	12,00	
						24,00	15,00	
3095	0,08	2,00	1,00	0,045	0,03	22,00	12,00	

						24,00	15,00	
--	--	--	--	--	--	-------	-------	--

310	0,25	2,00	1,50	0,045	0,03	24,00	19,00	
						26,00	22,00	
3105	0,08	2,00	1,50	0,045	0,03	24,00	19,00	
						26,00	22,00	
314	0,25	2,00	1,50	0,045	0,03	23,00	19,00	
			3,00			26,00	22,00	
316	0,08	2,00	1,00	0,045	0,03	16,00	10,00	M0
						18,00	14,00	2,00 / 3,00
316 L	0,03	2,00	1,00	0,045	0,03	16,00	10,00	M0
						18,00	14,00	2,00 / 3,00
316 F	0,08	2,00	1,00	0,20	0,10	16,00	10,00	M0
					mín.	18,00	14,00	1,75 / 2,50
316 N	0,08	2,00	1,00	0,045	0,03	16,00	10,00	M0 2,00 / 3,00
						18,00	14,00	N 0,10 / 0,16
317	0,08	2,00	1,00	0,045	0,03	18,00	11,00	M0
						20,00	15,00	3,00 / 4,00
317 L	0,03	2,00	1,00	0,045	0,03	18,00	11,00	M0
						20,00	15,00	3,00 / 4,00
321	0,08	2,00	1,00	0,045	0,03	17,00	9,00	Ti >=
						19,00	12,00	5 x C
329	0,10	2,00	1,00	0,040	0,03	25,00	3,00	M0
						30,00	6,00	1,00 / 2,00
330	0,08	2,00	0,75	0,040	0,03	17,00	34,00	
			1,50			20,00	37,00	
347	0,08	2,00	1,00	0,045	0,03	17,00	9,00	Nb + Ta >=
						19,00	13,00	10 x C
348	0,08	2,00	1,00	0,045	0,03	17,00	9,00	Nb + Ta >= 10 x C
						19,00	13,00	Ta 0,10 máx.
							I	CO 0,20 máx.
384	0,08	2,00	1,00	0,045	0,03	15,00	17,00	
						17,00	19,00	

(A) Opcional.

ANEXO B - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AÇOS INOXIDÁVEIS.
AÇOS MARTENSÍTICOS, %MÁXIMA.

Tipo de aço ABNT	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Outros
403	0,15	1,00	0,50	0,04	0,03	11,50 13,00		
405	0,08	1,00	1,00	0,04	0,03	11,50 14,50		Al 0,10 / 0,30
410	0,15	1,00	1,00	0,04	0,03	11,50 13,50		
414	0,15	1,00	1,00	0,04	0,03	11,50 13,50		Ni 1,25 / 2,50
416	0,15	1,25	1,00	0,06	0,15 mín.	12,00 14,00	0,60 (A)	
416 Se	0,15	1,25	1,00	0,06	0,06	12,00 14,00		Se 0,15 mín.
420 (B)	0,15 mín.	1,00	1,00	0,04	0,03	12,00 14,00		
420 F	0,15 mín.	1,25	1,00	0,06	0,15 mín.	12,00 14,00	0,60 (A)	
422	0,20 0,25	1,00	0,75	0,025	0,025	11,00 13,00	0,75 1,25	Ni 0,50 / 1,00 V 0,15 / 0,30 W 0,75 / 1,25
431	0,2	1,00	1,00	0,04	0,03	15,00 17,00		Ni 1,25 / 2,50
440 A	0,60 0,75	1,00	1,00	0,04	0,03	16,00 18,00	0,75	
440 B	0,75 0,95	1,00	1,00	0,04	0,03	16,00 18,00	0,75	
440 C	0,95 1,20	1,00	1,00	0,04	0,03	16,00 18,00	0,75	
501	0,10 mín.	1,00	1,00	0,04	0,03	4,00 6,00	0,40 0,65	
502	0,10	1,00	1,00	0,04	0,03	4,00 6,00	0,40 0,65	

(B) O aço tipo ABNT 420 pode ser solicitado objetivando carbono nas faixas 0,15/0,35 e 0,35/0,45 caso se destine a uso geral ou aplicação em cutelaria respectivamente.

ANEXO C - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AÇOS INOXIDÁVEIS.
AÇOS FERRÍTICOS, %MÁXIMA.

Tipo de aço ABNT	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Outros
409	0,08	1,00	1,00	0,045	0,045	10,50 11,75		Ti $\geq 6 \times C$ Ti 0,75 máx.
429	0,12	1,00	1,00	0,04	0,03	14,00 16,00		
430	0,12	1,00	1,00	0,04	0,03	16,00 18,00		
430F	0,12	1,25	1,00	0,06	0,15 mín.	16,00 18,00	0,60 (A)	
430F Se	0,12	1,25	1,00	0,06	0,06	16,00 18,00		Se 0,15 mín.
434	0,12	1,00	1,00	0,04	0,03	16,00 18,00		
436	0,12	1,00	1,00	0,04	0,03	16,00 18,00	0,75 1,25	Nb + Ta $\geq 5 \times C$ C 0,70 máx.
442	0,20	1,00	1,00	0,04	0,03	13,00 23,00	0,75 1,25	
446	0,20	1,50	1,00	0,04	0,03	23,00 27,00		N 0,25

(A) Opcional.

ANEXO D – DATASHEET CONSUMÍVEL E2209 DO FABRICANTE BÖHLER WELDING



EN ISO 17633-A:2006: T 22 9 3 NL P M 1
EN ISO 17633-B:2006: T 22 9 3 NL P C 1
AWS A5.22-95: TS209-FB1
E2209T1-4
E2209T1-1

BÖHLER CN 22/9 PW-FD

FCAW tube wire, stainless steel
Resistant to corrosion

DESCRIPTION:

Rutile tube wire for the welding of duplex 1.4462 / S31803 stainless steel in all positions. Developed for the junction of austenitic/ferritic stainless steel with duplex micro-structure, as well as for welding dissimilar junction and coating welding. The deposited metal is resistant to inter-granular corrosion (in humid means, up to +250°C). High resistance to corrosion by pites (CPT ASTM G48 / method A (24 h) up to 25°C) and resistant to corrosion under tension in fluids containing chlorides, for example, as sea water.

Specially developed to meet the requirements of the offshore industry, cargo ships, petrochemical and chemical industry and paper and cellulose. It works in temperatures ranging from -46°C to +250°C. Excellent wetability characteristics, self-detachable slag, exemption of splashes and good superficial finishing of the chord.

TYPICAL CHEMICAL COMPOSITION OF THE DEPOSITED METAL:

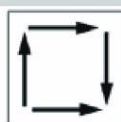
% Weight	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Mo	%N	PRE _N	FN
	≤0.03	0.8	0.9	22.7	9.0	3.2	0.13	≥35	35-50

TYPICAL MECHANICAL PROPERTIES OF THE DEPOSITED METAL:

(*)	u
Flow Limit (LE) N/mm ² :	600
Resistance Limit (LR) N/mm ² :	800
Stretching (S) [L ₀ = 5d ₀] %:	27
Charpy Impact V (J)	+20°C: 80 -20°C: 65 -46°C: 45

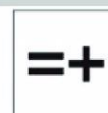
(*) u No treatment, as welded - Protection gas Air + 18CO₂.

OPERATIONAL DATA:



Drying: **Possible, 150°C/24h**
Protection gas: **Air + 15-25% CO₂ max**
100% CO₂

Ømm Current (A) Voltage (V)
1.20 100 - 220 20 - 31



Weld it with the torch slightly inclined (about 80°), slightly oscillate - which is recommended for welding out of position. When using 100%CO₂ as a protection gas, it is required to increase the voltage in 2V. The gas flow at the edge of the torch should be from 15 to 18 l/min. Preheating and inter-pass temperature as required for the base metal.

BASE METALS:

Duplex stainless steel of the same and similar composition, as well as welding dissimilar junction or metallic coating.

1.4462 X2CrNiMoN22-5-3, 1.4362 X2CrNiN23-4, 1.4462 X2CrNiMoN22-5-3 with 1.4583
X10CrNiMoNb18-12, 1.4462 X2CrNiMoN22-5-3 with P235GH / P265GH, S255N, P295GH, S460N,
16Mo3, UNS S31803, S32205.

WARNING: The information presented herein is not a guarantee or certification for which we can be held legally responsible; this may be altered without previous notice.

Aug/2008 Rev. 0

WELDING - 0800-119002

ANEXO E – DATASHEET CONSUMÍVEL ER316L DO FABRICANTE WELD-INOX

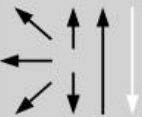
WI M 316 - L - ER 316 L								
AWS A5.9 ER 316 L								
Arame de Inox								
Aplicação								
M 316 L								
Arame para soldagem de aços inoxidáveis do tipo AISI 316 L e CF 3M, ou revestimentos altamente resistentes à corrosão sobre os aços carbono e baixa liga. O depósito de solda é resistente á corrosão intergranular e pode ser utilizado em temperaturas entre 195°C e 350°C.								
Composição Química (Típica)								
C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu
0,03	18,0 - 20,0	11,0 - 14,0	2,0 - 3,0	1,0 - 2,5	0,30 - 0,65	0,03	0,03	0,75
Propriedades Mecânicas (Típica)								
Resistência a Tração (Mpa)				Alongamento (%- mín)				
490				30				
Parâmetros de Soldagem								
Ø	Tensão (V)	Faixa de Corrente (A)	Gás de Proteção		Tipo de Corrente			
0,8	18 - 24	60 - 200	Ar +20- 25% CO2		CC+			
0,9	18 - 26	70 - 250						
1,0	18 - 32	80 - 300						

ANEXO F – DATASHEET CONSUMÍVEL E310-16 DO FABRICANTE BÖHLER WELDING



UTP 68 H

fully austenitic CrNi stick electrode

Classifications					
EN ISO 3581-A		AWS A5.4		Material-No.	
E 25 20 R 32		E 310-16		1.4842	
Characteristics and field of use					
The rutile coated stick electrode UTP 68 H is suitable for joining and surfacing of heat resistant Cr-, CrSi-, CrAl-, CrNi-steels/cast steels. It is used for operating temperatures up to 1100° C in low-sulphur combustion gas. Application fields are in the engineering of furnaces, pipework and fittings.					
UTP 68 H is weldable in all positions except vertical down. Fine droplet. The surface of the seams is smooth and finely rippled. Easy slag removal free from residues.					
Base materials					
Material-No.		DIN		Material-No.	
1.4710		G-X30 CrSi 6		1.4837	
1.4713		X10 CrAl 7		1.4840	
1.4762		X10 CrAl 24		1.4841	
1.4828		X15 CrNiSi 20 12		1.4845	
1.4832		G-X25 CrNiSi 20 14		1.4848	
				DIN	
				G- X40 CrNiSi 25 12	
				G- X15 CrNi 25 20	
				X15 CrNiSi 25 20	
				X12 CrNi 25 21	
				G- X40 CrNiSi 25 20	
Joining these materials with non- and low alloyed steels is possible.					
Typical analysis in %					
C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe
0,10	0,6	1,5	25,0	20,0	balance
Mechanical properties of the weld metal					
Yield strength R _{p0,2}		Tensile strength R _m		Elongation A	
MPa		MPa		%	
> 350		> 550		> 30	
				Impact strength K _v	
				J	
				> 47	
Welding instruction					
Weld stick electrode with slight tilt and with a short arc. Redry the stick electrodes 2 h at 120 – 200° C.					
Welding positions					
					
Current type DC (+) / AC					
Recommended welding parameters					
Electrodes Ø x L [mm]	1,5 x 250*	2,0 x 250*	2,5 x 250	3,2 x 350	4,0 x 400
Amperage [A]	25 – 40	40 – 60	50 – 80	80 – 110	130 – 140
*available on request					

ANEXO G – CERTIFICADO DE CONTROLE DE QUALIDADE DO MATERIAL SAF 2205 ADQUIRIDO

OUTOKUMPU

Avesta Works
QCM, Jan Egerstad

Your order - Ihre Bestellung - Votre commande

E-2941

Purchaser - Besteller - Acheteur

MEGALIGAS COMERCIO EXP. E IMPO
RUA SEVERA, 457 - V. MARIA
02111-000 SAO PAULO
BRAZIL

Dest.

UTILITY COMERCIAL IMP. EXP. LTDA

Product - Erzeugnisform - Produit

Stainless Steel Hot Rolled, Coil-Plate
finish 1D, cut edge

Grade - Werkstoff - Nuance

Outokumpu 2205
UNS S32205/UNS S31803

Brand mark
Herstellerzeichen
Signe du producteur

OUTOKUMPU

Inspector's stamp
Abnehmer - Stempel
Estamp de l'expert

AJA

Melting process
Erschmelzungsart
Procédé de fusion

E+AOD

Extent of delivery - Lieferumfang - Etendue de livre

Item Pcs Dimensions - Abmessungen - Dimensions

Pcs Anzahl

Poids Nombre

kg

mm

Heat No

Lot No

Heat No

Lot No

Heat No

Lot No

Heat No

Lot No

Heat No

Lot No

Heat No

Lot No

Heat No

Lot No

Heat No

Lot No

Heat No

Lot No

Heat No

Lot No

Heat No

Lot No

Heat No

Lot No

Heat No

Lot No

Heat No

Lot No

Heat No

Lot No

Heat No

Lot No

Heat No

Lot No

Heat No

Lot No

Heat No

Lot No

Heat No

Lot No

Heat No

Lot No

Heat No

Lot No

Heat No

Lot No

Heat No

Lot No

Chemical composition - Chemische Zusammensetzung - Composition chimique

Heat	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	Cu	Co	N
	.021	.39	1.51	.020	.001	22.39	5.69	3.19	.016	.26	.10	.172

Radioactive contamination check acc. IAEA recommendations: Satisfactory

Test results - Prüfergebnisse - Résultats des essais (1N/mm² = 1 MPa) F = Front - Anfang - Debut B = Back - Ende - Fin T = Transverse - Quer - Travers

Test Ref	Temp	RP	0.2	RP	1.0	RM	2"	HB	PSH
Probe Ref	*C	N/MM2	N/MM2	N/MM2	N/MM2	N/MM2	N/MM2	N/MM2	N/MM2
Min	+20	450	653	703	820	815	25	293	51.0
Max	+20	450	653	703	820	815	25	293	51.0

Microstructure acc to ASTM A 923-A: Satisfactory

Corrosion acc. EN ISO 3651-2C: Satisfactory

Heat treatment: Material temperature 1100 cel / Quenched (forced air + water)

Steel grade verification (PMI-spectroscopic): OK

Insp. and gauge measurement: Satisfactory

FORNECIDO Á INOXPLASMA COMÉRCIO DE METAIS LTDA., ATRAVÉS DE NOSSA NOTA

FISCAL Nº 000.001.336 DE 14/10/2015.

06 PLACAS DE: 8,00 x 105 x 135mm

ne de
MEGALIGAS Com. Exp. e Imp. Ltda

Outokumpu Stainless AG

Avesta Works

BOX 74

S-774 22 AVESSTA

SWEDEN

Regoffice: Stockholm Sweden, Registry: 596001-8748

Telephone : + 46 (0)226 813 57

Fax : + 46 (0)226 813 56

V.A.T no : SE556001874801

This material is found to comply with order requirements

Mats Kjellm

Authorized Inspector

