

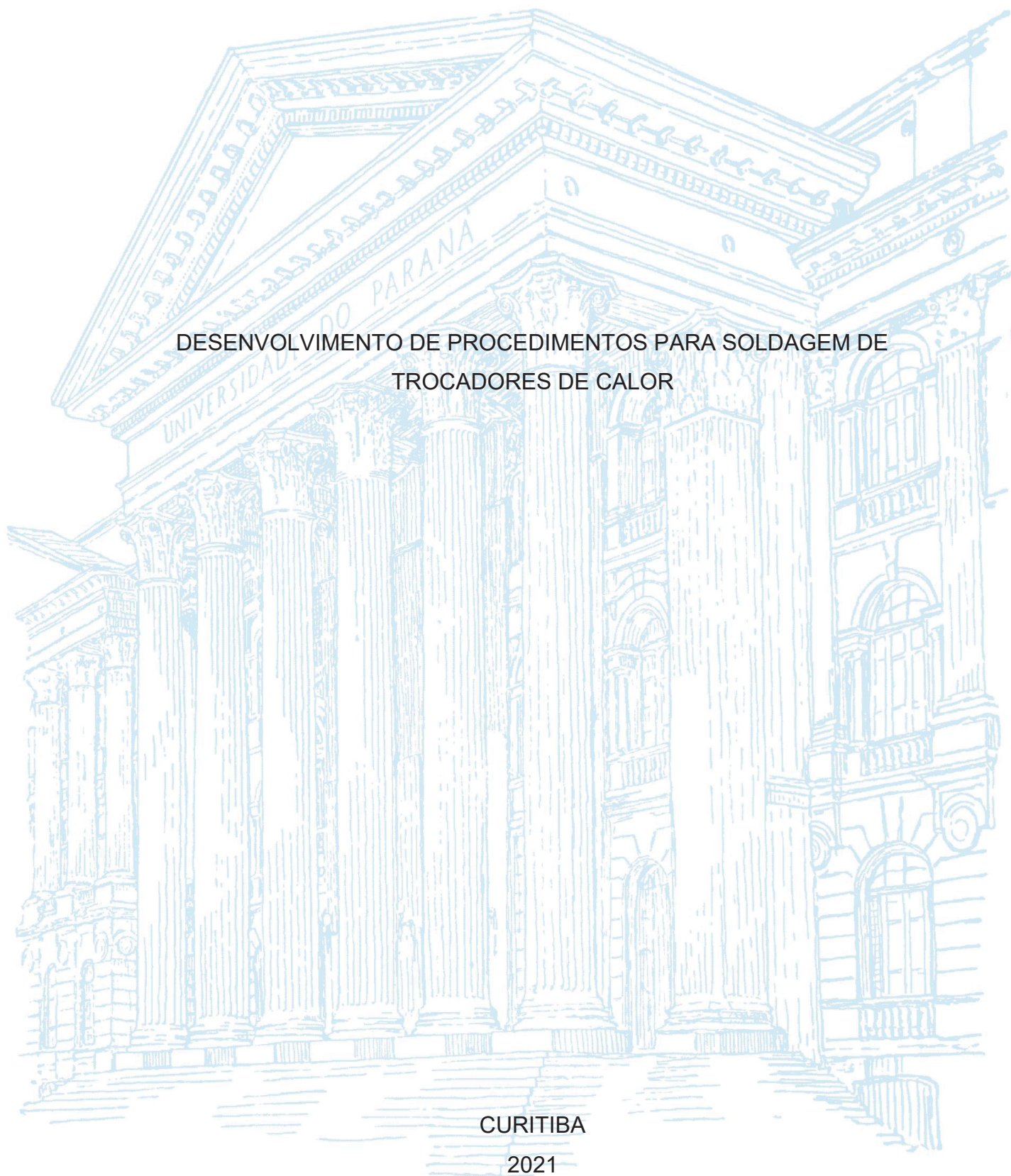
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ATARÉ MESSIAS DE FREITAS

DESENVOLVIMENTO DE PROCEDIMENTOS PARA SOLDAGEM DE
TROCADORES DE CALOR

CURITIBA

2021



ATARÉ MESSIAS DE FREITAS

DESENVOLVIMENTO DE PROCEDIMENTOS PARA SOLDAGEM DE
TROCADORES DE CALOR

Dissertação apresentada ao curso de Curso de Mestrado Profissional em Engenharia de Manufatura, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Ramón Cortés Paredes.

CURITIBA

2021

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

F866d	Freitas, Ataré Messias de Desenvolvimento de procedimentos para soldagem de trocadores de calor [recurso eletrônico] / Ataré Messias de Freitas. – Curitiba, 2021. Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura, 2021. Orientador: Ramón Cortés Paredes . 1. Aço inoxidável. 2. Soldagem. 3. Permutadores de calor. I. Universidade Federal do Paraná. II. Paredes, Ramón Cortés. III. Título. CDD: 672.52
-------	---

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
MANUFATURA - 40001016171P2

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE MANUFATURA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ATARÉ MESSIAS DE FREITAS** intitulada: **Desenvolvimento de procedimentos para Soldagem de Trocadores de Calor**, sob orientação do Prof. Dr. RAMON SIGIFREDO CORTES PAREDES, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 29 de Setembro de 2021.

Assinatura Eletrônica

12/11/2021 13:47:55.0

RAMON SIGIFREDO CORTES PAREDES

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

14/10/2021 10:36:10.0

GUSTAVO BAVARESCO SUCHARSKI

Avaliador Externo (INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO)

Assinatura Eletrônica

12/11/2021 19:08:55.0

ALDO SANTOS PEREIRA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

Avenida Coronel Francisco Heráclito dos Santos, 100 - Curitiba - Paraná - Brasil

CEP 81531-980 - Tel: (41) 3361-3123 - E-mail: ufprppgem@gmail.com

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 119259

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp> e insira o código 119259

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao PGMEC – Programa de Pós-graduação de Engenharia Mecânica e ao Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagens Especiais – LABATS da Universidade Federal do Paraná, em especial ao meu orientador Prof. Dr. Prof. Ramón Cortés Paredes pela orientação deste trabalho, realizada com dedicação e motivação e pelo incentivo durante todo o período de estudos.

Gostaria de agradecer também ao professor Dr. Gustavo Bavaresco Sucharski que proporcionou toda a estrutura física para a execução dos ensaios e orientação acadêmica em diversos momentos da fundamentação teórica e prática durante o decorrer dos estudos.

Agradeço também à equipe formada pelos estudantes Larissa Ribas dos Santos, Andressa Amorim Galdino Figueira, Rullian Pinheiro, Estéfano Poletto da Silva, Lucas Vinicius Hoeffling Ribas Pinto e Juan Fernando Costa de Matos pelo fundamental apoio na preparação e análise das amostras.

O agradecimento se estende também a empresa Lim Cross Projetos e Tecnologias, que proporcionou o espaço para soldagem, equipamentos e que pela figura da profissional Sandra A. Geffer ofereceu todo apoio logístico/técnico para a preparação das peças.

RESUMO

A fabricação de trocadores de calor no Brasil é escassa, principalmente de aços inoxidáveis, assim como também sua manutenção. A grande maioria são importados e/ou comercializados por empresas brasileiras. O principal problema em sua fabricação é a soldabilidade de aços inoxidáveis com aços ao carbono, conhecida como soldagem dissimilar. Normalmente os materiais utilizados na fabricação desses trocadores são os aços comercialmente conhecidos como ABNT 1020, aços inoxidáveis ferríticos (430) e austeníticos (304). A soldagem dos aços inoxidáveis gera na região da solda como também na zona termicamente afetada (ZTA), fases que são críticas tais como a fase sigma, alfa linha, ferrita delta entre outras. E quando unidos com aços ao carbono ocorre a precipitação de carbonetos de cromo o que limita significativamente a resistência a corrosão e abaixa a temperatura de operação dos trocadores. Para buscar a melhoria do processo foram realizadas uniões soldadas, através do processo MIG/MAG, de aços inoxidáveis 430 com o 304 e esses mesmos com aços ao carbono. As variáveis de estudo (tensão de referência, velocidade de solda, tecimento do cordão, técnica da tocha, tipo de gás de proteção e o arame de solda) foram combinadas conforme o Método Taguchi (planejamento robusto de experimentos). Esse método proporcionou as melhores combinações de solda com um número mínimo de experimentos, que, foram validados com ensaios de dureza, cálculo da diluição e microscopia. Com as combinações ótimas foi sugerido um procedimento que permitiu uma combinação ótima de parâmetros que minimiza as principais fases deletérias identificadas.

Palavras-chave: Soldagem de aços inoxidáveis; Método Taguchi, MIG/MAG.

ABSTRACT

The manufacture of heat exchangers in Brazil is scarce, mainly of stainless steels, as well as their maintenance. The vast majority are imported and / or marketed by Brazilian companies. The main problem in its manufacture is the weldability of stainless steels with carbon steels, known as dissimilar welding. Usually the materials used in the manufacture of these exchangers are commercial steels known as ABNT 1020, ferritic (430) and austenitic (304) stainless steels. The welding of stainless steels generates in the weld region as well as in the thermally affected zone (ZTA), phases that are critical such as the sigma phase, alpha line, delta ferrite, among others. And when joined with carbon steels, chromium carbides are forgotten, which limits complementing corrosion resistance and lowers the operating temperature of the exchangers. To seek an improvement in the process carried out, welded joints were used, through the MIG / MAG process, of 430 stainless steel with 304 and the same with carbon steel. The study variables (reference voltage, selling speed, cord weaving, torch technique, type of shielding gas and the selling wire) were combined according to the Taguchi Method (robust design of experiments). This method provided the best weld combinations with a minimum number of experiments, which were validated with hardness tests, dilution calculation and microscopy. With the optimum combinations, a procedure has been suggested that combines an optimal combination of parameters that minimizes the main harmful phases identified.

Keywords: Welding of stainless steels; Taguchi Method, MIG / MAG.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – FLUXO DAS ATIVIDADES PARA DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO	23
FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS DIFERENTES REGIÕES DA ZTA	27
FIGURA 3 - ESTRUTURA TÍPICA DE UM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO 500x	30
FIGURA 4 – MORFOLOGIAS DA FERRITA DELTA NA ZONA FUNDIDA DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS.....	33
FIGURA 5 – EFEITO DE ELEMENTOS INTERSTICIAIS NA FORMAÇÃO DE PRECIPITADOS NO RESFRIAMENTO DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS.....	34
FIGURA 6 – ESTRUTURA TÍPICA DE UM AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO 500x...	35
FIGURA 7 – PROCESSO DE SOLDAGEM POR PRESSÃO	40
FIGURA 8 – PROCESSO DE SOLDAGEM POR FUSÃO	40
FIGURA 9 – EQUIPAMENTOS PARA SOLDAGEM MIG/MAG	41
FIGURA 10 – EFEITO DA TENSÃO DE SOLDAGEM NA PENETRAÇÃO DA SOLDA	42
FIGURA 11 – INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO DO ARAME	48
FIGURA 12 – PADRÕES DE MOVIMENTAÇÃO DO ARAME	49
FIGURA 13 – TIPOS MAIS COMUNS DE JUNTA	54
FIGURA 14 – TIPOS MAIS COMUNS DE SOLDAS DE TOPO	55
FIGURA 15 – TIPOS MAIS COMUNS DE CHANFROS	55
FIGURA 16 – MICROESTRUTURA NA ZTA DE UM AUSTENÍTICO 304 COM 0,05%	58
FIGURA 17 – PRECIPITAÇÃO DE CARBONETO DE CROMO EM UM LIMITE DE GRÃO EM AÇO INOXIDÁVEL 316; a) MICROGRAFIA TEM; b) PERFIL DE CONCENTRAÇÃO DE Cr ATRAVÉS DOS LIMITES DOS GRÃOS	58
FIGURA 18 – MICROESTRUTURA DE CONTORNO DE GRÃO EM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO SENSITIZADO.....	59
FIGURA 19 – CURVAS DE SOLVUS DE Cr_{23}C_6 E TIC (e NbC) EM AÇO INOXIDÁVEL 18Cr-8Ni.	60

FIGURA 20 – SENSIBILIZAÇÃO EM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO: (A) DIAGRAMA DE FASES; B) CICLO TÉRMICO; (C) CURVA DE PRECIPITAÇÃO; (D) MICROESTRUTURA.....	61
FIGURA 21 – CICLOS TÉRMICOS E DETERIORAÇÃO DA SOLDA EM SOLDA DE AÇO INOXIDÁVEL 304.....	62
FIGURA 22 – ATAQUE DE FACA EM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO ESTABILIZADO.	63
FIGURA 23 – TRINCAS POR CORROSÃO SOB TENSÃO EM UM ARCO DE GÁS-TUNGSTÊNIO DE TUBO DE AÇO INOXIDÁVEL 304.....	64
FIGURA 24 – MICROESTRUTURA DE AÇO INOXIDÁVEL 430 (AMPLIAÇÃO 200x): (a) PRÓXIMO AO LIMITE DE FUSÃO; b) PRÓXIMO AO METAL BASE; c) METAIS COMUNS.	66
FIGURA 25 – FORMAS DE ARRANJO DE TROCADORES DE CALOR	68
FIGURA 26 – DETALHE DO PROCESSO DE EXPANSÃO DOS TUBO NO ESPELHO	69
FIGURA 27 – TUBOS SOLDADOS PELO PROCESSO TIG NO ESPELHO DO TROCADOR.....	70
FIGURA 28 – TIPOS DE TÉCNICAS DE TOCHA UTILIZADOS NO EXPERIMENTO.	77
FIGURA 29 – TIPOS DE TECIMENTO UTILIZADOS NO EXPERIMENTO.....	77
FIGURA 30 – SUPORTE PARA PLACA DE TESTES.	79
FIGURA 31 – SEQUENCIA DAS MEDIÇÕES DE TEMPERATURA.	79
FIGURA 32 – PERFIL GEOMÉTRICO DOS CORDÕES DE SOLDA.....	80
FIGURA 33 – MACROGRAFIA DOS CORDÕES DE SOLDA AIA x AIF	85
FIGURA 34 – MACROGRAFIA DOS CORDÕES DE SOLDA AC x AIA.....	86
FIGURA 35 – MACROGRAFIA DOS CORDÕES DE SOLDA AC x AIF	88
FIGURA 36 – INFLUÊNCIA DOS FATORES DE CONTROLE SOBRE A DILUIÇÃO PARA O PAR AIF X AIA	90
FIGURA 37 – INFLUÊNCIA DOS FATORES DE CONTROLE SOBRE A DILUIÇÃO PARA O PAR AC X AIA.....	91
FIGURA 38 – INFLUÊNCIA DOS FATORES DE CONTROLE SOBRE A DILUIÇÃO PARA O PAR AC X AIF	92
FIGURA 39 – MICROGRAFIA DOS CORDÕES DE SOLDA AIF x AIA – (200um) ..	93
FIGURA 40 – MICROGRAFIA DOS CORDÕES DE SOLDA AC x AIA – (200um)...	96

FIGURA 41 – MICROGRAFIA DOS CORDÕES DE SOLDA AC x AIF – (200um) ...	98
FIGURA 42 – MEDIÇÕES DA MICRODUREZA NOS CORDÕES DE SOLDA.	101
FIGURA 43 – INFLUÊNCIA DOS FATORES DE CONTROLE SOBRE A MICRODUREZA DO PAR AIF x AIA.....	104
FIGURA 44 – INFLUÊNCIA DOS FATORES DE CONTROLE SOBRE A MICRODUREZA DO PAR AC x AIA.	107
FIGURA 45 – INFLUÊNCIA DOS FATORES DE CONTROLE SOBRE A MICRODUREZA DO PAR AC x AIF.	110

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA PARA OS TRES PARES DE AMOSTRAS	82
GRÁFICO 2 – INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA E DA TÉCNICA DA TOCHA – EMPURRANDO	83
GRÁFICO 3 – INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA E DA TÉCNICA DA TOCHA – EMPURRANDO	83
GRÁFICO 4 – MEDIÇÃO DAS DUREZAS PARA O PAR AIF x AIA	102
GRÁFICO 5 – MEDIÇÃO DAS DUREZAS EM FUNÇÃO PARA O PAR AIF x AIA – ZTA	103
GRÁFICO 6 – MEDIÇÃO DAS DUREZAS EM FUNÇÃO PARA O PAR AC x AIA – ZTA	105
GRÁFICO 7 – MEDIÇÃO DAS DUREZAS EM FUNÇÃO PARA O PAR AC x AIA – ZTA	106
GRÁFICO 8 – MEDIÇÃO DAS DUREZAS EM FUNÇÃO PARA O PAR AC x AIF .	108
GRÁFICO 9 – MEDIÇÃO DAS DUREZAS EM FUNÇÃO PARA O PAR AIF x AIA – ZTA	109

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE ALGUNS AÇOS CARBONOS.....	26
TABELA 2 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ALGUNS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS.....	31
TABELA 3 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE ALGUNS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS.....	31
TABELA 4 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ALGUNS AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS	36
TABELA 5 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE ALGUNS AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS	37
TABELA 6 – REQUISITOS DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA PARA ARAMES DE AÇOS DOCES E DE BAIXA LIGA	47
TABELA 7 – PROBLEMAS TÍPICOS DE SOLDAGEM DE AÇOS INOXIDÁVEIS	56
TABELA 8 – ALGUNS TIPOS DE ARRANJOS ORTOGONAIS DE TAGUCHI.....	73
TABELA 9 – MATRIZ L8 (2 ⁷) - SETE PARÂMETROS COM DOIS NÍVEIS	76
TABELA 10 - ENSAIOS REALIZADOS COM A MATRIZ L8.....	78
TABELA 11 – PERCENTUAIS DE DILUIÇÃO POR PAR DE EXPERIMENTO.	89
TABELA 12 – PARÂMETROS TAGUCHI PARA SOLDA EM FUNÇÃO DA DILUIÇÃO.	111
TABELA 13 - PARÂMETROS TAGUCHI PARA SOLDA EM FUNÇÃO DA MICRODUREZA.	111

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	- Aço carbono
Ad	- Área depositada do cordão
Af	- Área fundida do metal de base
AIA	- Aço inoxidável austenítico
AIF	- Aço inoxidável ferrítico
Ar	- Argônio
AWS	- American Welding Society
CCC	- Cúbica de corpo centrado
CFC	- Cúbica de face centrada
CST	- Corrosão sob tensão
En	- Experimentos (com n variando de 1 a 8)
GMAW	- Gas Metal Arc Welding
HRB	- Rockwell hardness
HV	- Vickers hardness
L	- Linha
MIG	- Metal inert gas
MAG	- Metal active gas
Pn	- Parâmetros de soldagem (com n variando de 1 a 8)
R	- Ruído
S	- Sinal
SAE	- Society of Automotive Engineers
TIG	- Tungsten Inert Gas
ZF	- Zona fundida
ZTA	- Zona termicamente afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

% - percentual

Σ - somatório de números

@ - arroba

° - graus

ANOVA - Análise de variância

C - Carbono

CO₂ - Dióxido de carbono

Cr - Cromo

Fe - Ferro

K - Kelvin

L16 - Arranjo ortogonal com dois níveis com dezesseis ensaios

L18 - Arranjo ortogonal com três níveis com dezoito ensaios

L27 - Arranjo ortogonal com três níveis com vinte e sete ensaios

L32 - Arranjo ortogonal com dois níveis com trinta e dois ensaios

L4 - Arranjo ortogonal com dois níveis com doze ensaios

L4 - Arranjo ortogonal com dois níveis com quatro ensaios

L8 - Arranjo ortogonal com dois níveis com oito ensaios

L9 - Arranjo ortogonal com três níveis com nove ensaios

m - Metro

min - Minuto

mm - Milímetro

Mn - Manganês

Mo - Molibdênio

MPa - Mega Pascal

N - Nitrogênio

Ni - Níquel

ni - Número de repetições num ensaio

°C - Graus Celcius

pol - polegada

sec - Segundo

Si - Silício

SN - Signal / Noise

Ti - titânio

Ur - Tensão de referencia

V - Tensão de solda

Vs - Velocidade de solda

W - Watts

W/m.K - condutividade térmica

XX - fração volumétrica de carbono no ferro

yi - Característica da qualidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 JUSTIFICATIVA	20
1.2 OBJETIVOS	21
1.2.1 Objetivo geral	21
1.2.2 Objetivos específicos.....	21
1.3 METODOLOGIA.....	22
2 REVISÃO DE LITERATURA	25
2.1 AÇOS CARBONO	25
2.1.1 Características	25
2.1.2 Propriedades Mecânicas	26
2.1.3 Composição Química	26
2.1.4 Efeito da soldagem em aços carbono	27
2.1.5 Aços de Médio Carbono	28
2.1.6 Aços de Alto Carbono.....	28
2.1.7 Aços de Baixa Liga.....	29
2.2 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS	29
2.2.1 Características	29
2.2.2 Propriedades Mecânicas	30
2.2.3 Composição Química	31
2.2.4 Efeito da soldagem em aços inoxidáveis austeníticos	32
2.2.5 Efeito dos elementos intersticiais na formação de precipitados	34
2.2.6 Resistência à corrosão dos aços inoxidáveis austeníticos	34
2.3 AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS.....	35
2.3.1 Características	35
2.3.2 Propriedades Mecânicas	36
2.3.3 Composição Química	37
2.3.4 Efeito da soldagem em aços inoxidáveis ferríticos	37
2.3.5 Efeito dos elementos intersticiais na formação de precipitados	38
2.3.6 Resistência à corrosão dos aços ferríticos	39
2.4 SOLDAGEM	39
2.4.1 Definição	39
2.4.2 Soldagem GMAW (Gas Metal Arc Welding).....	41

2.4.3 Faixa de tensão de solda	42
2.4.4 Técnica de tocha	43
2.4.5 Velocidade de solda	44
2.4.6 Tipo de arame de solda.....	45
2.4.6.1 Arames de aço carbono.....	46
2.4.6.2 Arames de aço inoxidável.....	47
2.4.7 Velocidade de alimentação do arame de solda	48
2.4.8 Tipo de tecimento	49
2.4.9 Gás de Proteção	50
2.4.9.1 Propriedades dos gases	51
2.4.9.2 Dióxido de carbono (CO ₂).....	52
2.4.9.3 Argônio-dióxido de carbono (Ar / CO ₂)	53
2.4.10 Tipos comuns de juntas soldadas	54
2.5 PRINCIPAIS PROBLEMAS RELACIONADOS A SOLDAGEM DOS AÇOS INOXIDÁVEIS	56
2.5.1 Sensitização da Solda em Aços Inoxidáveis Austeníticos.....	57
2.5.2 Ataque de faca em Aços Inoxidáveis Austeníticos	62
2.5.3 Fissuração a quente em zona parcialmente derretida em Aços Inoxidáveis Austeníticos.....	63
2.5.4 Sensitização em Aços Inoxidáveis Ferríticos	64
2.5.5 Formação de Martensita e Crescimento de Grãos em Aços Inoxidáveis Ferríticos	65
2.5.6 Trincas nos cordões de solda em Aços Inoxidáveis Ferríticos	67
2.6 TIPOS DE TROCADORES DE CALOR	67
2.7 SOLDAGEM EM TROCADORES DE CALOR TIPO CASCO TUBO	69
2.8 MÉTODO TAGUCHI	71
3 MATERIAIS E MÉTODOS	74
3.1 MATERIAIS DE CONSUMO E EQUIPAMENTOS	74
3.2 METODOLOGIA.....	75
3.3 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS	76
3.4 PREVISÃO DA COMBINAÇÃO ÓTIMA	78
3.5 REALIZAÇÃO DAS SOLDAGENS	79
3.6 MEDIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS PARA OBTENÇÃO DAS VARIÁVEIS RESPOSTAS.....	80

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	81
4.1 COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA APÓS A SOLDAGEM PARA TODAS AS AMOSTRAS	81
4.2 RESULTADOS DA INSPEÇÃO VISUAL DA SOLDAGEM	84
4.2.1 Macrografia para o par AIF x AIA	84
4.2.2 Macrografia para o par AC x AIA	86
4.2.3 Macrografia para o par AC x AIF	88
4.3 CÁLCULO DA DILUIÇÃO	89
4.3.1 Cálculo da diluição do cordão de solda para o par AIF x AIA	90
4.3.2 Cálculo da diluição do cordão de solda para o par AC x AIA	91
4.3.3 Cálculo da diluição do cordão de solda para o par AC x AIF	91
4.4 ANÁLISE MICROSCÓPICA DA ZTA	92
4.4.1 Análise da ZTA para o par AIF x AIA	93
4.4.2 Análise da ZTA para o par AC x AIA	95
4.4.3 Análise da ZTA para o par AC x AIF	98
4.5 ANÁLISE MICRODUREZA	100
4.5.1 Análise da microdureza para o par AIF x AIA	101
4.5.2 Análise da microdureza para o par AC x AIA	104
4.5.3 Análise da microdureza para o par AC x AIF	107
4.6 PARÂMETROS PARA SOLDAGEM CONFORME TAGUCHI	110
4.6.1 Parâmetros para diluição	110
4.6.2 Parâmetros para microdureza	111
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	112
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	113
REFERÊNCIAS	114
APÊNDICE 1 – QUESTIONÁRIO	119
APÊNDICE 2 – CRONOGRAMA	123
ANEXO 1 – DADOS DA MÁQUINA DE SOLDA	126
ANEXO 2 – CURVA CARACTERÍSTICA DA MÁQUINA DE SOLDA	127
ANEXO 3 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AÇOS INOXIDÁVEIS COMERCIALMENTE UTILIZADOS (ARCELORMITTAL)	128
ANEXO 4 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AÇOS CARBONO (ARCELORMITTAL)	

1 INTRODUÇÃO

Segundo Shapiro (2011) trocadores de calor são dispositivos que trocam energia entre fluidos em diferentes temperaturas por modos de transferência de calor. Eles possuem inúmeras aplicações domésticas e industriais. No segmento industrial podem ser utilizados em processos de aquecimento e resfriamento de produtos, condensadores e evaporadores (PERUSSI, 2010).

Os trocadores de calor são caracterizados em função do mecanismo de transferência de calor, tipo de construção, modo de escoamento e quanto ao número de fluidos utilizados no processo de troca térmica (MELO, 2010). A forma mais utilizada para sua caracterização é a construtiva. Existem, dentre os mais usuais, os modelos do tipo casco tubo, casco (ou duplo tubo), do tipo placas e tubos aletados.

Especificamente os trocadores de calor do tipo casco tubo e do tipo casco possuem em seu processo de fabricação uma etapa de soldagem a arco elétrico das juntas dos materiais que os compõem (especificamente na junção dos tubos e na flange de fixação, denominada de espelho e emendas em suas curvas de trajeto interno). Devido aos mecanismos como corrosão sob tensão, corrosão por pite e defeitos no processo de soldagem os problemas como trincas e danos podem ser facilmente formados nessas juntas soldadas. Assim essas juntas tornam-se uma parte fraca em tais trocadores de calor (LIU et al., 2016), por isso serão objeto de maior detalhamento neste trabalho.

Normalmente os materiais utilizados na fabricação dos trocadores de calor do tipo casco tubo e do tipo casco são os aços comercialmente conhecidos como ABNT 1020, aços inoxidáveis ferríticos (430) e austeníticos (304). A união por fusão desses aços inoxidáveis gera na região da solda e zona termicamente afetada (ZTA), fases que são críticas tais como a fase sigma, alfa linha, ferrita delta, entre outras – denominadas de fases deletérias. Quando ocorre a solda entre esses materiais com aços ao carbono ocorre a precipitação de carbonetos de cromo o que limita significativamente a resistência a corrosão e abaixa a temperatura de trabalho dos trocadores de calor (a união por fusão entre materiais de diferentes composições é conhecida soldagem dissimilar).

Tais problemas são evidenciados durante o funcionamento desses equipamentos que em função da variação de temperatura e vibrações comuns ao processo que acabam trincando devido a tensões residuais de tração. A tensão

residual é um fator importante no desenvolvimento dessas fissuras que geralmente ocorrem nas juntas de tubo durante o serviço (HONG et al., 2020), resultando em vazamentos, misturas entre fluidos, e em alguns casos, falhas catastróficas devido a grandes variações de temperatura.

Visando minimizar as falhas mencionadas nas juntas soldadas nos trocadores, serão realizadas uniões soldadas, através do processo MIG/MAG, entre os materiais da estrutura dos trocadores de calor (ABNT 1020, aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos) obedecendo a combinação do Método Taguchi, para que seja possível determinar uma combinação de parâmetros que permita a redução de problemas de corrosão e defeitos de soldas.

1.1 JUSTIFICATIVA

Este projeto representa uma melhoria no processo de fabricação para os fabricantes como também para manutenção de trocadores de calor, o que se justifica pela pouca disponibilidade de informações consistentes para evitar retrabalhos ou manutenção como consequência de falhas em operação, principalmente trincas.

O processo de soldagem convencionalmente utilizado na fabricação de trocadores de calor é o TIG (Tungsten Inert Gas). Esse é um procedimento onde a qualidade da solda está ligada tanto ao soldador, quanto as condições de bancada, ou seja, dependente de uma infraestrutura mínima e habilidade do soldador. Visando facilitar essa operação, neste trabalho a soldagem foi executada através do processo MIG/MAG, pois esse método possibilita soldas de mais fácil execução, o que promove uma melhor visualização do comportamento das amostras quanto a fabricação e principalmente sua manutenção. As máquinas de soldagem MIG/MAG, são relativamente mais fáceis de manusear, uma vez que, diferente da TIG, o seu metal de enchimento é alimentado pela tocha de soldagem. Desta forma, os soldadores conseguem operar com mais segurança e rapidez.

Portanto, o estudo da soldagem MIG/MAG entre os principais aços inoxidáveis com aços ao carbono, proporcionará a elaboração de um método para soldagem conhecendo a qualidade da solda produzida. Para a indústria também será importante, porque além dos procedimentos testados poderá dimensionar e

prever as condições de soldagem com a alocação orçamentária correta além de proporcionar qualidade esperada pelos clientes.

1.2 OBJETIVOS

Desenvolvimento de um rol de parâmetros para soldagem dissimilar de componentes de trocadores de calor que minimize possíveis danos e fases deletérias que possam ocorrer em aços carbono, aços inoxidáveis austeníticos e aços inoxidáveis ferríticos.

1.2.1 Objetivo geral

Como objetivo geral da pesquisa, pretende-se estudar experimentalmente o comportamento das soldas dissimilares, tendo seus parâmetros selecionados através método Taguchi.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Revisão bibliográfica dos principais tipos de trocadores de calor e abordagem teórica sobre os materiais que os compõe. Serão abordados métodos de soldagem entre aços inoxidáveis e aços ao carbono utilizados em sua fabricação.
2. Aplicar o Método Taguchi para a definição das melhores combinações de parâmetros de tensão de referência, velocidade de solda, tecimento do cordão, técnica da tocha, tipo de gás de proteção e o arame de solda que minimizem a taxa de deposição e a dureza.
3. Caracterização das uniões soldadas através da inspeção visual, ensaios de dureza na ZTA e taxas de diluição.
4. Identificação das fases deletérias através da microscopia e possíveis regiões de sensitização – cálculo da ANOVA e da representação gráfica das tendências.
5. Elaboração de um rol de parâmetros de soldagem que minimize os defeitos decorrentes das falhas levantadas na pesquisa.

1.3 METODOLOGIA

A escolha metodológica adotada para a realização deste trabalho foi a pesquisa experimental.

Na primeira etapa foi realizada uma visita em empresas especializadas em fabricar e/ou reparar trocadores de calor do tipo casco tubo ou tipo casco casco. Nesta ocasião foi aplicado um questionário conforme APENDICE A. O objetivo dessa checagem foi definir os parâmetros mais comuns utilizados para o ajuste de fontes de solda, definição do arame de solda, gases de proteção e tipos de materiais mais comuns utilizados.

Desta forma, os principais parâmetros de soldagem (tensão de referência, velocidade de solda, tecimento do cordão, técnica da tocha, tipo de gás de proteção e o arame de solda) coletados na visita técnica foram combinados seguindo a metodologia estatística de Taguchi.

Na sequência foram unidos os seguintes materiais dissimilares através processo MIG/MAG:

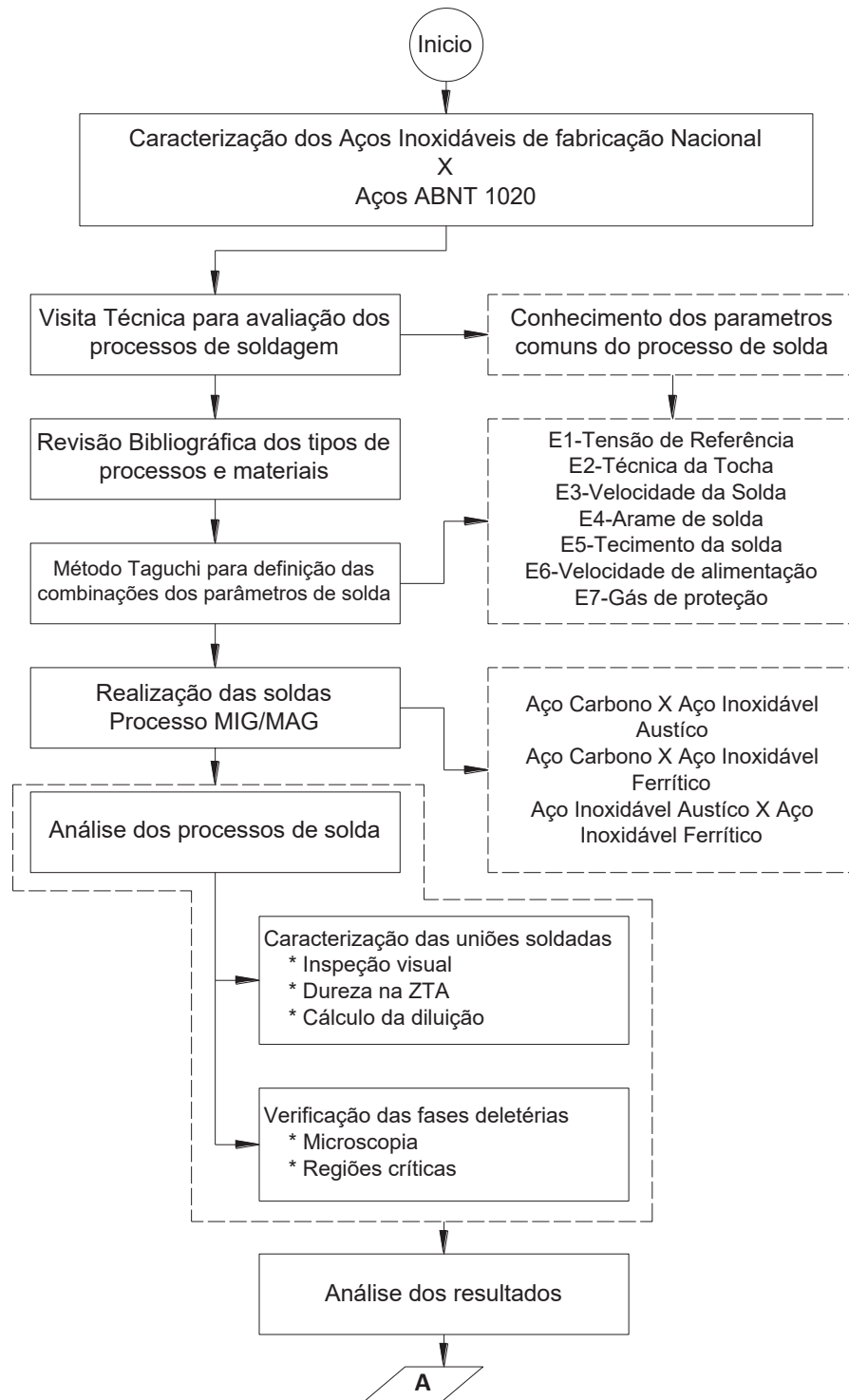
- Aços ABNT 1020 com aços inoxidáveis ferríticos (430);
- Aços ABNT 1020 com aços inoxidáveis austeníticos (304);
- Aços inoxidáveis austeníticos (304) com aços inoxidáveis ferríticos (430).

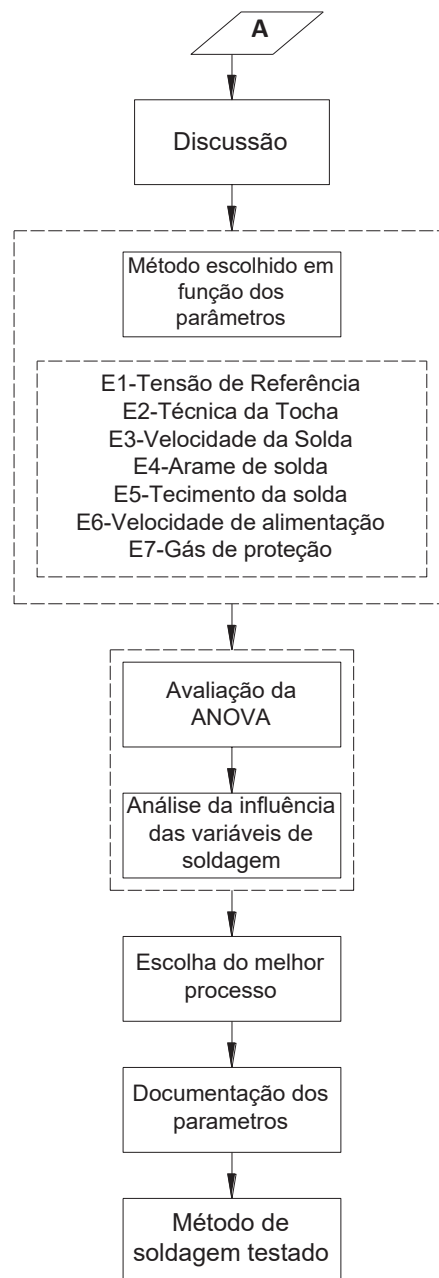
As soldas foram executadas seguindo a seleção de parâmetros aplicados conforme o método Taguchi. As seguintes saídas foram observadas:

- Temperaturas de resfriamento logo após a soldagem foram monitoradas para cada par escolhido;
- Caracterização de cada amostra através da inspeção visual;
- Cálculo da diluição;
- Ensaio de dureza.

Com essas atividades foi possível identificar possíveis regiões de fases deletérias. A FIGURA 1 ilustra o fluxo das atividades.

FIGURA 1 – FLUXO DAS ATIVIDADES PARA DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO





FONTE: O autor (2020).

Os dados coletados e analisados pela de variância em função das médias obtidas para o cálculo da ANOVA e da representação gráfica das tendências permitiram a escolha da melhor combinação baseada no método Taguchi para as variáveis de soldagem.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Esta revisão de literatura trata da apresentação dos aspectos relacionados às características, composição química e de microestrutura que afetam as propriedades mecânicas de aços carbono, aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos que influenciam no processo de construção dos trocadores.

Na sequência serão citadas as falhas de soldagem entre os aços inoxidáveis e o seu comportamento com a união com o aço carbono, bem como os defeitos de soldagem que podem ocorrer.

Posteriormente serão comentadas as características dos trocadores de calor mais comuns e do detalhamento construtivo dos trocadores de calor do tipo casco tubo e do tipo casco (duplo tubo). Serão descritos os materiais que compõe a estrutura interna e externa desses equipamentos, assim como os processos de junção dos diferentes materiais da sua estrutura no que diz respeito aos processos de soldagem.

2.1 AÇOS CARBONO

2.1.1 Características

Para Chiaverini (1988) aço é uma liga de ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação. O limite inferior a 0,008% corresponde à máxima solubilidade no ferro à temperatura ambiente e o limite superior 2,11% correspondente à máxima quantidade de carbono que se dissolve no ferro à 1148 °C.

Os aços são classificados de acordo com a ABNT e a SAE/AISI como 10XX, onde os dois primeiros algarismos significam que os aços são simplesmente ao carbono. A fração XX/100 indica o teor de carbono em peso presente no aço. Assim, o aço SAE 1020 é um aço simplesmente ao carbono, contendo aproximadamente 0,20%C em peso.

2.1.2 Propriedades Mecânicas

O Ferro é capaz de dissolver, na temperatura ambiente, um teor de Carbono máximo de cerca de 0,008% (fase ferrita). A quantidade que ultrapassa este valor forma uma outra fase junto com o Ferro, denominada cementita. A fase ferrita é macia e dúctil, enquanto a fase cementita é dura e frágil (CHIAVERINI, 1988). A quantidade destas e de outras fases presentes, bem como a maneira como se distribuem, formam a chamada “microestrutura”, também influenciando os patamares de resistência mecânica e propriedades demais mecânicas dos aços.

As propriedades mecânicas dos aços dependem em princípio da sua estrutura. Os tratamentos térmicos modificam, em maior ou menor escala, a estrutura dos aços, resultando na alteração mais ou menos pronunciada, de suas propriedades mecânicas.

2.1.3 Composição Química

Para Modenesi (2011) aços de baixo carbono incluem as séries AISI C-1008 e C-1025. O teor de carbono varia entre 0,10 e 0,25%, o de manganês entre 0,25 e 1,5%, o teor de fósforo máximo é de 0,04% e o de enxofre é de 0,05%.

A TABELA 1 lista a série dos alguns dos principais aços carbono e suas respectivas composições químicas.

TABELA 1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE ALGUNS AÇOS CARBONO

No SAE	C	Mn	P(máx.)	S(máx.)
1006	0,08 máx.	0,25-0,40	0,040	0,050
1010	0,08-0,13	0,30-0,60	0,040	0,050
1020	0,18-0,23	0,30-0,60	0,040	0,050
1045	0,43-0,50	0,60-0,90	0,040	0,050
1060	0,55-0,65	0,60-0,90	0,040	0,050
1070	0,65-0,75	0,60-0,90	0,040	0,050

FONTE: Adaptado – Modenesi (2011)

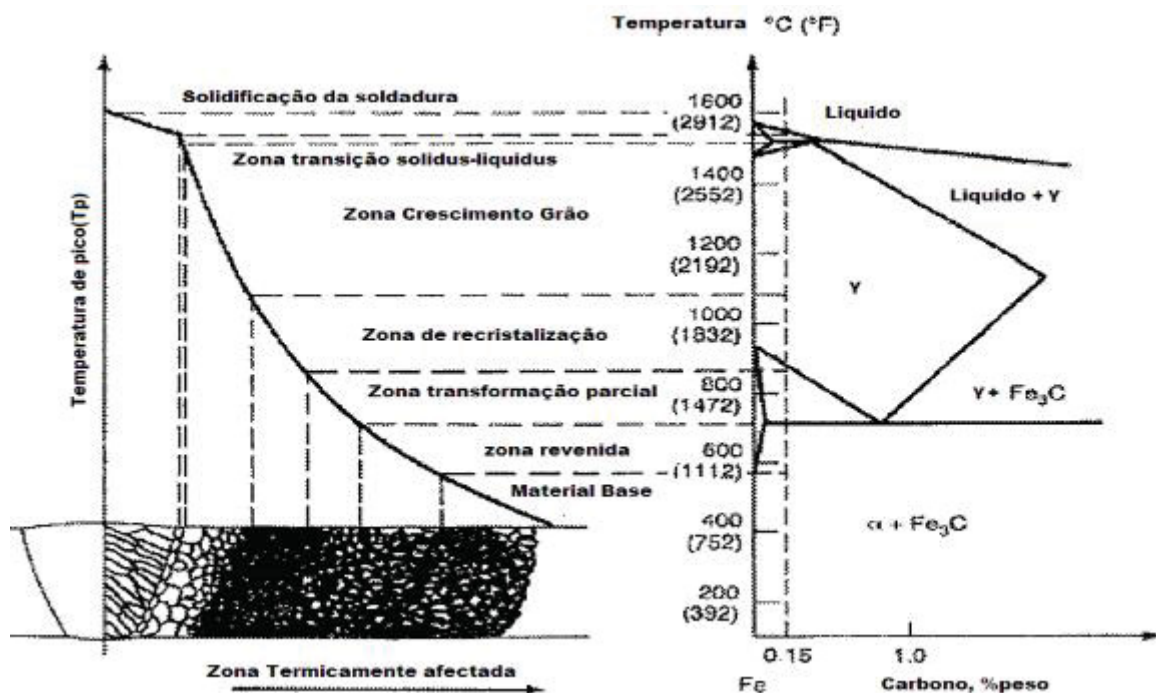
Estes são os aços mais comumente usados em fabricação e construção. São materiais facilmente soldáveis por qualquer processo a arco, gás ou resistência.

2.1.4 Efeito da soldagem em aço carbono

A ZTA de um aço carbono consiste em regiões de grãos grosseiros, grãos finos, microestrutura intercrítica e subcrítica, no sentido da interface com o metal de solda até o metal de base não afetado pelo calor (BATISTA, 2007).

A microestrutura da ZTA adjacente à linha de fusão é composta basicamente por microestrutura bainítica, que consiste em ripas de ferrita com carbonetos alinhados, e martensita (CAMPOS, 2015), produtos de elevada dureza. Devido à exposição ao calor gerado durante a soldagem e a ausência de precipitados que auxiliam na inibição do crescimento de grão, os grãos mais próximos da linha de fusão tornam-se grosseiros, diminuindo gradualmente sua dimensão em regiões mais afastadas da linha de fusão. A FIGURA 2 ilustra as regiões afetadas da soldagem.

FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS DIFERENTES REGIÕES DA ZTA



FONTE Campos (2015)

O maior problema de soldabilidade desses aços é a formação de trincas induzidas pelo hidrogênio, principalmente na zona termicamente afetada (ZTA) (PRABAKARAN; KANNAN, 2019). Outros problemas mais específicos incluem a perda de tenacidade na ZTA, ou na zona fundida (associada com a formação de

estrutura de granulação grosseira, durante a soldagem com baixo aporte térmico) e a formação de trincas de solidificação (em peças contaminadas ou na soldagem com aporte térmico elevado).

O ciclo térmico de soldagem a arco elétrico altera a microestrutura da região próxima da solda, passando a ser constituída por uma microestrutura complexa denominada de zona termicamente afetada (ZTA) levando a variações nas propriedades do material (CAMPOS, 2015). Trincas de reaquecimento e a frio na ZTA e ZF (zona de fusão) são, por vezes, observadas neste aço. Estes problemas podem ser minimizados com pré-aquecimento ou utilizando baixo aporte de calor com soldagem multipasse, de modo a reduzir o tamanho de grão da austenita e formar uma microestrutura bainítica de grãos finos (BERGQUIST, 2005).

2.1.5 Aços de Médio Carbono

Os aços de médio carbono encontram-se na faixa SAE 1030 e 1050. A composição é similar a dos aços de baixo carbono, exceto pelo teor de carbono entre 0,3 e 0,5% e o teor de manganês entre 0,6 e 1,65%. Em função do maior teor de carbono e de manganês, eletrodos de baixo hidrogênio são recomendados, particularmente para peças de maior espessura (MODENESI, 2011). Um pré-aquecimento entre 150 e 260°C pode ser necessário. Pós-aquecimento é recomendado algumas vezes para aliviar tensões residuais e reduzir a dureza que pode ser causada por um resfriamento rápido após soldagem.

Consumíveis com baixo hidrogênio e procedimentos de soldagem adequados devem ser usados para reduzir a possibilidade de trincas induzidas pelo hidrogênio. Por causa da elevada resistência pode ser necessária a utilização de eletrodos com elementos de liga para sejam alcançadas as propriedades do metal de base na região da solda (TELLES, 1979). Pode ainda ser necessário tratamento térmico pós soldagem para restabelecer a resistência e/ou tenacidade da zona termicamente afetada.

2.1.6 Aços de Alto Carbono

Estes aços incluem as séries SAE 1050 e 1095. A composição é similar aos aços anteriores, exceto pelo teor de carbono entre 0,5 e 1,03% e o teor de Mn entre

0,3 e 1,0% (CHIAVERINI, 1988). A soldagem destes aços necessita de cuidados especiais. Eletrodos/processos de baixo hidrogênio precisam ser usados com um pré-aquecimento entre 200 e 320°C, especialmente para peças mais pesadas. Um tratamento térmico após soldagem (alívio de tensões ou mesmo recozimento) é usualmente especificado. Os mesmos processos de soldagem podem ser usados para estes aços.

Para evitar o aparecimento de fissuras é recomendado o uso de eletrodos consumíveis de baixo hidrogênio, assim como os procedimentos de pré-aquecimento e alívio de tensões (TELLES, 1979). Eletrodos de aço inoxidável austenítico são às vezes usados para soldar aços de alto carbono.

2.1.7 Aços de Baixa Liga

Aços de baixa liga, contêm pequenas quantidades de elementos de liga que produzem consideráveis melhoria em suas propriedades. Os elementos de liga são adicionados para melhorar a resistência mecânica e a tenacidade, para diminuir ou aumentar a resposta ao tratamento térmico e para retardar os processos de formação de carepa e corrosão (ESAB; FORTES; VAZ, 2005).

Aços de baixa liga são geralmente definidos como aqueles que possuem teor total de liga de 1,5% a 5,0%. Os elementos de liga mais comuns são o manganês, silício, cromo, níquel, molibdênio e vanádio. Aços de baixa liga podem conter quatro ou cinco desses elementos de liga em diversos teores. Aços de baixa liga possuem maior limite de escoamento e de resistência que aços doces ou aços carbono estruturais.

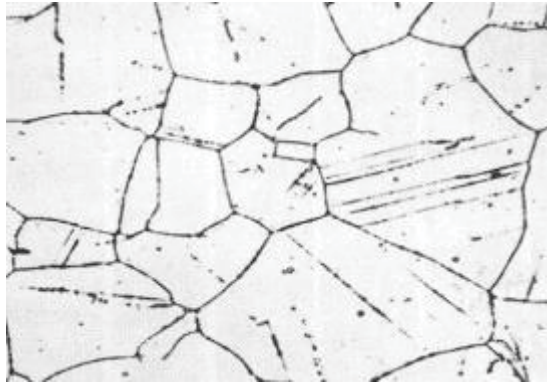
Aços de baixa liga com adição de níquel são frequentemente empregados em situações de baixa temperatura. Os aços perdem muito de sua resistência a altas temperaturas. Para evitar essa situação, são adicionadas pequenas quantidades de cromo ou de molibdênio (MODENESI, 2001).

2.2 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

2.2.1 Características

Para Paredes (1999) os aços inoxidáveis austeníticos são ligas principalmente de Fe-Cr-Ni não magnéticos que apresentam teores de Cr entre 15 a 26%, Ni até 35% e Mn até 15%. Sua microestrutura típica está ilustrada na FIGURA 3.

FIGURA 3 - ESTRUTURA TÍPICA DE UM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO 500x



FONTE: Paredes (1999)

Apresentam estrutura austenítica, não sendo endurecíveis por tratamento térmico. São entre os aços inoxidáveis, os materiais de melhor soldabilidade e resistência à corrosão. À temperatura ambiente apresentam um baixo limite de escoamento, alto limite de resistência e alta ductilidade (MODENESI, 2001; PAREDES, 1999).

São utilizados em aplicações em temperatura ambiente, em altas a temperaturas (até 1.150° C) e em baixíssimas temperaturas (condições criogênicas), uma série de alternativas que dificilmente são conseguidas com outros materiais (BRASIL, 2011).

Possuem estrutura CFC devido ao uso de elementos austenitizantes como o Ni, Mn e N. Em sua maioria não são é endurecíveis por tratamentos térmicos, apenas por trabalho a frio, o que pode torná-los ligeiramente magnéticos em determinadas designações (CARBÓ, 2008). São os que apresentam a mais elevada resistência à corrosão, em termos gerais, dentre as famílias de aços inoxidáveis. Portanto, quando a resistência à corrosão é o principal fator a ser considerado, os austeníticos são os mais aconselháveis.

2.2.2 Propriedades Mecânicas

Os aços inoxidáveis austeníticos possuem excelentes propriedades mecânicas, sendo elas: ductilidade, resistência mecânica em altas temperaturas e soldabilidade, além da alta resistência à corrosão. A TABELA 2 apresenta as propriedades mecânicas típicas de alguns aços inoxidáveis austeníticos.

TABELA 2 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ALGUNS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

TIPO AISI	LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	LIMITE DE ESCOAMENTO – 0,2%(MPA)	ALONGAMENTO (%)	DUREZA (HRB)
301	515	205	40	100
304	700	300	54	85
316	620	300	54	85
316L	515	170	40	95

FONTE: Adaptado -Lopes et al. (2005)

2.2.3 Composição Química

Possuem resistência à corrosão, propriedade determinante em seu desempenho. Entretanto possuem estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) na temperatura ambiente e não são passíveis de tratamento térmico de endurecimento (TSCHIPTSCHIN, 2010). Resta, para essa família, o mecanismo de endurecimento por deformação a frio, encruamento, fato que limita formas, dimensões e nível de endurecimento. A TABELA 3 mostra a composição química de alguns aços inoxidáveis austeníticos.

TABELA 3 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE ALGUNS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

Tipo	%C	%Cr	%Ni	%Mn	%Si	OUTROS
304	0,08	18-20	8-10,5	2,0	1,0	
304L	0,03	18-20	8-12	2,0	1,0	
304N	0,08	18-20	8-10,5	2,0	1,0	0,16-0,30%N
316	0,08	16-18	10-14	2,0	1,0	2-3%Mo
316L	0,08	16-18	10-14	2,0	1,0	2-3%Mo

FONTE: Adaptado -Alegre (2016)

2.2.4 Efeito da soldagem em aços inoxidáveis austeníticos

Apresentam como principais características a boa soldabilidade e excelente resistência à corrosão, alta ductilidade, alta resistência à fluência, porém baixos limites de escoamento e de resistência à temperatura ambiente. Por terem estrutura CFC não possuem transição dúctil frágil com a diminuição da temperatura e, portanto, possui elevada tenacidade. São muito susceptíveis ao fenômeno de corrosão intergranular conhecido como sensitização em consequência do processamento termomecânico ou quando expostos em determinadas temperaturas de serviço (CÔRTE, 2014).

Para teores de Ni inferiores a 1-1,5%, o material se comportaria como um aço completamente ferríticos durante o resfriamento a partir de altas temperaturas. Acima deste teor, existe uma faixa de temperaturas em que a liga é bifásica (austenita mais ferrita delta), que se amplia com o aumento do teor de Ni (PAREDES, 1999).

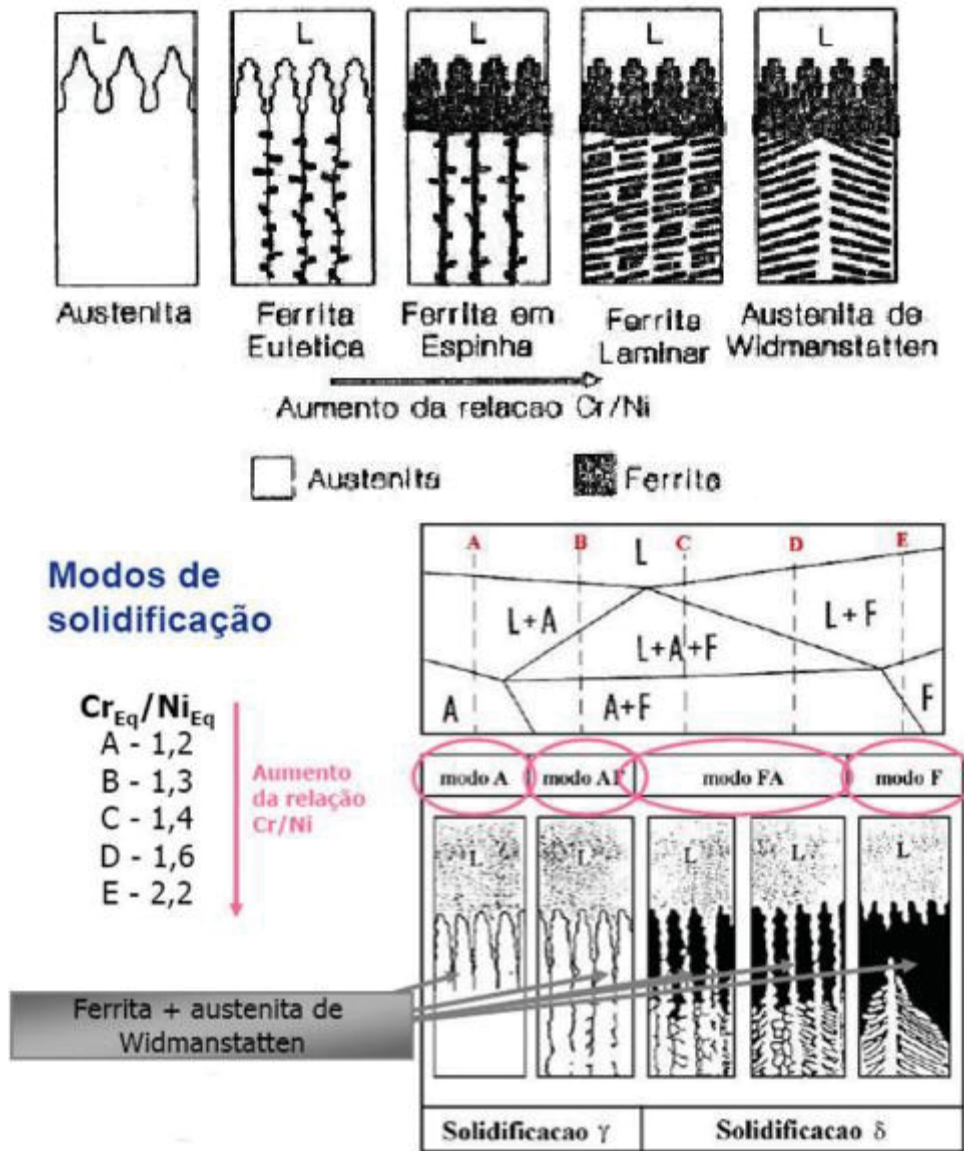
As regiões de diferentes orientações cristalográficas são favoráveis a formação de campos de segregação de vários elementos ou a precipitação de componentes metálicos, como é o caso dos carbonetos, sofrem um tipo de ataque corrosivo, chamado corrosão intergranular (sensitização), caracterizado pelo aparecimento de trincas no contorno dos grãos, à medida que as trincas avançam, os grãos do material vão se destacando até ruptura da peça (SEDRIKS, 1996). A sensitização, quando ocorre na soldagem normalmente está associada com a ZTA da solda e depende da composição química do material, das condições microestruturais, da deformação do material durante a soldagem e do aporte térmico do cordão de solda.

Uma fase líquida pode se solidificar inteiramente como austenita ou inicialmente como austenita e posteriormente como ferrita ou inicialmente como ferrita e depois como austenita ou ainda inteiramente como ferrita, à medida que a relação Cr/Ni aumenta (CHIAVERINI, 1988). Posteriormente, durante o resfriamento parte da ferrita formada durante a solidificação pode se transformar em austenita.

A transformação da ferrita delta em austenita é completa somente se o aço permanecer por um tempo suficientemente longo na faixa de temperaturas na qual a cinética é mais rápida (PAREDES, 1999). Quanto maior esta velocidade, menor

deve ser a extensão desta transformação. A FIGURA 4 mostra algumas morfologias possíveis da ferrita delta em função da relação Cr/Ni.

FIGURA 4 – MORFOLOGIAS DA FERRITA DELTA NA ZONA FUNDIDA DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS



FONTE: Paredes (1999)

Para Carbó (2008) um conteúdo de 4% de ferrita delta pode prever a fissuração a quente, sendo que ainda com 5% de ferrita delta o metal de solda pode apresentar fissuração a quente.

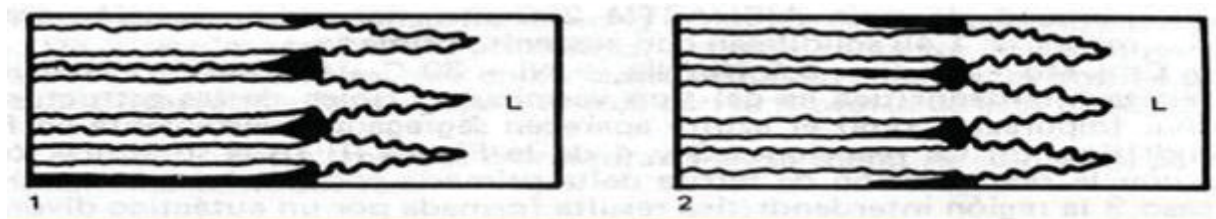
Algumas características das soldas das zonas fundidas dos aços inoxidáveis austeníticos resultam desta estrutura. Ela é predominante austenítica, onde a ferrita

delta é considerada, em geral, um constituinte desejável na zona fundida devido ao seu efeito favorável na resistência à fissuração na solidificação.

2.2.5 Efeito dos elementos intersticiais na formação de precipitados

Quando solidifica um aço inoxidável austenítico a primeira fase em ser formada pode ser a austenita ou ferrita delta. Em ambos os casos precipita, no espaçamento interdendrítico um eutético formado por austenita e ferrita delta (PAREDES, 1999). A ferrita delta interdendrítica pode transformar-se em forma parcial ou total em austenita secundária durante o resfriamento, gerando uma estrutura dúplex ou totalmente austenítica no metal de solda (FIGURA 5).

FIGURA 5 – EFEITO DE ELEMENTOS INTERSTICIAIS NA FORMAÇÃO DE PRECIPITADOS NO RESFRIAMENTO DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS



FONTE: Paredes (1999)

A morfologia da ferrita interdendrítica é do tipo vermicular, típica das estruturas de fundição. Impurezas como o enxofre aparecem segregadas fortemente na forma interdendrítica.

2.2.6 Resistência à corrosão dos aços inoxidáveis austeníticos

A melhora na resistência à corrosão de estrutura de grãos finos é atribuída ao maior número de caminhos de difusão (contornos de grão) para que o cromo enriqueça o filme passivo. O refino do grão diminui a energia livre de difusão do cromo, levando à formação de mais óxidos, fazendo com que a camada passiva se forme mais rapidamente (TORRES; CORREA; ANTUNES, 2016).

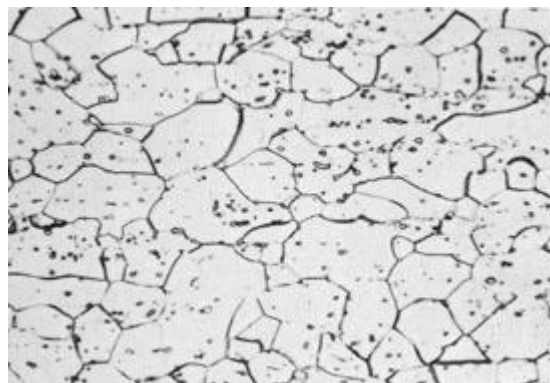
2.3 AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS

2.3.1 Características

Os aços inoxidáveis ferríticos são ligas Fe-Cr predominantemente ferríticas em qualquer temperatura até a sua fusão. Tem entre 12% a 30% de cromo e baixo teor de carbono (PAREDES; D'OLIVEIRA, ANA SOFIA, 2001). Sua microestrutura típica está ilustrada na FIGURA 6. Como não são austenitizados estes aços não podem ser endurecidos por têmpera e sua granulação só pode ser refinada por combinação de trabalho mecânico e recozimento de recristalização (MODENESI, 2001).

Os aços inoxidáveis ferríticos possuem boa resistência à corrosão, especialmente corrosão sob tensão, não são endurecíveis por tratamento térmico, possuem boa conformabilidade plástica e podem sofrer diversos fenômenos de fragilização com o aquecimento em certas faixas de temperatura (PAREDES, 1999).

FIGURA 6 – ESTRUTURA TÍPICA DE UM AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO 500x



FONTE: Paredes (1999)

Os aços inoxidáveis ferríticos apresentam estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC), o que lhes confere propriedades magnéticas. Estas ligas possuem boa ductilidade, alto valor de limite de escoamento e baixo custo, mas sua resistência mecânica em elevadas temperaturas é relativamente baixa quando comparada com os aços inoxidáveis austeníticos (AZEVEDO, FERRARESI, 2009). Também conhecidos por boa resistência à corrosão, mas se destacam, em relação

aos aços inoxidáveis austeníticos, por serem imunes a fenômenos de corrosão sob tensão. A soldabilidade dos aços inoxidáveis ferríticos é limitada devido ao crescimento de grãos, o que provoca uma diminuição da tenacidade na zona termicamente afetada (ZTA) e metal de solda (CÔRTE, 2014).

2.3.2 Propriedades Mecânicas

Os aços inoxidáveis ferríticos contêm, em geral, uma quantidade de cromo superior à dos martensíticos. Isso melhora a resistência à corrosão, mas em parte sacrifica outras propriedades, como a resistência ao impacto (BOND, 1969). O mais popular dos aços ferríticos é o 430. Com cromo superior a 16%, é um material com ótima resistência à corrosão. Sua capacidade de estampagem também é boa, mas estampagens muito profundas não podem ser conseguidas com esse tipo de aço (BRASIL, 2011). A TABELA 4 apresenta as propriedades mecânicas típicas de alguns aços inoxidáveis ferríticos.

TABELA 4 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ALGUNS AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS

TIPO AISI	LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	LIMITE DE ESCOAMENTO – 0,2%(MPa)	ALONGAMENTO (%)	DUREZA (HRB)
409	380	205	22	88
430	450	205	22	88
444	497	337	32	83
446	480	280	20	-

FONTE: Adaptado -Lopes et al. (2005)

Os aços inoxidáveis ferríticos quando comparados com os aços inoxidáveis austeníticos apresentam menor limite de escoamento, menor alongamento, menor encruamento, menor tenacidade e ductilidade e menor resistência à corrosão generalizada (PAREDES, 1999).

No entanto, são amplamente utilizados em meios que a corrosão sob tensão (CST) é um problema, onde os aços inoxidáveis austeníticos não tem bom desempenho. A tenacidade dos aços inoxidáveis ferríticos tende a deteriorar com o aumento do tamanho de grão e do teor de C. Possuem menor resistência mecânica

a alta temperatura que os aços austeníticos. Classes resistentes ao calor podem ser utilizadas até cerca de 870°C. (MODENESI, 2001).

2.3.3 Composição Química

Os aços inoxidáveis ferríticos se diferem basicamente através de sua composição química. A adição ou remoção de certos elementos, afeta diretamente as propriedades mecânicas do aço. Alguns aços inoxidáveis ferríticos podem ter menores teores de elementos intersticiais como C e N, graças ao advento de técnicas de refino mais acentuadas (LOPES et al., 2005).

A relação destes aços inoxidáveis ferríticos com as respectivas composições químicas (% em peso) encontra-se na tabela TABELA 5.

TABELA 5 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE ALGUNS AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS

Tipo	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Al	%Mo	OUTROS
405	0,08	1,0	1,0	11,5-13,5	0,1-0,3	-	-
409	0,08	1,0	1,0	10,5-11,8	-	-	0,5%Ti, até 0,5%Ni
430	0,12	1,0	1,0	16-18	-	-	-
430Ti	0,12	1,0	1,0	16-18	-	-	0,50%Ti
430Nb	0,12	1,0	1,0	16-18	-	-	0,50%Nb
442	0,20	1,0	1,0	18-23	-	-	-
446	0,25	1,0	1,0	23-27	-	-	-

FONTE: Adaptado - Lopes et al. (2005)

2.3.4 Efeito da soldagem em aços inoxidáveis ferríticos

Para Azevedo (2009) os aços inoxidáveis ferríticos apresentam uma baixa soldabilidade (comparados com os aços inoxidáveis austeníticos), pois a sua solda é caracterizada por ductilidade e tenacidade baixas. Estes problemas de soldabilidade têm limitado, até recentemente, a aplicabilidade destes aços em estruturas soldadas.

As vantagens do uso deste aço inoxidável foram baseadas em seu menor custo se comparado com outras classes de aços inoxidáveis e devido às suas propriedades físicas, especialmente coeficiente de expansão térmica e

condutibilidade térmica, que estão próximas aos aços ferríticos estruturais. Essas características evitam a ocorrência de alguns problemas associados à fadiga térmica (SILVA et al., 2013).

Recentemente, desenvolveram-se aços inoxidáveis ferríticos com inserção de teores de níquel e/ou titânio, os quais melhoram suas características mecânicas. Sua solidificação poderá ser 100% ferrita, no entanto, na soldagem desses materiais, dependendo do balanço entre os elementos estabilizadores da ferrita, existe a possibilidade de formação de austenita, que no resfriamento pode se transformar em martensita (AZEVEDO, FERRARESI, 2009).

2.3.5 Efeito dos elementos intersticiais na formação de precipitados

Nos aços inoxidáveis ferríticos, resfriamentos rápidos até a temperatura ambiente, a partir de 900°C, não impedem a precipitação de carbonetos e / ou nitretos ricos em cromo nos contornos de grão. Ao redor desses precipitados, são formadas regiões pobres em cromo, as quais, se não atingem o teor mínimo de cromo (12%) para produzir passividade, podem ser atacadas por meios agressivos e produzir corrosão intergranular (MODENESI, 2001). Essa condição é, normalmente, denominada sensitização e pode ocorrer durante processamentos termomecânicos ou por soldagem, como já comentado. Dos elementos de liga presentes nos aços inoxidáveis ferríticos, o carbono é o elemento mais importante relacionado com a resistência à corrosão intergranular. Teores de 0,01%C são suficientes para produzir sensitização nesses aços (SERNA-GIRALDO et al., 2007).

Aços inoxidáveis ferríticos, com baixos teores de elementos intersticiais, são susceptíveis à severa corrosão intergranular (BOND, 1969), fenômeno conhecido como sensitização. A sensitização pode ser reduzida, adicionando elementos estabilizadores, tais como titânio, nióbio e/ou zircônio. Esses elementos formam carbonetos e/ou nitretos mais estáveis, em elevadas temperaturas, que os carbonetos e/ou nitretos de cromo, reduzindo, apreciavelmente, a sensitização.

A baixas temperaturas, os elementos intersticiais (C e N) ficam em grande parte na forma de precipitados de carbonetos e nitretos, que podem ser intergranulares ou intragranulares. Os carbonetos e nitretos se dissolvem, quando o material é aquecido acima de cerca de 1000°C, o que coincide, quando o teor de intersticiais for suficientemente elevado, com a formação de austenita. Quando o aço

é resfriado, mesmo que rapidamente, os carbonetos e nitretos voltam a se formar se o teor de intersticiais for superior a 0,01%. O tamanho, quantidade, distribuição e condições de formação destes precipitados têm um importante efeito nas propriedades mecânicas e químicas destas ligas (LOPES et al., 2005).

2.3.6 Resistência à corrosão dos aços ferríticos

A redução no tamanho de grão de uma liga prejudica a resistência à corrosão. Porém, se o material for exposto a um ambiente em que a passivação pode ser estabelecida, o refinamento provoca melhora na resistência à corrosão, pois se forma um filme passivo mais estável (TORRES; CORREA; ANTUNES, 2016)

A melhora na resistência à corrosão de estrutura de grãos finos é atribuída ao maior número de caminhos de difusão (contornos de grão) para que o cromo enriqueça o filme passivo. O refino do grão diminui a energia livre de difusão do cromo, levando à formação de mais óxidos, fazendo com que a camada passiva se forme mais rapidamente (PAREDES, 1999).

2.4 SOLDAGEM

O termo soldagem é extremamente abrangente, tendo suas variáveis com inúmeras aplicações. No caso dos trocadores de calor a solda aqui estudadas será a MIG/MAG. A abordagem será com a explanação dos conceitos sobre a solda em si, faixa de tensão, velocidade de solda, tipos de arames mais usuais, velocidade de alimentação do consumível e tipo de tecimento.

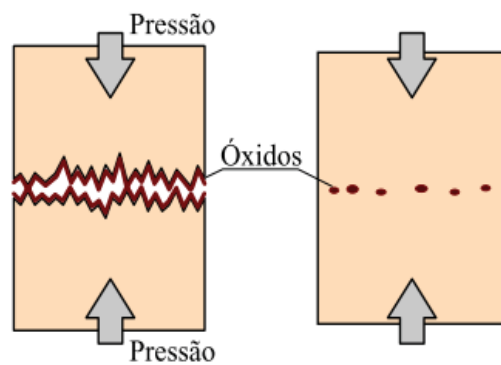
2.4.1 Definição

A soldagem é processo de união de materiais baseado no estabelecimento, na região de contato entre os materiais unidos, de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais. (MORTEAN et al., 2016).

Para Modenesi (2000) os processos de soldagem podem ser divididos em dois grupos: (a) processos de soldagem por pressão (ou por deformação) e (b) processos de soldagem por fusão.

O Primeiro meio consiste em deformar as superfícies de contato permitindo a aproximação dos átomos a distâncias em que o número de ligações formadas é suficiente para garantir qualquer resistência para a junta, conforme FIGURA 7.

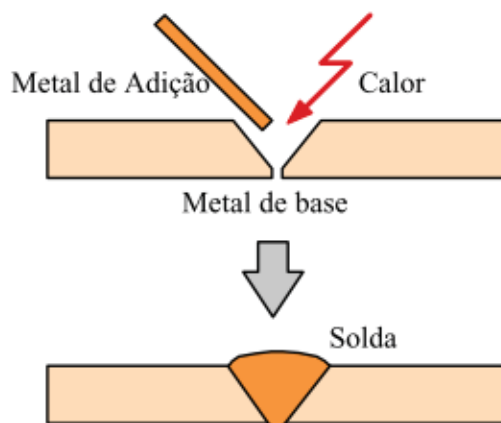
FIGURA 7 – PROCESSO DE SOLDAGEM POR PRESSÃO



FONTE: Modenesi (2000)

O segundo método consiste no aporte de calor na região de união até a sua fusão e do metal de adição – quando este é utilizado, fundindo as superfícies de contato e produzindo a união pela solidificação dos metais (FIGURA 8).

FIGURA 8 – PROCESSO DE SOLDAGEM POR FUSÃO



FONTE: Modenesi (2000).

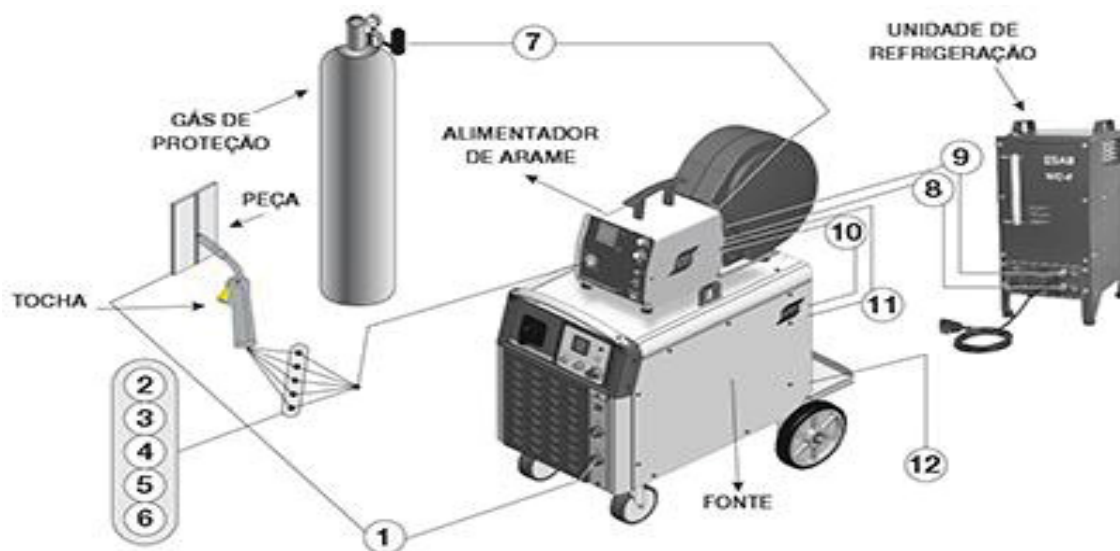
Existe uma vasta quantidade de processos de soldagem por fusão que podem ser organizados, por exemplo, de acordo com o tipo de fonte de energia usada para fundir as peças. Dentre estes, os processos de soldagem onde a fonte de energia é arco elétrico são os de maior importância industrial na atualidade.

Especificamente processo (Gas Metal Arc Welding - GMAW) ou MIG/MAG (Metal Inerte Gás ou Metal Ativo Gás), por ser o método utilizado para o experimento será objeto de estudo nesse trabalho.

2.4.2 Soldagem GMAW (Gas Metal Arc Welding)

O termo GMAW (Gas Metal Arc Welding) ou MIG/MAG (Metal inerte gás / Metal ativo gás) corresponde à terminologia americana e é a nomenclatura mais comum utilizada para definir esse processo de soldagem, sem distinção de acordo com o tipo de gás de proteção utilizado, que pode ser um gás ativo ou inerte ou mistura destes (O'BRIEN, 2004). Destacam-se como vantagens da soldagem MIG/MAG em comparação com o processo de eletrodo revestido: a alta produtividade; possibilidade de ser mecanizada ou automatizada; grande versatilidade de materiais e espessuras aplicáveis; ausência de operações de remoção de escória e maior facilidade de uso (BATISTA, 2018). A FIGURA 9, ilustra uma montagem padrão dos equipamentos de solda MIG/MAG.

FIGURA 9 – EQUIPAMENTOS PARA SOLDAGEM MIG/MAG



FONTE: Esab (2016).

Para o processo de soldagem MIG/MAG operar de maneira estável pelo menos dois requisitos básicos devem ser satisfeitos:

1) A velocidade média de fusão do arame tem que ser igual à velocidade média de alimentação do arame, e;

2) O metal de adição fundido deve ser transferido para a poça de fusão causando o mínimo de perturbações no processo (BATISTA, 2018). Para que esses requisitos sejam atendidos, alguns parâmetros de máquina e operação devem ser observados:

- a) Faixa de tensão de solda;
- b) Técnica de tocha;
- c) Velocidade de solda;
- d) Tipo de arame de solda;
- e) Velocidade de alimentação do arame de solda;
- f) Tipo de tecimento;
- g) Gás de proteção.

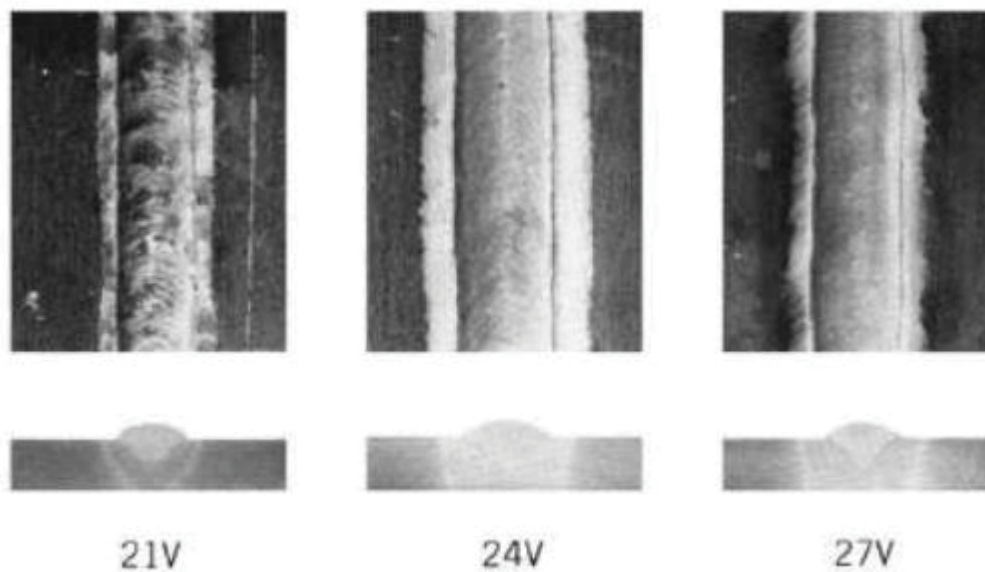
Notadamente, dentre os parâmetros listados, existem parâmetros de máquina, operador, material de adição e gás de proteção que não competem somente ao critério máquina, mas à fatores externos, assim far-se-á uma descrição da influência de cada variável no processo.

2.4.3 Faixa de tensão de solda

A tensão do arco juntamente com o comprimento do arco são parâmetros importantes na determinação das características do cordão (NUNES et al., 2011).

A tensão do arco depende do comprimento do arco, do tipo e do diâmetro do eletrodo, do gás de proteção, influenciando assim o modo de transferência. Em um processo em que estes parâmetros são constantes, um aumento de tensão do arco gera um aumento da largura e uma diminuição da altura (ou reforço) do cordão de solda, além da redução da penetração. A FIGURA 10 ilustra o efeito da variação da tensão da largura e penetração de cordões de solda.

FIGURA 10 – EFEITO DA TENSÃO DE SOLDAGEM NA PENETRAÇÃO DA SOLDA



FONTE: Nunes et al. (2011)

Tensões elevadas do arco provocam excesso de respingos de solda e mordeduras e tensões baixas implicam em falta de fusão e cordões muito convexos.

A variação na tensão do arco não afeta somente as características geométricas do cordão de solda, mas também a sua microestrutura e consequentemente o sucesso ou fracasso da operação de soldagem pela quantidade de metal transferido. Quando a tensão do arco é muito baixa a transferência de metal é feita tanto por curto-circuito (com baixa velocidade de alimentação) ou por transferência globular (alta velocidade de alimentação). O modo de transferência de metal de uma dada condição de soldagem depende também da intensidade da corrente elétrica do arco, composição química do metal de adição, tipo de gás de proteção, diâmetro e comprimento do eletrodo etc (MODENESI, 2011).

2.4.4 Técnica de tocha

Na soldagem MIG/MAG a tocha de soldagem é inclinada na direção da soldagem em cerca de 10° a 20° e pode ser arrastada ou empurrada (BONACORSO et al., 2017). Sua distância à peça de trabalho deve ser tal que a extremidade livre do fio, ou seja, a distância entre a borda inferior da ponta de contato e o ponto inicial do arco, é cerca de 10 - 12 vezes o diâmetro do fio [mm]. Se a tocha de soldagem estiver muito inclinada, existe o risco de que o ar seja sugado para o gás de proteção.

Para Moreira (2008) ao soldar arames sólidos, os movimentos da tocha frontal são geralmente usados. A soldagem reversa é usada com arames tubulares formadores de escória. A tocha de soldagem normalmente é movida usando um movimento ligeiramente para trás da posição de soldagem, este método é mais usado principalmente com chapas mais finas.

Para Scotti (2008) em chapas mais espessas, existe o risco de falta de fusão devido ao avanço do metal de solda. A falta de fusão causada pelo metal de solda avançando também pode ocorrer em outras posições se a soldagem for realizada em uma velocidade de soldagem muito baixa. Portanto, movimentos amplos da técnica da tocha devem ser evitados sempre que possível.

2.4.5 Velocidade de solda

Os efeitos da velocidade do percurso do arco são semelhantes aos da tensão de soldagem, pois a penetração é máxima em um determinado valor e diminui conforme a velocidade do percurso do arco varia (A. SCOTTI, 2008).

A velocidade de soldagem é a relação entre o caminho percorrido pelo arco ao longo da peça e o tempo gasto para percorrê-lo. Esse parâmetro é normalmente expresso em cm/min ou mm/min (ESAB; FORTES; VAZ, 2005). Três observações gerais podem ser enunciadas com respeito à velocidade de soldagem:

- quando a espessura da peça aumenta a velocidade de soldagem deve diminuir;
- para uma dada espessura de peça e tipo de junta, quando a corrente de soldagem aumentar a velocidade de soldagem também deve aumentar e vice-versa;
- maiores velocidades de soldagem são alcançadas empregando a técnica de soldagem empurrando.

Com velocidades mais baixas, muito metal é depositado em uma área e a solda derretida tende a rolar na frente do arco e "amortece" a placa de base. Isso evita mais penetração (FONSECA; PINHEIRO, 2016). Em altas velocidades, o calor gerado pelo arco não tem tempo suficiente para derreter substancialmente a área do material de base.

2.4.6 Tipo de arame de solda

O arame para solda MIG é um tipo de eletrodo não revestido, alimentado à poça de fusão, protegido por um gás de proteção. Esse arame, em combinação com o gás de proteção, produzirá a deposição química que determina as propriedades físicas e mecânicas da solda (ESAB, 2014). Os principais que influenciam a escolha do arame para a soldagem MIG/MAG são:

- Composição química do metal de base;
- Propriedades mecânicas do metal de base;
- Gás de proteção empregado;
- Tipo de serviço ou os requisitos da especificação aplicável;
- Tipo de projeto de junta.

Na soldagem MIG/MAG de aços carbono a função primária das adições de elementos de liga é controlar a desoxidação da poça de fusão e ajudar a determinar as propriedades mecânicas da solda (FONSECA; PINHEIRO, 2016). Desoxidação é a combinação de um elemento com o oxigênio da poça de fusão, resultando numa escória ou num filme vítreo sobre a superfície do cordão de solda. A remoção do oxigênio da poça de fusão elimina a principal causa de porosidade no metal de solda (PAREDES, 1999). São adicionados elementos como silício (Si), manganês (Mn), alumínio (Al), titânio (Ti) e zircônio (Zr)

O silício é o elemento mais comum empregado como desoxidante em arames usados na soldagem MIG/MAG. Geralmente os arames contêm de 0,40% a 1,00% de silício, dependendo da aplicação (ALEGRE, 2016). Nessa faixa percentual o silício apresenta uma capacidade de desoxidação muito boa. Quantidades maiores de silício aumentarão a resistência mecânica da solda com pequena redução na ductilidade e na tenacidade. No entanto, acima de 1,0-1,2% de silício o metal de solda pode tornar-se sensível à fissuração (PAREDES, 1999).

O manganês é também comumente utilizado como desoxidante e para aumentar a resistência mecânica. O manganês está presente com 1,00% a 2,00% dos arames de aço doce. Teores maiores de manganês aumentam a resistência do metal de solda com uma influência maior que o silício (KAVAMURA, 2007). O manganês também reduz a sensibilidade à fissuração a quente do metal de solda. O alumínio, titânio e o zircônio (Zr) são elementos desoxidantes. Quando presentes

não mais que 0,20% como teor total é obtido algum aumento na resistência mecânica.

O carbono é o elemento que apresenta a maior influência nas propriedades mecânicas e microestruturais. Na fabricação de arames de aço para a soldagem MIG/MAG o teor de carbono dos arames é geralmente mantido de 0,05% a 0,12% (ESAB; FORTES; VAZ, 2005). Essa faixa é suficiente para proporcionar a resistência necessária ao metal de solda sem afetar consideravelmente a ductilidade, a tenacidade e a porosidade. Maiores teores de carbono no arame e no metal de base têm o efeito de gerar porosidade, particularmente durante a soldagem com o gás de proteção CO₂ (ESAB, 2014). Quando o teor de carbono do arame e/ou da peça ultrapassar 0,12% o metal de solda perderá carbono na forma de CO. Esse fenômeno pode causar porosidade, porém desoxidantes adicionais auxiliam a superá-lo. Outros – níquel, cromo e molibdênio são frequentemente adicionados para melhorar as propriedades mecânicas e/ou a resistência à corrosão.

Em pequenas quantidades eles podem ser adicionados aos arames de aço carbono para melhorar a resistência e a tenacidade do depósito. São adicionados em maiores quantidades nos arames de aço inoxidável (TSCHIPTSCHIN, 2010). Geralmente, quando a soldagem é realizada com argônio a 1-3% de oxigênio ou com misturas de argônio contendo baixos teores de dióxido de carbono, a composição química do metal de solda não diferirá muito da composição química do arame (ESAB, 2014). No entanto, quando o dióxido de carbono é usado como gás de proteção, podem ser esperadas reduções nos teores de silício, manganês e outros elementos desoxidantes. Os teores de níquel, cromo, molibdênio e carbono permanecerão constantes. Arames com teor de carbono muito baixo (0,04-0,06%) produzirão, com o dióxido de carbono como gás de proteção, metais de solda com maior teor de carbono.

2.4.6.1 Arames de aço carbono

A TABELA 6 lista os requisitos químicos e as designações para todos os arames de aço doce cobertos pela especificação AWS A5.18. Embora as propriedades mecânicas e os requisitos de serviço influenciem fortemente a seleção do arame em alguns casos, considerações mais genéricas poderão ser mais úteis na maioria das aplicações e dos projetos de junta (GHOSH; PAL; NANDI, 2017).

TABELA 6 – REQUISITOS DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA PARA ARAMES DE AÇOS DOCES E DE BAIXA LIGA

AWS	ESAB	C	Mn	Sir	Mo	OUTROS
ER70S-2	65	0,07	0,90-1,40	0,40-0,70	---	0,05-0,15 Ti 0,02-0,12 Zr 0,05-0,15 Al
ER70S-3	29S ou 82	0,06-0,15	0,90-1,40	0,45-0,70	---	
ER70S-4	85	0,07-0,15	1,00-1,50	0,65-0,85	---	
ER70S-5	---	0,07-0,19	0,90-1,40	0,30-0,60	---	0,50-0,90 Al
ER70S-6	OK 12.51	0,07-0,15	1,40-1,80	0,80-1,15	---	
ER70S-2	87HP	0,07-0,15	1,50-2,00	0,50-0,80	---	
ER80S-D2	83 ou Hi84	0,07-0,12	1,60-2,10	0,50-0,80	0,4-0,6	

FONTE: Adaptado - Esab (2014)

Quando a corrente de soldagem, o tamanho da poça de fusão, a quantidade de oxidação, a carepa de usina, e o óleo encontrado na superfície do metal de base aumentam, ou mesmo, quando os teores de dióxido de carbono ou de oxigênio aumentam, os teores de manganês e de silício do arame devem também aumentar para proporcionar a melhor qualidade à solda.

2.4.6.2 Arames de aço inoxidável

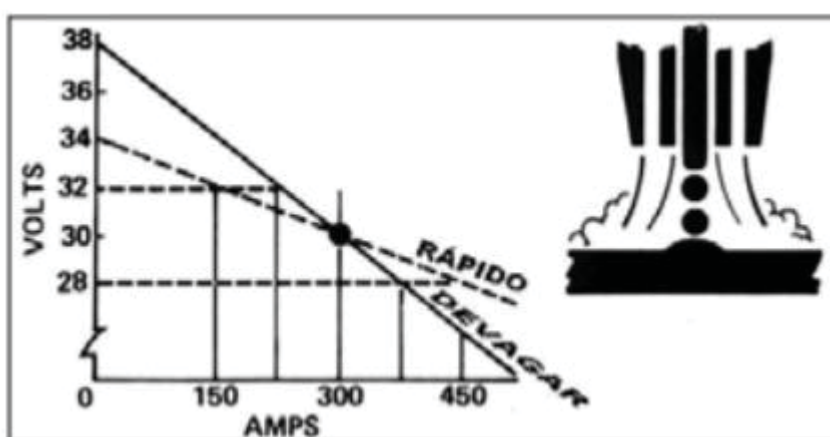
Na escolha do arame adequado para a soldagem de aços inoxidáveis existem geralmente alguns aspectos a serem considerados:

- os gases de proteção são normalmente limitados a Ar / 1% O₂ para a soldagem em aerossol e 90% He / 7,5% Ar / 2,5% CO₂ para curto-circuito. Todos os arames podem ser empregados com qualquer gás (FONSECA; PINHEIRO, 2016);
- os arames são, na maioria das vezes, escolhidos para combinar com a composição química do metal de base;

2.4.7 Velocidade de alimentação do arame de solda

Uma fonte MIG/MAG proporciona uma tensão do arco relativamente constante durante a soldagem. Essa tensão determina o comprimento do arco. Quando ocorre uma variação brusca da velocidade de alimentação do arame, ou uma mudança momentânea da tensão do arco, a fonte aumenta ou diminui abruptamente a corrente (e, portanto, a taxa de fusão do arame) dependendo da mudança no comprimento do arco (A. SCOTTI, 2008). A taxa de fusão do arame muda automaticamente para restaurar o comprimento original do arco. Como resultado, alterações permanentes no comprimento do arco são efetuadas ajustando-se a tensão de saída da fonte. A velocidade de alimentação do arame que o operador seleciona antes da soldagem determina a corrente de soldagem (FIGURA 11). Esse parâmetro pode ser alterado sobre uma faixa considerável antes que o comprimento do arco mude o suficiente para fazer o arame tocar na peça ou queimar o bico de contato.

FIGURA 11 – INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO DO ARAME



FONTE: Adaptado - Esab (2014)

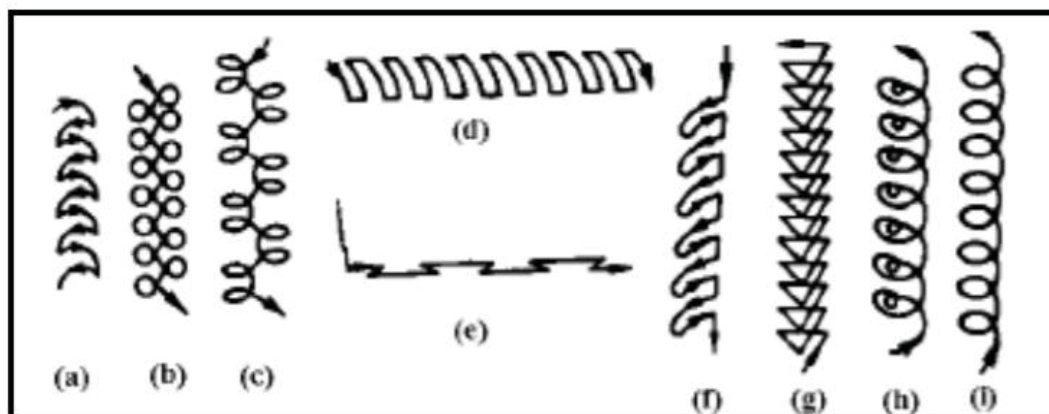
No processo MIG/MAG a corrente de soldagem está diretamente relacionada à velocidade de alimentação do arame (desde que a extensão do eletrodo seja constante). Quando a velocidade de alimentação do arame é alterada, a corrente de soldagem varia no mesmo sentido (A. SCOTTI, 2008). Em outras palavras, um aumento (ou diminuição) na velocidade de alimentação do arame causará um aumento (ou diminuição) da corrente de soldagem.

A distância entre o bico de contato e a peça (extensão do eletrodo) afeta a corrente de soldagem necessária para fundir o arame a uma dada velocidade de alimentação de arame. Quando essa distância é aumentada, o aquecimento devido ao efeito Joule aumenta e a corrente de soldagem necessária para fundir o arame é diminuída e vice-versa.

2.4.8 Tipo de tecimento

A movimentação trançada ou oscilação lateral do arame de soldagem (tecimento) durante a solda é usado quando é necessário um cordão espalhado ou trançado (GUILHERME et al., 2016). Cordões trançados são normalmente usados quando são feitas soldas de topo e de ângulo. O trançamento (tecimento) pode ser feito em vários padrões dependendo do tipo de solda, da preparação da junta e da habilidade do soldador. A FIGURA 12 mostra diferentes padrões de trançamento que são usados pelos soldadores para produzir boas soldas. Os formatos mostrados na FIGURA 12 (a e i) são os mais usadas em soldagens de topo.

FIGURA 12 – PADRÕES DE MOVIMENTAÇÃO DO ARAME



FONTE: Adaptado - Esab (2014)

Os padrões (a) e (e) são usados onde mais calor é necessário ser aplicado em ambos os lados da junta; o padrão (b) é particularmente adequado para chapa grossa. O padrão (f) é particularmente adequado quando mais calor deve ser aplicado a uma borda enquanto os padrões (g) e (h) são úteis quando o calor deve ser aplicado no meio da solda (ESAB; FORTES; VAZ, 2005).

Para obter um cordão consistente é essencial que o balanço do movimento de tração seja mantido constante. Pode-se obter uma solda correta, bem penetrada, sadia e de alta qualidade somente se os movimentos do soldador forem bem controlados e só se consegue isso através da prática e experiência.

Porém é importante dizer que quando se impõe o movimento de tecimento à tocha de soldagem, como é usual no passe de raiz, há também variação na frequência de transferência de gotas, que ocasiona a variação da corrente e tensão de soldagem, surgindo a tendência à falta de fusão ou excessiva fluidez da poça e recuo do reforço da raiz (A. SCOTTI, 2008). Ainda quanto ao passe de raiz, variações na abertura de raiz também podem afetar o processo, mas estudos foram feitos soldando-se chapas de topo de até 15mm de espessura onde aberturas de raiz variando de 0 até 6mm não afetaram significativamente a resistência da junta (Jang, 2001).

2.4.9 Gás de Proteção

O ar atmosférico é expulso da região de soldagem por um gás de proteção com o objetivo de evitar a contaminação da poça de fusão. A contaminação é causada principalmente pelo nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2) e vapor d'água (H_2O) presentes na atmosfera (BATISTA, 2007). Como exemplo, o nitrogênio no aço solidificado reduz a ductilidade e a tenacidade da solda e pode causar fissuração. Em grandes quantidades o nitrogênio pode causar também porosidade. O oxigênio em excesso no aço combina-se com o carbono e forma o monóxido de carbono (CO), que pode ser aprisionado no metal, causando porosidade (FILHO D., 2007). Além disso, o oxigênio em excesso pode se combinar com outros elementos no aço e formar compostos que produzem inclusões no metal de solda — o manganês (Mn) e o silício (Si), por exemplo.

Quando o hidrogênio (H), presente no vapor d'água e no óleo, combina-se com o ferro (Fe) ou com o alumínio (Al), resultará em porosidade e pode ocorrer fissuração sob cordão no metal de solda (FILHO D., 2007).

Para evitar esses problemas associados com a contaminação da poça de fusão, três gases principais são utilizados como proteção: argônio (Ar), hélio (He) e dióxido de carbono (CO_2). Além desses, pequenas quantidades de oxigênio (O_2),

nitrogênio (N_2) e hidrogênio (H_2) provaram ser benéficas em algumas aplicações (A. SCOTTI, 2008). Desses gases, apenas o argônio e o hélio são gases inertes.

A compensação para a tendência de oxidação dos outros gases é realizada pelas formulações especiais dos arames. O argônio, o hélio e o dióxido de carbono podem ser empregados puros, em combinações ou misturados com outros gases para proporcionar soldas livres de defeitos numa variedade de aplicações e processos de soldagem.

2.4.9.1 Propriedades dos gases

A condutividade térmica do gás à temperatura do arco influencia a tensão do arco bem como a energia térmica transferida à solda. Quando a condutividade térmica aumenta, maior tensão de soldagem é necessária para sustentar o arco. Por exemplo, a condutividade térmica do hélio e do dióxido de carbono é muito maior que a do argônio; devido a isso, aqueles gases transferem mais calor à solda (ESAB, 2014).

Portanto, o hélio e o dióxido de carbono necessitam de uma tensão de soldagem maior para manter o arco estável (SCOTTI, 2008). A compatibilidade de cada gás com o arame e o metal de base determina a adequação das diversas combinações de gases. O dióxido de carbono e a maioria dos gases de proteção contendo oxigênio não devem ser utilizados na soldagem do alumínio, pois se formará o óxido de alumínio (Al_2O_3). Entretanto, o dióxido de carbono e o oxigênio são úteis às vezes e mesmo essenciais na soldagem MAG dos aços (FILHO D., 2007). Eles promovem estabilidade ao arco e uma boa fusão entre a poça de fusão e o material de base.

Os arames de aço devem conter elementos fortemente desoxidantes para suprimir a porosidade quando usados com gases oxidantes, particularmente misturas com altos percentuais de dióxido de carbono ou oxigênio e especialmente o dióxido de carbono puro (ESAB; FORTES; VAZ, 2005).

Os gases de proteção também determinam o modo de transferência do metal e a profundidade à qual a peça é fundida - a profundidade de penetração. A transferência por aerossol não é obtida quando o gás de proteção é rico em CO_2 (FILHO, 2014). Por exemplo, misturas contendo mais que 20% CO_2 não exibem uma verdadeira transferência em aerossol. Até certo ponto, misturas até 30% CO_2 podem

apresentar um arco com um aspecto semelhante ao aerossol a altos níveis de corrente, mas são incapazes de manter a estabilidade do arco obtida com misturas de menores teores de CO₂. Os níveis de respingos também tenderão a aumentar quando as misturas forem ricas em CO₂.

O argônio é um gás inerte que é usado tanto puro quanto em combinações com outros gases para alcançar as características de arco desejadas na soldagem de metais ferrosos e não ferrosos (CLAUDIO et al., 2012). Quase todos os processos de soldagem podem utilizar o argônio ou misturas de argônio para alcançar boa soldabilidade, propriedades mecânicas, características do arco e produtividade. O argônio é empregado puro em materiais não ferrosos como o alumínio, ligas de níquel, ligas de cobre e materiais reativos que incluem o zircônio, titânio e tântalo (ESAB, 2014).

Para Scotti (2008) o argônio proporciona excelente estabilidade ao arco no modo de transferência por aerossol, boa penetração e ótimo perfil do cordão na soldagem desses metais. Algumas soldas em curto-circuito de materiais de pequena espessura são também viáveis. Quando usado na soldagem de metais ferrosos, o argônio é normalmente misturado com outros gases como o oxigênio, hélio, hidrogênio, dióxido de carbono e/ou nitrogênio.

2.4.9.2 Dióxido de carbono (CO₂)

O dióxido de carbono puro não é um gás inerte porque o calor do arco o dissocia em monóxido de carbono e oxigênio livre. Esse oxigênio combinar-se-á com os elementos em transferência através do arco para formar óxidos que são liberados da poça de fusão na forma de escória ou carepa (ESAB, 2014). Embora o CO₂ seja um gás ativo e produza um efeito oxidante, soldas íntegras podem ser consistente e facilmente obtidas sem a presença de porosidade e outras discontinuidades (FONSECA; PINHEIRO, 2016).

O dióxido de carbono é largamente empregado na soldagem de aços. Sua popularidade é devida a sua disponibilidade e à boa qualidade da solda, bem como pelo seu baixo custo e instalações simples (COSTA, 2007). Deve ser mencionado que o baixo custo do gás não necessariamente se traduz num baixo custo por metro linear de solda, sendo fortemente dependente da aplicação. A baixa eficiência de

deposição que o CO₂ proporciona - causada pela perda por respingos - influencia no custo final da solda (ESAB; FORTES; VAZ, 2005).

O dióxido de carbono não permitirá uma transferência em aerossol; por isso, os modos de transferência de metal ficam restritos ao curto-circuito e à transferência globular (ESAB, 2014). A vantagem do CO₂ são velocidades de soldagem maiores e penetração profunda. Os maiores inconvenientes do CO₂ são a indesejável transferência globular e, conseqüentemente, os altos níveis de respingos na solda. A superfície do cordão de solda resultante da proteção com o CO₂ puro é, na maioria dos casos, fortemente oxidada.

Um arame de solda contendo grande quantidade de elementos desoxidantes é algumas vezes necessário para compensar a natureza reativa do gás. De um modo geral, boas propriedades mecânicas podem ser obtidas com o CO₂ (MACIEL, 2000). O argônio é misturado frequentemente com o CO₂ para balancear as características de desempenho do CO₂ puro. Se as propriedades de impacto tiverem que ser maximizadas, são recomendadas misturas de Ar e CO₂.

2.4.9.3 Argônio-dióxido de carbono (Ar / CO₂)

As misturas argônio-dióxido de carbono são usadas principalmente nos aços carbono e de baixa liga e, com aplicação limitada, em aços inoxidáveis. As adições de argônio ao dióxido de carbono diminuem os níveis de respingo normalmente experimentados com o dióxido de carbono puro (ESAB, 2014). Pequenas adições de dióxido de carbono ao argônio produzem as mesmas características de transferência em aerossol que as pequenas adições de oxigênio.

A diferença recai na maioria das vezes nas maiores correntes de transição para transferência em aerossol das misturas argônio / dióxido de carbono. Na soldagem MIG/MAG com adições de dióxido de carbono um nível de corrente ligeiramente maior deve ser atingido para estabelecer e manter uma transferência de metal estável em aerossol através do arco (MODENESI; MARQUES, 2000) . Adições de oxigênio reduzem a corrente de transição para transferência em aerossol. Acima de aproximadamente 20% CO₂ a transferência em aerossol torna-se instável e começam a ocorrer aleatoriamente transferências por curto-circuito e globular (A. SCOTTI, 2008).

Argônio / 3-10% CO₂ – essas misturas são empregadas na transferência por curto-circuito e na transferência em aerossol em uma série de espessuras de aços carbono (ESAB; FORTES; VAZ, 2005). Como as misturas conseguem utilizar os dois modos de transferência com sucesso esse gás ganhou muita popularidade como uma mistura versátil.

Para Scotti (2008) misturas a 5% são muito comuns na soldagem MIG pulsada fora de posição de peças espessas de aços de baixa liga. As soldas são geralmente menos oxidadas que aquelas com misturas 98% Ar / 2% CO₂. Melhores penetrações são alcançadas com menos porosidade quando se utilizam adições de dióxido de carbono no lugar das adições de oxigênio.

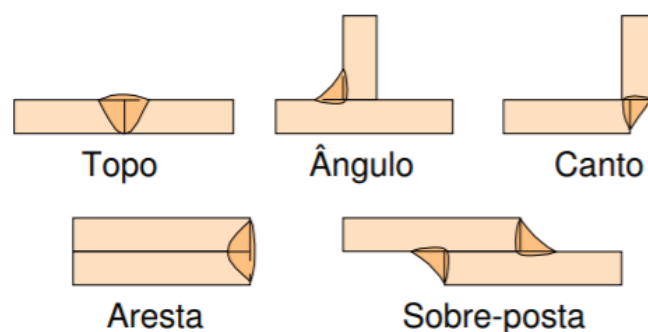
Considerando a molhabilidade, é necessário o dobro de dióxido de carbono na mistura para se conseguir o mesmo resultado que com o oxigênio. De 5% a 10% CO₂ o arco torna-se muito forte e definido, dando a essas misturas mais tolerância à carepa e uma poça de fusão muito fácil de controlar (FILHO, 2014).

2.4.10 Tipos comuns de juntas soldadas

A terminologia de soldagem é bastante extensa e muitas vezes os termos técnicos que utilizamos em uma região geográfica não são aplicáveis em outras. O primeiro termo a ser definido é junta – junta é a região onde duas ou mais partes da peça são unidas pela operação de soldagem.

Para Modenesi (2000) uma junta (joint) é região entre duas ou mais peças que serão unidas. Tipos de Junta: Os tipos usuais de junta são: de topo (butt), de ângulo (Tee), de canto (corner), sobreposta (lap) e de aresta (edge).

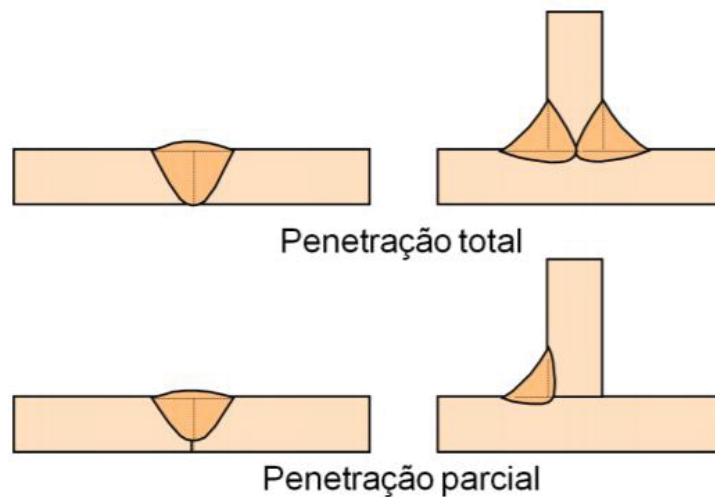
FIGURA 13 – TIPOS MAIS COMUNS DE JUNTA



FONTE: Adaptado - Modenesi (2000)

Soldas em juntas de topo e ângulo podem ser de penetração total (penetração em toda a espessura de um dos componentes da junta) ou parcial, conforme verificado na FIGURA 14.

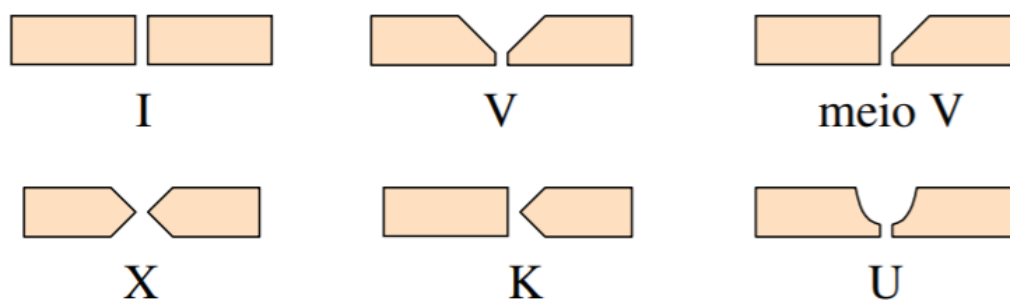
FIGURA 14 – TIPOS MAIS COMUNS DE SOLDAS DE TOPO



FONTE: Adaptado - Modenesi (2000)

O chanfro é um corte efetuado na junta para possibilitar/facilitar a obtenção de uma solda com a penetração desejada. É usado quando a espessura dos componentes da junta impede a obtenção da penetração desejada sem o chanfro. O uso de um chanfro diferente do tipo I (FIGURA 15) implica na necessidade de se usar metal de adição.

FIGURA 15 – TIPOS MAIS COMUNS DE CHANFROS



FONTE: Adaptado - Modenesi (2000)

A escolha do tipo de chanfro e suas dimensões dependem de muitos fatores como a material base, sua espessura, o tipo de junta, o processo de soldagem, a possibilidade de se acessar os dois lados da junta, a posição de soldagem e as características desejadas para a junta.

Soldas de penetração total apresentam um melhor comportamento mecânico, contudo, tendem a ser de execução mais difícil. Assim, quando o melhor desempenho destas não for necessário, o usual é se trabalhar com soldas de penetração parcial.

2.5 PRINCIPAIS PROBLEMAS RELACIONADOS A SOLDAGEM DOS AÇOS INOXIDÁVEIS

Os aços inoxidáveis ferríticos apresentam uma baixa soldabilidade (comparados com os aços inoxidáveis austeníticos), pois a sua solda é caracterizada por ductilidade e tenacidade baixas. Estes problemas de soldabilidade têm limitado, até recentemente, a aplicabilidade destes aços em estruturas soldadas. Recentemente, desenvolveram-se aços inoxidáveis ferríticos com inserção de teores de níquel e/ou titânio, os quais melhoram suas características mecânicas. Sua solidificação poderá ser 100% ferrita, no entanto, na soldagem desses materiais, dependendo do balanço entre os elementos estabilizadores da ferrita, existe a possibilidade de formação de austenita, que no resfriamento pode se transformar em martensita (AZEVEDO, FERRARESI, 2009).

Sindou Kou (2002) resume problemas típicos de soldagem em aços inoxidáveis e algumas soluções recomendadas, conforme TABELA 7.

TABELA 7 – PROBLEMAS TÍPICOS DE SOLDAGEM DE AÇOS INOXIDÁVEIS

	Problemas típicos	Soluções
Austeníticos	Quebra na solidificação	Utilização de arames e diluição adequados para manter 4-10% ferrita
	Deterioração da solda	Inserção de graus estabilizados (321 347) ou com baixo teor de carbono (304L e 316L) Tratamento térmico pós-solda para dissolver carbonetos, seguidos de têmpera
	Ataque de faca (em grãos	Utilização de classes de baixo carbono.

	estabilizados)	Tratamento térmico pós-solda para dissolver carbonetos
	Fissuração a quente em zona parcialmente derretida	Substituição do aço inoxidável 347 por 304 ou 316 Emprego de baixo aporte térmico
Ferríticos	Baixa tenacidade devido ao crescimento de grãos ZTA e martensita de limite de grão	Utilização de menos calor ou adicione formadores de carboneto e nitreto para impedir o crescimento de grãos Adição de Ti ou Nb para reduzir a martensita
Martensíticos	Fragilização por Hidrogênio	Pré-aquecimento e pós-aquecimento Utilização de aço inoxidável com baixo teor de hidrogênio ou eletrodos austeníticos

FONTE: Adaptado - (KOU, 2002)

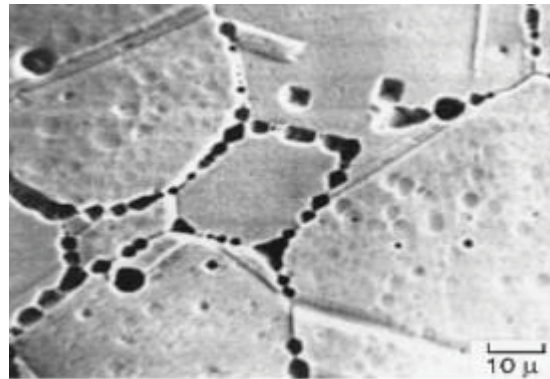
Devido às propriedades físicas dos aços inoxidáveis, seu comportamento de soldagem pode ser diferente do comportamento de outros materiais (AZEVEDO, FERRARESI, 2009). Por exemplo, o aço inoxidável austenítico possui baixa condutividade térmica (26 W/m.K) em comparação ao aço baixo carbono (50 W/m.K) e ao alumínio (347 W/m.K), o que acarreta em um cordão de solda mais largo no aço inoxidável austenítico do que nos demais, para um mesmo aporte térmico (O'BRIEN, 2004). Em contraste, o coeficiente de expansão térmica da austenita é 30 a 40% maior do que o da ferrita, o que pode resultar em aumentos na distorção e na tensão residual devido à soldagem.

2.5.1 Sensitização da Solda em Aços Inoxidáveis Austeníticos

A zona termicamente afetada (ZTA) dos aços inoxidáveis austeníticos contendo mais de cerca de 0,05%C pode ser suscetível a uma forma de corrosão intergranular denominada decaimento de solda (S. LEBRÃO, 2019).

A FIGURA 16 mostra a microestrutura na ZTA de um austenítico a 304 com 0,05% aço inoxidável submetido a um teste de corrosão acelerado. O preferencial ataque nos limites dos grãos é evidente.

FIGURA 16 – MICROESTRUTURA NA ZTA DE UM AUSTENÍTICO 304 COM 0,05%

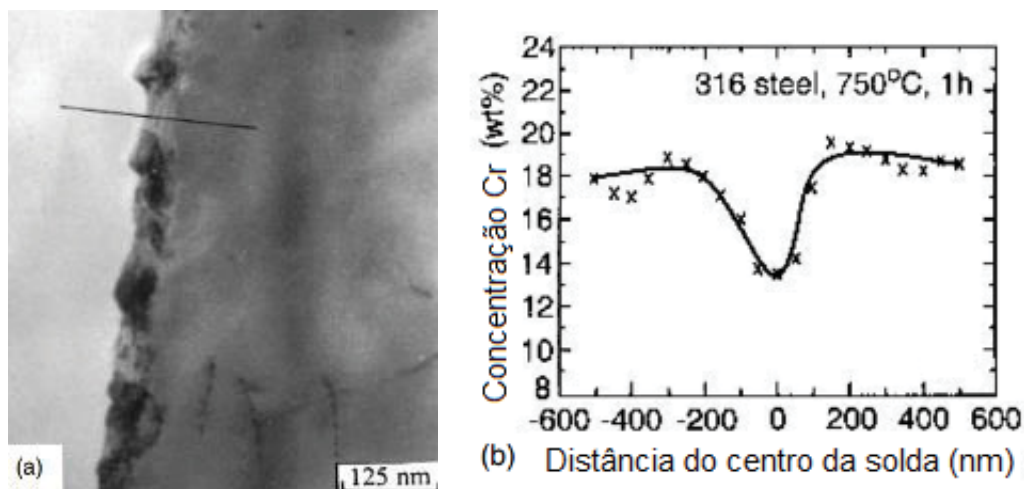


FONTE: (KOU, 2002)

A deterioração da solda em aços inoxidáveis austeníticos é causada por precipitação de carboneto de Cr nos limites dos grãos, que é chamado de sensibilização. Normalmente, o carboneto de Cr é $M_{23}C_6$ enriquecido com Cr, em que M representa Cr e algumas pequenas quantidades de Fe (KOU, 2002).

Dentro da faixa de temperatura de sensibilização, os átomos de carbono rapidamente se difundem para os limites dos grãos, onde se combinam com o Cr para formar o carboneto de Cr. A distribuição da concentração de Cr medida ao longo da linha reta é mostrado FIGURA 17a, na FIGURA 17b e indica claramente a depressão de Cr no grão fronteira.

FIGURA 17 – PRECIPITAÇÃO DE CARBONETO DE CROMO EM UM LIMITE DE GRÃO EM AÇO INOXIDÁVEL 316

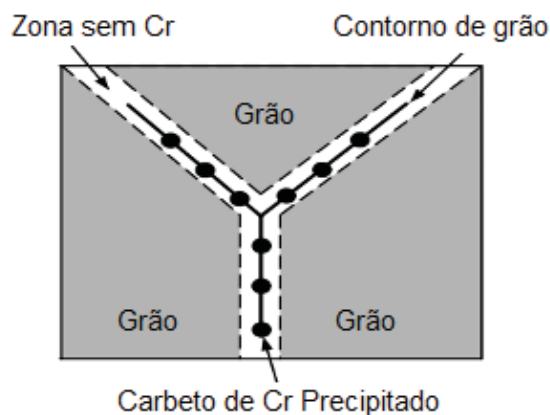


FONTE: Adaptado - (KOU, 2002)

Devido à precipitação de carboneto de Cr na fronteira de grãos, as áreas adjacentes ao limite de grão são esgotadas de Cr, como mostrado esquematicamente na FIGURA 18 (BRASIL, 2003).

Essas áreas tornam-se anódicas para o restante do grão e, portanto, são preferencialmente atacados em meios corrosivos, resultando em corrosão intergranular.

FIGURA 18 – MICROESTRUTURA DE CONTORNO DE GRÃO EM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO SENSITIZADO.

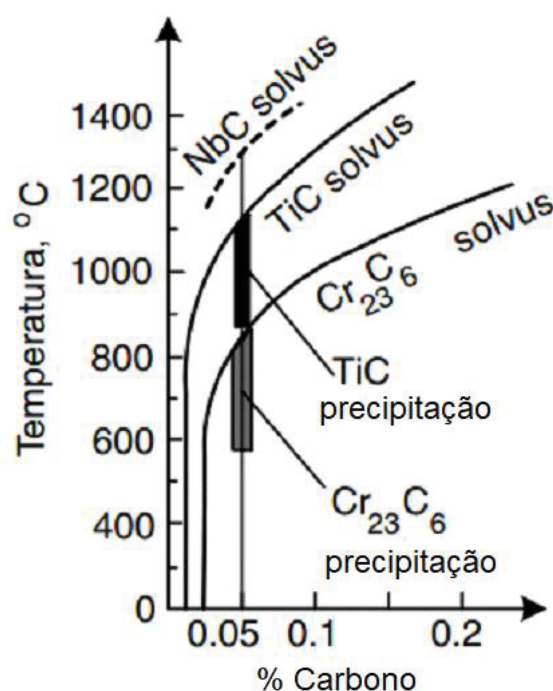


FONTE: Adaptado - (KOU, 2002)

As regiões com deficiência em cromo nos contornos de grão formam-se durante a precipitação de carbonetos ocasionadas pela grande diferença nas velocidades de difusão do cromo e carbono na austenita. Para que o aço não fique sujeito à corrosão intergranular a região adjacente ao contorno de grão não deverá apresentar teor de cromo inferior a 12% (ZANETIC; ALONSO-FALEIROS, 2001).

A sensibilização é tanto mais intensa quanto maior for a quantidade de carbono no aço ou quanto mais tempo o material permanecer a temperatura crítica. Um aço com 0,1%C sensibiliza em dois minutos à 650 °C, ao passo que são necessários 10 minutos para um aço com 0,06%C (TELLES, 1979). Conclui-se, pois, que qualquer construção soldada provocará alguma sensibilização nos aços inoxidáveis com teor de carbono normal (até 0,08%C).

A FIGURA 19 mostra as curvas de solvus de Cr_{23}C_6 e TiC (e NbC) em aço inoxidável 18Cr-8Ni. As áreas marcadas indicam as faixas de temperatura da precipitação dos carbonetos, cerca de 600-850°C para Cr_{23}C_6 e até cerca de 1100°C para TiC .

FIGURA 19 – CURVAS DE SOLVUS DE Cr_{23}C_6 E TIC (e NbC) EM AÇO INOXIDÁVEL 18Cr-8Ni.

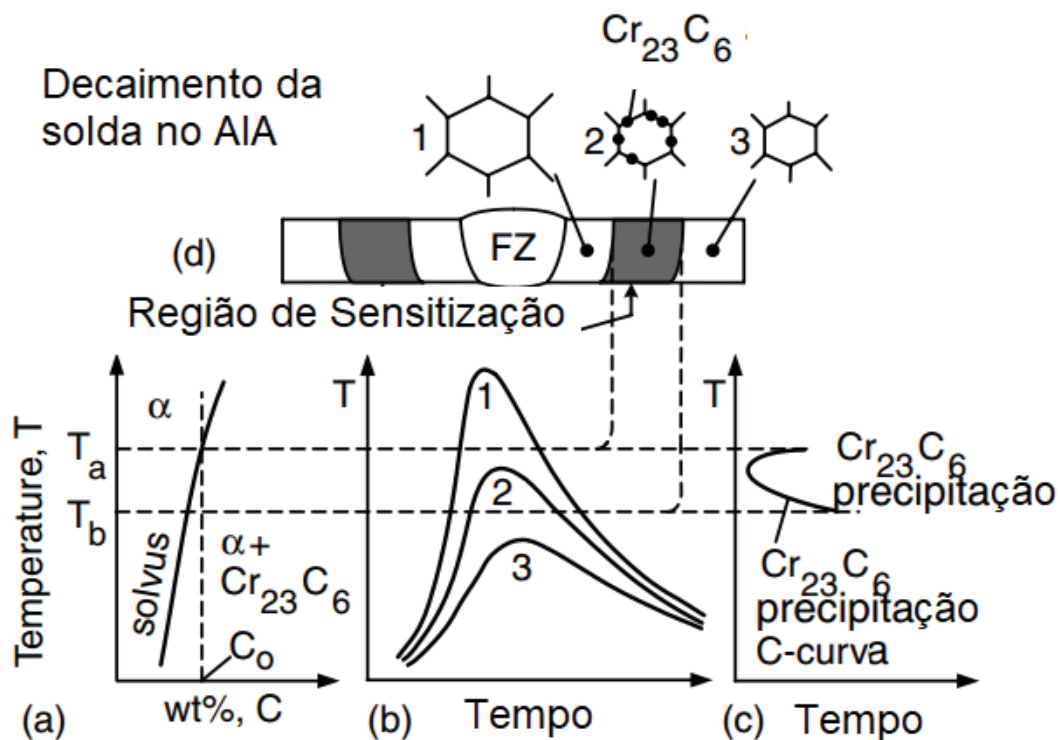
FONTE: (KOU, 2002)

O carboneto de cromo se dissolve a temperaturas acima de sua curva de solvus. Ao esfriar lentamente acima da temperatura do solvus, o carboneto de Cr pode precipitar novamente (SEDRIKS, 1996). No entanto, se a taxa de resfriamento for alta, o carboneto de Cr pode não ter tempo suficiente para precipitar e o material pode ser supersaturado com carbono livre.

A deterioração da solda não ocorre imediatamente próximo ao limite da fusão, onde a temperatura de pico é mais alta durante a soldagem. Em vez disso, ocorre a uma curta distância dele, onde a temperatura de pico é muito menor (YU et al., 2018). Esse fenômeno pode ser explicado com a ajuda de ciclos térmicos durante a soldagem, como mostra a FIGURA 20.

Na posição 1, próximo ao limite da fusão, o material apresenta a temperatura de pico e a taxa de resfriamento mais altas. Consequentemente, a taxa de resfriamento através da faixa de precipitação é muito alta para permitir a precipitação de carboneto de Cr (KOU, 2002).

FIGURA 20 – SENSIBILIZAÇÃO EM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO: (A) DIAGRAMA DE FASES; (B) CICLO TÉRMICO; (C) CURVA DE PRECIPITAÇÃO; (D) MICROESTRUTURA.



FONTE: (KOU, 2002)

Na posição 2, que está mais distante da linha de fusão, o tempo de retenção do material na faixa de temperatura de sensibilização é longo o suficiente para que a precipitação ocorra. Na posição 3, fora do ZTA, a temperatura de pico é muito baixa para permitir qualquer precipitação.

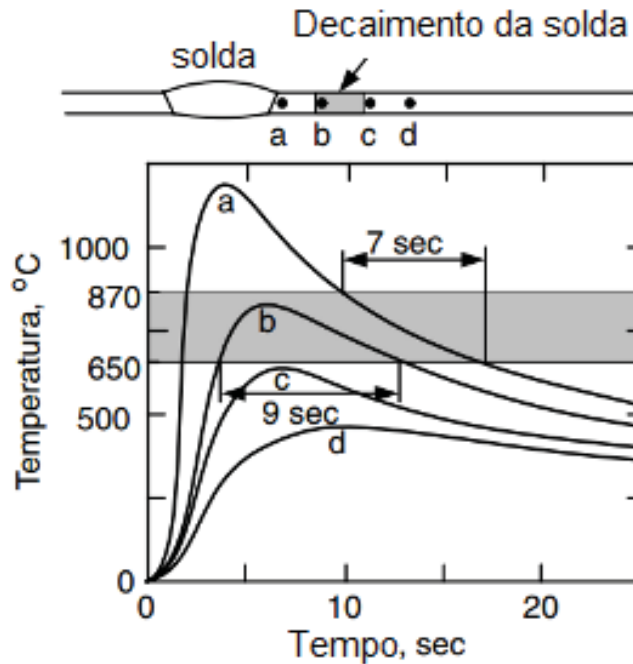
Idealmente, os aços inoxidáveis possuem microestruturas que consistem exclusivamente de austenita policristalina. Contudo, devido à segregação durante a solidificação, a ferrita pode vir a ser formada, sendo, comumente, encontrada em fundidos e soldas de aços inoxidáveis austeníticos (KWIETNIEWSKI, 2010).

A formação de ferrita δ (delta) ocorre na presença de elementos estabilizadores de ferrita ou por meio de tratamentos térmicos. Esta última formação ocorre quando o aço é aquecido na faixa de temperatura de aproximadamente 1350° a 1500°C, seguido de têmpera (PAREDES, 1999).

A ferrita δ é rica em cromo e outros elementos estabilizadores da ferrita e pobre em níquel e elementos estabilizadores da austenita. A presença de ferrita delta em quantidades significantes aumenta a resistência à corrosão sob tensão, à corrosão por pite, e à corrosão intergranular (WILDE, 1986).

A FIGURA 21 mostra os ciclos térmicos medidos durante a soldagem do aço inoxidável 304 e a localização do resultante decaimento da solda.

FIGURA 21 – CICLOS TÉRMICOS E DETERIORAÇÃO DA SOLDA EM SOLDA DE AÇO INOXIDÁVEL 304.



FONTE: (KOU, 2002)

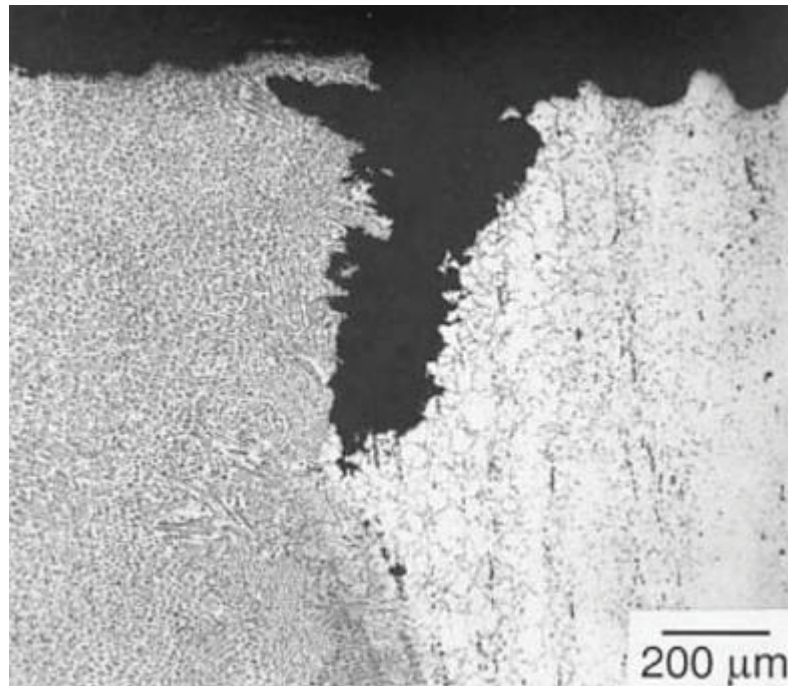
Na posição c, que está longe do limite de fusão, os limites grossos e escuros de grãos são a evidência de deterioração da solda devido à precipitação do limite de grãos mais rapidamente no aço inoxidável 304 à medida que seu conteúdo de carbono aumenta.

2.5.2 Ataque de faca em Aços Inoxidáveis Austeníticos

Embora os aços inoxidáveis austeníticos estabilizados, como 321 e 347, não sejam suscetíveis à deterioração da solda, eles podem ser suscetíveis a um tipo diferente de ataque de corrosão intergranular, chamado ataque de faca (KOU, 2002).

Como cárie de solda, linha de faca o ataque também é causado pela precipitação de carboneto de Cr nos limites dos grãos. A FIGURA 22 mostra ataque por faca ao lado do metal de solda (esquerda) em aço inoxidável 321.

FIGURA 22 – ATAQUE DE FACA EM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO ESTABILIZADO.



FONTE: (KOU, 2002)

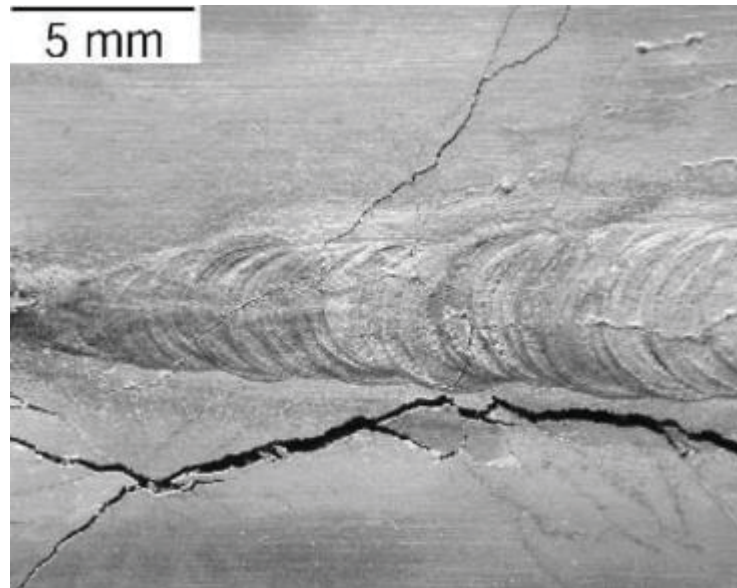
O ataque da linha da faca difere da deterioração da solda de duas maneiras: (i) o ataque da linha da faca ocorre em uma região estreita imediatamente adjacente ao metal da solda e (ii) o ataque da linha da faca ocorre em aços inoxidáveis de grau estabilizado.

2.5.3 Fissuração a quente em zona parcialmente derretida em Aços Inoxidáveis Austeníticos

Devido à baixa condutividade térmica e ao alto coeficiente de expansão térmica de aços inoxidáveis austeníticos, tensões residuais graves podem estar presentes nesses materiais após a soldagem (MACIEL, 2000).

Quando exposto a meios corrosivos, podem ocorrer trincas por corrosão sob tensão no ZTA. O craqueamento geralmente é transgranular e ramificado e pode se estender até o metal base (KOU, 2002). A FIGURA 23 mostra a fissuração por corrosão sob tensão em uma solda a arco de gás-tungstênio circunferencial em um tubo 304 de 100 mm (4 pol.) De diâmetro e 2,4 mm (3/32 pol.) De parede expostos a um líquido corrosivo.

FIGURA 23 – TRINCAS POR CORROSÃO SOB TENSÃO EM UM ARCO DE GÁS-TUNGSTÊNIO DE TUBO DE AÇO INOXIDÁVEL 304.



FONTE: (KOU, 2002)

Na metade inferior da imagem existem muitas trincas muito finas que se ramificam na principal rachadura, cobertas com produtos de corrosão.

2.5.4 Sensitização em Aços Inoxidáveis Ferríticos

A sensitização de aços inoxidáveis ferríticos (como 430 e 446) é bem diferente da dos aços inoxidáveis austeníticos (não estabilizados, como 304). A faixa sensibilizante para aços inoxidáveis ferríticos situa-se acima de 925°C, e a imunidade à corrosão intergranular é restaurada pelo recozimento na faixa de 650–815°C para cerca de 10 a 60 minutos (KOU, 2002).

Essas temperaturas são essencialmente o oposto de as que se aplicam aos aços inoxidáveis austeníticos. Por causa da alta sensibilização na faixa de temperatura, o decaimento da solda nos aços inoxidáveis ferríticos ocorre próximo ao metal de solda, e não à distância, como no caso dos aços inoxidáveis austeníticos (MOREIRA, 2008).

Além disso, diferentemente dos aços inoxidáveis austeníticos, a redução do teor de carbono não é muito eficaz na prevenção da deterioração da solda nos aços inoxidáveis ferríticos. De fato, um aço inoxidável 430 com um teor de carbono tão

baixo quanto 0,009% C foi encontrado ainda suscetível à deterioração da solda (BOND, 1969).

Como as taxas de difusão de C e Cr são muito mais altas em ferrita do que na austenita, o resfriamento rápido acima de 925°C durante a soldagem realmente não suprime a precipitação de carboneto de Cr nos limites de grão em aços inoxidáveis ferríticos (KOU, 2002). Pela mesma razão, a redução do teor de carbono não efetivamente pode impedir que o carboneto de Cr se precipite, a menos que o teor de carbono seja extremamente baixo (por exemplo, 0,002% em aço inoxidável 446).

O recozimento pós-soldado na faixa de 650–815°C incentiva a difusão de Cr átomos na região depleção de Cr adjacente ao carboneto de Cr precipita e, portanto, ajuda a restabelecer uma composição uniforme de Cr para resistir à corrosão intergranular (SEDRIKS, 1996).

2.5.5 Formação de Martensita e Crescimento de Grãos em Aços Inoxidáveis

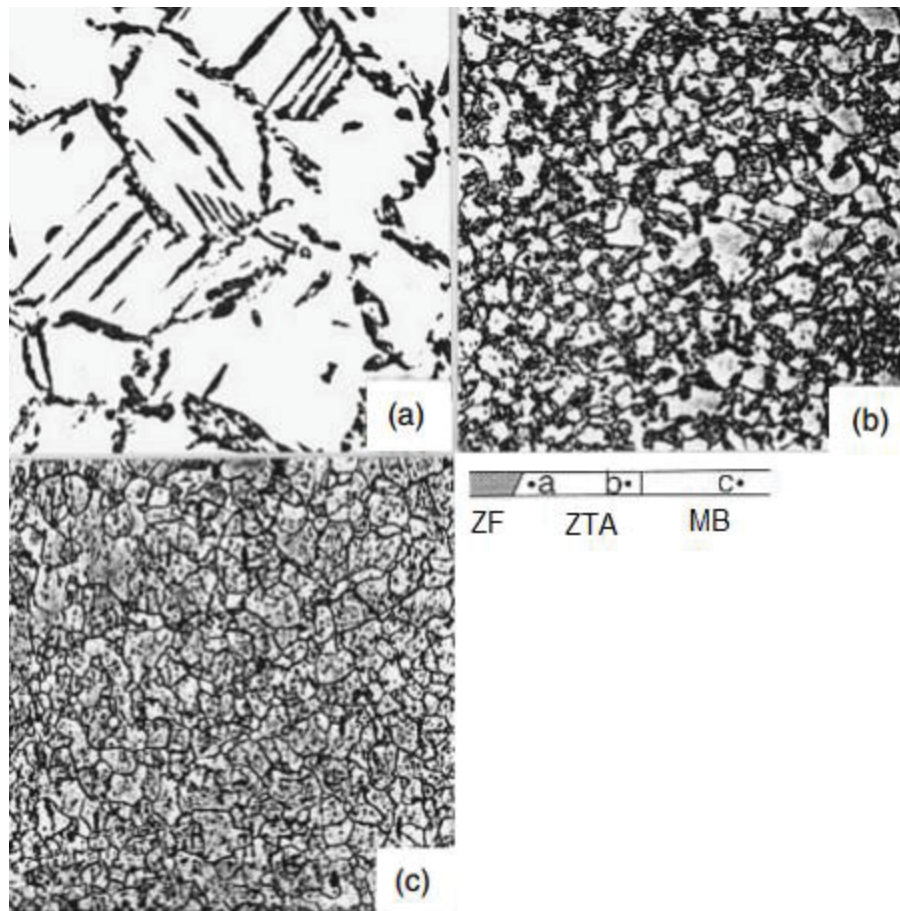
Ferríticos

A FIGURA 24 mostra a microestrutura do aço inoxidável 430 no metal base e a ZTA. A posição b (longe do limite da fusão) atinge os intervalos de formação de austenita. Aqui, a austenita se formou ao longo dos limites dos grãos e, após resfriamento rápido durante a soldagem, transformado em martensita (FIGURA 24b) (KOU, 2002).

Pouco crescimento de grãos ocorreu. Próximo ao limite da fusão, por outro lado, atingiu a faixa de ferrita-d e ocorre crescimento excessivo de grãos a altas temperaturas (FIGURA 24a). Durante o resfriamento através da austenita faixas de formação, uma quantidade considerável de austenita formada nos limites dos grãos. A austenita parece agulhada devido ao grande tamanho de grão e à alta taxa de resfriamento (NAKAMATSU; DIAS, 2014).

Durante um resfriamento mais rápido até a temperatura ambiente, a austenita se transforma em martensita semelhante a uma agulha. Devido ao excesso de engrossamento dos grãos e à formação de martensita semelhante a uma agulha nos limites dos grãos, a tenacidade do entalhe do aço inoxidável 430 soldada é baixa.

FIGURA 24 – MICROESTRUTURA DE AÇO INOXIDÁVEL 430 (AMPLIAÇÃO 200x): (a) PRÓXIMO AO LIMITE DE FUSÃO; b) PRÓXIMO AO METAL BASE; c) METAIS COMUNS.



FONTE: (KOU, 2002)

Tratamento térmico pós solda a 800°C (têmpera de martensita) significativamente melhora a tenacidade do entalhe. Suprimir a formação de martensita adicionando 0,5% de Ti ou 1% de Nb também ajuda. Provavelmente porque o Ti e o Nb aumentam a estabilidade da ferrita delta, suprimindo assim a formação de austenita (PAREDES, 1999).

Além disso, eles tendem a formar carbonetos a altas temperaturas. Portanto, o teor de carbono é reduzido e a tendência a formar martensita diminui. O crescimento excessivo de grãos pode ser evitado, é claro, usando menos calor de soldagem (PAREDES; D'OLIVEIRA, ANA SOFIA, 2001). Também foi sugerido que nitreto e formadores de metal duro como B, Al, V e Zr podem ser adicionados aos aços inoxidáveis ferríticos para suprimir o crescimento de grãos durante a soldagem.

2.5.6 Trincas nos cordões de solda em Aços Inoxidáveis Ferríticos

A dureza dos aços inoxidáveis martensíticos aumenta significativamente com o aumento do teor de carbono. Para aço de 12% Cr extinto a partir de 1050°C, por exemplo, a dureza aumenta de 364 HV a 0,07% C para 620 HV a 0,60% C (KOU, 2002).

Consequentemente, os aços inoxidáveis martensíticos com maior teor de carbono são bastante suscetíveis à fissuração por baixo do cordão, especialmente quando o hidrogênio está presente durante a soldagem (PAREDES, 1999).

Devido às tensões internas induzidas pelo aumento de volume associado à transformação de austenita em martensita, a fissuração por esferas ainda pode ocorrer mesmo se uma restrição relativamente baixa for empregada durante a soldagem. Como resultado disso, os aços inoxidáveis martensíticos devem possuir um teor de carbono acima 0,25-0,30% não são normalmente soldados (ALVAREZ et al., 2014).

2.6 TIPOS DE TROCADORES DE CALOR

As formas do arranjo de escoamento mais usuais para os trocadores de calor são as de fluxo paralelo, de fluxo contrário e de fluxo cruzado.

Diversas podem ser as formas construtivas de um trocador de calor, sendo que muitas vezes os mesmos podem ser fabricados de acordo com o critério e a necessidade do usuário. O grupo de trocadores de calor cujos esforços têm sido despendidos ao longo dos anos em termos de otimização e projeto, se resumem a quatro modelos em especial: o de arranjo de duplo tubo, o do tipo casco-tubo, o trocador a placas e o do tipo com tubos aletados (PERUSSI, 2010).

O trocador de calor de duplo tubo, constitui-se na montagem de um tubo dentro de outro, na maioria das vezes de forma concêntrica e a transferência de calor entre os fluidos ocorre por intermédio da parede do tubo interno.

Os trocadores de calor a placas consistem em finas placas metálicas corrugadas comprimidas por parafusos de aperto em um pedestal. Entre cada par de placas são usadas gaxetas para formar canais de escoamento pelos quais os fluidos quente e frio circulam alternadamente, trocando calor através das placas metálicas (GUT, 2003).

O permutador casco e tubo é constituído basicamente de um feixe tubular envolvido num casco. Neste modelo, um dos fluidos circula pelo interior e o outro pelo exterior dos tubos, o que permite grande superfície de troca de calor (CÔRTE, 2014).

A FIGURA 25, ilustra as formas de arranjo para os quatro tipos de trocadores de calor mais comuns.

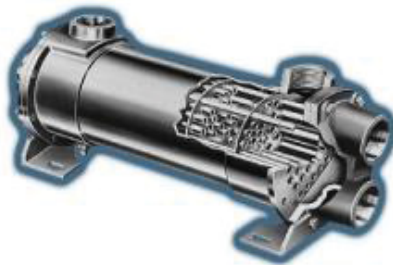
FIGURA 25 – FORMAS DE ARRANJO DE TROCADORES DE CALOR



Trocador de calor de duplo tubo



Trocador de calor a placas



Trocador de calor tipo casco – tubo



Trocador de calor de tubos aletados

FONTE: (PERUSSI, 2010)

O trocador de calor de tubos aletados é constituído por um feixe de tubos interligados por aletas externas. Seu funcionamento se resume pela passagem de fluido líquido, gasoso ou em mudança de fase através dos tubos, enquanto o lado das aletas recebe a passagem do gás, na maioria das vezes ar e de maneira forçada por um ventilador. A trajetória do fluido do tubo ao longo do trocador de calor

pode variar com: o número de passes, o número de circuitos e o arranjo dos tubos em relação as linhas e fileiras.

2.7 SOLDAGEM EM TROCADORES DE CALOR TIPO CASCO TUBO

Os trocadores de calor do tipo casco tubo, conforme já descrito, consistem resumidamente, de um casco cilíndrico que contém tubos em seu interior. Um dos fluidos de trabalho escoa pelo casco e o outro fluido, pelos tubos do feixe. A troca térmica é realizada através das paredes dos tubos. Os componentes principais deste equipamento são o casco, o feixe de tubos e os cabeçotes de entrada e retorno (SOUZA, 2013).

O trocador é constituído por um tubo de diâmetro variado entre 8 a 12 polegadas, que possui no seu interior um feixe de tubos geralmente com diâmetro de 19mm e em suas duas extremidades são montados dois espelhos, os tubos são encaixados dentro dos furos do espelho. Após a montagem do mesmo, é realizada a expansão, conforme a FIGURA 26 dos tubos trefilados por meio de um equipamento, de expansão e o torque é controlado por um limitador.

FIGURA 26 – DETALHE DO PROCESSO DE EXPANSÃO DOS TUBO NO ESPELHO



FONTE: (JESUS; OLIVEIRA, 2017)

Dependendo da finalidade a montagem dos tubos no espelho é feita pelo processo de soldagem TIG, como exemplificado na FIGURA 27, ou MIG/MAG. O

processo de soldagem convencionalmente utilizado na fabricação de trocadores de calor é o TIG (Tungsten Inert Gas) e o MIG/MAG. O processo TIG é um procedimento onde a qualidade da solda está ligada tanto ao soldador, quanto as condições de bancada, ou seja, dependente de uma infraestrutura mínima e habilidade do soldador. Já o MIG/MAG, possibilita soldas de mais fácil execução, o que promove uma melhor visualização do comportamento das amostras quanto a fabricação e principalmente sua manutenção, pois esse processo é relativamente de mais fácil execução em reparos em campo, e o seu metal de enchimento é alimentado pela tocha de soldagem. Desta forma, os soldadores conseguem operar com mais segurança e rapidez, portanto sendo o método de soldagem abordado no experimento.

FIGURA 27 – TUBOS SOLDADOS PELO PROCESSO TIG NO ESPELHO DO TROCADOR



FONTE: Jesus (2017)

A soldagem do arco metálico a gás (GMAW) é um processo de soldagem de arco no qual a fonte de calor é um arco formado entre eletrodo de metal consumível e a peça de trabalho com um escudo de gás fornecido externamente, tanto inerte como argônio e/ou CO₂ (PRABAKARAN; KANNAN, 2019).

O modo de transferência metálica utilizada na soldagem influencia fortemente características operacionais do processo GMAW como a sua estabilidade, o nível de respingos, o formato do cordão e sua regularidade e a capacidade de fundir o metal de base. A forma de transferência obtida no processo GMAW é muito sensível ao seu ajuste e depende dos parâmetros de soldagem.

No processo de soldagem, podem-se classificar as variáveis de processo como função do equipamento e fatores operacionais. Os principais parâmetros do equipamento que determinam o modo de transferência são a corrente de soldagem (que é função da tensão de referência), o comprimento do arco (distância entre o bico e a peça), a composição do gás de proteção, a bitola e o material do qual é feito o eletrodo e a sua velocidade de alimentação. Já os fatores operacionais são a técnica de tocha (puxando ou empurrando a tocha em função do sentido), o tipo de tecimento (tipo triangular ou sem tecimento) e a velocidade com que esses movimentos são realizados – estes últimos, estão ligados à habilidade do operador.

2.8 MÉTODO TAGUCHI

O método de Taguchi foi desenvolvido na década de 60 no Japão e pode ser definido como uma fonte de referência em diversas áreas, podendo ser implementado em situações que envolvam produtos e/ou processos. O método Taguchi foi desenvolvido pelo cientista japonês Dr. Genichi Taguchi (GHOSH; Pal; Nandi, 2017). O projeto de experimentos da Taguchi fornece uma maneira eficiente e sistemática de otimizar projetos quanto ao desempenho, qualidade e custo (ROY, 2001). Esse método é amplamente utilizado em diferentes campos da engenharia para otimizar os processos e/ou sistemas de manufatura (S. VINODH, S.K. BHARATHI, 2016). É uma das ferramentas mais importantes para projetar sistemas e processos de alta qualidade com custo reduzido. O método de Taguchi é baseado em experimentos de matriz ortogonal que enfatiza o projeto balanceado com peso igual para todos os fatores com menos número de execuções experimentais.

Esta metodologia científica de Taguchi é definida por dois parâmetros importantes:

- (a) redução na variabilidade, ou seja, emprego da Engenharia da Qualidade no produto ou processo representado melhoria contínua e objetivando menor perda para a sociedade;
- (b) aplicação do planejamento estratégico de forma adequada, objetivando o desenvolvimento de novas táticas, visando fundamentalmente a otimização do processo de maneira racional e a redução do número de experimento em situações reais, em forma geral.

De acordo com a filosofia de Taguchi, quanto mais próximo uma característica funcional do produto estiver do valor nominal de projeto, maior será a qualidade do mesmo, independentemente de estar ou não dentro dos valores de tolerância do projeto, pois o mesmo leva em consideração essa variação funcional. Quanto menor a variação funcional, menor o prejuízo sofrido pela sociedade e consequentemente maior a qualidade do produto, ou seja, se produz um produto mais uniforme com relação a algumas características do mesmo (MARQUES, 2013, p. 9).

Para avaliar a significância dos parâmetros do processo, o método de Taguchi usa uma medida estatística de desempenho chamada razão sinal-ruído (S/R) que leva em conta a média e a variabilidade (A.K. Singh, D. Tapas, V. Dey, 2016). A relação S/R é a relação entre a média (sinal) e o desvio padrão (ruído). A relação depende das características de qualidade do produto / processo a ser otimizado. As razões S/R padrão geralmente utilizadas são nominal-é-melhor, menor-melhor e maior-melhor.

O método de Taguchi é baseado em matrizes ortogonais assemelhando-se a um plano fatorial fracionado. Assim o processo é simplificado reduzindo-se o número total de experiências bem como se promove a normalização das matrizes (M. DE M. TAKENOUCHI, 2011). Este método reduz o número de experiências contabilizando apenas um número de experiências que garanta robustez ao processo de controle. Para que tal ocorra, o número de experiências deve ser igual ou superior ao número de graus de liberdade relativos ao processo.

A seleção dos ensaios passa pela forma porque cada fator assuma os possíveis níveis o mesmo número de vezes. Este número de vezes que os valores se repetem é contabilizado na totalidade dos ensaios da matriz. Deste modo origina-se assim uma matriz experimental do tipo ortogonal (A. D. VALENTE, 2017).

O método consiste em se obter um número mínimo de experiências que garantam robustez ao processo. As matrizes são identificadas pela letra “L” seguida de um número que indica a quantidades de ensaios. Tomando como exemplo a matriz ortogonal L4, afere-se que necessita de 4 ensaios e que permite a utilização de dois níveis para cada fator. Os arranjos ortogonais com dois níveis são denominados L4, L8, L12, L16 e L32, com três níveis são designados L9, L18 e L27

(M. DE M. TAKENOCHI, 2011). A TABELA 8, ilustra alguns tipos de arranjos ortogonais de Taguchi

TABELA 8 – ALGUNS TIPOS DE ARRANJOS ORTOGONAIS DE TAGUCHI

Arranjo Ortogonal	Numero de Ensaio	Número de Níveis	Número máximo de fatores
L4	4	2	3
L8	8	2	7
L9	9	9	4
L12	12	12	11
L16	16	16	15
L18	18	18	8
L27	27	27	13

FONTE: Adaptado - (JOSE; TEIXEIRA, 2018)

Uma das principais razões da utilização dos arranjos ortogonais reside no fato de se atribuir significado a efeitos fatoriais de alta reprodutibilidade. Especificamente, na utilização de um arranjo ortogonal para analisar a diferença de dois níveis, visa-se o efeito médio, quando são variados os níveis dos outros fatores (JOSE; TEIXEIRA, 2018).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será abordado o detalhamento da metodologia utilizada para o desenvolvimento do presente estudo. Com o principal objetivo reduzir problemas comuns de soldagem MIG/MAG em aços dissimilares em trocadores de calor. Foram realizados testes com a fonte operando em tensão constante. Nesses testes foram avaliadas as influências das características operacionais do processo e combinações dos parâmetros determinados pelo método Taguchi, sendo o tipo de transferência metálica o curto-circuito. Para a execução dessa etapa os seguintes materiais e métodos foram utilizados conforme descrito na sequência.

3.1 MATERIAIS DE CONSUMO E EQUIPAMENTOS

Para a realização dos estudos de soldagem foram utilizados os seguintes materiais e consumíveis:

- a) Material de base:
 - Placas de aço ABNT 1020 com dimensões de 150x50x3mm;
 - Placas de aço inoxidável austenítico (304) com dimensões de 150x50x3mm;
 - Placas de aço inoxidável ferrítico (430) com dimensões de 150x50x3mm.
- b) Arames de solda com 1,0mm de diâmetro:
 - AWS A 5.18 (ER70S6);
 - AWS SFA 5.9 (ER 308 LSI).
- c) Gases de proteção utilizados:
 - Mistura para solda MIG/MAG (98% Ar / 2% CO₂);
 - Dióxido de carbono (CO₂).

Na execução e análise das amostras foram utilizados os equipamentos:

- a) Retificadora de tensão constante para soldagem semi-automática Bambozi TMC-400S;
- b) Mini termômetro digital infravermelho, marca Fluke 62;
- c) Microscópio metalúrgico vertical da série BX51M (Olympus);
- d) Durômetro universal EMCOTEST Durascan.

O processo de soldagem (como já comentado) os principais parâmetros de soldagem (tensão de referência, velocidade de solda, tecimento do cordão, técnica da tocha, tipo de gás de proteção e o arame de solda), metal de adição ER 308-LSi e ER 70S-6; gás de proteção 98% Ar / 2% CO₂ e CO₂ foram definidos conforme questionário aplicado (APENDICE A), mesmo tendo como referencial teórico que em aços inoxidáveis tanto AIA com AIF ou em soldagem de materiais dissimilares com estes aços não são recomendados a utilização os consumíveis e gases.

3.2 METODOLOGIA

As seguintes etapas foram seguidas na elaboração do experimento:

- a) Baseado em critérios de operação práticos de soldagem foram definidos os parâmetros de máquina e operação (tensão de referência, velocidade de soldagem, tecimento do cordão, técnica da tocha, tipo de gás de proteção e o arame de solda);
- b) Definição da matriz experimental através do método Taguchi;
- c) Agrupamentos dos pares de metais de base em:
 - Aços inoxidáveis austeníticos (AIA) com aços inoxidáveis ferríticos (AIF);
 - Aços inoxidáveis austeníticos (AIA) com aços carbono (AC);
 - Aços inoxidáveis austeníticos (AIF) com aços carbono (AC);
- d) Soldagem dos pares definidos;
- e) Acompanhamento da taxa de resfriamento e comportamento da temperatura em função de cada método utilizado;
- f) Realização de macrografia para obtenção características geométricas do cordão de solda para obtenção da diluição;
- g) Realização de micrografia para identificação da ZTA para cada lado da solda;
- h) Realização do ensaio de microdureza na ZTA e no material de base;
- i) Realização cálculo da diluição para as amostras;
- j) Seleção das variáveis de respostas (aferição de temperatura de resfriamento, diluição e microdureza Vickers);

- k) Compilação dos dados coletados através da matriz ortogonal de Taguchi para obtenção da combinação ótima para as variáveis diluição, menor ZTA e menor dureza;
- l) Seleção da melhor combinação para o método de soldagem.

3.3 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Na definição da metodologia as etapas (a), (b) e (c) correspondem ao método Taguchi para o planejamento dos experimentos.

A TABELA 9 a seguir mostra o experimento utilizado para a coleta de dados – Taguchi L8 (2^7). Essa matriz ortogonal L8 significa 8 corridas e 2^7 significa 7 fatores com 2 níveis cada. Essa matriz é ortogonal; os níveis de fatores têm o mesmo peso em todo o experimento. As colunas da tabela representam os fatores de controle, as linhas da tabela representam as corridas (combinações de níveis de fatores) e cada célula da tabela representa o nível de fator para a corrida.

TABELA 9 – MATRIZ L8 (2^7) - SETE PARÂMETROS COM DOIS NÍVEIS

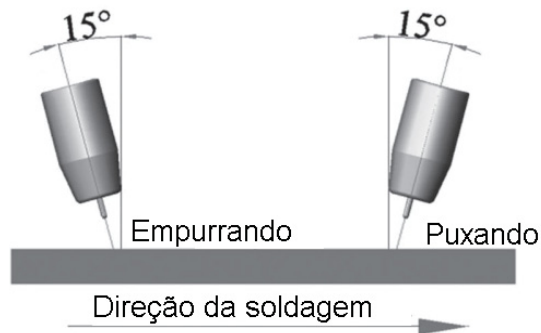
	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

FONTE: Adaptado - (JOSE; TEIXEIRA, 2018)

Este método foi utilizado para reduzir o número de ensaios necessários em comparação ao método do fatorial completo. Desta forma foram escolhidos sete parâmetros com dois níveis cada (1 e 2 para preenchimento da tabela respectivamente):

- a) Tensão de referência: Ur = 20 e 22V;
- b) Técnica da tocha: Puxando e empurrando – conforme FIGURA 28;

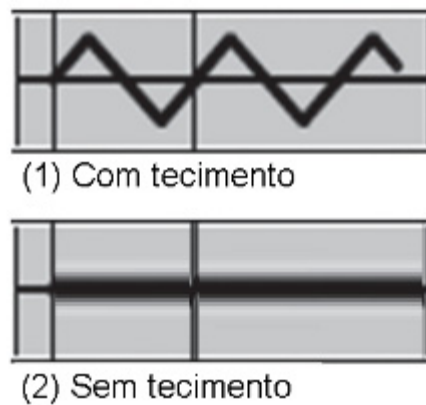
FIGURA 28 – TIPOS DE TÉCNICAS DE TOCHA UTILIZADOS NO EXPERIMENTO.



FONTE: Pessoa et al.,(2010)

- c) Velocidade de soldagem: $V_s = 0,2$ e $0,25\text{m/min}$;
- d) Arame de solda: AWS A 5.18 (ER70S6) e AWS SFA 5.9 (ER 308 LSI);
- e) Tecimento manual do cordão de solda: Com tecimento (1) e sem tecimento (2) - conforme;

FIGURA 29 – TIPOS DE TECIMENTO UTILIZADOS NO EXPERIMENTO.



FONTE: PESSOA et al., (2010)

- f) Velocidade de alimentação do arame (6m/min e 7m/min);
- g) Tipo de gás de proteção: Mistura para solda MIG/MAG ($98\% \text{ Ar} / 2\% \text{ CO}_2$) e Dióxido de carbono (CO_2).

Para o par de aços inoxidáveis austeníticos (AIA), com aços inoxidáveis ferríticos (AIF), foi realizada a soldagem obedecendo a ordem do método Taguchi, conforme a TABELA 10. A vazão dos gases utilizados para a solda foi mantida

constante em 18l/min e a distância do bico da tocha em relação às peças foi mantida em 12mm para todas as soldas.

TABELA 10 - ENSAIOS REALIZADOS COM A MATRIZ L8.

Exp.	Tensão	Técnica Tocha	Velocidade soldagem	Arame de solda	Tecimento manual	Velocidade alimentação	Gás de mistura
E1	20V	Empurrando	0,25m/min	ER70S6	Triangular	6m/min	Mistura
E2	20V	Empurrando	0,25m/min	ER 308LSI	Sem tecimento	7m/min	CO ₂
E3	20V	Puxando	0,20m/min	ER70S6	Triangular	7m/min	CO ₂
E4	20V	Puxando	0,20m/min	ER 308LSI	Sem tecimento	6m/min	Mistura
E5	22V	Empurrando	0,20m/min	ER70S6	Sem tecimento	6m/min	CO ₂
E6	22V	Empurrando	0,20m/min	ER 308LSI	Triangular	7m/min	Mistura
E7	22V	Puxando	0,25m/min	ER70S6	Sem tecimento	7m/min	Mistura
E8	22V	Puxando	0,25m/min	ER 308LSI	Triangular	6m/min	CO ₂

FONTE: O autor (2020)

As variáveis respostas escolhidas foram a microdureza e a diluição do cordão de solda das amostras. O comportamento térmico bem como a microscopia foram analisadas em função das respostas do método Taguchi.

3.4 PREVISÃO DA COMBINAÇÃO ÓTIMA

De posse dos resultados, foram avaliadas as variáveis respostas diluição através do tratamento estatístico do método Taguchi, onde essas variáveis são um problema de solução do tipo “quanto menor melhor” Eq (1).

$$\eta = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n_i} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

n_i = número de repetições num ensaio (número de repetições independente dos níveis de ruído).

y_i é a característica da qualidade (resposta observada).

3.5 REALIZAÇÃO DAS SOLDAGENS

As soldagens foram realizadas posição plana por simples deposição dos arames eletrodos sobre as placas de aço seguindo a combinação dos aços dissimilares e acopladas em um suporte (FIGURA 30), o qual promove uma fixação adequada às placas de teste para que não sofram distorções durante soldagem.

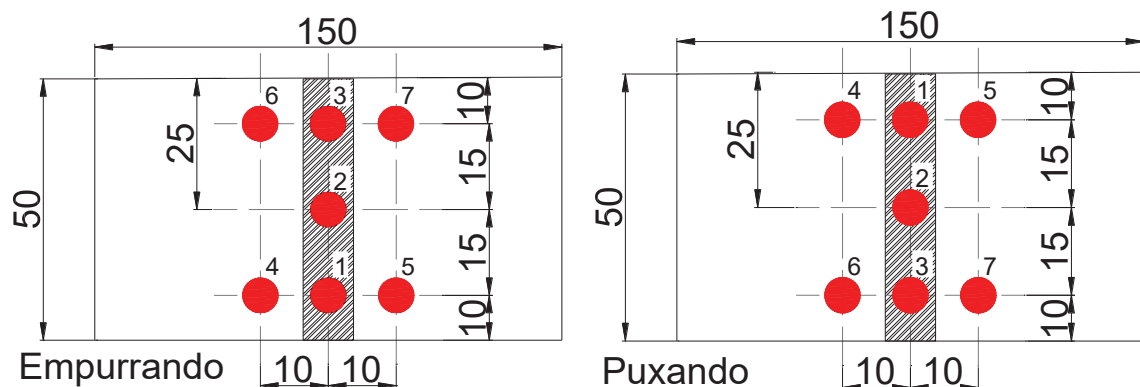
FIGURA 30 – SUPORTE PARA PLACA DE TESTES.



FONTE: O autor (2020)

As amostras foram submetidas a marcas para medição da taxa de resfriamento suporte (FIGURA 31). Essa sequência foi definida para o monitoramento das temperaturas nas condições empurrando e puxando da solda.

FIGURA 31 – SEQUENCIA DAS MEDIÇÕES DE TEMPERATURA.



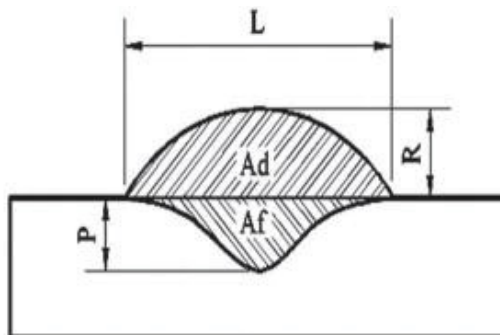
FONTE: O autor (2020)

Para ambas as soldagens as medições foram realizadas medições de temperatura no sentido do início até o final do cordão (de 1 até 3) para monitorar a taxa de resfriamento.

3.6 MEDIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS PARA OBTENÇÃO DAS VARIÁVEIS RESPOSTAS

Para a medição das características geométricas do cordão de solda, (diluição e a relação entre altura e largura do cordão) mostradas na FIGURA 32. Foram retiradas amostras com 25mm de comprimento com 10mm de altura. A diluição foi calculada, através da relação entre as áreas adicionada e diluída, conforme a Eq. (2).

FIGURA 32 – PERFIL GEOMÉTRICO DOS CORDÕES DE SOLDA.



FONTE: (Pessoa et al., 2010)

$$D = \frac{Af}{(Ad + Af)} 100\%$$

Eq. (2)

Ad – Área depositada do cordão

Af – Área fundida do metal de base

Sendo a diluição a parcela do metal de base que entra na composição da zona fundida, a sua definição torna-se importante para determinação de condições de falha em operação, uma vez que uma elevada taxa de diluição pode favorecer falhas durante a operação, principalmente em se tratando em soldagens de juntas dissimilares.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Nesse capítulo será apresentada a influência da temperatura nos cordões de solda que foram executados conforme o método Taguchi, as medições realizadas conforme FIGURA 31. Na sequência serão abordadas as observações sobre o acabamento das soldas através de uma inspeção visual, com posterior cálculo da diluição.

Seguindo o procedimento serão selecionadas amostras com maior extensão da ZTA para análise e por final serão listados os resultados do ensaio de dureza para todas as amostras.

Os ensaios de dureza, cálculo da diluição e inspeção visual alimentarão a matriz ortogonal de Taguchi que adotando o método menor melhor apresenta uma combinação ótima dos parâmetros escolhidos.

4.1 COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA APÓS A SOLDAGEM PARA TODAS AS AMOSTRAS

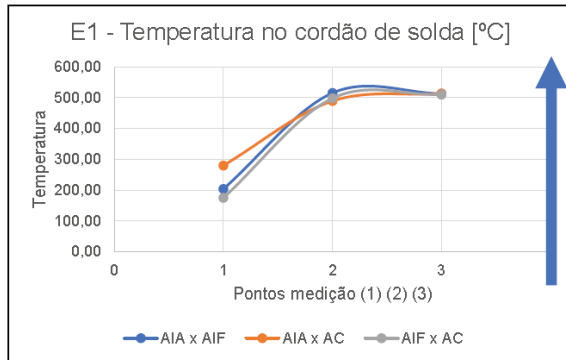
Após a realização das soldagens, a temperatura foi aferida para se observar o comportamento da taxa de resfriamento e a deposição de material seguindo a sequência da figura 31. As medições iniciais foram agrupadas para os pares de aços inoxidáveis austeníticos (AIA) com aços inoxidáveis ferríticos (AIF), aços inoxidáveis austeníticos (AIA) com aços carbono (AC) e aços inoxidáveis austeníticos (AIF) com aços carbono (AC), conforme o GRAFICO 1.

A observação da influência da variação da temperatura de soldagem é importante para determinar a quais pares sofrem maiores distorções e quais combinações proporcionam maiores temperaturas de soldagem, haja vista que uma temperatura maior será um fator determinante à formação de fases deletérias.

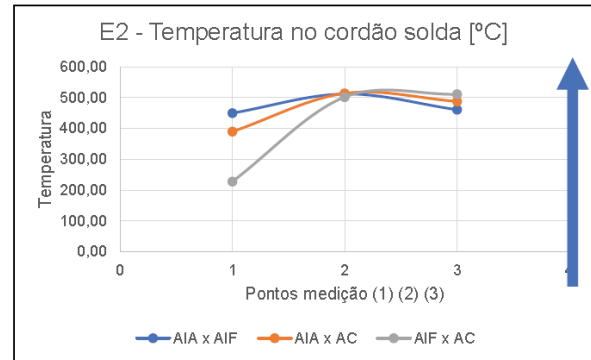
Quando aquecidos entre 450 e 850°C, os aços inoxidáveis austeníticos sensibilizam. Cromo e carbono se combinam nessa faixa de temperaturas para precipitar nos contornos de grão como carbonetos de cromo.

A ideia aqui é identificar faixas onde o cordão de solda concentra o fluxo de calor após o processo, pois durante o resfriamento, os aços inoxidáveis austeníticos podem sensibilizar, devido a que parte do material fica submetida a temperaturas dentro da faixa crítica.

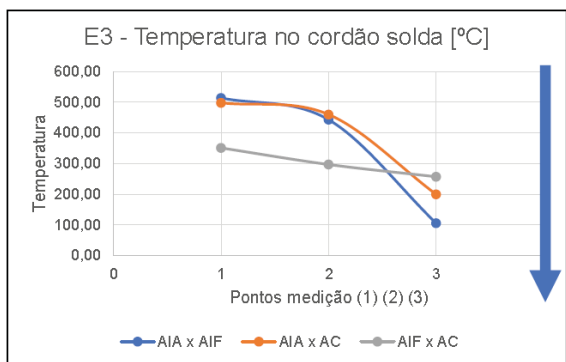
GRÁFICO 1 – INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA PARA OS TRES PARES DE AMOSTRAS



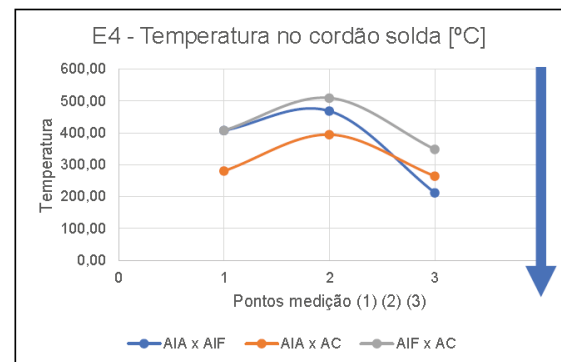
Experimento E1



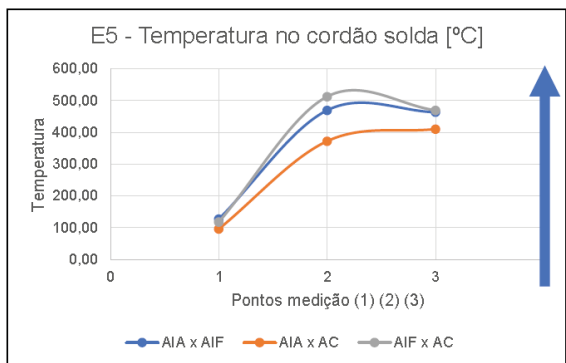
Experimento E2



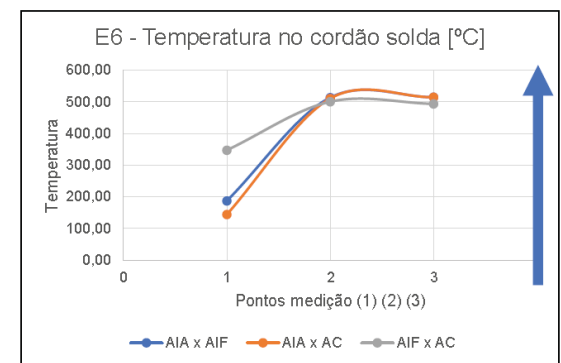
Experimento E3



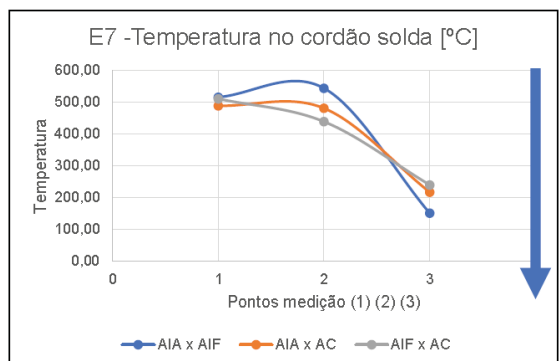
Experimento E4



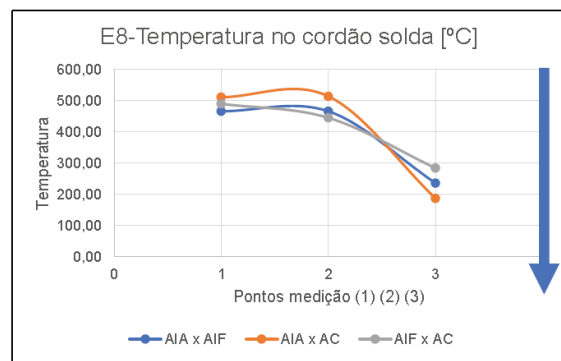
Experimento E5



Experimento E6



Experimento E7



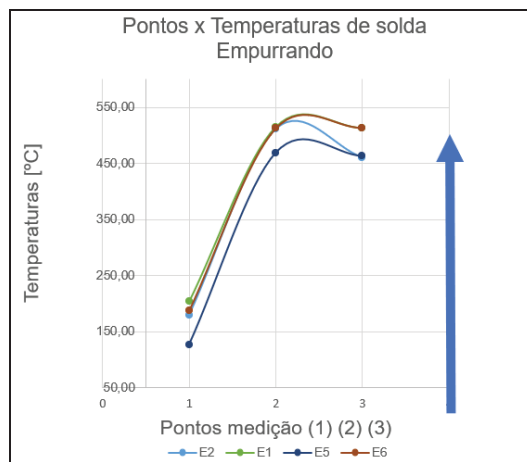
Experimento E8

FONTE: O autor (2020).

Da observação das temperaturas do GRAFICO 1, foi possível a identificar que a técnica da tocha influencia na maneira como o gradiente varia. Assim foi possível calcular a média e agrupar os resultados pela técnica da tocha.

O GRÁFICO 2 ilustra e influência da variação de temperatura em função da distância e da técnica da tocha para a condição de soldagem com o eletrodo sendo empurrado.

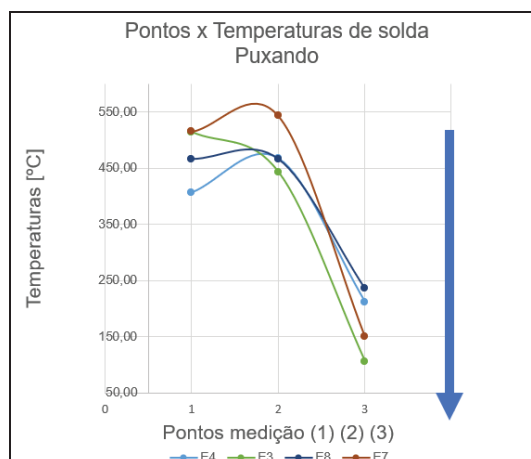
GRÁFICO 2 – INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA E DA TÉCNICA DA TOCHA – EMPURRANDO



FONTE: O autor (2020).

O GRÁFICO 3 ilustra e influência da variação de temperatura em função da distância e da técnica da tocha para a condição de soldagem com o eletrodo sendo puxado contra a junta soldada.

GRÁFICO 3 – INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA E DA TÉCNICA DA TOCHA – EMPURRANDO



FONTE: O autor (2020).

Observa-se que para a técnica de solda empurrando a temperatura do metal de base é maior no final do cordão de solda para os experimentos E1, E2, E5 e E6.

A técnica de soldagem empurrando produzirá cordões mais largos. Isso ocorre pois o arco provoca pré-aquecimento frente à poça fundida quando empurrado em ângulo, aumentando a molhabilidade e favorecendo o aumento da largura do cordão.

Para a soldagem com a técnica puxando, a temperatura ficará maior no início do cordão (experimentos E3, E4, E7 e E8), conforme verificado na Figura 9. Isso pode produzir um baixo valor da velocidade de resfriamento que conduza a um elevado teor de austenita precipitada podendo ainda conter fases deletérias (Alvarez et al., 2014).

A maior penetração é alcançada utilizando a tocha inclinada utilizando a técnica de soldagem puxando. Este efeito pode ser justificado pelo fato de o jato de plasma empurrar a poça fundida para trás nesse modo, de tal forma que o aquecimento da chapa pelo acoplamento do arco com a peça se torna mais eficiente, agindo mais no fundo da poça. Além disso, existe a ação das gotas em transferência diretamente para a região mais aquecida da chapa, localizada no fundo da poça.

4.2 RESULTADOS DA INSPEÇÃO VISUAL DA SOLDAGEM

Para a inspeção visual, observa-se a superfície da solda com o auxílio da macrografia a fim de detectar os defeitos superficiais da soldagem, tamanho da zona fundida e defeitos como mordeduras ou falta de fusão. Na sequência serão comentados os resultados acerca desses dados.

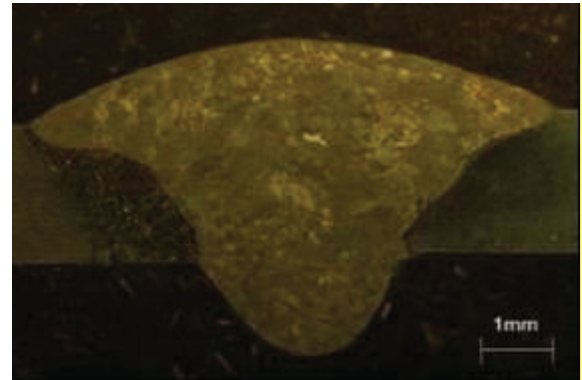
4.2.1 Macrografia para o par AIF x AIA

As soldas dissimilares realizadas com os parâmetros definidos pelo método Taguchi, estão apresentadas na FIGURA 33. A ordem para a organização das macrografias foi do lado direito os aços inoxidáveis ferríticos e do lado esquerdo os aços inoxidáveis austeníticos.

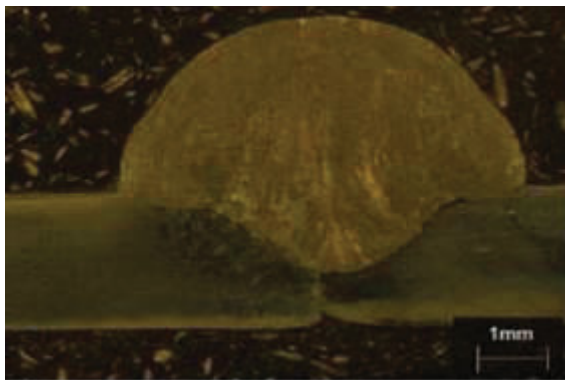
FIGURA 33 – MACROGRAFIA DOS CORDÕES DE SOLDA AIA x AIF



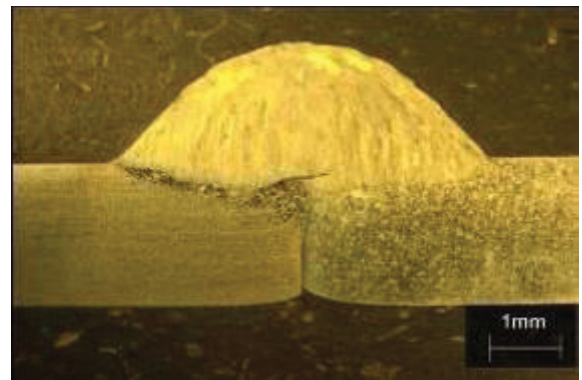
Experimento E1 (AIF x AIA)



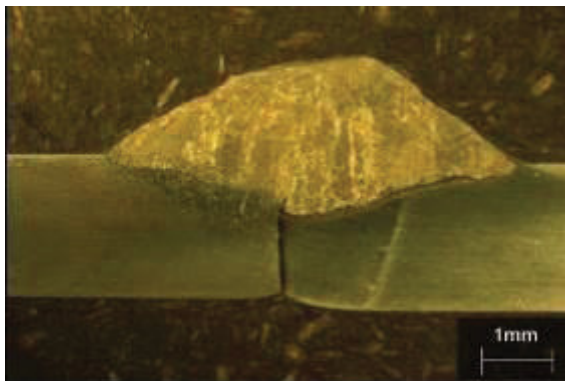
Experimento E2 (AIF-430 x AIA-304)



Experimento E3 (AIF-430 x AIA-304)



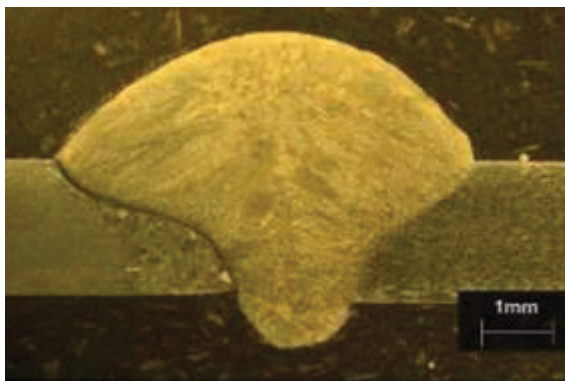
Experimento E4 (AIF-430 x AIA-304)



Experimento E5 (AIF-430 x AIA-304)



Experimento E6 (AIF-430 x AIA-304)



Experimento E7 (AIF-430 x AIA-304)



Experimento E8 (AIF-430 x AIA-304)

FONTE: O autor (2020).

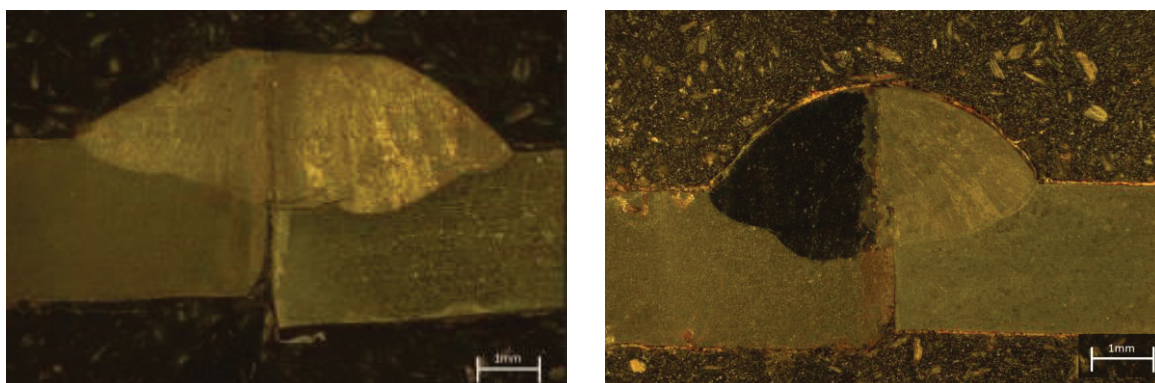
Observa-se que os experimentos E2 e E7 geraram altas taxas de fusão, conforme a FIGURA 33. Também sobre a figura é possível inferir que os experimentos E3 e E4 apresentaram o maior reforço dentre as amostras que pode ser um fator de concentrador de tensões que durante a operação dos trocadores de calor pode interferir nas resistências das soldas, pois podem falhar quando forem submetidas a tensões com níveis inferiores ao limite de resistência ou mesmo em níveis inferiores ao da resistência ao escoamento do material.

Observam-se que os experimentos E1, E2, E6, E7 e E8 apresentaram desalinhamento nas suas faces de topo, isso se deve ao fato de que em aços inoxidáveis e ferríticos o coeficiente de expansão térmica é sensivelmente o mesmo que o dos aços ao carbono, mas no caso de um aço inoxidável austenítico o coeficiente é cerca de 50% mais elevado (PAREDES, 1999). Neste caso, esta diferença dá lugar a maiores esforços de contração, pelo que as chapas de menor espessura se deformam mais facilmente.

4.2.2 Macrografia para o par AC x AIA

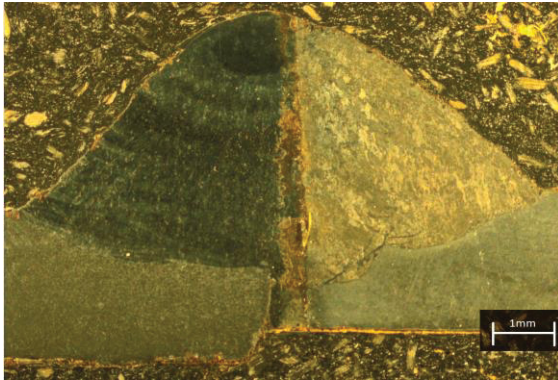
As soldas dissimilares realizadas com os parâmetros definidos pelo método Taguchi, estão apresentadas na FIGURA 34¹. A ordem para a organização das macrografias foi do lado direito os aços inoxidáveis austeníticos e do lado esquerdo os aços carbono 1020.

FIGURA 34 – MACROGRAFIA DOS CORDÕES DE SOLDA AC x AIA

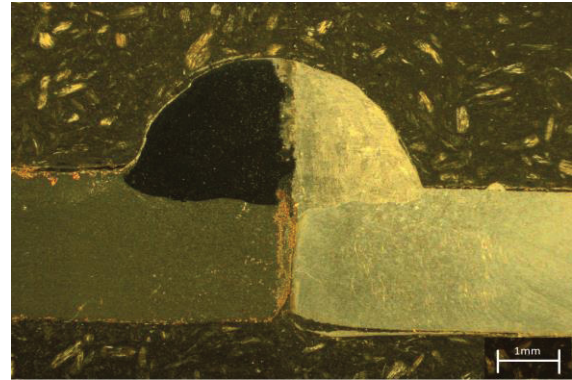


¹ A coloração escurecida em alguns segmentos dos cordões de solda ocorre devido aos diferentes ataques químicos à qual a peça foi submetida (Villela e Nital).

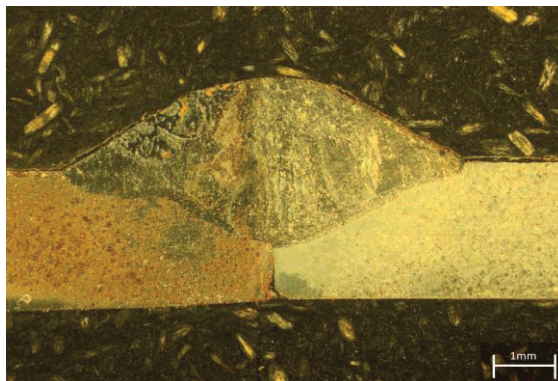
Experimento E1 (AC-1020 x AIA-304)



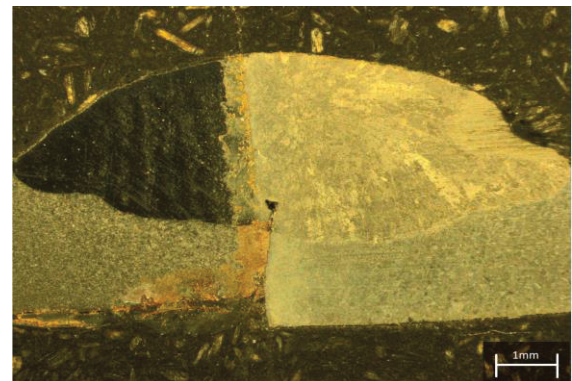
Experimento E2 (AC-1020 x AIA-304)



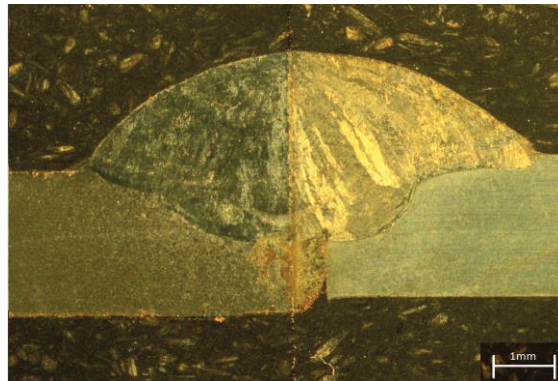
Experimento E3 (AC-1020 x AIA-304)



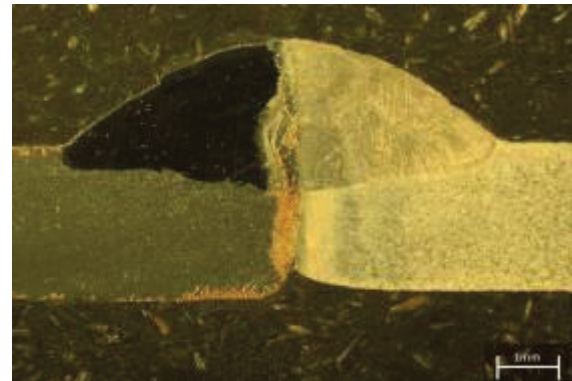
Experimento E4 (AC-1020 x AIA-304)



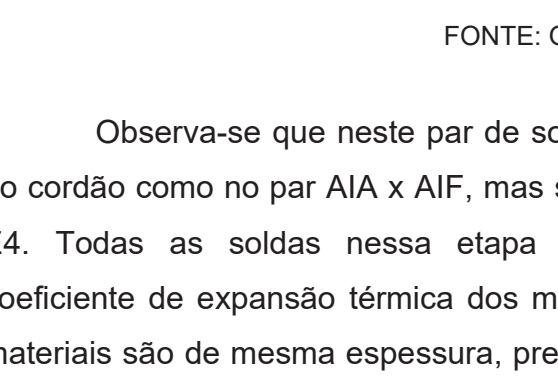
Experimento E5 (AC-1020 x AIA-304)



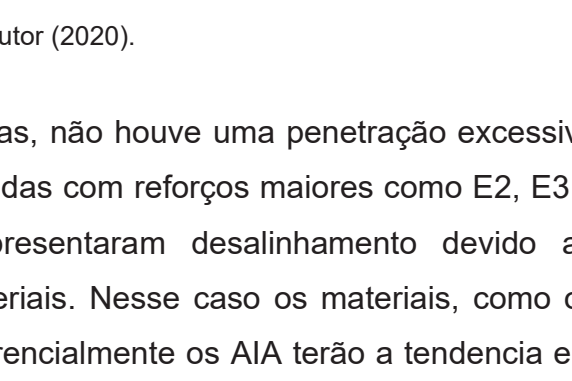
Experimento E6 (AC-1020 x AIA-304)



Experimento E7 (AC-1020 x AIA-304)



Experimento E8 (AC-1020 x AIA-304)



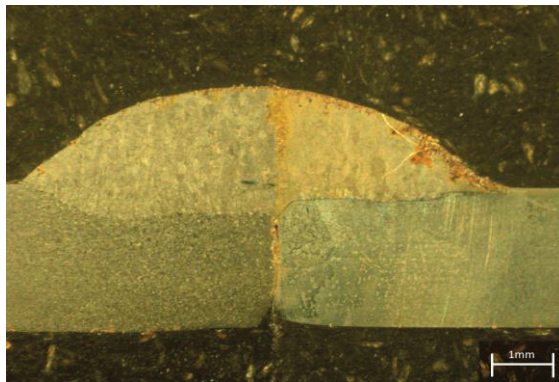
FONTE: O autor (2020).

Observa-se que neste par de soldas, não houve uma penetração excessiva no cordão como no par AIA x AIF, mas soldas com reforços maiores como E2, E3 e E4. Todas as soldas nessa etapa apresentaram desalinhamento devido ao coeficiente de expansão térmica dos materiais. Nesse caso os materiais, como os materiais são de mesma espessura, preferencialmente os AIA terão a tendência em deformar-se primeiro em relação aos outros materiais de base.

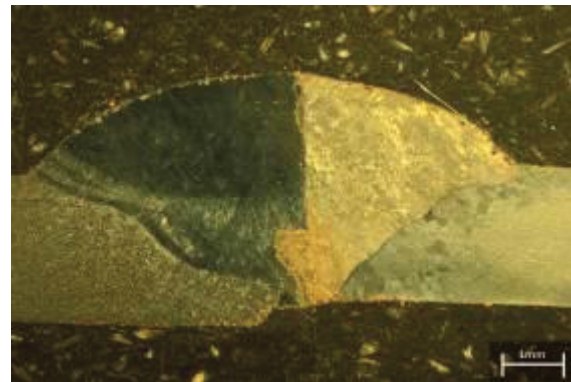
4.2.3 Macrografia para o par AC x AIF

As soldas dissimilares realizadas com os parâmetros definidos pelo método Taguchi, estão apresentadas na FIGURA 35. A ordem para a organização das macrografias foi do lado direito os aços inoxidáveis ferríticos e do lado esquerdo os aços carbono 1020.

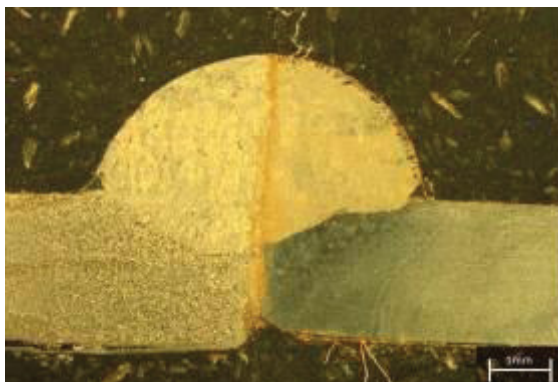
FIGURA 35 – MACROGRAFIA DOS CORDÕES DE SOLDA AC x AIF



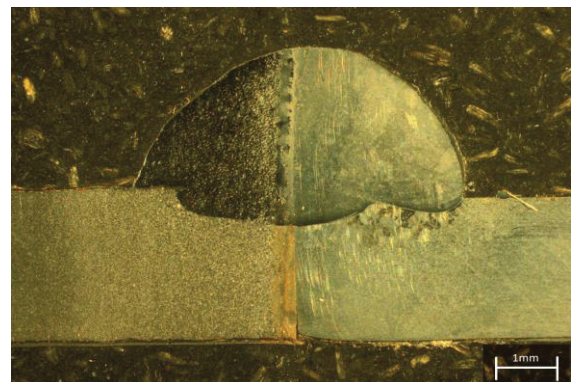
Experimento E1 (AC-1020 x AIF-430)



Experimento E2 (AC-1020 x AIF-430)



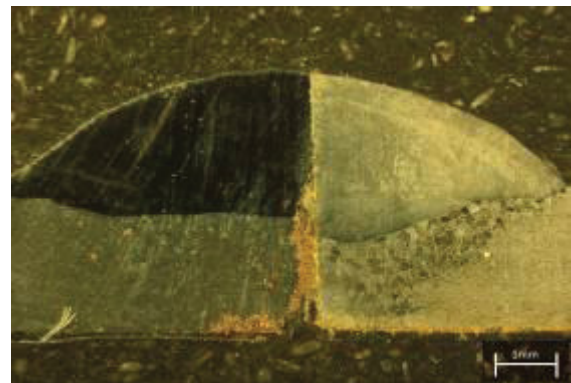
Experimento E3 (AC-1020 x AIF-430)



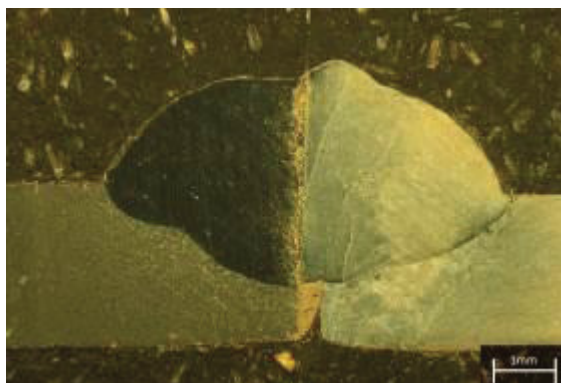
Experimento E4 (AC-1020 x AIF-430)



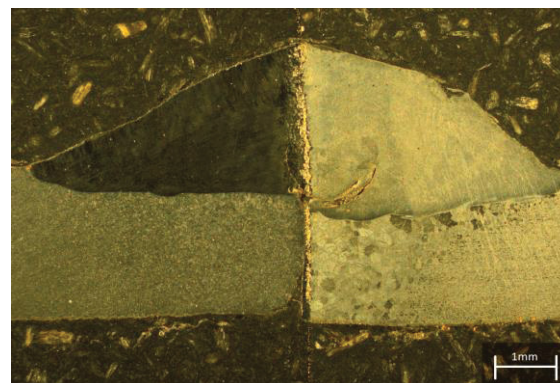
Experimento E5 (AC-1020 x AIF-430)



Experimento E6 (AC-1020 x AIF-430)



Experimento E7 (AC-1020 x AIF-430)



Experimento E8 (AC-1020 x AIF-430)

FONTE: O autor (2020).

Observa-se que os experimentos E3 e E4 apresentaram os maiores reforços no cordão de solda enquanto o experimento E5 e o E7 as maiores diluições. A parcela do metal de base que entra na composição da zona fundida, torna-se importante para determinação de condições de falha em operação, uma vez que uma elevada taxa de diluição pode favorecer falhas durante a operação, principalmente em se tratando em soldagens de juntas dissimilares.

Como esperado o par AC-1020 x AIF-430 apresentou as menores distorções pois o aço inoxidável ferrítico possui praticamente o mesmo coeficiente de expansão térmica do que o aço carbono.

4.3 CÁLCULO DA DILUIÇÃO

As diluições foram calculadas com a medição da parcela de metal de base que entra na composição da zona fundida (metal de solda), para cada um dos pares estudados. As medições da diluição calculadas conforme Eq (1), estão dispostas conforme TABELA 11.

TABELA 11 – PERCENTUAIS DE DILUIÇÃO POR PAR DE EXPERIMENTO.

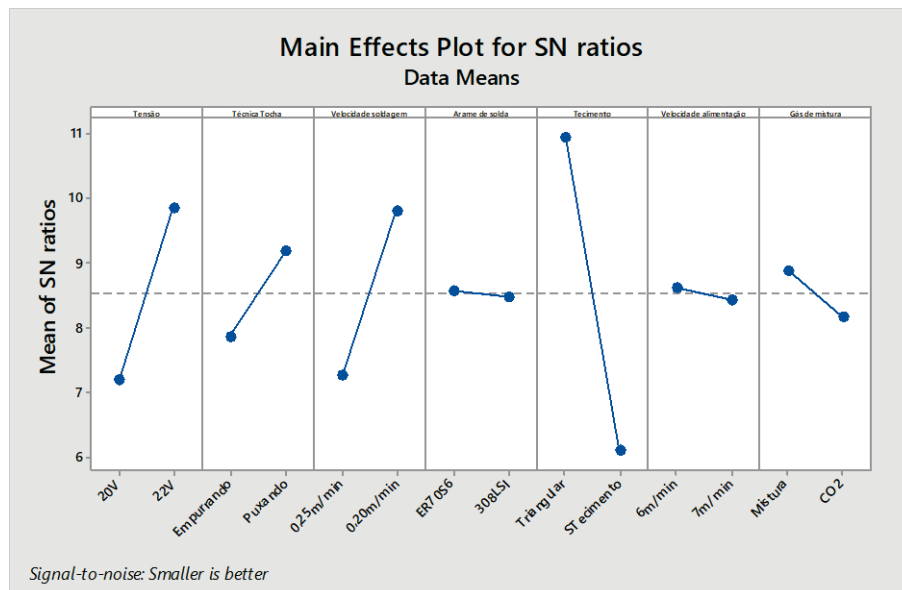
Pares \ %	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
AIF x AIA	38,92	76,43	27,63	44,14	40,64	22,11	43,97	27,07
AC x AIF	40,00	43,54	31,82	16,53	45,38	39,06	38,58	38,72
AC x AIA	39,00	44,33	33,51	20,00	45,01	38,88	40,02	32,36

FONTE: O autor (2020).

4.3.1 Cálculo da diluição do cordão de solda para o par AIF x AIA

A FIGURA 36 mostra a influência dos fatores de controle sobre a diluição, a qual é minimizada para a combinação de fatores (1 1 1 2 2 2 2).

FIGURA 36 – INFLUÊNCIA DOS FATORES DE CONTROLE SOBRE A DILUIÇÃO PARA O PAR AIF X AIA



FONTE: o Autor (2020)

A combinação obtida refere-se a tensão de referência de 20V, técnica da tocha empurrando, velocidade de soldagem em 0,25m/min, arame de solda ER 308LSI, sem tecimento, velocidade de alimentação do arame em 7m/min e gás de proteção sendo o CO₂.

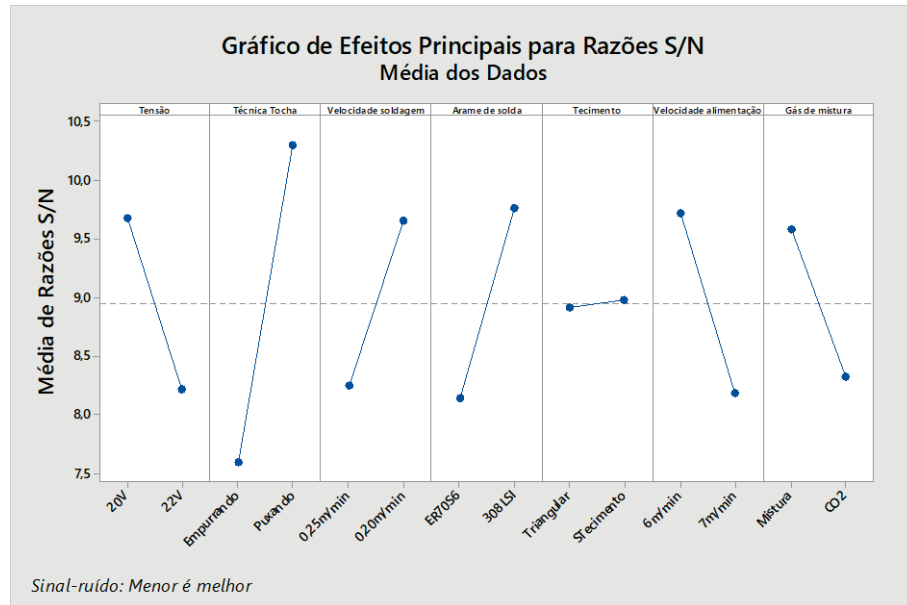
Tensões de referência menores implicam em correntes de soldagens menores. Como evidenciado pelo método este resultado indica que, com o aumento da tensão há um aumento nos valores de diluição dos cordões de solda.

Isto justifica-se pelo fato de que para maiores valores de aporte de energia tem-se um maior comprimento de arco, que por sua vez proporciona uma coluna de plasma mais ampla em sua extensão, ou seja, com isso o cordão de solda torna-se mais largo e mais achatado proporcionando um pequeno reforço que não atua como uma barreira e não evita que a força do arco haja diretamente sobre a poça de fusão.

4.3.2 Cálculo da diluição do cordão de solda para o par AC x AIA

A FIGURA 37 mostra a influência dos fatores de controle sobre a diluição, a qual é minimizada para a combinação de fatores (2 1 1 1 1 2 2).

FIGURA 37 – INFLUÊNCIA DOS FATORES DE CONTROLE SOBRE A DILUIÇÃO PARA O PAR AC X AIA



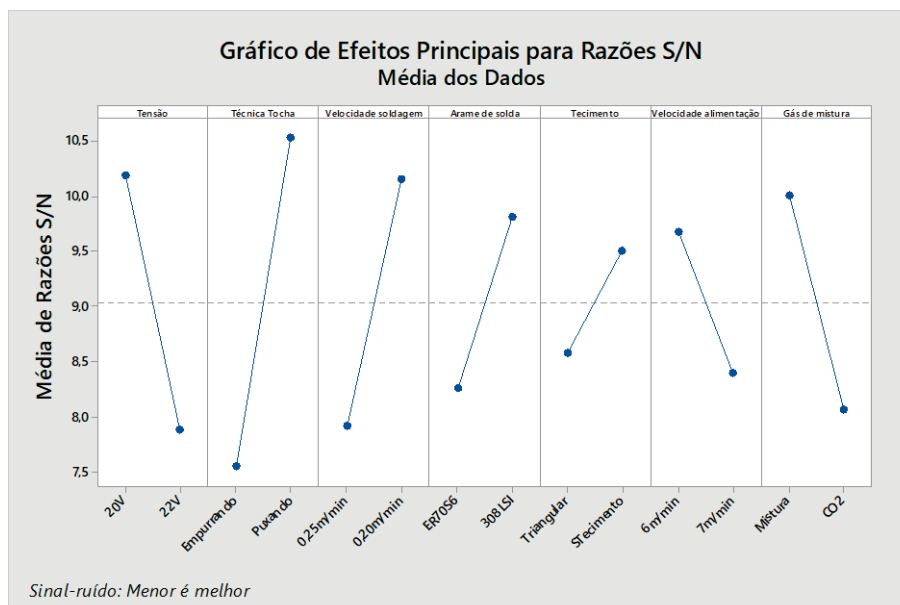
FONTE: o Autor (2020)

A combinação obtida refere-se a tensão de referência de 22V, técnica da tocha empurrando, velocidade de soldagem em 0,25m/min, arame de solda ER70S6, com tecimento triangular, velocidade de alimentação do arame em 7m/min e gás de proteção sendo o CO₂.

4.3.3 Cálculo da diluição do cordão de solda para o par AC x AIF

A FIGURA 38 mostra a influência dos fatores de controle sobre a diluição, a qual é minimizada para a combinação de fatores (2 1 1 1 1 2 2).

FIGURA 38 – INFLUÊNCIA DOS FATORES DE CONTROLE SOBRE A DILUIÇÃO PARA O PAR AC X AIF



FONTES: o Autor (2020)

A combinação obtida refere-se a tensão de referência de 22V, técnica da tocha empurrando, velocidade de soldagem em 0,25m/min, arame de solda ER 70S6, com tecimento triangular, velocidade de alimentação do arame em 7m/min e gás de proteção sendo o CO₂.

4.4 ANÁLISE MICROSCÓPICA DA ZTA

Zona termicamente afetada (ZTA) é a região da solda que não se fundiu durante a soldagem, porém teve sua microestrutura e propriedades alteradas pelo calor induzido pela soldagem (MODENESI, 2011). O calor do processo de soldagem e posterior resfriamento faz com que aconteça a alteração na área circundante da solda. A extensão e magnitude da mudança de propriedade depende principalmente do metal de enchimento de solda, e a quantidade e concentração de entrada de calor pelo processo de soldagem.

A ZTA é constituída basicamente de uma região de grãos grosseiros vizinha à linha de fusão de solda e uma região de grãos finos mais afastada desta linha (MCGRATH, J.T; GIANETTO, 1986).

A região de grãos grosseiros ocorre nos aços, devido às altas taxas de resfriamento nesta região e à sua granulometria é geralmente constituída de

martensita de elevada dureza (YANG, J.R. & BHADESHIA, 1990), cujo valor será tanto maior quanto maior for a porcentagem de carbono e de elementos de liga e quanto maior for a taxa de resfriamento. Dessa maneira a inspeção microscópica buscou as menores ZTA para os pares soldados.

4.4.1 Análise da ZTA para o par AIF x AIA

Na região ilustrada na FIGURA 39 (cada par de imagens corresponde a uma amostra do estudo) é possível identificar os pontos onde ocorrem a maior variação da ZTA, em função da área observada.

A zona termicamente afetada (ZTA) pode apresentar fases que são críticas tais como a fase sigma, alfa linha, ferrita delta, entre outras – denominadas de fases deletérias – e sua delimitação pode ser utilizada para mapear e mitigar os efeitos de tais fases.

FIGURA 39 – MICROGRAFIA DOS CORDÕES DE SOLDA AIF x AIA – (200um)



Experimento E1 (AIF-430)



Experimento E1 (AIA-304)



Experimento E2 (AIF-430)



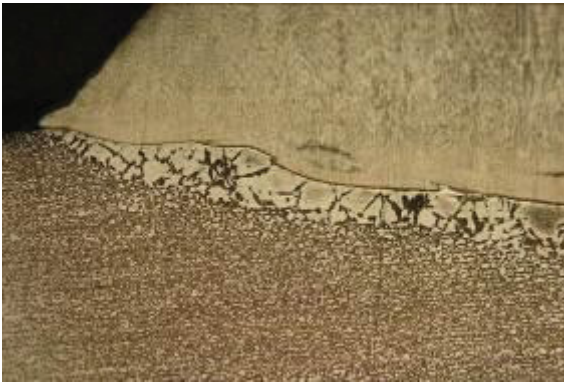
Experimento E2 (AIA-304)



Experimento E3 (AIF-430)



Experimento E3 (AIA-304)



Experimento E4 (AIF-430)



Experimento E4 (AIA-304)



Experimento E5 (AIF-430)



Experimento E5 (AIA-304)



Experimento E6 (AIF-430)



Experimento E6 (AIA-304)



Experimento E7 (AIF-430)



Experimento E7 (AIA-304)



Experimento E8 (AIF-430)



Experimento E8 (AIA-304)

FONTE: o Autor (2020)

A partir da FIGURA 39, é possível observar que há a formação de uma rede de grãos grosseiros ao longo dos contornos de grão ferríticos (no caso de ligas com maiores teores de intersticiais) e a granulação grosseira nas regiões de crescimento de grão e na zona fundida.

Essa observação é importante para definir a região onde a solda tem a maior capacidade de produzir fases deletérias e a partir daí definir a região de estudo da dureza.

4.4.2 Análise da ZTA para o par AC x AIA

Na região ilustrada na FIGURA 40, é possível identificar os pontos onde ocorrem a maior variação da ZTA, em função da área observada.

FIGURA 40 – MICROGRAFIA DOS CORDÕES DE SOLDA AC x AIA – (200um)



Experimento E1 (AC-1020)



Experimento E1 (AIA-304)



Experimento E2 (AC-1020)



Experimento E2 (AIA-304)



Experimento E3 (AC-1020)



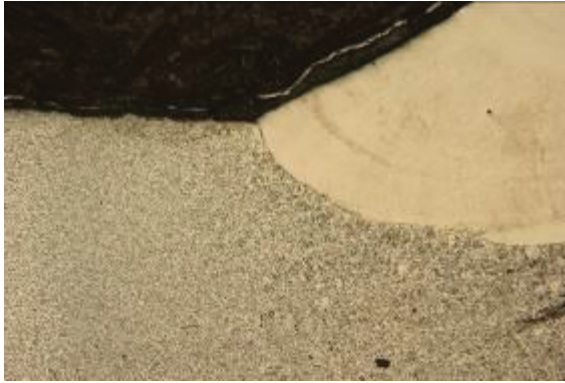
Experimento E3 (AIA-304)



Experimento E4 (AC-1020)



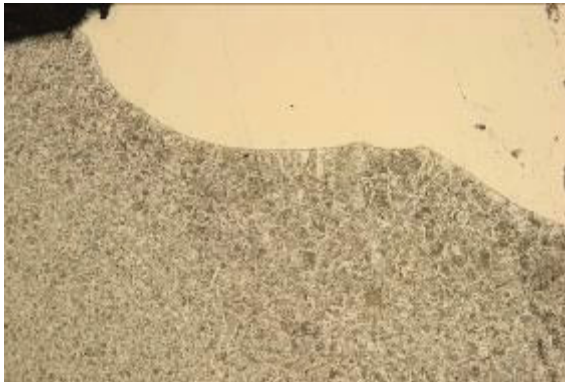
Experimento E4 (AIA-304)



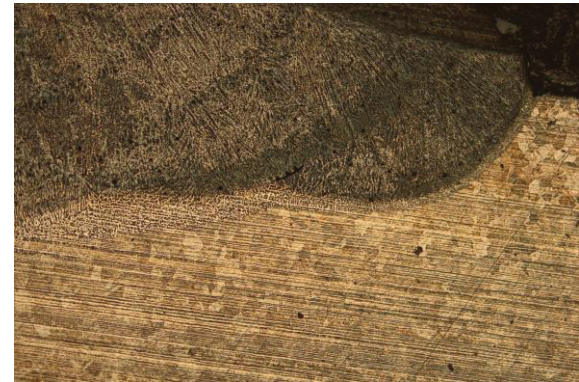
Experimento E5 (AC-1020)



Experimento E5 (AIA-304)



Experimento E6 (AC-1020)



Experimento E6 (AIA-304)



Experimento E7 (AC-1020)



Experimento E7 (AIA-304)



Experimento E8 (AC-1020)



Experimento E8 (AIA-304)

FONTE: o Autor (2020)

Do lado direito, o material de base foi o aço carbono e do lado esquerdo o aço inoxidável austenítico. A partir da observação da FIGURA 40, é possível concluir que do lado do aço carbono, os experimentos E1 e E8 possuem uma região da ZTA maior e mais grosseira do que os demais, já do lado do aço inoxidável ferrítico percebe-se a formação de uma ZTA maior nos experimentos E1, E6 e E7.

Uma ZTA grande pode ser indício de um maior aporte térmico, que pode ser efeito dos parâmetros ou do material de base do conjunto soldado. Quanto maior a ZTA para esses pares, maior a probabilidade de ocorrer o aparecimento de fases deletérias.

4.4.3 Análise da ZTA para o par AC x AIF

Na região ilustrada na FIGURA 41, é possível identificar os pontos onde ocorrem a maior variação da ZTA, em função da área observada.

FIGURA 41 – MICROGRAFIA DOS CORDÕES DE SOLDA AC x AIF – (200um)



Experimento E1 (AC-1020)



Experimento E1 (AIF-304)



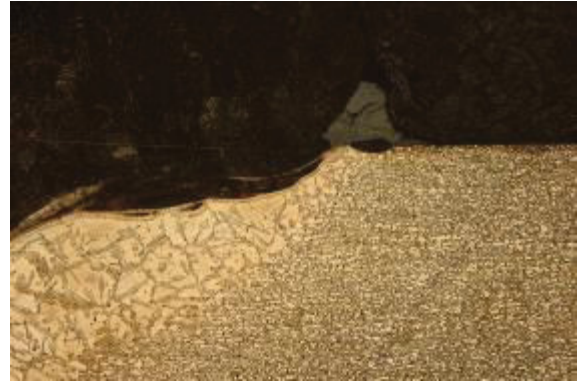
Experimento E2 (AC-1020)



Experimento E2 (AIF-304)



Experimento E3 (AC-1020)



Experimento E3 (AIF-304)



Experimento E4 (AC-1020)



Experimento E4 (AIF-304)



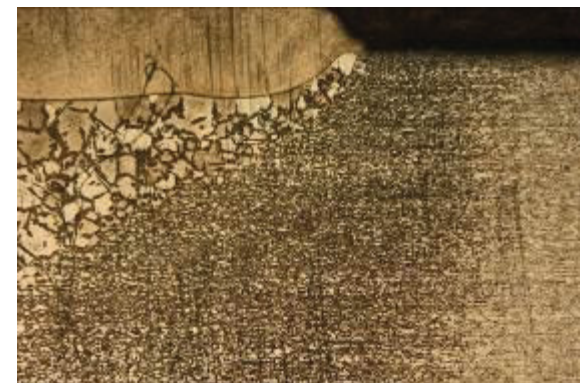
Experimento E5 (AC-1020)



Experimento E5 (AIF-304)



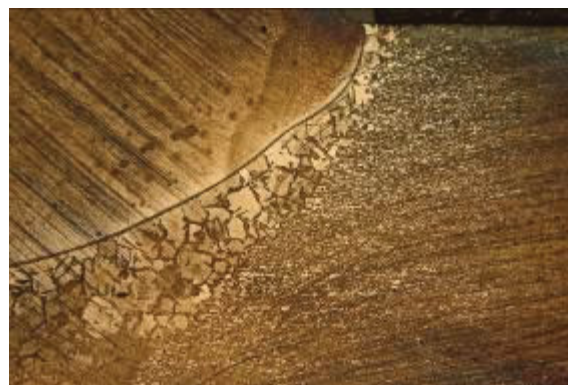
Experimento E6 (AC-1020)



Experimento E6 (AIF-304)



Experimento E7 (AC-1020)



Experimento E7 (AIF-304)



Experimento E8 (AC-1020)



Experimento E8 (AIF-304)

FONTE: o Autor (2020)

Do lado direito, o material de base foi o aço carbono e do lado esquerdo o aço inoxidável ferrítico. A partir da observação da FIGURA 41, é possível concluir que do lado do aço carbono, os experimentos E1 e E8 possuem uma região da ZTA maior e mais grosseira do que os demais, já do lado do aço inoxidável ferrítico percebe-se a formação de uma ZTA maior nos experimentos E1, E6 e E7.

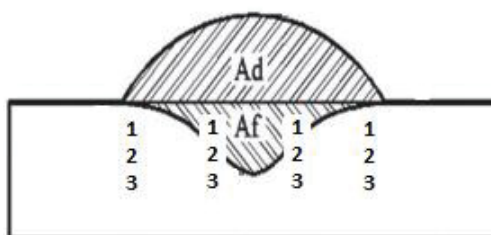
Grãos grosseiros nos contornos de grão na região da ZTA podem apresentar trincas de reaquecimento, o que pode ser catastrófico em operações de trocadores de calor.

4.5 ANÁLISE MICRODUREZA

O ensaio de dureza permite medir a resistência de um material a uma deformação plástica localizada. No caso da soldagem a intenção é buscar regiões de grande variação da dureza em relação ao metal de base, pois elevadas taxas de microdureza podem ser indícios de austenita retida em função da martensita que se forma após o resfriamento.

A medição seguiu um distanciamento de 0,4mm entre os pontos e para cada grupo de medidas, para cada grupo de medições (1, 2 e 3) foi calculada a aritmética simples conforme a FIGURA 42.

FIGURA 42 – MEDIÇÕES DA MICRODUREZA NOS CORDÕES DE SOLDA.



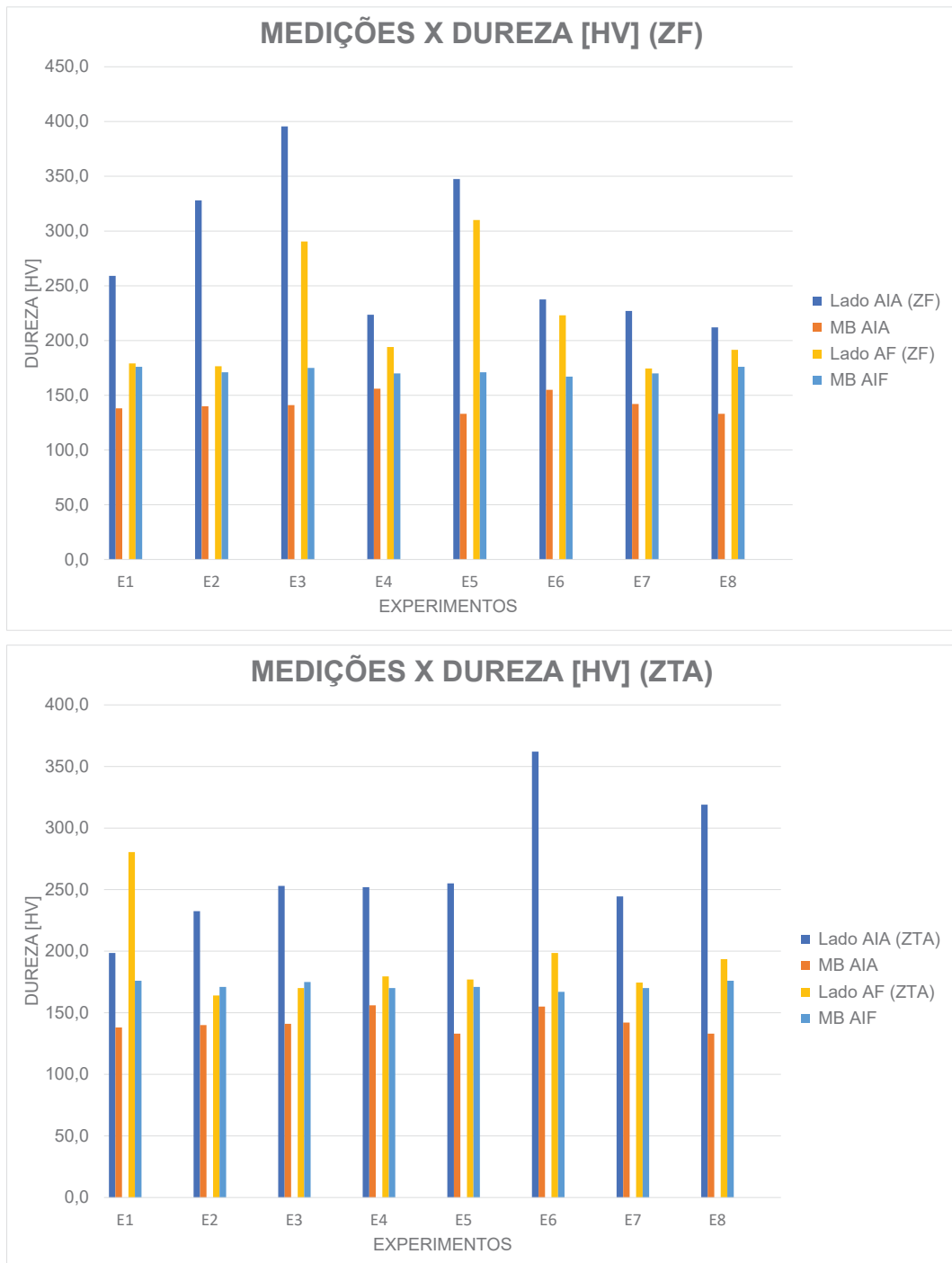
FONTE: O Autor (2020)

O critério de medição consistiu na realização medições de microdureza Vickers na ZTA, ZF e material de base. A dureza do material de base serviu de referência para as demais, assim o resultado para a avaliação do método Taguchi foi a menor variação sobre a dureza do material de base, ou seja, quanto menor melhor.

4.5.1 Análise da microdureza para o par AIF x AIA

Nesta etapa foram executados ensaios de medição da microdureza nos dois lados da junta soldada em três pontos para os pares de aços inoxidáveis austeníticos (AIA) com aços inoxidáveis ferríticos (AIF). As medições para a zona fundida e da ZTA estão no GRÁFICO 4.

GRÁFICO 4 – MEDIÇÃO DAS DUREZAS PARA O PAR AIF x AIA



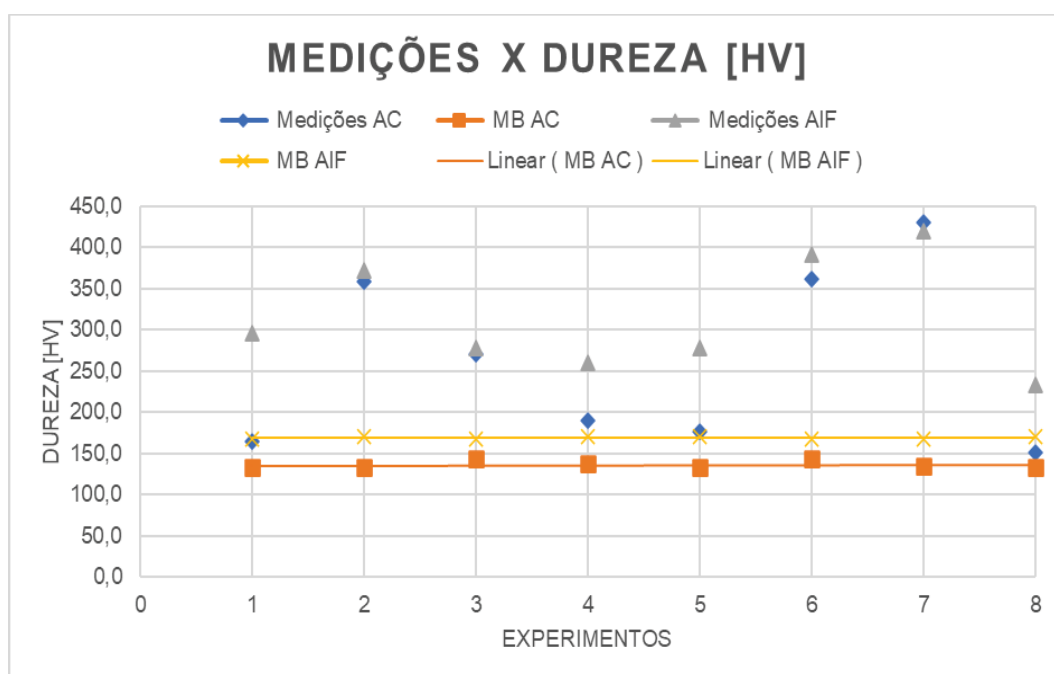
FONTE: O autor (2020).

Para uma análise através do método Taguchi, foram calculadas as médias de dureza entre a ZTA e a ZF, entre os dois pares, a fim de obter-se uma dureza de referência (Gráfico 5) e compará-la, com os resultados do método Taguchi.

Um aumento na dureza pode ser indicio do aumento no nível de carbono que promove a formação de produtos de transformação a baixa temperatura, tais como bainita e martensita que leva a uma significativa redução na resistência à fratura.

Desta forma, quanto mais próximo da condição da dureza nominal é melhor para o par soldado, assim uma menor variação será a melhor resposta, sendo a variável resposta ao método Taguchi.

GRÁFICO 5 – MEDIÇÃO DAS DUREZAS EM FUNÇÃO PARA O PAR AIF x AIA – ZTA

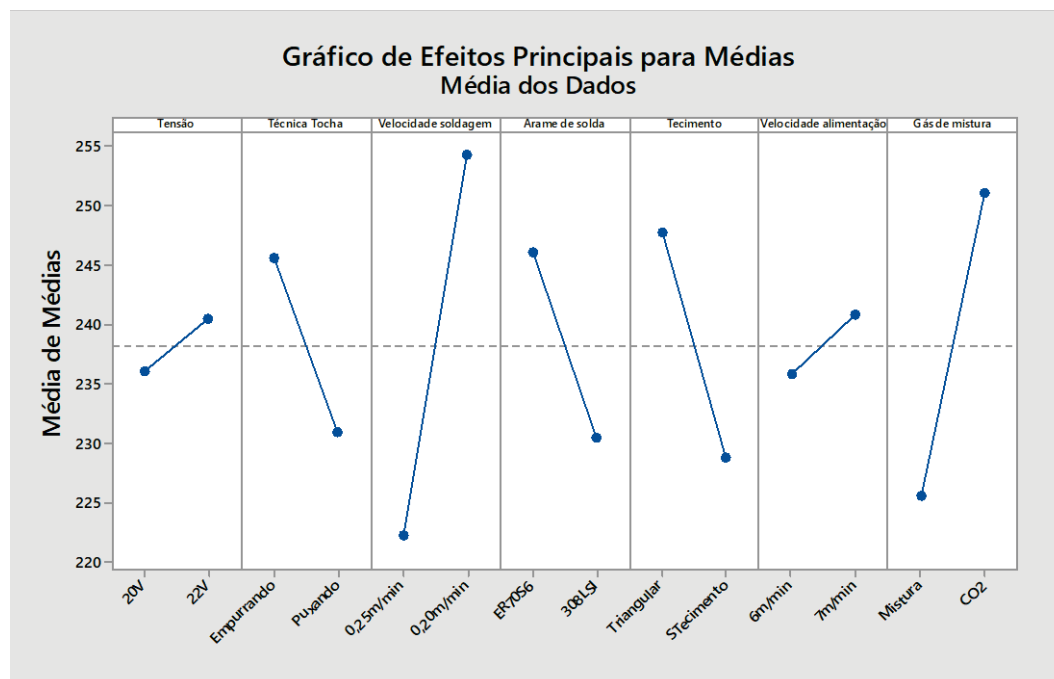


FONTE: O autor (2020)

Os dados do GRÁFICO 6, oferecem uma compilação de informações entre as microdurezas obtidas através da variação dos parâmetros das soldas realizadas pelo método Taguchi, os melhores resultados são aqueles mais próximos do valor nominal, neste caso o E4 e E8.

Assim o resultado para a avaliação do método Taguchi foi a menor variação sobre a dureza do material de base, ou seja, quanto menor melhor. A FIGURA 43 mostra a influência dos fatores de microdureza, a qual é minimizada para a combinação de fatores (1 2 1 2 2 1 1).

FIGURA 43 – INFLUÊNCIA DOS FATORES DE CONTROLE SOBRE A MICRODUREZA DO PAR AIF x AIA.



FONTE: O Autor (2020)

Elevadas taxas de microdureza podem ser indícios de austenita retida em função da martensita que se forma após o resfriamento. Com a obtenção dos parâmetros ótimos através do método Taguchi busca-se melhorar a tenacidade dos aços inoxidáveis através da presença da austenita estável, finamente dispersa na forma filmes na estrutura dos aços inoxidáveis martensíticos de baixo carbono.

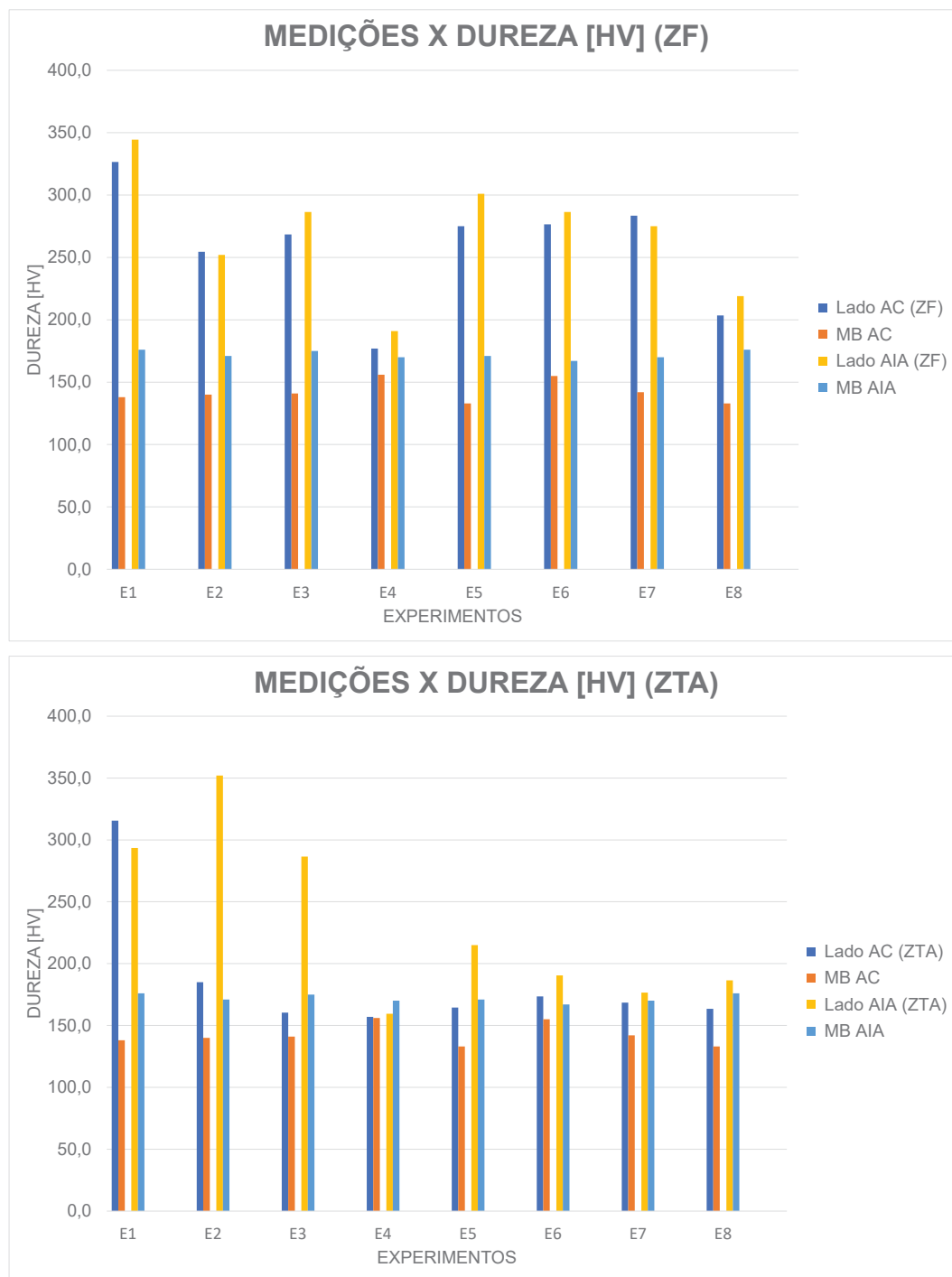
Se a energia de soldagem for alta, a taxa de resfriamento será baixa, entretanto, as taxas de resfriamentos são altas quando a energia de soldagem for baixa.

Com a energia de soldagem elevada a ZTA irá aumentar e a dureza será menor, portanto, esses itens devem ser controlados durante o processo de soldagem (LANCASTER, 1999; SSAB TUNNPLAT, 2004; DALCIN, 2016).

4.5.2 Análise da microdureza para o par AC x AIA

Nesta etapa o ensaio de microdureza seguiu-se nos dois lados da junta soldada em três pontos para os pares de aços carbono (AC) com aços inoxidáveis austeníticos (AIA). As medições para a zona fundida estão no Gráfico 6.

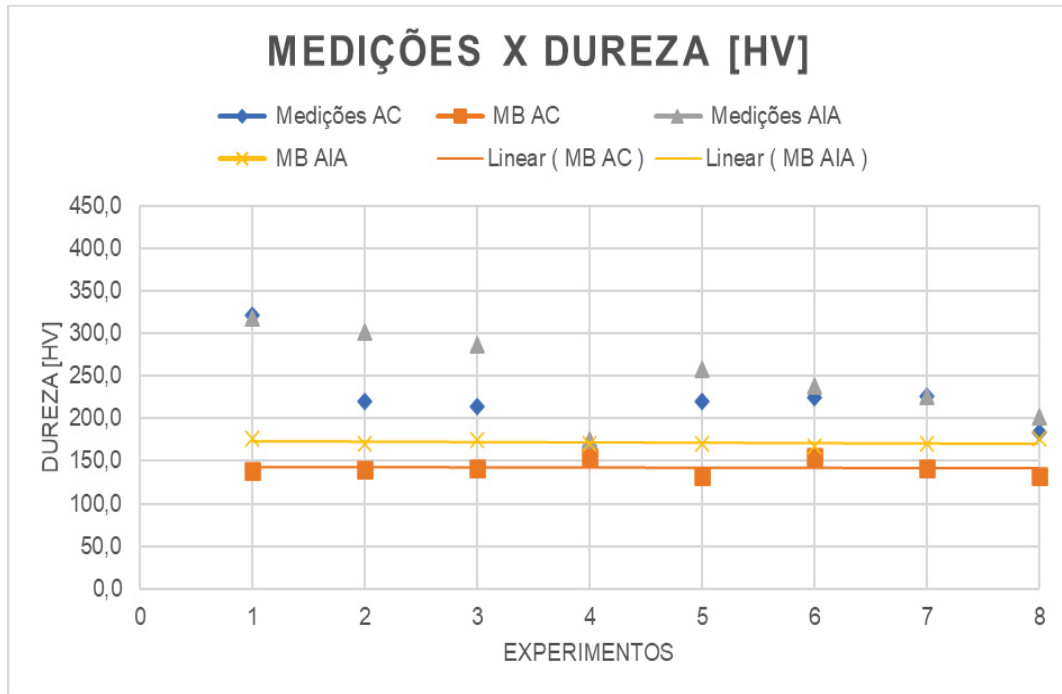
GRÁFICO 6 – MEDIÇÃO DAS DUREZAS EM FUNÇÃO PARA O PAR AC x AIA – ZTA



FONTE: O autor (2020).

A junção dos dados da zona fundida e ZTA para os pares de aços carbono e aços inoxidáveis ferríticos, estão apresentadas no gráfico 7.

GRÁFICO 7 – MEDIÇÃO DAS DUREZAS EM FUNÇÃO PARA O PAR AC x AIA – ZTA

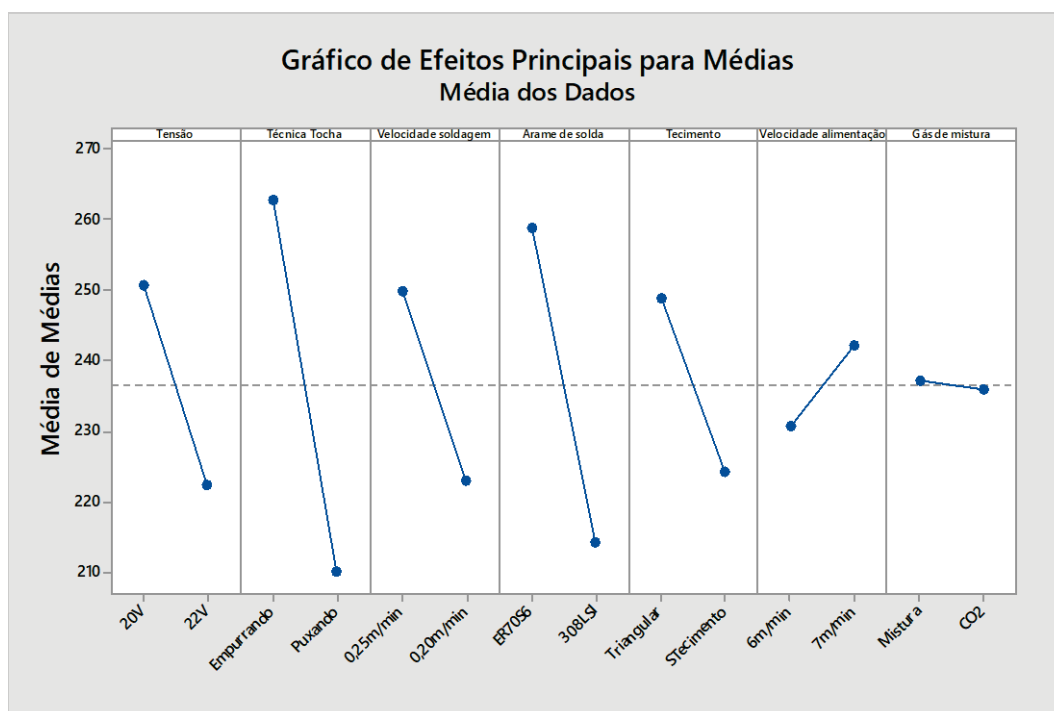


FONTE: O autor (2020).

Os experimentos E4, E5 e E8, tendo como referência a média das durezas do material de base, apresentaram os melhores valores.

Aplicando Taguchi para minimizar a influência da dureza sobre a solda, tem-se os fatores (2 2 2 2 2 1 2), como a melhor combinação para o par estudado (FIGURA 44).

FIGURA 44 – INFLUÊNCIA DOS FATORES DE CONTROLE SOBRE A MICRODUREZA DO PAR AC x AIA.



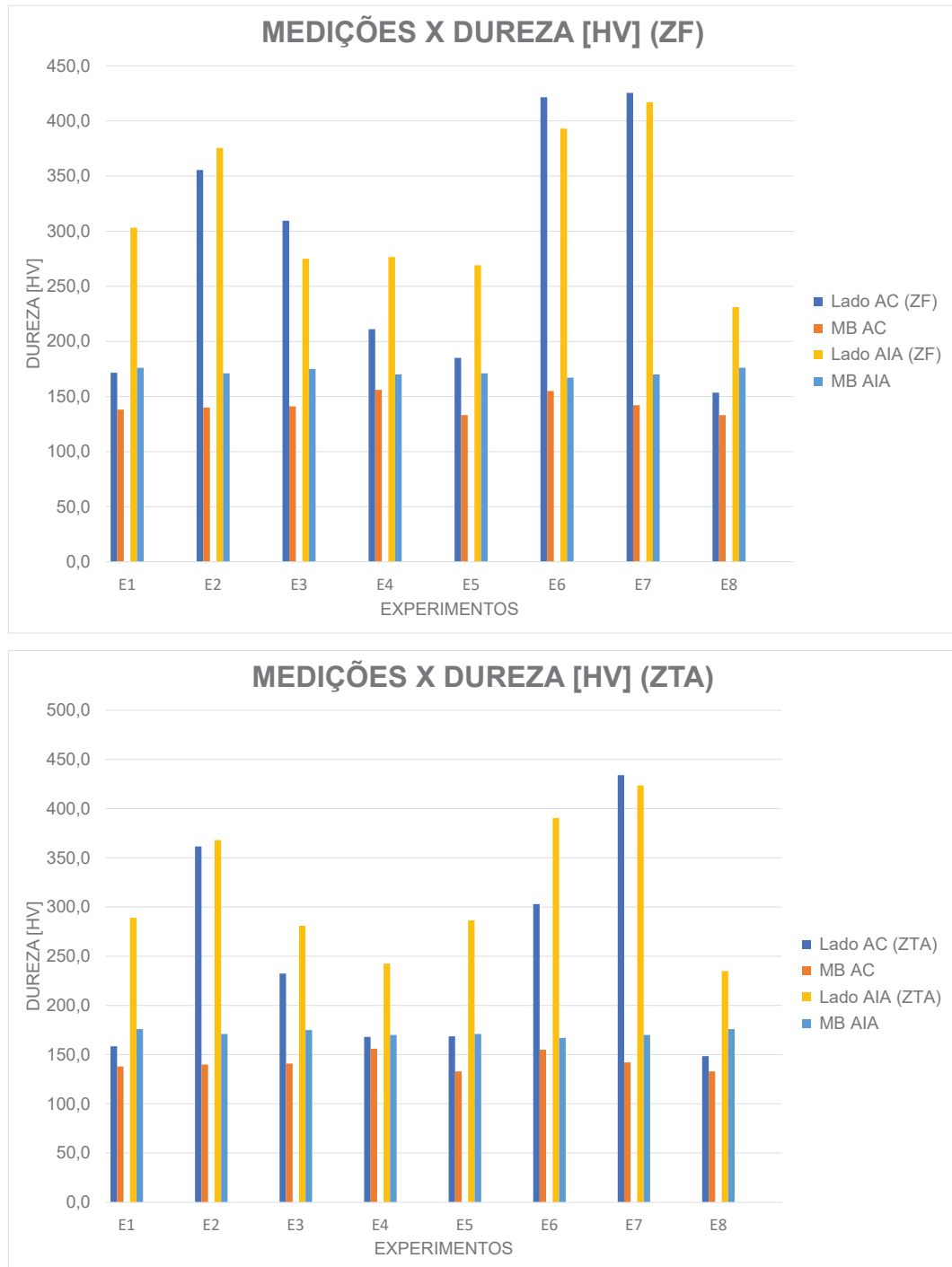
FONTE: O Autor (2020)

Tensões de referência menores implicam em correntes de soldagens menores. Como evidenciado pelo método este resultado indica que, com o aumento da tensão há um aumento nos valores de diluição dos cordões de solda.

4.5.3 Análise da microdureza para o par AC x AIF

Nesta etapa o ensaio de microdureza seguiu-se nos dois lados da junta soldada em três pontos para os pares de aços carbono (AC) com aços inoxidáveis ferríticos (AIF). As medições para a zona fundida estão no gráfico 8.

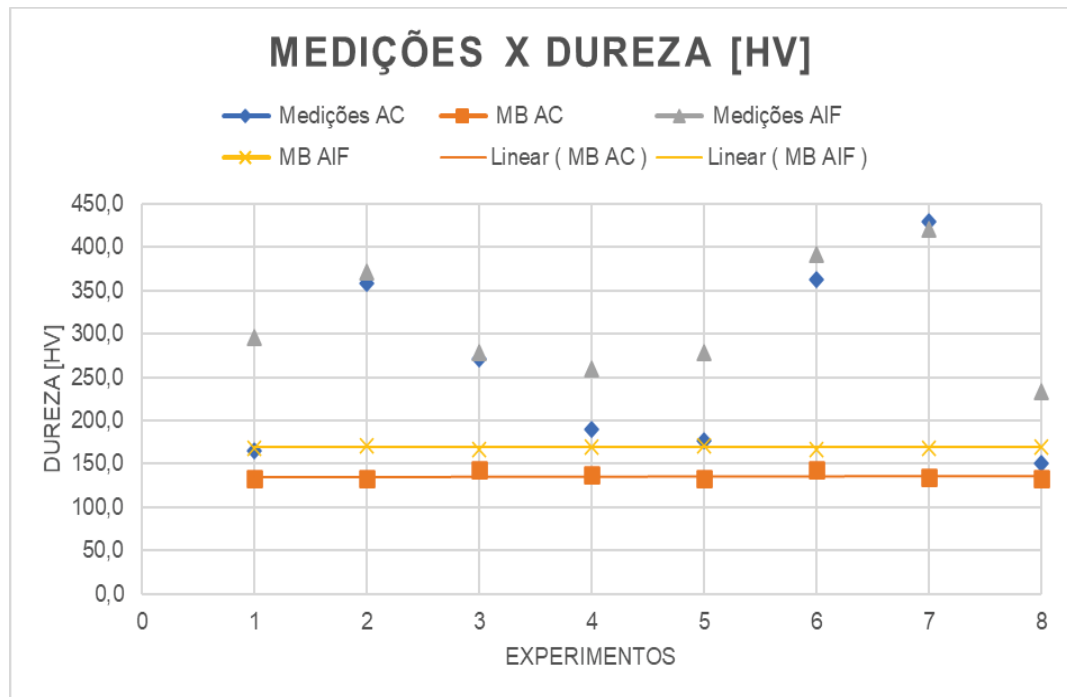
GRÁFICO 8 – MEDIÇÃO DAS DUREZAS EM FUNÇÃO PARA O PAR AC x AIF



FONTE: O autor (2020).

A junção dos dados da zona fundida e ZTA para os pares de aços carbono e aços inoxidáveis ferríticos, estão apresentadas no gráfico 9.

GRÁFICO 9 – MEDIÇÃO DAS DUREZAS EM FUNÇÃO PARA O PAR AIF x AIA – ZTA

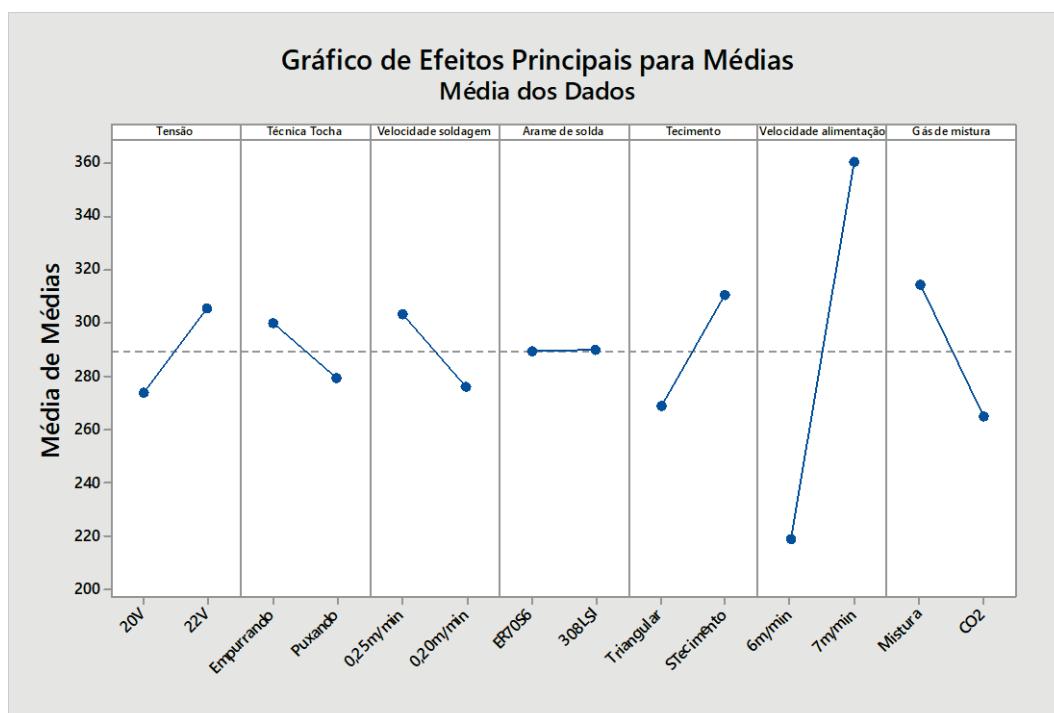


FONTE: O autor (2020).

Os experimentos E4, E5 e E8, tendo como referência a média das durezas do material de base, apresentaram os melhores valores.

Aplicando Taguchi para minimizar a influência da dureza sobre a solda, tem-se os fatores (1 2 2 1 1 1 2), como a melhor combinação para o par estudado (FIGURA 45).

FIGURA 45 – INFLUÊNCIA DOS FATORES DE CONTROLE SOBRE A MICRODUREZA DO PAR
AC x AIF.



FONTE: O Autor (2020)

A combinação ótima sugerida pelo método Taguchi permite reduzir o aumento brusco da dureza e grande perda da ductilidade, quando obedecidos os parâmetros de solda sugeridos.

4.6 PARÂMETROS PARA SOLDAGEM CONFORME TAGUCHI

4.6.1 Parâmetros para diluição

Os parâmetros resultantes da combinação ótima do método Taguchi, forneceram as condições ótimas de trabalho para atender à solicitação de quanto menor melhor para a diluição, conforme verificado na TABELA 12.

TABELA 12 – PARÂMETROS TAGUCHI PARA SOLDA EM FUNÇÃO DA DILUIÇÃO.

		AIF x AIA		AC x AIF		AC x AIF	
P1	Tensão	1	20V	2	22V	2	22V
P2	Técnica Tocha	1	Puxando	1	Puxando	1	Puxando
P3	Velocidade soldagem	1	0,20m/s	1	0,20m/s	1	0,20m/s
P4	Arame de solda	2	ER308LSI	1	ER70S6	1	ER70S6
P5	Tecimento	2	Sem tecimento	1	Triangular	1	Triangular
P6	Velocidade alimentação	2	7m/min	2	7m/min	2	7m/min
P7	Gás de mistura	2	CO ₂	2	CO ₂	2	CO ₂

FONTE: O autor (2020)

Da observação da tabela acima é possível inferir que a técnica da tocha será sempre empurrando para as três combinações (AIF x AIA, AC x AIF, AC x AIF). O mesmo acontece para a velocidade de soldagem, velocidade de alimentação do arame e gás de mistura.

A variável de saída diluição pode ser aplicada a juntas soldadas de ângulo, de canto e sobre posta, pois o reforço tende a ficar alinhado com o metal de base. Já para as juntas de aresta e de topo, recomenda-se a análise do parâmetro de microdureza.

4.6.2 Parâmetros para microdureza

A TABELA 13, descreve os parâmetros para composição das melhores combinações conforme o método Taguchi para os pares estudados sobre a condição de saída sendo a menor microdureza.

TABELA 13 - PARÂMETROS TAGUCHI PARA SOLDA EM FUNÇÃO DA MICRODUREZA.

		AIF x AIA		AC x AIF		AC x AIF	
P1	Tensão	1	20V	1	20V	2	22V
P2	Técnica Tocha	2	Empurrando	2	Empurrando	2	Empurrando
P3	Velocidade soldagem	1	0,20m/s	2	0,25m/s	2	0,25m/s
P4	Arame de solda	2	ER308LSI	1	ER70S6	2	ER308LSI
P5	Tecimento	2	Sem tecimento	1	Triangular	2	Sem tecimento
P6	Velocidade alimentação	1	6m/min	1	6m/min	1	6m/min
P7	Gás de mistura	1	Mistura	2	CO ₂	2	CO ₂

FONTE: O autor (2020)

A influência dos fatores de controle para a menor microdureza possui o mesmo fator sendo a técnica da tocha (empurrando), velocidade de soldagem e velocidade de alimentação do arame as mesmas para todas as combinações.

A aplicação da tabela para análise dos parâmetros de soldas dissimilares em função da microdureza proporciona as melhores saídas em condições de soldas de topo e reparos em campo, pois quanto menor a dureza, mais próxima do valor nominal está se encontrará, e por consequência, haverá uma menor taxa de deformação de fases deletérias.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A influência dos fatores de controle para a diluição possui maior variação no tecimento manual, ou seja, para um tipo de tecimento triangular há uma maior diluição do cordão de solda, o que favorece situações de soldas com altas taxas de penetração, porém para junções de materiais de espessuras próximas às das amostras estudadas (3mm), tal situação não é requerida.

Com a medição da temperatura de resfriamento para cada um dos parâmetros do método Taguchi foi possível identificar que apesar a técnica da tocha “puxando” oferecer cordões mais finos, a sua taxa de resfriamento é o oposto da técnica “empurrando”, pois a tocha direciona o aporte térmico no sentido oposto ao do cordão de solda, o que para a aplicação prática em trocadores de calor pode se tornar um inconveniente pois menores taxas de resfriamento promovem a maior precipitação de Cr_{23}C_6 , porque nessa situação o Cr e C para combinam-se e o carbono pode ficar em solução sólida na austenita até temperatura ambiente.

O uso do método Taguchi foi uma ferramenta estatística muito útil, pois permitiu com um reduzido número de ensaios avaliar e selecionar os parâmetros ótimos para obtenção das características geométricas desejadas para soldagem. Essas características são a base para a determinação da variação ótima dos parâmetros de máquina e operador evitando a formação de grãos grosseiros na ZTA.

Como resultado é possível prever que a combinação (1 1 1 2 2 2 2) para a diluição e a combinação (1 1 2 1 2 2 2) para minimizar a dureza, podem ser referências de soldagem dissimilar entre os aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos que possam minimizar a ZTA e por consequência as fases deletérias.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros o estudo pode ser ampliado também para o ensaio de dobramento, o que fornecerá condições de avaliar qualitativamente a integridade da junta soldada em função da sua ductilidade, ou seja, a capacidade de resistir à fratura durante o dobramento – que são utilizados para detectar defeitos de falta de fusão, altas taxas de diluição e trincas. Esse ensaio pode ser posteriormente aplicado ao método Taguchi com a condição ótima sendo o não rompimento da região soldada.

Com a adoção do ensaio de dobramento, serão três saídas do método, sendo além dessa, a diluição e a dureza, proporcionando dessa forma a aplicação de mais um grau de refino ao método, dando condições para aplicação de uma matriz L18, desta maneira, será possível obter uma tabela que atenda os quesitos de menor dureza, menor diluição e menor taxa de rompimento, de uma distribuição média entre os aços dissimilares. Por fim a adoção desses métodos poderá ser verificada com um número mínimo de ensaios para validação do procedimento.

REFERÊNCIAS

A. D. VALENTE. “**Modelação Obtenção da de um Edifício Ótima e de Nobre Gonçalves Valente Solução Climatização Aplicando a Metodologia de Taguchi.** [s.l: s.n.].

A. SCOTTI, V. P. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho.** Curitiba: UFPR, 2008.

A.K. SINGH, D. TAPAS, V. DEY, R. N. R. An approach to maximize weld Image, penetration during TIG welding of P91 steel plates by utilizing processing and Taguchi orthogonal array. **J. Inst. Eng. India Ser. C**, 2016.

ALEGRE, P. Fenômenos de precipitação assistidos por irradiação nos aços inoxidáveis austeníticos AISI 348 e AISI 316L AISI 348 e AISI 316L. 2016.

ALVAREZ, T. R. et al. Influência da temperatura interpasse nas propriedades do aço inoxidável duplex durante a soldagem pelo processo a arco submerso. **Soldagem & Inspeção**, v. 19, n. 2, p. 114–124, 2014.

AZEVEDO, FERRARESI, J. P. F. Soldagem de um Aço Inoxidável Ferrítico com o Processo A-TIG. v. 14, n. 1, p. 2–9, 2009.

BATISTA, G. Z. Determinação dos parâmetros para o curvamento a quente e tratamento térmico de tubos api 5l x80. **Rio Pipeline Conference & Exposition**, p. 1–8, 2007.

BATISTA, L. A. Soldagem MIG / MAG com fluxo ativo do aço inoxidável austenítico AISI 304L Soldagem MIG / MAG com fluxo ativo do aço inoxidável austenítico AISI 304L. p. 115, 2018.

BERGQUIST, E. L. ET AL. Microstructure and properties of post weld heat treated 2 . 25Cr1Mo weld metal. **7th International Conference: Trends in Welding Research**, p. 963–968, 2005.

BONACORSO, N. G. et al. Técnica da oscilação longitudinal da tocha para o incremento da produção na soldagem em ângulo entre chapas de espessuras dissimilares. **Soldagem e Inspecao**, v. 22, n. 2, p. 207–216, 2017.

BOND, A. . Mechanism of intergranular corrosion in ferritic stainless steels. **Transactions of the Metallurgical Society of AIME**, v. 245, p. 2127–2134, 1969.

BRASIL, A. I. **Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações**, 2011.

BRASIL, F. Estudo De Corrosão Sob Tensão Em Tubos De Aço Inoxidável Aisi 304 L , Aspergidos Termicamente. 2003.

CAMPOS, T. **CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DA ZONA TERMICAMENTE AFETADA DO AÇO BAIXA LIGA 2,25Cr-1Mo REVESTIDO COM ERNiCrMo-3 E AMATEIGADO COM ER80S-D2.** [s.l: s.n.].

CARBÓ, H. Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações. **Arcelor Mittal**, p. 29, 2008.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos.** [s.l: s.n.].

CLAUDIO, L. et al. Tendências no Desenvolvimento de Gases de Proteção

Utilizados na Soldagem MIG/MAG (Trends in the Development of Protective Gases Used in GMAW Welding). v. 1709, n. 3, p. 218–228, 2012.

CÔRTE, R. R. A. Avaliação Comparativa Do Titânio E Do Aço Inoxidável Superaustenítico Para Aplicação Em Permutadores De Calor Do Tipo Placas. p. 1–84, 2014.

COSTA. Soldagem Robotizada, MIG MAG SAE e aços ABNT. 2007.

ESAB. **ESAB MIG Welding Handbook**. [s.l: s.n.].

ESAB; FORTES, C.; VAZ, C. T. Soldagem MIG / MAG. **Soldagem MIG/MAG**, p. 135, 2005.

FILHO D. **Influência do gás de proteção na soldagem do aço inoxidável ferrítico**. [s.l: s.n.].

FILHO, D. F. Influência Do Tipo De Gás De Proteção Da Soldagem Mig / Mag Na Qualidade Do Cordão De Aço Inoxidável. **Researchgate**, n. September 2014, p. 10, 2014.

FONSECA, C. S.; PINHEIRO, I. P. Influência do aporte térmico sobre a morfologia da austenita e na quantidade das fases em chapas soldadas de aço inoxidável duplex SAF2205 Influence of heat input on the morphology of the austenite and the quantity of phases in welded duplex stainless ste. **Revista Matéria**, v. 21, n. 1, p. 227–234, 2016.

GHOSH, N.; PAL, P. K.; NANDI, G. GMAW dissimilar welding of AISI 409 ferritic stainless steel to AISI 316L austenitic stainless steel by using AISI 308 filler wire. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 20, n. 4, p. 1334–1341, 2017.

GUILHERME, L. H. et al. Corrosion behaviour of a dissimilar joint TIG weld between austenitic AISI 316L and ferritic AISI 444 stainless steels. **Welding International**, v. 30, n. 4, p. 268–276, 2016.

GUT, J. A. . **Configurações Ótimas para Trocadores de Calor a Placas**. [s.l.] Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2003.

HONG, Y. et al. Study on reducing the risk of stress corrosion cracking of austenitic stainless steel hydraulically expanded joints. **Engineering Failure Analysis**, v. 113, n. April, p. 104560, 2020.

JESUS, A. C. N.; OLIVEIRA, C. J. K. D. Substituição do processo de expansão pela soldagem TIG (GTAW) na fixação de tubos em trocadores de calor. p. 44–47, 2017.

JOSE, M.; TEIXEIRA, M. O método Taguchi aplicado ao estudo do curtume do couro sem crômio. 2018.

KAVAMURA, H. A. APLICAÇÃO DE SOLDA LASER EM CARROCERIAS AUTOMOTIVAS: ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A SOLDA LASER E A SOLDA PONTO POR RESISTÊNCIA. 2007.

KOU, S. **WELDING METALLURGY**. [s.l: s.n.].

KWIETNIEWSKI, C. E. F. E K. **Metalografia e Tratamento Térmico de Aços e Ferros Fundidos**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2010.

LIU, L. et al. Failure analysis of tube-to-tubesheet welded joints in a shell-tube heat exchanger. **Case Studies in Engineering Failure Analysis**, v. 7, p. 32–40, 2016.

LOPES, A. D. E. C. et al. **AVALIAÇÃO DA SOLDABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS FERRITICOS EXTRA BAIXO INTERSTICIAIS EBI/P444**. [s.l: s.n.].

M. DE M. TAKENOUCI. **Otimização do processo de usinagem de superliga nimonic 80A utilizando o método de taguchi**. [s.l: s.n.].

MACIEL, T. M. **INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM SOBRE A MICROESTRUTURA DE JUNTAS SOLDADAS DE AÇOS ARBL**. [s.l: s.n.].

MARQUES, M. **ESTIMAÇÃO DOS INTERVALOS DE CONFIANÇA PARA A FUNÇÃO PERDA DE TAGUCHI, RAZÃO SINAL RUÍDO E DOS ÍNDICES DE CAPACIDADE POTENCIAL DO PROCESSO, POR MEIO DE MÉTODO DE REAMOSTRAGEM**. [s.l: s.n.].

MCGRATH, J.T; GIANETTO, J. . & L. M. . Factors Affecting the Toughness Properties of High Strength HY80 Weldments. **Canadian Metallurgical Quarter**, Vol. 25, p. 349–356, 1986.

MELO, L. M. D. O. **Análise Paramétrica e Econômica de Trocadores de Calor Compactos para Turbinas a Gás Regenerativas**. [s.l: s.n.].

MICHAEL J.MORAN & HOWARD N. SHAPIRO. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. [s.l: s.n.].

MODENESI, P. J. **Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis**. São Paulo: [s.n.].

MODENESI, P. J. Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas. p. 27, 2011.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. **Soldagem I: Introdução aos Processos de Soldagem**. [s.l: s.n.].

MOREIRA, H. S. Estudo da influência dos parâmetros de soldagem MIG e da morfologia do cordão no comportamento à fadiga de juntas soldadas de um eixo traseiro veicular. **Universidade de São Paulo**, p. 84, 2008.

MORTEAN, M. V. V. et al. Soldagem por difusão de aços inoxidáveis para fabricação de trocadores de calor compactos. **Soldagem e Inspeção**, v. 21, n. 1, p. 103–114, 2016.

NAKAMATSU, S.; DIAS, M. M. Efeito da Temperatura de Revenido na Formação de Ferrita Delta em um aço inoxidável martensítico com baixo teor de Carbono. n. 1, p. 2665–2672, 2014.

NUNES, E. B. et al. Estudo dos efeitos da restrição na microestrutura, microdureza e tenacidade em juntas soldadas em aço inoxidável duplex. **Soldagem e Inspeção**, v. 16, n. 2, p. 156–164, 2011.

O'BRIEN, A. **Welding Handbook- Welding Process, Part 1**. 9th. ed. Miami: [s.n.].

PAREDES, R. C. **Metalurgia e soldabilidade dos aços inoxidáveis**. [s.l.] UFPR, 1999.

PAREDES, R. S. C.; D'OLIVEIRA, ANA SOFIA, C. M. TRINCAS DE SOLIDIFICAÇÃO E LIQUAÇÃO DE AÇOS INOXIDÁVEIS SUPERAUSTENÍTICOS AISI 904L SOLDADOS POR ARCO ELÉTRICO. (1) Ramón S. Cortés Paredes , Dr.

Eng.; **1ª Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, n. 1, p. 9, 2001.

PERUSSI, R. Análise do desempenho de trocadores de calor de fluxo cruzado por simulação numérica. 2010.

PESSOA, A. R. P. et al. Seleção de parâmetros através do método Taguchi para soldagem de revestimento com ligas de níquel pelo processo MIG/MAG. **Soldagem & Inspeção**, v. 15, n. 4, p. 317–324, 2010.

PRABAKARAN, M. P.; KANNAN, G. R. Optimization of laser welding process parameters in dissimilar joint of stainless steel AISI316/AISI1018 low carbon steel to attain the maximum level of mechanical properties through PWHT. **Optics and Laser Technology**, v. 112, n. August 2018, p. 314–322, 2019.

ROY, R. K. **Experiments Using the Taguchi Approach**. New York: [s.n.].

S. LEBRÃO. ANÁLISE DA SENSITIZAÇÃO DE JUNTAS SOLDADAS EM AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO COM SOLDA DE ARAME TUBULAR MONOESTABILIZADO E BIESTABILIZADO AO NIÓBIO E TITÂNIO. v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2019.

S. VINODH, S.K. BHARATHI, N. G. **Parametric optimization of submerged arc welding using Taguchi method**. [s.l: s.n.].

SCOTTI, A. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**. [s.l: s.n.].

SEDRICKS, A. J. **Corrosion of stainless steels**. New York: [s.n.].

SERNA-GIRALDO, C. A. et al. Investigação do efeito do teor de intersticiais sobre o grau de sensitização em aços inoxidáveis ferríticos a 600°C. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 60, n. 1, p. 49–54, 2007.

SILVA, C. C. et al. Austenitic and ferritic stainless steel dissimilar weld metal evaluation for the applications as-coating in the petroleum processing equipment. **Materials and Design**, v. 47, p. 1–8, 2013.

SOUZA, M. S. **ANÁLISE TÉRMICA DE UM TROCADOR DE CALOR DO TIPO CASCO E TUBOS PARA RESFRIAMENTO DO RESÍDUO DE UMA UNIDADE DE DESTILAÇÃO ATMOSFÉRICA**, 2013.

TELLES, P. C. . **Materiais para equipamentos de processo**. Rio de Janeiro: [s.n.].

TORRES, A. DE A.; CORREA, O. V.; ANTUNES, R. A. Influência Do Tamanho De Grão Sobre a Resistência À Corrosão Do Aço Inoxidável Aisi 304. **22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, p. 9, 2016.

TSCHIPTSCHIN, A. P. Estrutura e propriedades do aço inoxidável austenítico AISI 316L Grau ASTM F138 nitretado sob plasma à baixa temperatura INOX: Engenharia de Superfície Estrutura e propriedades do aço inoxidável austenítico AISI 316L Grau ASTM F138. p. 137–141, 2010.

WILDE, B. E. **The Influence of Silicon on the Pitting Corrosion Resistance of on 18Cr-8Ni Stainless Steel**. **Corrosion**. [s.l: s.n.].

YANG, J.R. & BHADSHIA, K. D. . “The Dislocation of Acicular Ferrite in Steel Welds. **Welding Journal**, 1990.

YU, P. et al. Microstructure evolution and solidification cracking in austenitic stainless steel welds. **Welding Journal**, v. 97, n. 11, p. 301S-314S, 2018.

ZANETIC, S. T.; ALONSO-FALEIROS, N. A. Determinação do Grau de Sensitização de Aços Inoxidáveis Austeníticos pelo método DL-EPR. **Boletim Técnico da Faculdade de Tecnologia de São Paulo**, p. 107–114, 2001.

APÊNDICE 1 – QUESTIONÁRIO

	MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ DIRETORIA DE ENSINO DEPARTAMENTO DE MECÂNICA	DISCIPLINA:
	MESTRADO PROFISSIONAL EM ENG. DE MANUFATURA	DATA: 28/08/2019

QUESTIONÁRIO / CHECK LIST

Este é um questionário para pesquisa de ordem acadêmica para coletar informações que serão utilizadas para desenvolver um estudo experimental para avaliar o comportamento das soldas dissimilares para o desenvolvimento de procedimentos para soldagem de trocadores de calor, tendo seus parâmetros selecionados através método Taguchi.

O autor garante o sigilo das informações, sendo de uso exclusivo para a realização dessa pesquisa.

1 DADOS LEVANTADOS REFERENTE AO PROCESSO

1) Quais são os materiais mais usuais empregados no processo de fabricação de trocadores de calor?

☐ Aço inoxidável austenítico
 ☐ Aço inoxidável ferrítico
 ☐ Aço carbono

2) Quais são os processos de soldagens empregados na fabricação de trocadores de calor?

☐ Eletrodo revestido
 ☐ TIG
 ☐ MIG

3) Qual a temperatura média de operação para os trocadores de calor do tipo casco tubo?

☐ 0°C ~ 100°C
 ☐ 100°C ~ 250°C
 ☐ > 250°C

	MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ DIRETORIA DE ENSINO DEPARTAMENTO DE MECÂNICA	DISCIPLINA:
	MESTRADO PROFISSIONAL EM ENG. DE MANUFATURA	DATA: 28/08/2019

4) Quais são os pares de materiais de base utilizados nas soldas?

☐ AIA x AIF

☐ AIA x AC

☐ AIF x AC

5) Existem cuidados específicos para soldagem entre os AIA x AIF, AIA x AC e AIF x AC?

☐ Sim, justifique.

☐ Não

☐ Não aplicável

7) Após a soldagem como o produto é acondicionado?

☐ Sim, justifique

☐ Não

☐ Não aplicável

8) Existe algum cuidado específico ao resfriamento após a soldagem?

☐ Sim, justifique

☐ Não

☐ Não aplicável

9) Quais os tratamentos térmicos utilizados após a soldagem?

☐ Normalização

☐ Reozimento

☐ Não aplicável

10) Existem teste de qualificação para junta soldada?

	MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ DIRETORIA DE ENSINO DEPARTAMENTO DE MECÂNICA	DISCIPLINA:
	MESTRADO PROFISSIONAL EM ENG. DE MANUFATURA	DATA: 28/08/2019

☐ Sim, justifique
 ☐ Não
 ☐ Não aplicável

11) Quais testes são aplicados para certificação da junta soldada?

☐ Ultrassom
 ☐ Líquido penetrante
 ☐ Inspeção visual

12) Existem pontos de corrosão na junta soldada?

☐ Sim, justifique
 ☐ Não
 ☐ Não aplicável

14) Existem testes de estanqueidade após a realização das soldas?

☐ Sim, justifique
 ☐ Não
 ☐ Não aplicável

16) Existem retrabalhos nas soldas?

☐ Sim, justifique
 ☐ Não
 ☐ Não aplicável

18) Nos processos de retrabalho, qual é o método de soldagem empregado?

	MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ DIRETORIA DE ENSINO DEPARTAMENTO DE MECÂNICA	DISCIPLINA:
	MESTRADO PROFISSIONAL EM ENG. DE MANUFATURA	DATA: 28/08/2019

2 DADOS LEVANTADOS REFERENTE AOS PARAMETROS DE SOLDA ACERCA DO PROCESSO MIG/MAG

Premissas:

- Espessura mínima dos materiais de base definida em 3mm.
- Tubos soldados no espelho com diâmetro mínimo de 25mm.
- As soldas são executadas sem chanframento.
- Quando as soldas são executadas entre o espelho e o tubo, será considerado que o tubo foi expandido no interior do espelho.

- 1) Qual é a tensão nominal para a operação de soldagem (mín e máx)?
- 2) Qual é a técnica tocha normalmente utilizada (puxando ou empurrando)?
- 3) Qual é a velocidade soldagem utilizada no processo (mín x máx)?
- 4) Qual é o arame de solda normalmente empregado (Convencional x Inóx)?
- 5) Qual é o tipo de tecimento usado (Sem tecimento x Triangular)?
- 6) Qual é a velocidade alimentação do arame para os processos MIG/MAG (mín e máx)?
- 7) Qual é o gás de mistura normalmente usado no processo MIG/MAG (Argônio x CO₂)?

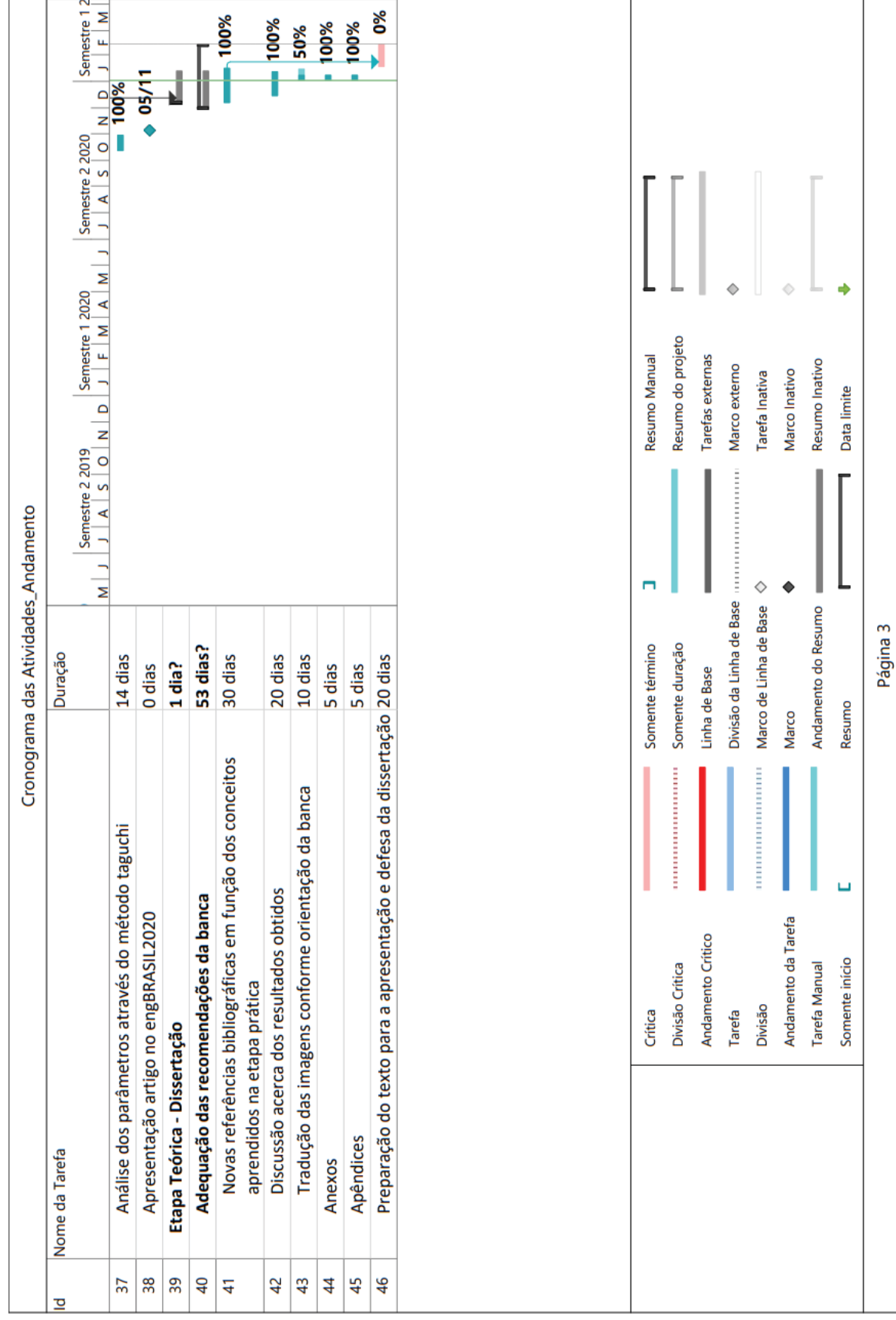
APÊNDICE 2 – CRONOGRAMA

Cronograma das Atividades_Andamento														
Nome da Tarefa		Duração	Semestre 2 2019 Semestre 1 2020 Semestre 2 2020 Semestre 1 2021											
1	Projeto de pesquisa	505 dias?												
2	Etapla teórica	274 dias												
3	Realização das disciplinas exigidas pelo curso	200 dias												
4	Revisão bibliográfica sobre soldabilidade de trocadores de calos fabricados de aços inoxidáveis e aços ao carbono	180 dias												
5	Visita técnica para conhecimento do processo atual e aplicação do questionário	0 dias												
6	Definição dos parametros de soldagem	10 dias												
7	Planejamento experimental para a realização das soldagem e caracterização microestrutural.	60 dias												
8	Defesa da proposta de projeto	0 dias												
9	Interrupção das atividades (Coronavírus)	100 dias												
10	Etapla prática	90 dias												
11	Realização das soldagens [até 3 meses]	90 dias												
12	Elaboração de lista de materiais para compra	1 dia												
13	Elaboração de suporte para fixação	1 dia												
14	Ajuste / parametrização da máquina de solda	2 dias												
15	Locação de medidor de temperatura	7 dias												
16	Compra dos materiais	7 dias												
17	AIA / AIF	3 dias												

Critica	Somente término	Resumo Manual
Divisão Crítica	Somente duração	Resumo do projeto
Andamento Crítico	Linha de Base	Tarefas externas
Tarefa	Divisão da Linha de Base	Marco externo
Divisão	Marco de Linha de Base	Tarefa Inativa
Andamento da Tarefa	Marco	Marco Inativo
Tarefa Manual	Andamento do Resumo	Resumo Inativo
Somente início	Resumo	Data limite

Página 1

Cronograma das Atividades_Andamento																							
Id		Nome da Tarefa	Duração	Semestre 2 2019 Semestre 1 2020 Semestre 2 2020 Semestre 1 2																			
18		CO2	3 dias	100%																			
19		Arame de solda	7 dias	100%																			
20		Planilha para coleta de dados	1 dia	100%																			
21		Cortar as amostras para teste de fixação e soldagem (1020)	1 dia	100%																			
22		Cortar as amostras para solda (AIA AIF 1020)	1 dia	100%																			
23		Solda das amostras	4 dias	100%																			
24		Identificar os pares do Taguchi	0,5 dias	100%																			
25		Preparação das amostras com lixamento e polimento	7 dias	100%																			
26		Análise de microscopia	19 dias	100%																			
27		Aços Inoxidáveis ferríticos e austeníticos	7 dias	100%																			
28		Caracterização microestrutural via microscopia ótica	7 dias	100%																			
29		Caracterização via microscopia ótica	7 dias	100%																			
30		Aços Inoxidáveis ferríticos e aços carbono	7 dias	100%																			
31		Caracterização microestrutural via microscopia ótica	7 dias	100%																			
32		Caracterização via microscopia ótica	7 dias	100%																			
33		Aços Inoxidáveis austeníticos e aços carbono	7 dias	100%																			
34		Caracterização microestrutural via microscopia ótica	7 dias	100%																			
35		Caracterização via microscopia ótica	7 dias	100%																			
36		Análise dos resultados de soldagem (gráficos)	14 dias	100%																			
Critica Divisão Crítica Andamento Crítico Tarefa Divisão Andamento da Tarefa Tarefa Manual Somente início Somente término Somente duração Linha de Base Divisão da Linha de Base Marco de Linha de Base Marco Andamento do Resumo Resumo Resumo Manual Resumo do projeto Tarefas externas Marco externo Tarefa Inativa Marco Inativo Resumo Inativo Data limite																							
Página 2																							



ANEXO 1 – DADOS DA MÁQUINA DE SOLDA

PS43020.000.4408

01. Introdução

Este manual contém as informações necessárias para operação e manutenção do retificador de tensão constante **TMC 400 S** para soldagem semi-automática.

Os melhores resultados serão obtidos SOMENTE se o pessoal de operação e manutenção deste equipamento tiver acesso a este manual e ficar familiarizado com o mesmo.

No painel traseiro da máquina encontra-se uma etiqueta com o número e a série do equipamento. Ao pedir peças de reposição cite: o número, a série, a quantidade, o código e a descrição da peça.

Número: PS43020.000.4408

02. Especificações Gerais

Corrente Nominal de soldagem.....	400 A.
Tensão nominal de soldagem.....	34 V.
Fator de trabalho nominal.....	60 %.
Tensão de circuito aberto mínima.....	21 V.
Tensão de circuito aberto máximo.....	50 V.
Frequência de rede.....	50/60 HZ.
Tensão de rede.....	220/380/440 V.
Corrente nominal.....	60/35/30 A.
Potência aparente absorvida da rede.....	22,8 kVA.
Fator de potência.....	0,86.
Classe de isolamento.....	B.
Peso (Kg).....	173.

As dimensões gerais estão na página 17.

PARTE I - Operação

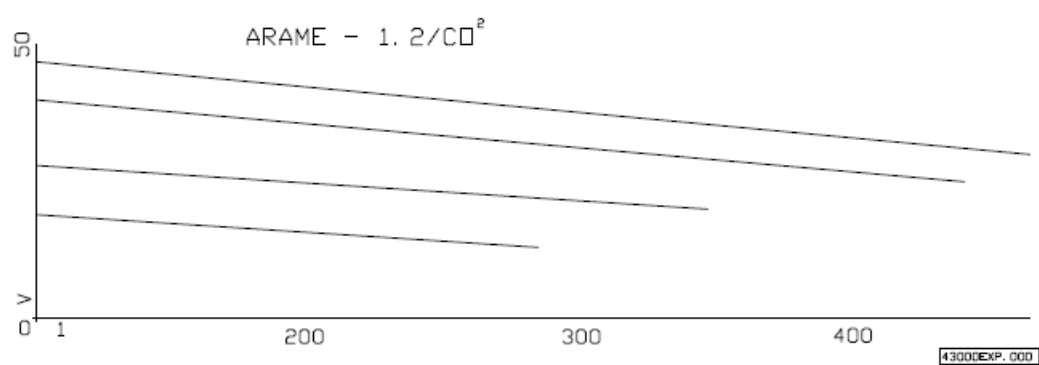
03. Instalação

3.1 Local de instalação

O equipamento deve ser instalado em local que esteja livre de pó, atmosferas corrosivas e excesso de umidade, bem como uma superfície compatível com o peso do equipamento. O pó acumulado nos retificadores, bobinas, etc., dentro da máquina podem causar aquecimento excessivo dos componentes diminuindo a eficiência e vida útil da máquina.

ANEXO 2 – CURVA CARACTERISTICA DA MÁQUINA DE SOLDA

PS43020.000.4408



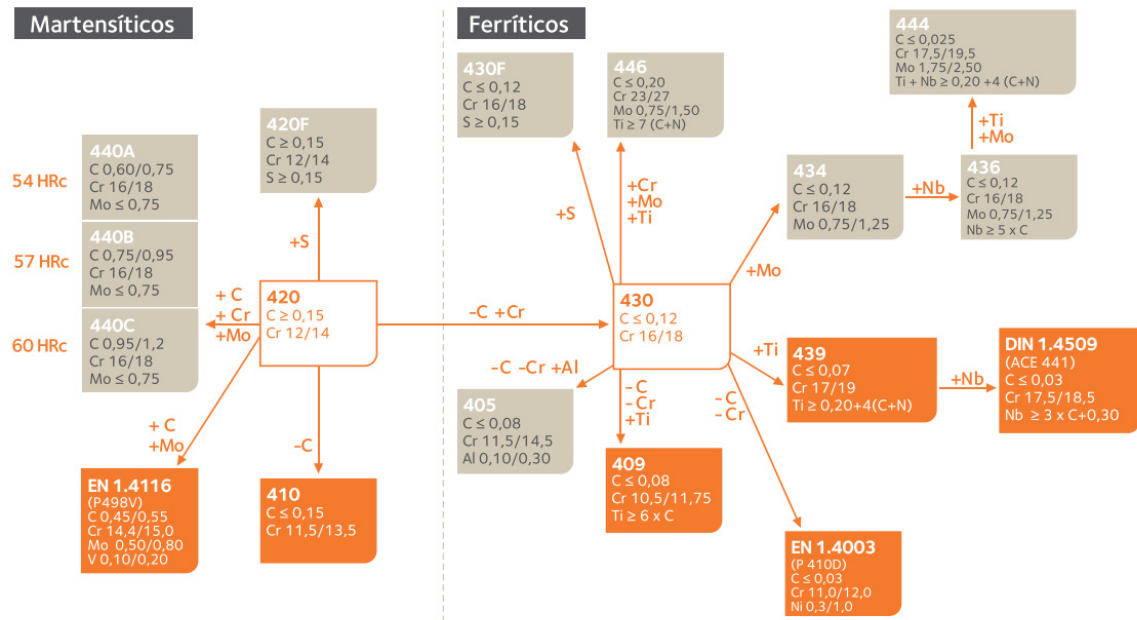
Curva Característica

TMC 400 S

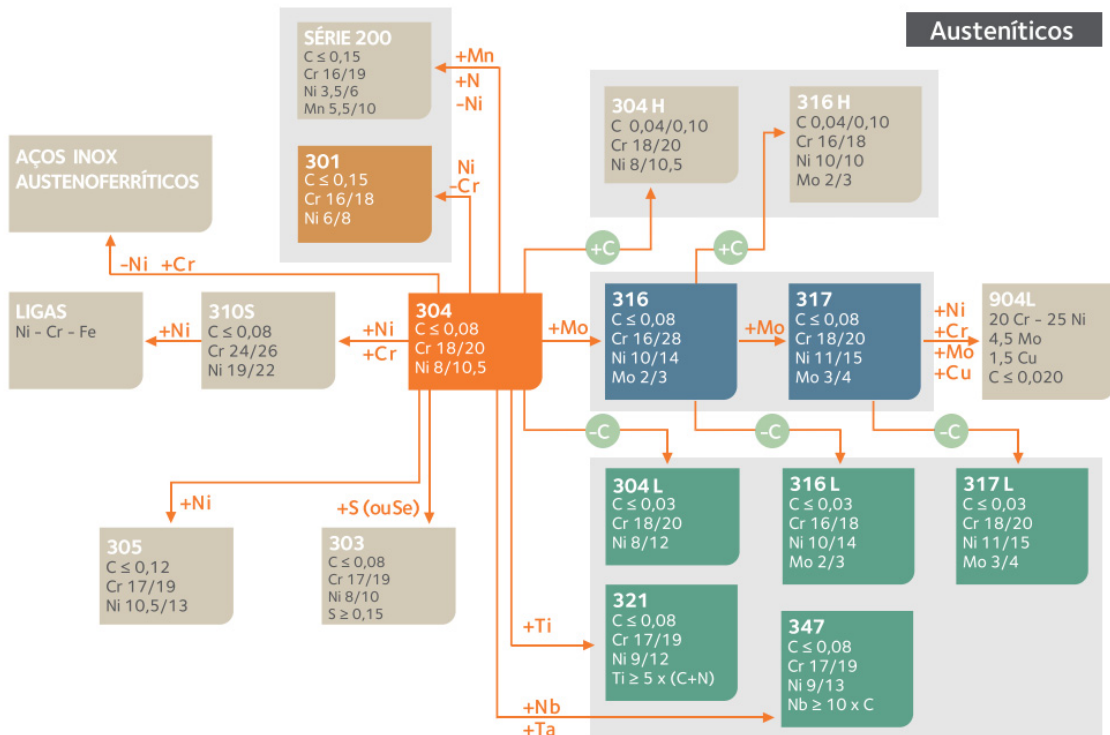
Página 09

ANEXO 3 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AÇOS INOXIDÁVEIS COMERCIALMENTE UTILIZADOS (ARCELORMITTAL)

Aços inoxidáveis da Série 400



Aços inoxidáveis da Série 300



ANEXO 4 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AÇOS CARBONO (ARCELORMITTAL)

AÇOS LIGADOS PARA CEMENTAÇÃO									
AÇO VISA	EQUIVALENTES								
1020	COPANT 1020; SAE 1020; AISI 1020; UNS 10200; DIN C22 (1.0402); AFNOR XC 25; JIS S 20 C.								
COMPOSIÇÃO QUÍMICA									
C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Outros
0,18-0,23	0,30-0,60	0,030	0,050	-	-	-	-	-	-
TRATAMENTO TÉRMICO									
Forj. ()	Recoz.	Norm.	Têmpera	Meio de têmpera	Cementação	Revenimento			
1260	870-900	900-955	790		900-925	-			
Características			Aplicações			Tratamento sugerido			
Maior resistência e menor deformabilidade que o 1016. Utilizado em condições nas quais o endurecimento superficial é necessário, mas a resistência do centro não é crítica.			Eixos de grande seção que não sofrem grandes solicitações. Molas com alta resistência ao desgaste, pinos e correntes endurecidos e aros de rodas automotivas (perfis especiais).			Cementação a 915°C por 8h, reaquecimento a 790°C e têmpera em água. Revenimento a 175°C. [RT(521Mpa), LE(302MPa), A(31,3%) e D(156H)].			