



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

JOSEMAIRON PRADO PEREIRA

**SOLDAGEM MAG COM BRAÇO ROBÓTICO DE AÇOS ASTM A36 E CSN
CIVIL EM PERFIL ESTRUTURAL DOBRADO A FRIO**

BAURU – SP

2016

JOSEMAIRON PRADO PEREIRA

**SOLDAGEM MAG COM BRAÇO ROBÓTICO DE AÇOS ASTM A36 E CSN
CIVIL EM PERFIL ESTRUTURAL DOBRADO A FRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Bauru, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves

BAURU – SP

2016

Pereira, Josemairon Prado.

Soldagem MAG com braço robótico de aços ASTM A36 e
CSN Civil-300 em perfil estrutural dobrado a frio /
Josemairon Prado Pereira, 2016

130 f.

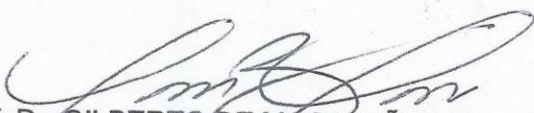
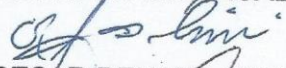
Orientador: Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2016

1. Processo de soldagem. 2. Distorção. 3.
Corrosão. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade
de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE JOSEMAIRON PRADO PEREIRA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA.

Aos 14 dias do mês de dezembro do ano de 2016, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da FEB/videoconferência, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. GILBERTO DE MAGALHÃES BENTO GONÇALVES - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. CESAR RENATO FOSCHINI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. ANGELO CAPORELLI FILHO do(a) Departamento de Materiais e Tecnologia / Faculdade de Engenharia de Guaratingueta, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de JOSEMAIRON PRADO PEREIRA, intitulada **SOLDAGEM MAG COM BRAÇO ROBÓTICO DE AÇOS ASTM A-36 E CSN CIVIL EM PERFIL ESTRUTURAL DOBRADO A FRIO**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. GILBERTO DE MAGALHÃES BENTO GONÇALVES
Prof. Dr. CESAR RENATO FOSCHINI
Prof. Dr. ANGELO CAPORELLI FILHO

Dedico este trabalho à minha esposa Lilian, aos meus filhos Jônatas, Jéssica e Letícia, à minha mãe Marize e ao meu pai Jose Vitor (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, meu Senhor, Salvador e Criador, por me conduzir em cada etapa deste trabalho.

E agradeço àqueles que estiveram comigo e me apoiaram durante essa caminhada.

- A minha amada esposa Lilian, por seu amor, cuidado, atenção e apoio.
- Aos meus queridos filhos Jônatas, Jéssica e Leticia, que com amor, carinho e muita paciência não reclamaram a falta do meu tempo.
- Ao meu orientador Prof. Dr. Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves, pela sabedoria, disponibilidade, atenção, amizade e dedicação na orientação.
- Aos meus professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, que possibilitaram o aprofundamento teórico.
- Aos funcionários da Unesp, que participaram direta ou indiretamente em algum momento da caminhada na construção desta pesquisa.
- Ao meu amigo Mateus Anacleto da Silva, pela amizade, dedicação e apoio desde o início do trabalho.
- As indústrias de estrutura metálicas da região, que disponibilizaram materiais e espaços para a execução de etapas da pesquisa.
- Ao SENAI de Lençóis Paulista, por abrir as portas para que eu pudesse fazer a adaptação do braço robótico à máquina de solda e realizasse todos os testes de soldagem.
- A Jacto Fundição, pela disponibilidade em me receber e realizar a análise química dos corpos de prova.

RESUMO

Diversos fatores podem afetar a fabricação e a montagem de estruturas metálicas, tais como os inerentes ao processo fabril, equipamentos, parâmetros de soldagem, consumíveis e o tipo de gás de proteção. Nesse ramo, as indústrias utilizam largamente a chapa dobrada, nos aços ASTM A36 e CSN Civil-300 para obter juntas soldadas de alta qualidade. Para isso, três variáveis precisam permanecer com baixa variabilidade e dentro de limites confiáveis: as propriedades mecânicas, a distorção e a corrosão na junta soldada. Este trabalho focaliza o processo de soldagem MAG, com o uso do braço robótico Motoman UP6, quanto ao comportamento do aço estrutural em relação a distorção, corrosão e as propriedades mecânicas na junta soldada. Diante disto, o perfil de aço ASTM A36 em chapa dobrada tipo U 100x50x3,0 mm e U 100x50x2,7 mm, formado no aço ARBL CSN Civil-300 foram aplicados ao processo de soldagem MIG/MAG. Neste processo, utilizou-se quatro tipos de juntas experimentais (com e sem ponteamentos), dois tipos de arames-eletrodos, AWS ER70S-3 e AWS ER70S-6, proteção gasosa de 75%Ar-25%CO₂, e parâmetros de soldagem que permitiram manter constante a densidade de corrente. Para tanto, foram utilizados o método de escaneamento tridimensional para avaliação da distorção na junta soldada, o método de aceleração da corrosão por névoa salina para avaliação da corrosão, as propriedades mecânicas foram avaliadas baseando-se na medição de microdureza, além disso, foram feitas análise química e observação das imagens macrográficas dos aços ASTM A36 e CSN Civil-300 das juntas soldadas com os arames-eletrodos AWS ER70S-3 e AWS ER70S-6. Com relação aos resultados obtidos, verificou-se que a distorção apresentou deslocamento inferior a 0,45 mm na superfície da amostra. O aço CSN Civil-300 apresentou maior resistência a corrosão, com a menor perda de massa de 0,0018 mm/ano. A medida de microdureza, nessas uniões, evidenciou redução média de 13% usando o arame-eletrodo AWS ER70S-3 com cordões de soldas de aspectos visuais e composições químicas satisfatórias.

Palavras-chave: Processo de Soldagem; Distorção; Corrosão; Propriedades Mecânicas; Estruturas Metálicas.

ABSTRACT

Several factors may affect the manufacture and building of metal structures, such as those inherent in the manufacturing process, equipment, welding parameters, consumables and the type of shielding gas. In this business, industries widely use the sheet bended in steel ASTM A36 and CSN Civil-300 for welded joints of high quality. For this, three variables need to remain with low variability and within reliable limits: the mechanical properties, distortion and corrosion the welded joint. This work focuses on the MAG welding process, using the robotic arm Motoman UP6, as the structural steel behavior in relation to distortion, corrosion and mechanical properties in the welded joint. Given this, the steel profile ASTM A36 bended plate type U 100x50x3,0 mm and U 100x50x2,7 mm, formed in HSLA steel CSN Civil-300 were applied of the MIG/MAG welding process. In this process, we used four types of experimental joints (with and without picking), two types of electrode wire AWS ER70S-3 and AWS ER70S-6, shielding gas 75%Ar-25% CO₂, and with welding parameters which allowed maintaining constant the current density. Therefore, we used three-dimensional scanning method for evaluation of distortion in the welded joint, the method of accelerated corrosion by salt spray to evaluate the corrosion and mechanical properties were evaluated based on the microhardness measurement, in addition, analysis chemical and observation of the macrographics images of ASTM A36 and CSN Civil-300 steels welded together with the AWS ER70S-3 and AWS ER70S-6 electrodes wires. Regarding the obtained results, it was verified that the distortion introduced displacement of less than 0,45 mm on the sample surface. The Civil-300 CSN steel showed higher resistance to corrosion, with the lower mass loss of 0,0018 mm / year. The microhardness measurement at these joints showed 13% average reduction using AWS ER70S-3 electrode wire with visible chemical weld beads and satisfactory chemical compositions.

Keywords: Process Welding; Distortion; Corrosion; Mechanical Properties; Metal Structures.

SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
SUMÁRIO	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABELAS	x
ÍNDICE DE EQUAÇÕES.....	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xiii
1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS.....	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1 ESTRUTURAS METÁLICAS.....	19
3.1.1 Resistência mecânica.....	22
3.1.2 Perfis estruturais de aço dobrado.....	23
3.1.3 A industrialização das estruturas metálicas frente ao processo de soldagem	24
3.2 AÇOS ESTRUTURAIS.....	25
3.2.1 Soldabilidade dos aços	26
3.3 PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG.....	28
3.3.1 Definição.....	28
3.3.2 Vantagens e limitações	29
3.3.3 Equipamentos e acessórios	30
3.3.4 Consumíveis	31
3.3.5 Variantes do processo	33
3.3.6 Soldagem robotizada.....	34
3.4 VARIÁVEIS PREDOMINANTES NA SOLDAGEM MIG/MAG.....	35
3.4.1 Junta de solda.....	38

3.4.2 Direção do arame-eletrodo	39
3.4.3 Penetração da raiz	40
3.4.4 Tipos de transferência metálica	42
3.5 DESENVOLVIMENTO DAS JUNTAS SOLDADAS.....	45
3.6 DISTORÇÃO EM JUNTAS SOLDADAS	47
3.7 CORROSÃO EM JUNTAS SOLDADAS.....	49
4 MATERIAIS E MÉTODOS	50
4.1 MATERIAIS.....	50
4.2 MÉTODOS	51
4.2.1 Procedimentos de soldagem	51
4.2.2 Análises químicas.....	56
4.2.3 Avaliação das distorções nas juntas soldadas.....	56
4.2.4 Avaliação da corrosão nas juntas soldadas	57
4.2.5 Avaliação macroestrutural das juntas soldadas.....	59
4.2.6 Medidas de microdureza	60
5 RESULTADO E DISCUSSÃO	62
5.1 PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM	62
5.2 ANÁLISES QUÍMICAS	64
5.3 DISTORÇÃO NAS JUNTAS SOLDADAS	66
5.4 CORROSÃO DAS JUNTAS SOLDADAS.....	71
5.5 DESENVOLVIMENTO MACROESTRUTURAL	77
5.6 MEDIDAS DE MICRODUREZA	82
6 CONCLUSÃO	86
7 BIBLIOGRAFIA	88
8 APÊNDICES	100
8.1 AQUISIÇÃO DE DADOS DE CORRENTE.....	100
8.2 MÉDIAS DE MICRODUREZA VICKERS DOS CORPOS DE PROVA	117

8.3 MAPEAMENTO DAS DISTORÇÕES.....	118
8.4 IMAGENS DA MACROGRAFIA.....	123
8.5 TESTE DE ACELERAÇÃO DA CORROSÃO POR NÉVOA SALINA	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 – Exemplo de uma estrutura metálica com tesoura americana.....	19
Figura 3.2 – Fluxograma da fabricação de estrutura metálica	21
Figura 3.3 – Perfis dobrados a frio tipo “Ômega, C, U e L”	24
Figura 3.4 – Processo convencional de soldagem MIG/MAG	29
Figura 3.5 – Posicionamento da junta frente a vazão do gás de proteção	31
Figura 3.6 – Comparação da geometria mensurada e calculada na seção da solda com diferentes composições de gás de proteção	32
Figura 3.7 – Sensibilidade da velocidade de soldagem pela variação da fresta	37
Figura 3.8 – Influência da extensão do eletrodo na geometria do cordão de solda ..	38
Figura 3.9 – Orientação do eletrodo e formação do cordão de solda.....	40
Figura 3.10 – Penetração e controle de soldagem.....	41
Figura 3.11 – Transferência metálica por curto-circuito	42
Figura 3.12 – Formação da gota e tempo médio envolvido na transferência globular com gás Ar	43
Figura 3.13 – Formação da gota na transferência spray com uso do gás Ar	44
Figura 3.14 – Formação da gota na transferência por arco pulsado.....	44
Figura 3.15 – Transferência por arco pulsado.....	45
Figura 3.16 – Classificação do tipo de transferência no diagrama de tensão do arco com a corrente de soldagem.....	45
Figura 3.17 – Isotermas e regiões do cordão de solda de topo por fusão, gradiente térmico tridimensional do processo de soldagem.....	46
Figura 3.18 – Regiões do cordão de solda com a curva térmica.....	46
Figura 3.19 – Curvas térmicas de tensão residual	48
Figura 4.1 – Acoplamento braço robótico e tocha de soldagem	51
Figura 4.2 – Procedimento de soldagem.....	51
Figura 4.3 – Algoritmo da programação do robô para executar o procedimento de soldagem.....	52
Figura 4.4 – Preparação e posicionamento padrão das juntas	53
Figura 4.5 – Preparação das juntas para o procedimento de soldagem	54
Figura 4.6 – Captura tridimensional da nuvem de pontos para realizar o corpo de prova por escaneamento.....	57

Figura 4.7 – Seccionamento dos corpos de prova para teste de corrosão	58
Figura 4.8 – Imagem do teste de corrosão do corpo de prova B146ECS	58
Figura 4.9 – Seccionamento dos corpos de prova para os respectivos ensaios de macrografia, análise química e microdureza	60
Figura 4.10 – Disposição dos pontos das medidas de microdureza na amostra.....	61
Figura 5.1 – Procedimento de soldagem elaborado no conjunto de amostras A1	62
Figura 5.2 – Forma de onda típica do processo de soldagem	63
Figura 5.3 – Distorção do corpo de prova A133.....	67
Figura 5.4 – Distorção do corpo de prova A233.....	67
Figura 5.5 – Distorção do corpo de prova B133.....	68
Figura 5.6 – Distorção do corpo de prova B233.....	68
Figura 5.7 – Distorção longitudinal no centro do perfil	69
Figura 5.8 – Flexão no corpo de prova	69
Figura 5.9 – Desenvolvimento da perda de massa nos perfis, ocasionada pela corrosão	72
Figura 5.10 – Diagrama da taxa de corrosão no MB, para os aços ASTM A36 e CSN Civil-300	73
Figura 5.11 – Diagrama da taxa de corrosão no cordão de solda.....	75
Figura 5.12 – Análise macrográfica do corpo de prova A123.....	77
Figura 5.13 – Análise macrográfica do corpo de prova A221.....	78
Figura 5.14 – Análise macrográfica do corpo de prova B121.....	78
Figura 5.15 – Análise macrográfica do corpo de prova B224.....	78
Figura 5.16 – Esquema das regiões para cálculo da diluição da solda.....	80
Figura 5.17 – Fotomicrografias das juntas soldadas nos diferentes conjuntos de amostras de metal de base com metal de solda	81
Figura 5.18 – Curvas de dureza para os conjuntos A1, A2, B1 e B2	83
Figura 8.1 – Formas de onda da tensão do conjunto A11.....	100
Figura 8.2 – Formas de onda da corrente do conjunto A11	101
Figura 8.3 – Formas de onda da tensão do conjunto A12.....	101
Figura 8.4 – Formas de onda da corrente do conjunto A12	102
Figura 8.5 – Formas de onda da tensão do conjunto A13.....	102
Figura 8.6 – Formas de onda da corrente do conjunto A13	103
Figura 8.7 – Formas de onda da tensão do conjunto A14.....	103

Figura 8.8 – Formas de onda da corrente do conjunto A14	104
Figura 8.9 – Formas de onda da tensão do conjunto A21	104
Figura 8.10 – Formas de onda da corrente do conjunto A21	105
Figura 8.11 – Formas de onda da corrente do conjunto A22	105
Figura 8.12 – Formas de onda da corrente do conjunto A22	106
Figura 8.13 – Formas de onda da corrente do conjunto A23	106
Figura 8.14 – Formas de onda da corrente do conjunto A23	107
Figura 8.15 – Formas de onda da corrente do conjunto A24	107
Figura 8.16 – Formas de onda da corrente do conjunto A24	108
Figura 8.17 – Formas de onda da tensão do conjunto B11.....	108
Figura 8.18 – Formas de onda da corrente do conjunto B11	109
Figura 8.19 – Formas de onda da tensão do conjunto B12.....	109
Figura 8.20 – Formas de onda da corrente do conjunto B12	110
Figura 8.21 – Formas de onda da tensão do conjunto B13.....	110
Figura 8.22 – Formas de onda da corrente do conjunto B13	111
Figura 8.23 – Formas de onda da tensão do conjunto B14.....	111
Figura 8.24 – Formas de onda da corrente do conjunto B14	112
Figura 8.25 – Formas de onda da corrente do conjunto B21	112
Figura 8.26 – Formas de onda da tensão do conjunto B21.....	113
Figura 8.27 – Formas de onda da corrente do conjunto B22	113
Figura 8.28 – Formas de onda da tensão do conjunto B22.....	114
Figura 8.29 – Formas de onda da corrente do conjunto B23	114
Figura 8.30 – Formas de onda da tensão do conjunto B23.....	115
Figura 8.31 – Formas de onda da corrente do conjunto B24	115
Figura 8.32 – Formas de onda da tensão do conjunto B24.....	116
Figura 8.33 – Mapa da distorção nos pontos extremos	118
Figura 8.34 – Distorção do corpo de prova A133.....	121
Figura 8.35 – Distorção do corpo de prova A233.....	121
Figura 8.36 – Distorção do corpo de prova B133.....	122
Figura 8.37 – Distorção do corpo de prova B233.....	122
Figura 8.38 – Análise macrográfica do corpo de prova A114.....	123
Figura 8.39 – Análise macrográfica do corpo de prova A123.....	123
Figura 8.40 – Análise macrográfica do corpo de prova A134.....	123

Figura 8.41 – Análise macrográfica do corpo de prova A143.....	124
Figura 8.42 – Análise macrográfica do corpo de prova A211.....	124
Figura 8.43 – Análise macrográfica do corpo de prova A221.....	124
Figura 8.44 – Análise macrográfica do corpo de prova A235.....	125
Figura 8.45 – Análise macrográfica do corpo de prova A245.....	125
Figura 8.46 – Análise macrográfica do corpo de prova B111.....	125
Figura 8.47 – Análise macrográfica do corpo de prova B121.....	126
Figura 8.48 – Análise macrográfica do corpo de prova B133.....	126
Figura 8.49 – Análise macrográfica do corpo de prova B145.....	126
Figura 8.50 – Análise macrográfica do corpo de prova B214.....	127
Figura 8.51 – Análise macrográfica do corpo de prova B224.....	127
Figura 8.52 – Análise macrográfica do corpo de prova B232.....	127
Figura 8.53 – Análise macrográfica do corpo de prova B243.....	128
Figura 8.54 – Corpos de prova retirados da câmara de aceleração da corrosão ...	128
Figura 8.55 – Imagem do corpo de prova B146DSS	128
Figura 8.56 – Imagem do corpo de prova B246ECS	129
Figura 8.57 – Corpos de prova limpos depois da estufa	129
Figura 8.58 – Conjuntos de corpos de prova A1 e A2.....	129
Figura 8.59 – Conjuntos de corpos de prova B1 e B2.....	130

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 – Teores dos elementos químicos fornecidos pelo C.A. da siderúrgica (% em peso)	50
Tabela 4.2 – Codificação e quantificação dos corpos de prova para soldagem	55
Tabela 4.3 – Valores médios dos parâmetros de soldagem	55
Tabela 5.1 – Teores dos principais elementos químicos existentes nos materiais (% em peso)	64
Tabela 5.2 – Tabela do carbono equivalente médio (CE) no metal de base	66
Tabela 5.3 – Valores médios da flexão no perfil devido à distorção	70
Tabela 5.4 – Resultados da aceleração corrosiva por névoa salina	71
Tabela 5.5 – Larguras médias da ZAC dos cordões de solda (mm)	79
Tabela 5.6 – Percentual de diluição da solda nos metais de base	80
Tabela 5.7 – Percentual médio de diluição da solda nos metais de base	82
Tabela 5.8 – Valores médios das medidas de microdureza Vickers (HV)	84
Tabela 8.1 – Resultados da soldagem do conjunto A11	100
Tabela 8.2 – Resultados da soldagem do conjunto A12	101
Tabela 8.3 – Resultados da soldagem do conjunto A13	102
Tabela 8.4 – Resultados da soldagem do conjunto A14	103
Tabela 8.5 – Resultados da soldagem do conjunto A21	104
Tabela 8.6 – Resultados da soldagem do conjunto A22	105
Tabela 8.7 – Resultados da soldagem do conjunto A23	106
Tabela 8.8 – Resultados da soldagem do conjunto A24	107
Tabela 8.9 – Resultados da soldagem do conjunto B11	108
Tabela 8.10 – Resultados da soldagem do conjunto B12	109
Tabela 8.11 – Resultados da soldagem do conjunto B13	110
Tabela 8.12 – Resultados da soldagem do conjunto B14	111
Tabela 8.13 – Resultados da soldagem do conjunto B21	112
Tabela 8.14 – Resultados da soldagem do conjunto B22	113
Tabela 8.15 – Resultados da soldagem do conjunto B23	114
Tabela 8.16 – Resultados da soldagem do conjunto B24	115
Tabela 8.17 – Média de microdureza (HV) das amostras	117

Tabela 8.18 – Resultados dos deslocamentos pontuais devido à distorção nas coordenadas tridimensionais.....	118
---	-----

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação (3.a) – Peso do carbono equivalente (método inglês e americano)	27
Equação (3.b) – Peso do carbono equivalente (método aços 0,15%C a 0,30%C) ...	27
Equação (3.c) – Peso do carbono equivalente (método intermediário).....	27
Equação (3.d) – Peso do carbono equivalente (método alemão).....	27
Equação (3.e) – Peso do carbono equivalente (método aços de oleodutos)	27
Equação (3.f) – Peso do carbono equivalente (método aços ARBL ou HSLA)	27
Equação (3.g) – Peso do carbono equivalente (método japonês).....	28
Equação (3.h) – Termo ou índice indexador do carbono do aço.....	28
Equação (5.a) – Limite da função da resistência à tração.....	72
Equação (5.b) – Taxa de corrosão	73
Equação (5.c) – Taxa de corrosão linear no aço A36	74
Equação (5.d) – Taxa de corrosão da curva senoidal do aço A36	74
Equação (5.e) – Taxa de corrosão do aço CSN Civil-300.....	74
Equação (5.f) – Taxa de corrosão senoidal do aço CSN Civil-300.....	74
Equação (5.g) – Somatório de área perdida gradualmente	77
Equação (5.h) – Área final última	77
Equação (5.i) – Tensão nominal.....	77
Equação (5.j) – Calculo da diluição da solda.....	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampère
a	Área nominal
A ₀	Área inicial ou de engenharia
ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
AC	Corrente alternada - “alternate current”
A _f	Área efetiva final
Al	Alumínio
A _n	Área perdida pela corrosão
Ar	Argônio
ARBL	Alta resistência e baixa liga
ASTM	American society for testing and materials
AWS	American welding society
B	Boro
C	Carbono
C. A.	Certificado de atestado da qualidade e conformidade do aço
CC	Corrente contínua eletrodo positivo, polaridade reversa (inversa)
CC-	Corrente contínua eletrodo negativo, polaridade direta
C _c	Comprimento do cordão
CE	Carbono equivalente
CNC	Controle numérico computadorizado
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CP	Corpo de prova
CPD	Centro de processamento de dados
Cr	Cromo
CS	Com solda
Cu	Cobre
d	Diâmetro do arame-eletrodo
D	Teste de dureza ou microdureza
D`	Referência à posição direita
DB	Decibel

DBCP	Distância bico de contato peça
δ_e	Densidade da amostra
Δ_{acorr}	Taxa de corrosão
Δ_e	Camada de espessura atingida pela corrosão
E	Energia de soldagem [J/cm]
E`	Referência à posição esquerda
En	Energia aplicada na soldagem
ER70S-3	Arame-eletrodo compacto (sólido)
ER70S-6	Arame-eletrodo compacto (sólido)
ESAB	Elektriska svetsnings aktie bolaget
F	Ferrita
FC	Ferrita carboneto
FCAW	Flux-cored arc welding
Fe	Ferro
GF	Grãos refinados
GG	Grãos grosseiros
HSLA	Alta Resistencia e baixa liga (High strength low alloy)
I	Corrente de soldagem
IIW	International institute of welding
le	Corrente eficaz aplicado no cordão
Im	Corrente média aplicado no cordão
M	Macrografia
MAG	Metal gás ativo
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MB	Metal de base
MIG	Metal gás inerte
MIG/MAG	Processo de soldagem a arco elétrico com proteção gasosa
MIG/MAG-P	Processo MIG/MAG com corrente pulsada
MIG/MAG-TC	Processo MIG/MAG com transferência controlada
MIG/MAG-AR	Processo MIG/MAG de alto rendimento
MIG/MAG-AC	Processo MIG/MAG de polaridades alternadas
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio

MO	Microscopia ótica
MS	Metal de solda
NBR	Norma brasileira
Ni	Níquel
P	Fósforo
P _{CM}	Parâmetro de composição (crítico) do metal
Q	Carregamento permanente somado a acidental
S	Enxofre
S _e	Exposição superficial da amostra
SENAI	Serviço nacional de aprendizagem industrial
Si	Silício
SS	Sem solda
σ	Tensão nominal
t	Tempo decorrido
t _a	Tempo de arco do cordão
t _e	Tempo de exposição
t ₀	Tempo inicial
T _c	Temperatura crítica
T _{corr}	Taxa de corrosão
T _f	Temperatura de fusão
σ_f	Tensão final
T _p	Temperatura de pico
t _n	Tempo na sequência enésima
σ_u	Tensão última de ruptura
U	Tensão de soldagem
U _e	Tensão eficaz aplicado no cordão
U _m	Tensão média aplicado no cordão
V _s	Velocidade de soldagem
ZAC	Zona afetada pelo calor
ZF	Zona fundida
ZTA	Zona termicamente afetada

1 INTRODUÇÃO

As indústrias de fabricação e montagem de estruturas metálicas aplicam largamente a soldagem em perfis de aços estruturais. O processo fabril inicia-se com o projeto, depois a fabricação, finalizando com a montagem no local da obra com diversos trabalhos de soldagens (ZHOU, *et al.*, 2016).

As estruturas metálicas de grande porte, por exemplo, com balanços maiores que 20 m e vigas treliçadas altas com vãos que excedam 60 m, cujo peso próprio se tornam expressivos, são estruturas que necessitam de controle rigoroso na soldagem das ligações para garantir a segurança.

Na fabricação e montagem deste ramo industrial, três fatores precisam permanecer com baixa variabilidade e dentro de limites confiáveis: a propriedade mecânica, a corrosão e a distorção na junta soldada (KAH, *et al.*, 2015) e (MENDEZ, *et al.*, 2014).

A distorção é inerente ao processo de soldagem, complexa nos seus efeitos e estudo, é resultado das deformações e tensões internas que atuam no metal de solda e vizinhança, impostas pelo ciclo térmico de soldagem (LUSTOSA, 2002) e (SANTOS, 2010).

Distorções excessivas em locais não determinados e imprevisíveis durante a montagem da estrutura metálica geram problemas de empenamento, desalinhamento e ondulações, que dificultam os encaixes e posicionamentos previstos no projeto original, comprometendo o prosseguimento da obra (CAIMACAN, MISHCHENKO e SCOTTI, 2015).

Ademais, essas dificuldades podem ser amplificadas devido às tensões internas introduzidas pelo encruamento microestrutural, se perfis estruturais utilizados em tesouras, vigas paralelas, colunas caixa, entre outros elementos construtivos, são fabricados através do dobramento a frio de chapas de aço, principalmente no local conformado (VERGÍLIO, 2011).

A definição correta dos procedimentos de soldagem, incluindo a sequência na execução das soldas, é requisito precípuo no controle das distorções induzidas pela soldagem, e constitui-se em importante objeto de investigação experimental (SOARES, 2006).

A corrosão em estruturas metálicas é outro fator relevante, porque, de modo geral, exige ações de manutenção contínua, no caso de não haver prescrição preventiva adequada (RIBEIRO, 2010). De certo, situações críticas em que a estrutura metálica é exposta a ambientes salinos ou ácidos, portanto, constantemente atacada, por exemplo, pela maresia ou vapores de cloro, os esforços para cessar a degradação do material são imperativos e constantes (ANTUNES, 2010).

Contudo, nessas circunstâncias, a junta soldada pode ter papel deletério, uma vez que impulsiona a corrosão de maneira localizada. O estabelecimento de par galvânico entre a zona termicamente afetada (ZAC) e a zona de fusão, ou metal de solda, atributo da variação na composição química entre estas regiões, torna-se a força motriz para desenvolver o fenômeno corrosivo (SILVA, *et al.*, 2012). A taxa da corrosão dependerá fundamentalmente de uma complexa interação entre processo e consumíveis de soldagem escolhidos, preparação da junta e classe do aço estrutural designado (BULAN ABDULLAH, 2015) e (SEIDU e KUTELU, 2013).

Agregar conhecimento prévio no que concerne à resposta do material em questões mecânico-metalúrgicas, específicas do conjunto estrutural a ser soldado, potencializa, sem dúvidas, a evolução no projeto e na qualidade de todo o produto fabricado, evitando também às práticas custosas de remanufatura do mesmo.

A partir de tais premissas, este trabalho apresenta os resultados da simulação do procedimento de soldagem executado na indústria de estruturas metálicas em juntas de topo soldadas de aços estruturais de corrente uso no mercado nacional utilizando diferentes tipos de arame-eletrodo, quando submetidos à soldagem a arco elétrico com proteção gasosa (processo MAG). Como o comportamento de distorção, a corrosão acelerada e os efeitos do processo de soldagem nas propriedades mecânicas no cordão de solda, na zona termicamente afetada e metal de base.

2 OBJETIVOS

Verificar a aplicação do uso do braço robótico no processo de soldagem da chapa de aço estrutural, programada na posição horizontal.

Verificar a soldabilidade dos aços CSN Civil-300 e ASTM A36, utilizando o processo de soldagem MIG/MAG em chapas dobradas, a frio, tipo U;

Analisar o perfil de dureza na zona termicamente afetada (ZAC) e eletrodo metal de adição em diferentes procedimentos de soldagens;

Analisar a corrosão e a distorção das juntas soldadas;

Investigar a penetração, a largura dos cordões e diluição da solda.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ESTRUTURAS METÁLICAS

A estrutura metálica é um produto do processamento de barras e chapas de aço, transformados em componentes estruturais que constituem construções para os mais diversos fins (PFEIL e PFEIL, 2010).

Além disso, a classificação das estruturas metálicas abrange uma gama extensa de tipos, podendo ser utilizadas em galpões, mezaninos, edifícios de múltiplos andares, ponte rolante, pontes e viadutos, entre outras aplicações. Os tipos mais comuns são os galpões, compostos de pilares, vigas, tesouras, terças de cobertura, fechamento lateral, contraventamentos, travamentos, mão francesa, ligações, telhas de vedação e calhas (PFEIL e PFEIL, 2010).

Para todos estes itens, surgem ramificações tipológicas como se verifica para as tesouras, que podem ser de alma cheia, caixa ou treliçadas. Para as tesouras treliçadas há ainda variações nos modelos como, por exemplo, tesoura americana, paralela, inglesa e invertidas (MINISTÉRIO DA INDUSTRIA E COMERCIO SECRETARIA DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL, 1986). A Figura 3.1 exemplifica uma estrutura metálica típica de galpões industriais.

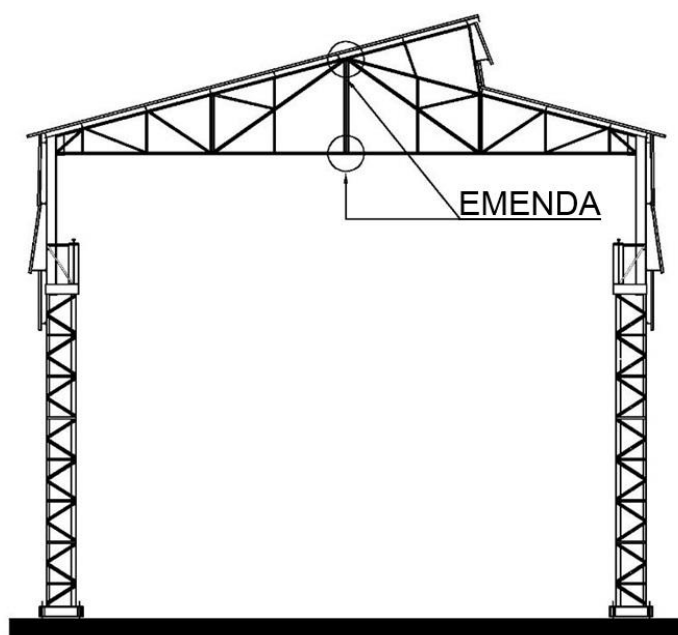


Figura 3.1 – Exemplo de uma estrutura metálica com tesoura americana
Fonte: Elaborado pelo autor

Atualmente a norma que rege o projeto de estruturas metálicas é a ABNT NBR 8800:2008, que determina os procedimentos de projeto, contemplando o cálculo, o detalhamento, a fabricação e a montagem.

O processo de fabricação da indústria de estruturas metálicas é multissetorial, voltado a padronização industrial para que resulte em alta produção. O alvo gestor sempre é o máximo de produção, com os melhores custos e tecnologia adequada para obter estruturas metálicas de elevada qualidade. Assim, todos os setores devem funcionar de forma holística, na mão de obra, ferramental e material. Não há legislação quanto ao tipo de padronização industrial, por isso cada indústria tem sua própria identidade, elaborando suas regras internas, onde a estrutura e procedimento de soldagem são estudados por caso (PERRET, *et al.*, 2011).

As estruturas montadas em ambientes que aceleram a degradação do aço, exigem tratamentos superficiais especiais. Geralmente é utilizada a pintura epóxi ou o tratamento superficial proposto por Strebkov (2005), que garante tempo útil de vida de seis a sete anos do aço. Para as construções em ambientes naturais, a pintura é a base de esmalte sintético.

Não existe até então a perspectiva de robotização dos setores de soldagem das indústrias de estruturas metálicas, devido ao alto custo para a implementação.

Muitos fatores estão envolvidos na elaboração do orçamento das estruturas metálicas. Além do material e da mão de obra, deve-se considerar, os gastos de insumos, manutenção, os processos de fabricação, logística e mobilização. Com tudo isso bem estabelecido, a meta da indústria de estrutura metálica pode otimizar gastos e aumentar a produtividade (STREBKOV, 2005).

O desenvolvimento de uma estrutura metálica se inicia com o projeto estrutural que é dimensionado e analisado pelo engenheiro calculista, utilizando aplicativos específicos. Depois, o projeto é encaminhado ao engenheiro coordenador de projetos que distribui os serviços de detalhamento aos desenhistas e projetistas, sempre monitorando o peso da obra para que nunca ultrapasse o valor em que foi orçada e objetivando obter uma estrutura econômica e segura. A seguir são elaborados os croquis das chapas em escala natural, que são direcionados ao CNC. As listas de materiais são encaminhadas para o departamento de compras, enquanto que as listagens dos conjuntos soldados são encaminhadas para o almoxarifado e para o departamento de expedição, que direciona a entrega da obra (PESSOA, *et al.*, 2011).

Na Figura 3.2 verifica-se, esquematicamente, a sequência de fabricação de uma estrutura metálica.

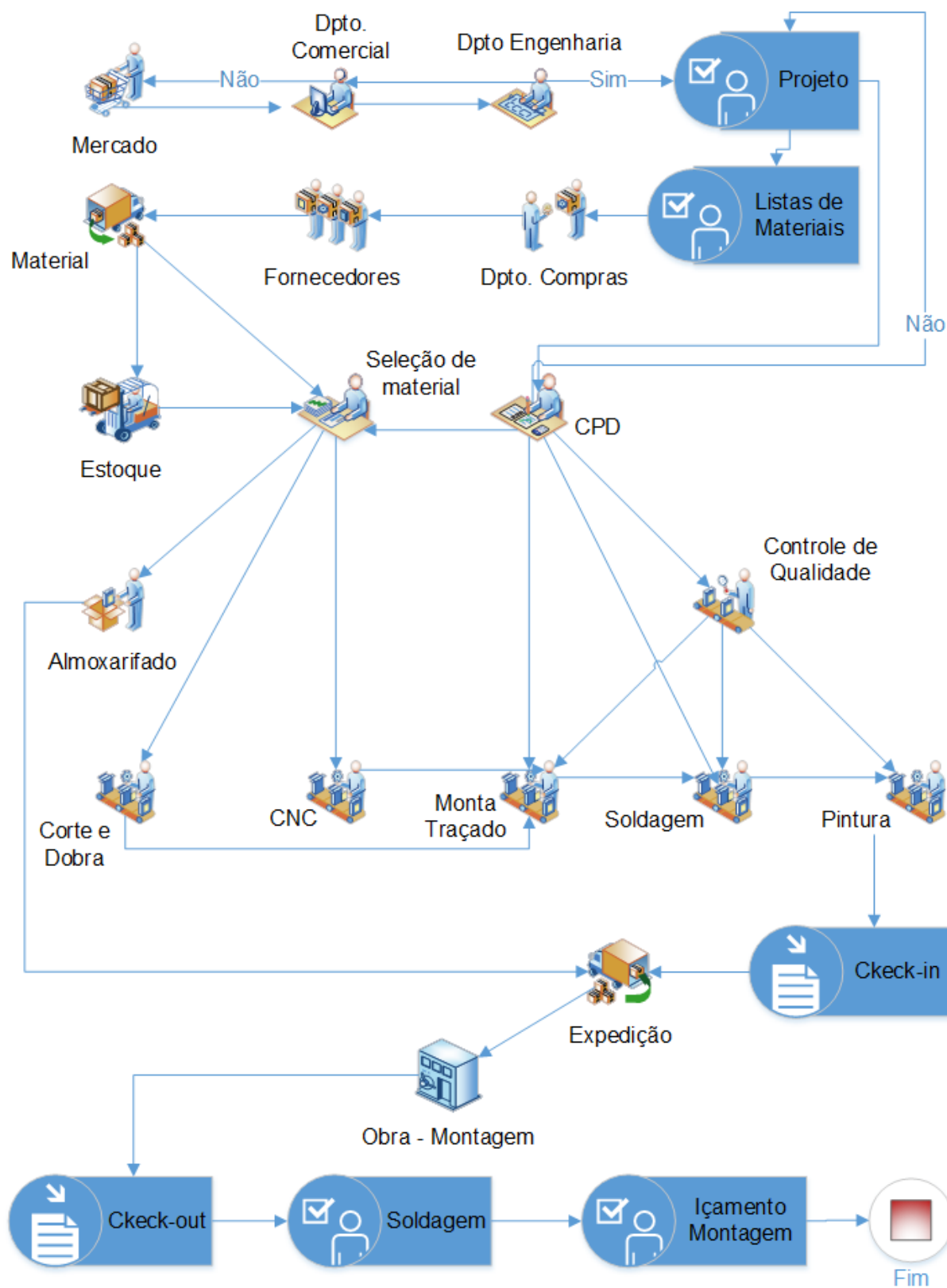


Figura 3.2 – Fluxograma da fabricação de estrutura metálica
Fonte: Elaborado pelo autor

Após o detalhamento realizado com as indicações de soldagens, corte, dobra e especificações de fabricação, o projeto é encaminhado ao departamento gestor fabril, que cataloga cada componente e faz o despacho dos conjuntos a serem soldados ao responsável pela fabricação.

A fabricação começa com a seleção dos perfis em estoque, que serão parte integrante dos conjuntos soldados. As chapas são separadas e agrupadas, transportadas ao setor de corte e dobra, que encaminha os perfis dobrados para a seção de traçado para execução dos gabaritos na fábrica. Os soldadores então iniciam o processo de soldagem, com o gabarito que servirá para produção dos conjuntos soldados em série. Em sequência, as peças vão para o departamento de pintura para ser realizado o processo de tratamento superficial. Os conjuntos soldados finalizados são devidamente marcados, conduzidos ao local da obra para a montagem da estrutura metálica (KAH, *et al.*, 2014).

Todas as soldas são especificadas no projeto da estrutura metálica com simbologias apropriadas, conforme prescreve a norma AWS D1.1, no que diz respeito às alturas de garganta, comprimentos, acabamentos e demais procedimentos de soldagem.

3.1.1 Resistência mecânica

A resistência mecânica é uma propriedade importante para que a estrutura metálica seja segura e o desempenho eficiente perante as normas brasileiras, principalmente no que se refere aos valores característicos da resistência no regime elástico e resistência à tração. A resistência mecânica também se relaciona com a condução térmica, como em situação de incêndio, que devido à fluência do aço, causa deformações excessivas e modificações estruturais (HAIVORONS'KYI, *et al.*, 2016).

Por outro lado, a resistência mecânica também tem relação com a resistência à corrosão, vários estudos têm sido feitos nesta área, porque a corrosão afeta diretamente a degradação do aço. A corrosão tem aceleração em função da exposição ao ambiente e temperatura, pois diminuem gradativamente a superfície do aço com a perda de material, promovendo a diminuição da seção e, por conseguinte, diminuindo o tempo de uso do material (DU, *et al.*, 2016).

A vida útil das estruturas metálicas atinge a média de 40 anos, embora as expectativas normatizadas (NBR 8681, NBR 15.575 e BS 7453) indiquem um tempo de aproximadamente 100 anos (STREBKOV, 2005).

A tensão de escoamento é o limite usado no dimensionamento dos perfis de aço, assim como o limite de ruptura no dimensionamento das ligações parafusadas e soldadas. Estas propriedades são elementares para a seleção do aço a ser aplicado (PARK, *et al.*, 2010), observando sempre sua composição química (HABIBI, *et al.*, 2016).

3.1.2 Perfis estruturais de aço dobrado

O dobramento das chapas de aço é um processo mecânico de transformação da chapa lisa em perfil estrutural dobrado, aplicado em diversos ramos industriais e muito utilizado na fabricação de estruturas metálicas. O formato geométrico do perfil dobrado segue a necessidade do projeto, porém para que seja incluído na classificação estrutural é necessária a observância da norma brasileira ABNT NBR 14672:2010, que rege o dimensionamento da chapa dobrada.

As dobras realizadas nas chapas formam regiões encruadas constituindo-se uma seção de menor homogeneidade, mas que melhora a característica de inercia necessária para atender as condições de projeto. Estas vantagens, propiciadas pelo dobramento das chapas, como aumento da resistência à flexão, torção e a flambagem do perfil, proporciona redução de peso e estruturas mais rígidas (NGUYEN, *et al.*, 2013).

Certamente as dobras a serem executadas devem seguir padrões de perfis estruturais para que o índice de esbeltez longitudinal seja melhorado pelo dobramento, e deve estar dentro de limites estabelecidos pela norma, relacionado principalmente à espessura das chapas. A região da dobra retém tensões residuais, de modo que a parte externa, acima da linha neutra, há concentração de tensões de tração e na interna, abaixo da linha neutra, tensões de compressão, impondo ao perfil estrutural com isso um afinamento, da espessura que não é benéfico (AMOUZEGARA, SCHAFFERB e TOOTKABONIA, 2016).

A respeito das máquinas dobradeiras, as mesmas podem ser constituídas de cutelo ou roletes e a capacidade do equipamento estabelece o tipo de dobramento,

sendo que cada tipo de máquina possui alguma limitação fabril. O processo de dobra realizado pelas dobradeiras com cutelo apresenta aspecto de vinco melhor que os confeccionados pelos roletes. A dobra dependerá do comprimento e dos ângulos internos da chapa a ser dobrada, e tem relação direta com a espessura (LI, *et al.*, 2016).

Dessa maneira, as formas geométricas do aço estrutural dobrados mais utilizados são: ômega, C, U e cantoneira, como mostrado na Figura 3.3.



Figura 3.3 – Perfis dobrados a frio tipo “Ômega, C, U e L”

O dobramento das chapas de aço é realizado normalmente com comprimentos de 6,0 m. Apesar da quantidade do número de dobras favorecer a rigidez da seção geométrica e melhorar o desempenho do perfil, deve ser observado as distâncias entre elas para não dificultar o processo de dobramento do perfil (YOUNG e LUI, 2006).

Outro fator importante que limita também o dobramento é a ductilidade do aço, pois no momento que é realizado o processo, quando atingido um ângulo tal que origine tensões maiores do que a tensão de plastificação localizada, aumentará a probabilidade de trincas longitudinais nas dobras. Geralmente aços carbono e de baixa liga satisfatoriamente atendem ao ângulo reto de dobra (YE, *et al.*, 2016).

3.1.3 A industrialização das estruturas metálicas frente ao processo de soldagem

As indústrias de estruturas metálicas têm uma participação razoável no mercado em comparação com as construtoras de concreto armado, e gradativamente tem ocupado mais espaço, de tal forma que há necessidade de contratar mais soldadores e adquirir equipamentos de soldagem mais modernos (MARIANE, 2014) e (KAH, *et al.*, 2014). O processo MIG/MAG é o mais comum em seu uso semiautomático, porque necessita do soldador para operar a máquina e a parcela

automatizada constitui-se na alimentação contínua do arame-eletrodo e na liberação do gás com o acionamento do gatilho da tocha. A indústria tem também preferência pela soldagem MIG/MAG devido à excelente taxa de deposição, alta taxa de ocupação do operador, elevada produtividade e facilidade de operação da máquina de soldagem, o que favorece a qualidade da solda e economia de consumíveis (PESSOA, *et al.*, 2011).

Igualmente chama a atenção o fato de que as indústrias em questão têm a visão do processo de soldagem na ótica unicamente produtiva, onde só é possível a realização da solda com o menor custo e tempo e, neste panorama, os fatores chave são o soldador com experiência, uma máquina de soldagem flexível, além dos consumíveis especificados de baixo custo e facilidade de aquisição no mercado. Evidentemente, por isso, a robotização para esse ramo no Brasil ainda não é uma realidade, pelo menos até que a viabilidade econômica se equipare ao processo MIG/MAG no modo semi-automático, como ocorreu nas indústrias automotivas (RANKY, 2002).

3.2 AÇOS ESTRUTURAIS

Com base nos aços C-Mn, os aços estruturais são produzidos por laminação a quente e aqueles que se classificam assim não adquirem boas características de resistência mecânica unicamente pelos tratamentos térmicos convencionais como no caso dos aços temperados e revenidos. A soldabilidade, a conformabilidade, a resistência mecânica e a corrosão atmosférica, apresentam condições aceitáveis obtidas através de uma ação coesa de apropriadas adições de elementos de liga e tratamentos térmicos convencionais, seja a normalização ou tratamentos termomecânicos como, por exemplo, a laminação controlada (PFEIL e PFEIL, 2010).

A principal propriedade dos aços estruturais temperados e revenidos é a resistência ao desgaste por abrasão. A ausência de pré-aquecimento, tornam os procedimentos utilizados de soldagem moderadamente simples (YAR-MUKHAMEDOVA, *et al.*, 2016).

Geralmente, o teor de carbono nos aços estruturais fixa-se no intervalo entre 0,03 a 0,25%. Como exemplo dos aços ao carbono, são compostos dos elementos de liga usuais como Mn, Si, Cr, Ni e Cu, adicionados para refinar a microestrutura, atribuir

efeitos de endurecimento por solução sólida da ferrita e melhorar a resistência à corrosão atmosférica. O refinamento microestrutural é resultado do tempo de têmpera que o aço é tratado (CHO, *et al.*, 2015).

Outrossim, a adição de elementos microligantes como Nb, V, Ti, Al, entre outros, com teores não mais que 0,15%, em conjunto com o processo de laminação controlada, tem permitido a obtenção de novas versões de aços ARBL com estrutura ferrítica, tendo dimensões de grãos muito fino na ordem de 5 e 10 μm . Como é notório, o refinamento de grãos é o caminho mais eficaz para melhorar a resistência mecânica e a tenacidade destes aços (ZHONG, *et al.*, 2016).

Também para condicionar especificamente, o tipo de aço para aplicação estrutural é adicionado ao aço carbono e ARBL, elementos de liga selecionados como Cu e Cr, e o resultado de teores determinados beneficiam a obtenção de um aço patinável que atenda as condições de exposição ambiental (SILVA e MEI, 1988).

Os elementos de liga, além das impurezas, previamente selecionadas são fundamentais para a especificação do aço estrutural para o fim de aplicação, para o caso das estruturas metálicas.

Para exemplificar, os aços estruturais ARBL pertencem à classe ASTM A514/A517, porém devido à redução custo/benefício para a indústria de estruturas metálicas é adotada a classe do aço ao carbono comum ASTM A36 ou os aços ARBL, como CSN Civil-300.

Salienta-se que na atualidade os aços ARBL têm encontrado grande aceitação no ramo das edificações metálicas.

3.2.1 Soldabilidade dos aços

A soldabilidade é a capacidade de união entre metais e ligas metálicas, devido à fusão ocasionada pela ação do arco elétrico, permitindo a perfeita interação das partes pela solda. A importância desta característica consiste em determinar quando um aço é mais ou menos susceptível à união por soldagem, o resultado do cordão de solda obtido em função do metal de adição e metal de base, mesmo que eles sejam diferentes na composição química. Outra questão relevante neste sentido está na compatibilidade de fusão no que concerne na diluição do metal de base com o metal de adição (HEBDA e SADY, 2013).

A norma americana ASTM A6, no seu anexo X3, fornece as diretrizes quanto a soldabilidade, e a realização ou não de tratamento térmico (ASTM-AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2009).

A composição química do aço, considerada em termos do CE, permite prever a capacidade de soldagem que o aço possui. Assim, o desempenho da soldagem fica sujeito a esta variável, pois dependendo dos limites, será necessário aplicar mais tratamento térmico pré ou pós soldagem em aços mais duros, do que em aço de baixo carbono (HEBDA e SADY, 2013).

O pesquisador Yurioka (2001) agrupou, nominalmente, as equações que se tornaram mais conhecidas para o cálculo do Carbono Equivalente (CE) em % de pesos por elemento químico:

Grupo A, o CE é representado por 1/6 de % em peso de Mn:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu + Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5} \quad (3.a)$$

$$CE = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} \quad (3.b)$$

Grupo B, o CE tem representação com 1/10 de % em peso de Mn:

$$CE = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{10} + \frac{Ni + Cu}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{10} \quad (3.c)$$

$$CE = C + \frac{Mn}{10} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{10} \quad (3.d)$$

Grupo C, o CE é influenciado com 1/16 de % em peso de Mn:

$$CE = C + \frac{Si}{25} + \frac{Mn}{16} + \frac{Cu}{16} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{40} + \frac{V}{15} \quad (3.e)$$

$$CE = C + \frac{Mn}{16} + \frac{Ni}{50} + \frac{Cr}{23} + \frac{Mo}{7} + \frac{Nb}{5} + \frac{V}{9} \quad (3.f)$$

Grupo D, o CE é representado com 1/6 de % em peso de Mn:

$$CE = C + A(C) \times \left\{ \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr + Mo + Nb + V}{20} + 5B \right\} \quad (3.g)$$

$$A(C) = 0.75 + 0.25 \times \tanh[20(C - 0.12)] \quad (3.h)$$

Os aços ao carbono e os ARBL, têm a soldagem dependente principalmente das porcentagens de C e Mn, não desprezando os teores de ligas (Si, Cu, Mn, Ni, Cr, Mo, Nb e V), uma vez que estes, ainda que em pequenas proporções e de forma discreta, influenciam diretamente na dureza, resistência mecânica, microestrutura e, conseqüentemente, alteram a soldabilidade. O teor de carbono tem maior influência na soldabilidade. Os aços com porcentagem de até 0,15% C, apresentam ótima soldabilidade, e entre 0,15% C a 0,30% C, resultam em boa soldabilidade (TAWEEJUN e KANCHANOMAI, 2015).

3.3 PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG

3.3.1 Definição

É um processo de soldagem por fusão gerada pelo calor do arco elétrico estabelecido entre a ponta de um arame-eletrodo consumível, alimentado de modo contínuo, e a superfície do metal de base, como mostra Figura 3.4, protegido por um gás, inerte (MIG) ou ativo (MAG), fornecido externamente (SCOTTI e PONOMAREV, 2014).

O processo MIG/MAG é conhecido pela sua versatilidade e por obter alta economia, com produção de cordão de solda de qualidade estrutural e bom aspecto geométrico (MVOLA, *et al.*, 2013).

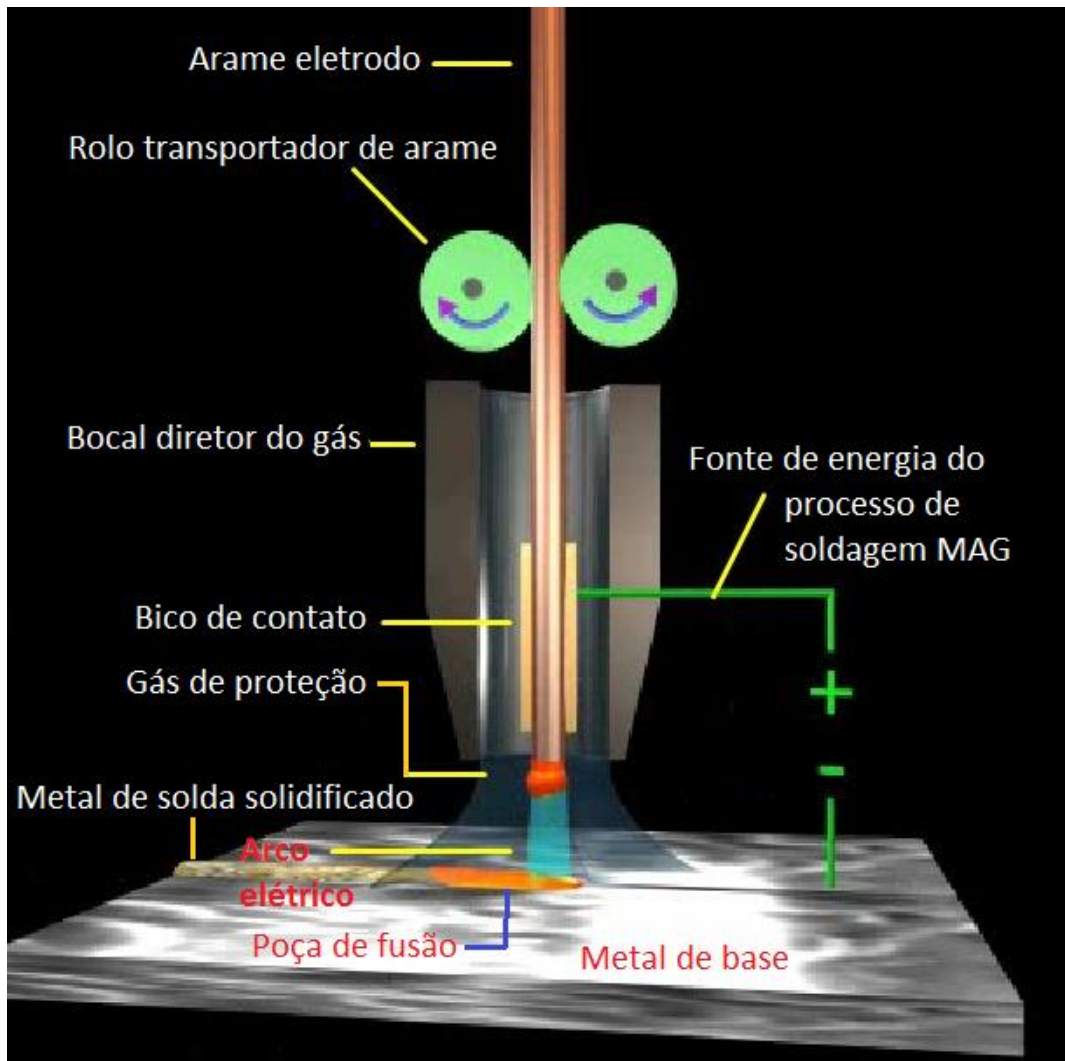


Figura 3.4 – Processo convencional de soldagem MIG/MAG
 Fonte: Informatiitehnice, (2014)

3.3.2 Vantagens e limitações

Karkoszka e Sokovic (2012) avaliaram o processo de soldagem MIG e MAG na sua eficiência e concluíram sobre os índices de significância para a qualidade, operação e gerenciamento, apresentando várias vantagens, como:

- Acabamento de ótimo aspecto;
- Realização de soldas em todas as posições;
- Ausência de escória, utilizando o arame-eletrodo compacto;
- Efetivo controle da taxa de deposição do metal de solda;
- Aplicação de ampla faixa de diferentes velocidades de soldagem;
- Alimentação contínua da poça de fusão;

- Execução de passe de raiz;
- Cálculo preciso de custos em projeto, com pequena margem de erro;
- Redução de respingos;
- Boa penetração da solda;
- Praticidade na regulagem dos parâmetros de soldagem para os aços;
- Geralmente em longos trabalhos de soldagem, a existência de falhas é fração ínfima;
- Fácil soldagem manual.

Ainda, segundo os autores este processo também se depara com algumas limitações, como:

- Velocidade de resfriamento rápida, podendo, inesperadamente, provocar trincas;
- Suscetível à falta de proteção gasosa, devido à corrente de ar;
- Limitação da posição da tocha com relação ao movimento do soldador;
- Irradiação de raios ultravioleta;
- Regulagem de parâmetros de soldagem complicado para alguns metais (ligas não ferrosas);
- Emissão de fumos metálicos prejudiciais à saúde;
- Emissão de substâncias tóxicas, como o ozônio (O₃).

O domínio dessas variáveis é complexo, porém necessário para o resultado final da solda. Mas, todas as variáveis são interdependentes, logo, não há somente uma única mudança nos parâmetros de soldagem que conduz à um resultado final satisfatório (KÜHN-KAUFFELDT, MARQUÈS e SCHEIN, 2014).

3.3.3 Equipamentos e acessórios

Os componentes da máquina de soldagem MIG/MAG basicamente são: a fonte de energia, a qual permite regular a tensão e corrente de soldagem, alimentador do arame-eletrodo e regulagem de sua velocidade de alimentação, conjunto de mangueira e tocha, com o sistema de refrigeração da mesma, e os cabos de energia positivo e negativo. O processo aceita qualquer posição de soldagem e, no caso de

junta em ângulo, a tocha deve se manter perfeitamente alinhada, pois pode causar falta de fusão lateral (ESAB – Elektriska Svetsnings Aktie Bolaget, 2005).

As posições de soldagem na horizontal e plana, são as mais indicadas para a aplicação de robô acoplada ao equipamento, sendo que em certos casos como no processo de soldagem em perfil de chapa dobrada a posição horizontal se torna a mais favorável.

3.3.4 Consumíveis

O gás usado no processo de soldagem forma uma camada de fluxo invólucra ao arco elétrico, protegendo totalmente dos contaminantes do ar ambiente ao seu redor, auxiliando também o estabelecimento do arco elétrico (plasma). Adicionalmente, pode ou não participar das reações que ocorrem na poça de fusão (GOMES, *et al.*, 2014).

Assim, a disposição do fluxo de gás frente a junta a ser soldada, tem relevância para que a proteção seja eficiente evitando defeitos no cordão de solda, como exhibe a Figura 3.5 (SHI, TIAN e ZHANG, 2016).

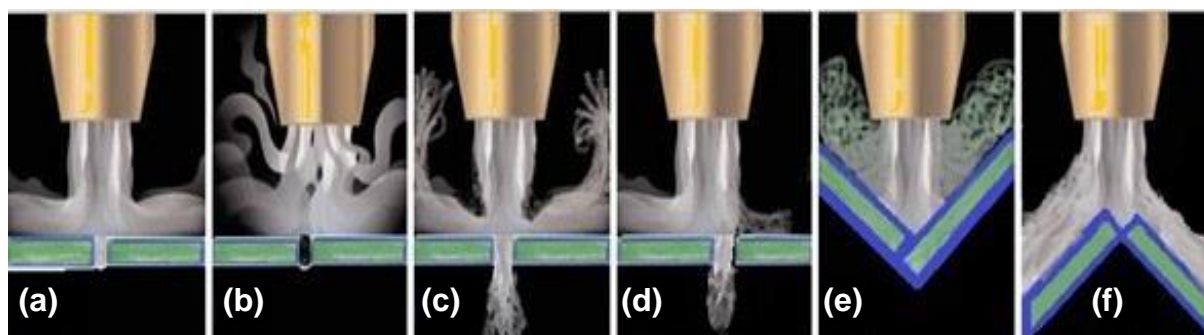


Figura 3.5 - Posicionamento da junta frente a vazão do gás de proteção
 (a) fluxo normal, (b) Fluxo insuficiente, (c) fluxo com alta pressão sobre a junta, (d) junta fora de posição com vazamento, (e) fluxo acumulado pelo retorno e (f) fluxo com direção prejudicial.
 Fonte: Adaptado de Informatiitehnice, (2014)

Exemplificando, a adição de CO₂ aumenta a penetração da solda e a dureza do cordão. Em consequência, uma fração maior de oxigênio dissociada tende a reduzir a tensão superficial do metal líquido, facilitar a ionização do plasma e causar efeitos na geometria do cordão de solda resultante, conforme ilustra a Figura 3.6, considerando teores crescentes de CO₂ (WANG, *et al.*, 2014).

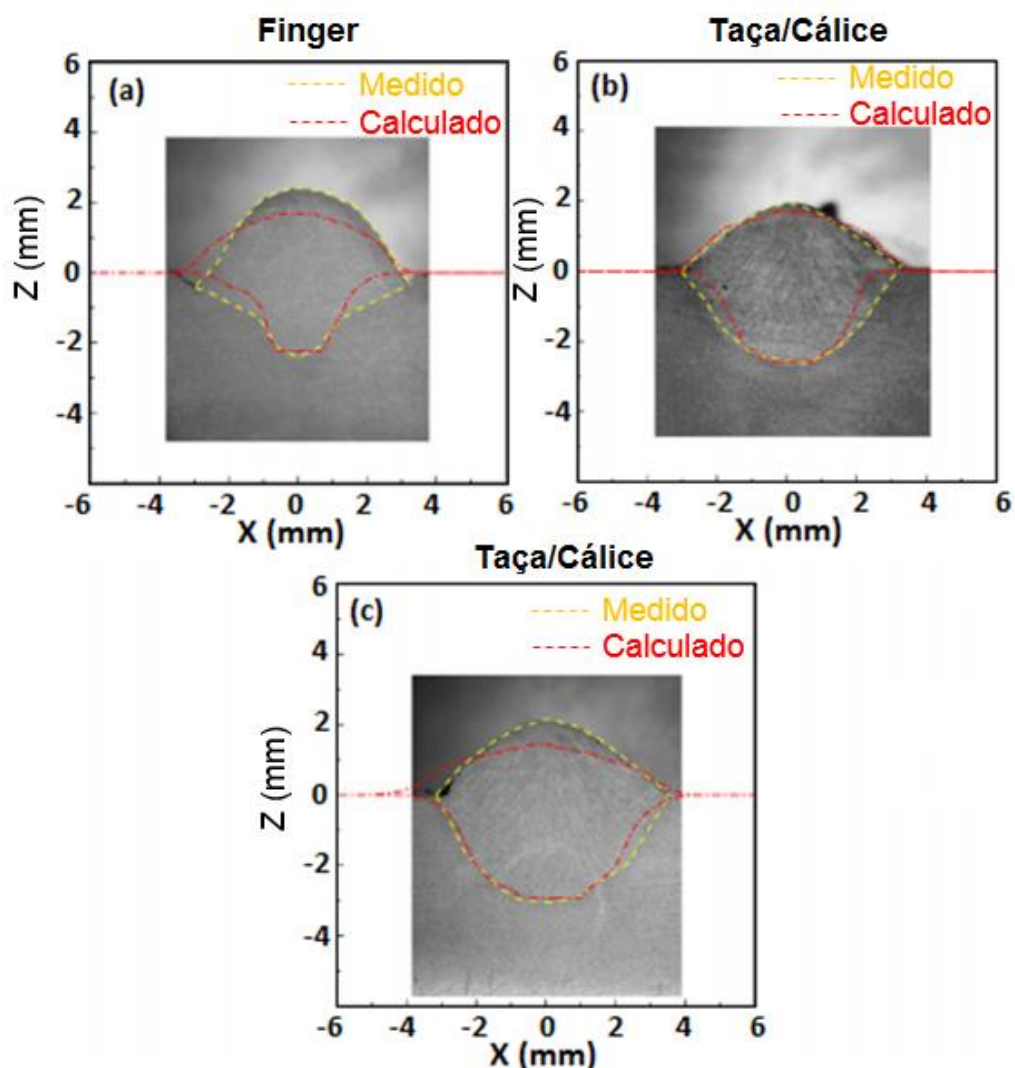


Figura 3.6 – Comparação da geometria mensurada e calculada na seção da solda com diferentes composições de gás de proteção
 (a) 100%Ar, (b) 75%Ar25%CO₂ e (c) 100%CO₂
 Fonte: Wang, *et al.*, (2014)

O arame-eletrodo maciço, comumente chamado de arame sólido, é um consumível tão importante quanto o gás de proteção, cuja seleção deve ser criteriosa para aplicação no processo de soldagem, porque a sua principal função é depositar o material metálico que formará o cordão de solda propriamente dito.

Em seguida, deve ser observada a espessura da chapa, a fresta de espaçamento da junta, o tipo de junta, o passe de raiz a ser executada e o gás de proteção escolhido, para assim ser selecionado o diâmetro correto do arame de deposição.

Os arames sólidos podem ser utilizados para soldar diversos materiais (aços carbono, aços de alta liga, alumínio, cobre e aços inoxidáveis), com isenção de escória e elevada taxa de deposição. Para um metal de base de aço carbono ou aço estrutural de baixa liga é utilizado amplamente os arames-eletrodos de especificação AWS ER70S-6 e ER70S-3 (DING, *et al.*, 2015).

3.3.5 Variantes do processo

Com o mesmo equipamento de soldagem e basicamente alterando parâmetros de soldagem e consumíveis, surgem as variantes do processo MIG/MAG:

- FCAW (Flux-Cored Arc Welding)
- MIG/MAG - Pulsado
- MIG/MAG - Com Transferência Controlada
- MIG/MAG - Alto Rendimento
- MIG/MAG - AC
- Plasma MIG/MAG

O processo FCAW (Flux-Cored Arc Welding) é uma das variantes do processo MIG/MAG, que utiliza como consumível um arame-eletrodo tubular, contendo material granular (fluxo) no interior da seção anular. Dependendo da natureza desse fluxo, é necessário ou não proteção gasosa exterior, sendo para essa última condição, aplicado o termo autoprottegido. A principal vantagem é a alta taxa de deposição, acabamento superficial e a dispensa do gás de proteção quando se usa o arame-eletrodo autoprottegido. A principal desvantagem é a relativa dificuldade de penetração, quando comparando com o processo MIG/MAG convencional (ALORAIER, *et al.*, 2012).

MIG/MAG – Pulsado; tem como característica principal a possibilidade de pulsos de corrente de soldagem em intervalos de tempo previamente determinados. Dentre muitas vantagens, apresenta a melhor estabilidade de arco e menos aporte de calor aplicado. A maior desvantagem é atribuída à limitação quanto a posição de soldagem, principalmente sob cabeça (MVOLA, *et al.*, 2013).

MIG/MAG – Transferência Controlada; é análogo ao pulsado, porém mais avançado uma vez que controla a transferência metálica, de modo que ocorra uma gota por pulso (AZAR, 2015).

MIG/MAG – Alto Rendimento; conhecido também como *Rapid Melt*, *Rapid Arc*, *Lind Fast* e *TIME*, caracteriza-se por alcançar transferência spray ou rotacional, com maior aporte térmico (SUBAN e TUSEK, 2001).

MIG/MAG – AC; trabalha com polaridade alternada, com menor alcance de calor imposto, se comparado com MIG/MAG convencional, porém de difícil regulagem para penetração (SHUJUN CHEN, *et al.*, 2016).

MIG/MAG – Plasma MIG; processo híbrido, em que a função do plasma garante a penetração, enquanto que o MIG proporciona enchimento. Indicado para mecanização, mas tem como desvantagem o alto custo do sistema (RAO, LIAO e TSAI, 2010) e (MENDEZ, *et al.*, 2014).

3.3.6 Soldagem robotizada

Os robôs de soldagem são cada vez mais utilizados nas indústrias automobilísticas, na fabricação de estruturas “offshore”, entre outras aplicações, e têm demonstrado vantagens no processo produtivo, assim como economia em mão de obra. Chen, *et al.*, (2015), como exemplo, obtiveram, utilizando simultaneamente dois robôs de soldagens, excelentes resultados no cordão de solda, em chapas com espessura de 2 pol., mostrando outra forma de aplicação industrial com otimização de custo e aumento de produção.

Aqueles robôs mais avançados e dedicados à soldagem, possuem recursos, como os sensores a laser que visualizam e detectam tridimensionalmente a posição, alinhamento, direção, formato e volume da junta de solda, em sistema de retroalimentação de dados durante o processo de soldagem, regulando instantaneamente os parâmetros de soldagem, direção e tecimento da solda.

Outra aplicação do uso do robô com sensor foi elaborada por Kah, *et al.*, (2015), em condições semelhantes à fabricação de estruturas metálicas, soldando chapas de espessuras diferentes e fresta com variação ao longo do percurso de soldagem, obtendo também soldas com alta taxa de deposição e ótima qualidade.

As principais características desses robôs são a elevada capacidade produtiva e obtenção de qualidade padronizada, em perfis dobrados ou tubulares (SHI, TIAN e ZHANG, 2015).

Há diversos fatores que demonstram que a implantação de robôs é possível e adaptável para as indústrias de estruturas metálicas de grande e até médio porte, apesar de seu custo ainda ser um investimento alto. Além dos benefícios devido a produtividade, não há interferência de fatores físicos ou emocionais, prejudiciais ao trabalho (KAH *et al.*, 2014).

A capacidade média de um soldador é de 17 kgf de estrutura metálica fabricada a cada hora trabalhada, segundo dados das indústrias de estruturas metálicas da região de Bauru. Se o mesmo serviço fosse realizado por um robô, o tempo seria reduzido e a qualidade seria melhor, pois a produção de um robô com arame-eletrodo simples tem taxa inicial de 2,75 kgf/h que é correspondente a 200 kgf de estrutura metálica fabricada (LINCOLN ELECTRIC, 2016).

3.4 VARIÁVEIS PREDOMINANTES NA SOLDAGEM MIG/MAG

Todos os fatores que se relacionam diretamente na formação do cordão de solda são variáveis que interagem uma com a outra, não sendo totalmente independentes. Como é complexa esta sinergia, conhecer bem, independentemente, as variáveis predominantes do processo, facilita a regulagem dos parâmetros de soldagem para resultar uma solda adequada em termos das características finais do cordão de solda, como dimensões, aspecto superficial, penetração, diluição e propriedades mecânicas, com a maior taxa de deposição e maior rendimento possível. Ter domínio das variáveis do processo é a meta para reduzir a incidência de defeitos como porosidade, inclusões de escória, trincas, mordeduras, concavidades na raiz, sulcos e outros (SEN, MUKHERJEE e PAL, 2015).

A penetração e fusão são dependentes da composição química do metal de base e da compatibilidade com o arame-eletrodo, bem como da tensão e corrente de soldagem dado que determinam não só a resistência da junta soldada, como também as dimensões do cordão de solda. Podem influenciar também a falha de uma estrutura soldada, como o ângulo muito alto do reforço, tornando-o um concentrador de tensão ou sulco, que reduz a área útil do perfil (BRANCO, FERNANDES e CASTRO, 1986).

A velocidade de soldagem está diretamente relacionada ao volume de metal depositado no cordão de solda. A regulagem desta variável também interage com a penetração e, conseqüentemente, na geometria da solda. Velocidades altas induzem

o volume da solda ao aspecto escamoso, dimensão da poça de fusão reduzida, e o menor calor do arco, que atua na poça, faz com que a penetração se torne baixa. Em contrapartida, baixas velocidades de soldagem fazem com que a penetração aumente. Na chapa dobrada, a velocidade de soldagem tem que ser controlada de forma que a velocidade seja constante, com equivalência entre a velocidade linear e angular na região da dobra (Al, *et al.*, 2016).

Outra variável importante é a tensão de soldagem, que permite regular a altura do arco elétrico, e tem efeito direto sobre a transferência metálica e na geometria do cordão. Quando a tensão do arco diminui, a penetração aumenta e ao contrário, quando aumenta, o comprimento do arco cresce, aumentando a incidências de respingos e chance de ocasionar porosidade e mordeduras (ZONG, *et al.*, 2016).

O alinhamento do arame-eletrodo na junta é importante ao se trabalhar com braço robótico, porque o arame tem que se manter dentro da junta a ser soldada para assim obter melhor penetração e distribuição térmica homogênea, quando a posição de soldagem é na horizontal. O aporte térmico na condição do arame-eletrodo estiver fora de alinhamento, pode concentrar-se 100% apenas em um dos lados da junta. Ocorrendo o alinhamento adequado, espera-se que a distribuição do aporte térmico fique equilibrado em relação à junta, especialmente quanto à fusão da parede lateral. Ao utilizar o robô com sensor este problema variável tende a desaparecer, porém nem todos os robôs tem este acessório, neste caso evidencia a falha no cordão longitudinalmente. A fresta deve ser conservada constante, pois dependendo da espessura da chapa, a execução do passe de raiz pode variar com a velocidade de soldagem, como mostra a Figura 3.7 (KAH, SALMINEN e MARTIKAINEN, 2011)

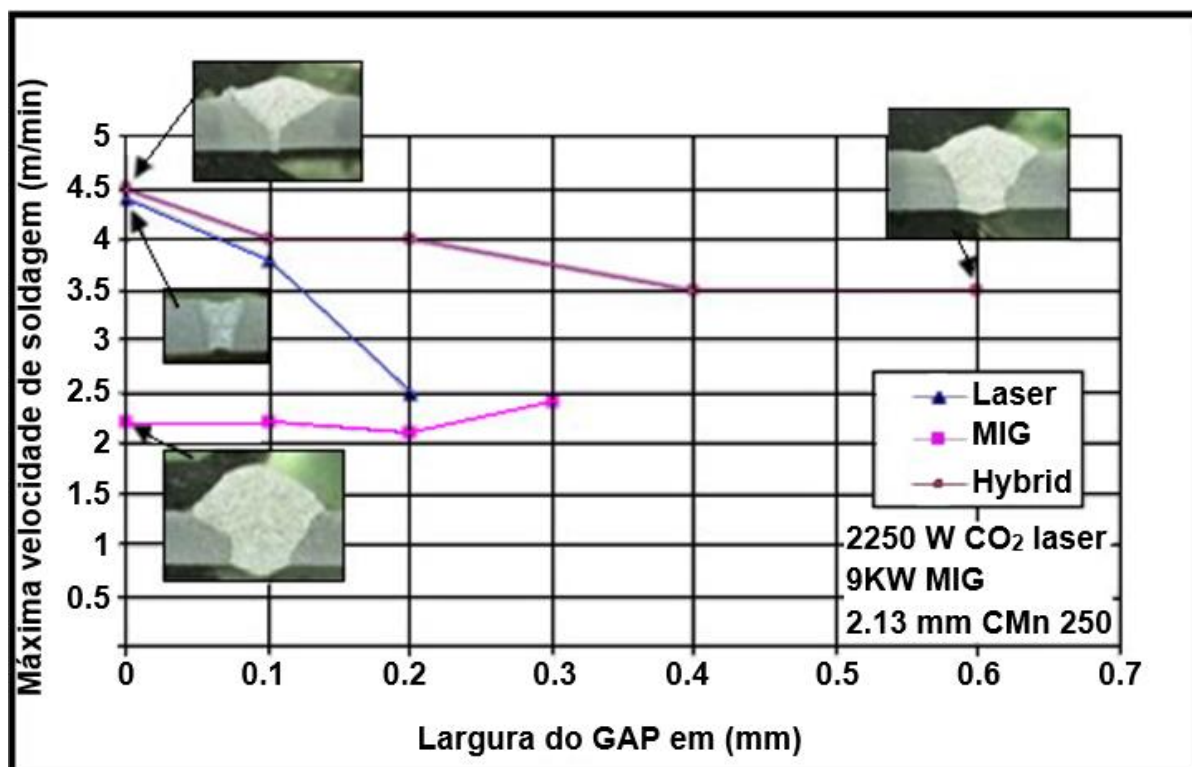


Figura 3.7 - Sensibilidade da velocidade de soldagem pela variação da fresta
 Fonte: Kah, Salminen e Martikainen, (2011)

O nível da corrente de soldagem tem efeito sobre a taxa de deposição no modo de transferência metálica e na geometria do cordão de solda. A espessura do metal de base a ser soldado e o diâmetro do arame-eletrodo definem a corrente do processo de soldagem, ou seja, sendo de baixa intensidade, a estabilidade do arco elétrico pode ser prejudicada, e sendo demasiadamente alta pode gerar excesso de respingo. Se o valor da corrente de soldagem for gradativamente aumentado, favorecerá a penetração da solda e a taxa de deposição do metal de adição, permitindo o aumento da velocidade de soldagem (WANG, *et al.*, 2016).

No processo MAG a velocidade de alimentação do arame automaticamente altera a corrente de soldagem, variando em escala proporcional, de tal modo que é uma das chaves da produtividade (WANG, *et al.*, 2016).

O bico de contato é encontrado no mercado normalmente em três dimensões de comprimento, 28, 37 e 52 mm. É de extrema importância a escolha do bico de contato para controlar, de certa forma, o "stick-out". Esta variável é a extensão livre do arame-eletrodo, cuja dimensão conta-se a partir do ponto de contato elétrico do arame-eletrodo, até a ponta do mesmo exibido na Figura 3.8. O bico de contato pode estar alojado dentro, faceado, ou fora do bocal (VIÑAS, JUAREZ e CABRERA, 2015).

A distância entre o bico de contato e a peça de trabalho (DBCP) deve ser constante, o que é possível ao robô, porém muito difícil ser controlado pelo soldador. Para se ter uma ideia, esta distância é muito pequena, dependendo da velocidade de alimentação do arame-eletrodo o bocal acaba se encostando à poça de fusão, arrastando parte do material consigo e depositando resíduo na poça, prejudicando o processo de soldagem, gerando desgaste do bocal. Para DBCP demasiadamente longa, haverá o aumento da resistência elétrica, com diminuição da corrente e, conseqüentemente, prejudicando o aporte térmico e a proteção gasosa.

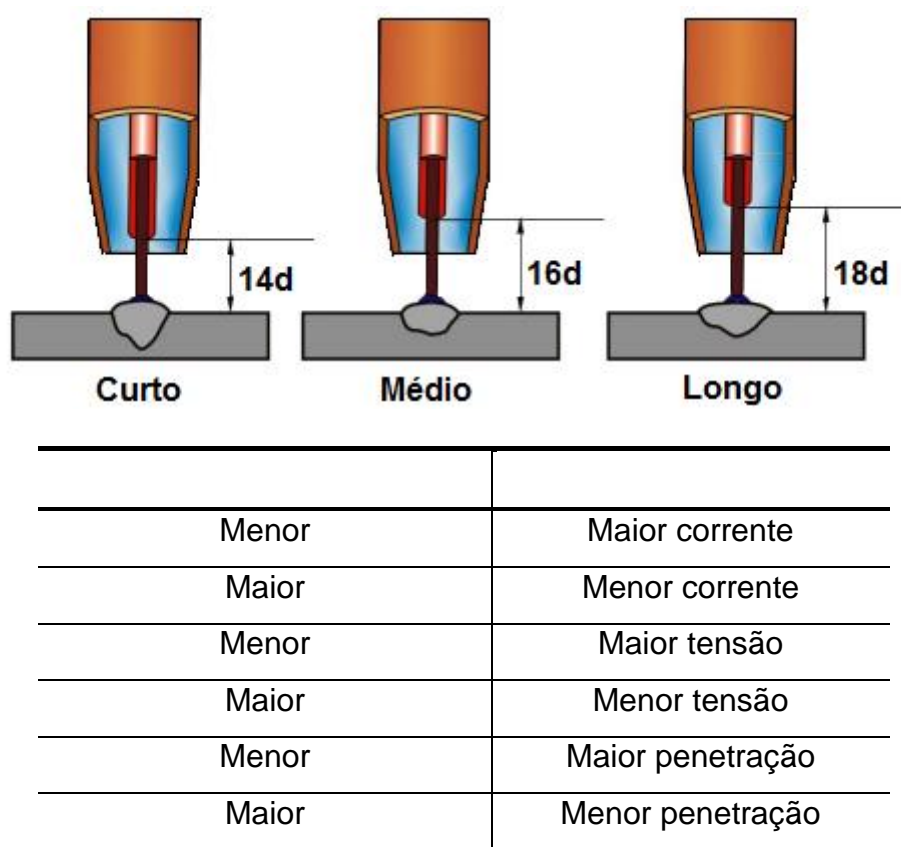


Figura 3.8 – Influência da extensão do eletrodo na geometria do cordão de solda
Fonte: Senai, (2004)

3.4.1 Junta de solda

A junta é a região onde as peças serão unidas pelo processo de soldagem e que pode ter fresta variando, desde nulo até no máximo o valor do diâmetro do arame-eletrodo usado no processo. Dependendo da aplicação, a preparação da junta pode ser de topo ou biselada. Deve ser isenta de resíduos e perfeitamente alinhadas

quando de topo, com abertura da fresta constante. Quando se trabalha com fresta ampla, deve-se manter o paralelismo para que não ocorra o toque inesperado do arame-eletrodo durante a transferência. A preparação da junta de soldagem deve seguir parâmetros bem definidos, com o uso do robô sem sensor. Ao se trabalhar com carretel de 1 ou 3 kgf e, portanto, com diâmetro pequeno, os roletes do sistema de alimentação do arame-eletrodo não conseguem fazer o endireitamento como nos rolos de 18 kgf e o efeito “hélix” é maior durante o processo de soldagem, a forma como foi preparada a junta soldada influenciará a formação do cordão (WANG, *et al.*, 2016).

3.4.2 Direção do arame-eletrodo

Direcionar bem o arame-eletrodo envolve manter constante alinhamento do trajeto espacial na junta a ser soldada, centralidade no eixo da junta, rotação tridimensional mantendo o raio fixo, inclinação espacial do arame em relação ao cordão de solda, projeção do trajeto arame-eletrodo, desde o ponto de início até o fim de soldagem. Tudo isso está relacionado diretamente à geometria da solda. Se um ou mais itens estiverem desregulados, a sobreposição de efeitos será evidente na constituição do cordão de solda e os defeitos serão inevitáveis, tais como: falta de penetração, aspecto visual imperfeito, furos, excesso de calor apenas em um lado do metal de base. Para evitar estes inconvenientes deve-se certificar que a tocha esteja instalada corretamente e sem folgas no suporte do robô (DING, *et al.*, 2015).

O percurso ou trajeto de soldagem pode ser realizado com a tocha levemente inclinada no sentido de puxar a poça de fusão ou, melhor explicado, com a tocha posicionada à frente da poça de fusão, verificando-se uma máxima penetração com ângulo entre 25° a 90°. Na técnica de empurrar a poça de fusão, contrariamente, a tocha se posiciona atrás da poça, predispondo a obtenção de um cordão raso e largo.

A inclinação do arame é o ângulo em que se encontra a tocha, ou o eixo do arame-eletrodo em relação à superfície do metal de base, e para isso deve-se ter o cuidado em minimizar o efeito “cast”.

A formação do cordão solda obtido, em função da direção de alimentação do arame-eletrodo e direção de deposição, é exibida na Figura 3.9.

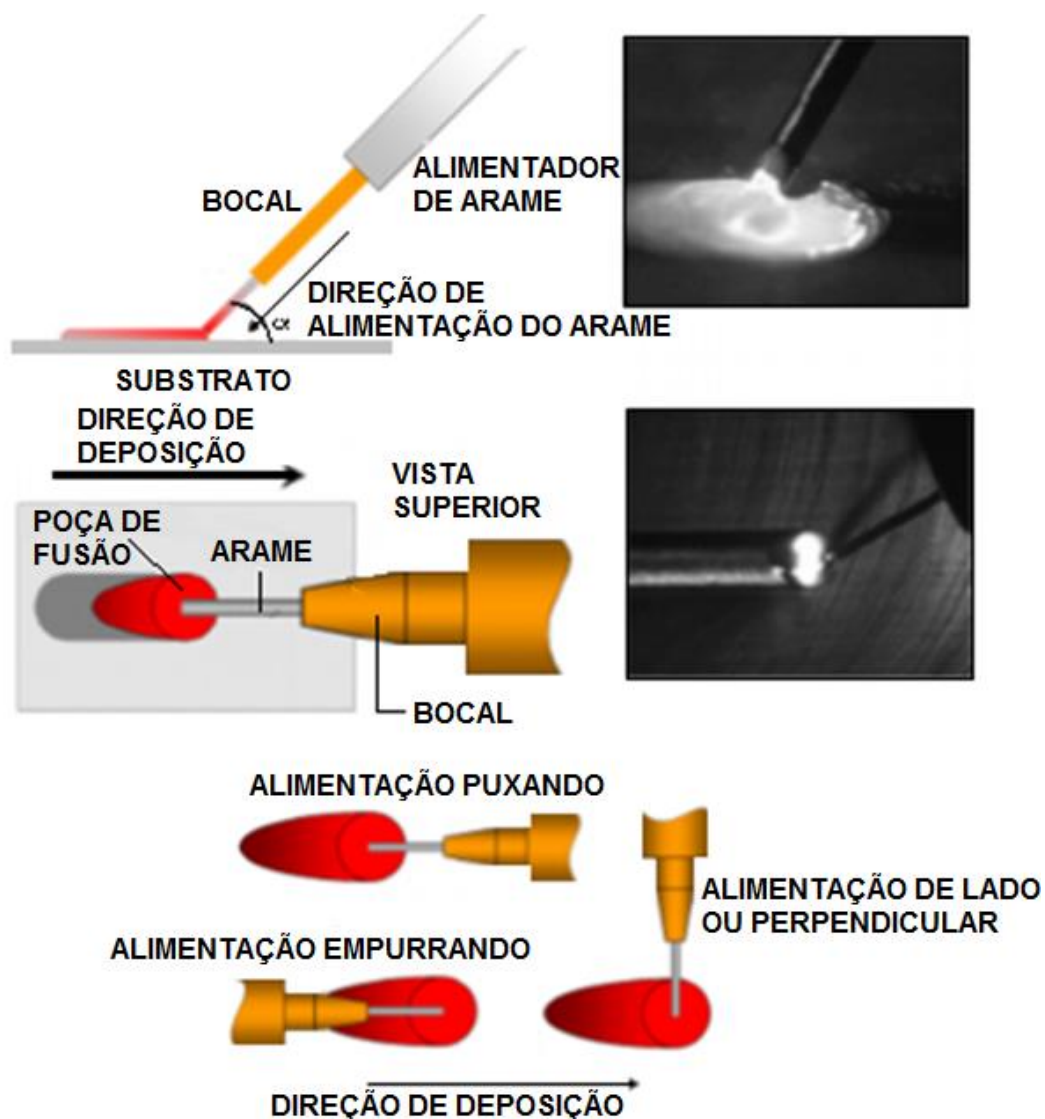


Figura 3.9 – Orientação do eletrodo e formação do cordão de solda
 Fonte: Ding, *et al.*, (2015)

3.4.3 Penetração da raiz

A penetração da solda é um dos aspectos mais importantes de um processo de soldagem, pois garante a resistência e continuidade completa da peça, desde que esta não apresente mordeduras. Alcançar a penetração desejada em chapas grossas é relativamente fácil, se as juntas são preparadas com biselamento e outros meios. Em chapas finas se torna um pouco mais difícil, não pelo processo em si, mas sim na regulagem ideal que resulte no melhor cordão. De acordo com Ibrahim, *et al.*, (2012) mapeou os valores da penetração no aço, devido a alteração tanto na velocidade do arame-eletrodo quanto na corrente de soldagem. Na prática, percebe-se que há

diversas combinações entre ambos os parâmetros que proporcionam penetrações semelhantes, porém com microestruturas visivelmente diferentes, o que leva a flutuações na dureza. O interessante é que o domínio dos fatores que conduzem a uma penetração com fusão homogênea no cordão pode conduzir a projetos com melhores desempenhos. Na Figura 3.10 expõe a influência da corrente de soldagem na penetração da solda, mostrado na pesquisa de Arif e Chung (2015), que analisou diferentes correntes e porcentagens de pulso no eletrodo negativo.

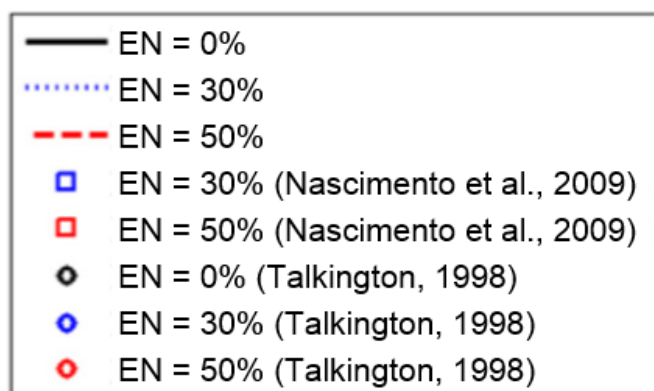
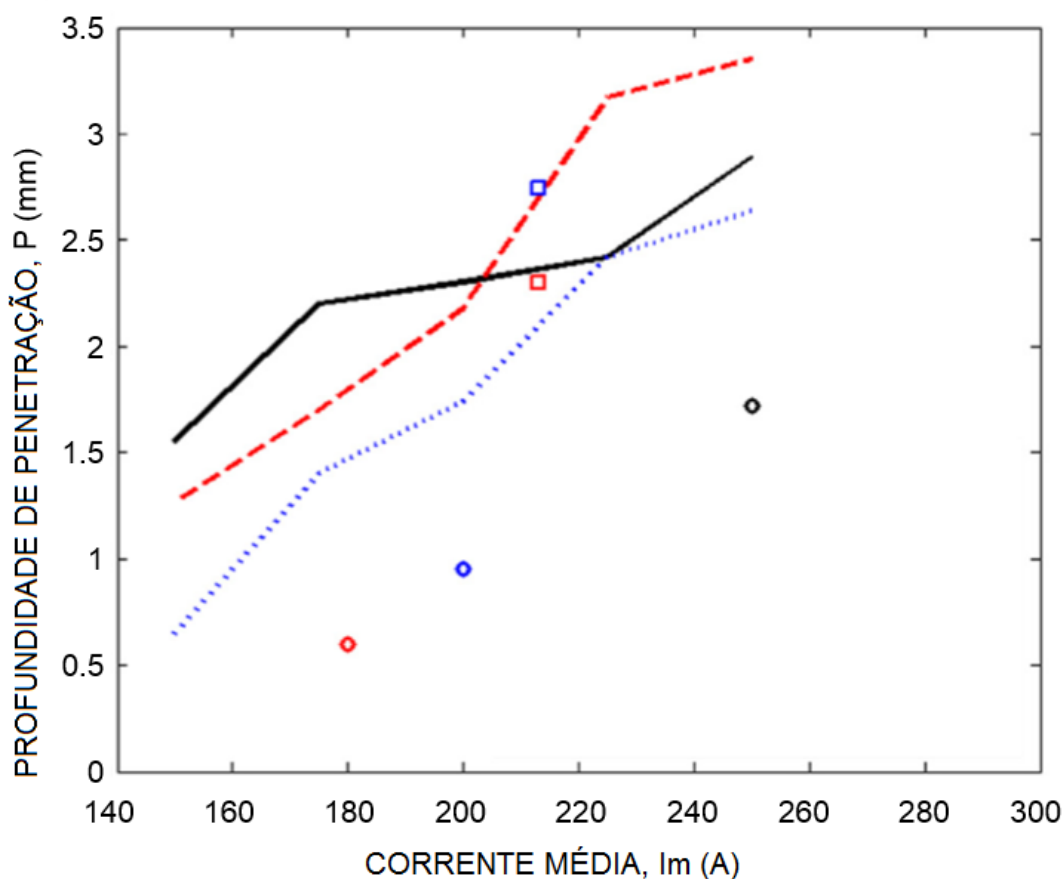


Figura 3.10 – Penetração e controle de soldagem
Fonte: Arif e Chung, (2015)

3.4.4 Tipos de transferência metálica

Transferência metálica é o fenômeno de gotejamento do metal líquido a partir da fusão do arame-eletrodo (metal de adição), que formará o cordão de solda. Dependendo fundamentalmente da corrente de soldagem, os modos de transferência podem ser por curto-circuito, globular, spray e pulsado. Cada um desses tipos de transferências possui sua característica de operação, produtividade, posições de soldagem, corrente, acabamento do cordão, estabilidade do arco, respingo e penetração (WONG e LING, 2014).

Mais detalhadamente, o destacamento do metal de adição depende da velocidade de alimentação do arame-eletrodo, do tipo do gás de proteção, do comprimento do arco, da intensidade da corrente de soldagem, da polaridade, da DBCP, do diâmetro do arame-eletrodo, da velocidade de soldagem, da posição e ângulo de soldagem (MODENESI, MARQUES e SANTOS, 2012).

Na Transferência por curto-circuito o material passa para a poça de fusão no momento em que há o contato do arame-eletrodo com a poça fusão. É importante salientar que não ocorre translado do metal de adição através do arco elétrico.

A Figura 3.11 registra, sequencialmente, este tipo de transferência, que acontece com corrente e tensões baixas de soldagem, o que permite a soldagem de chapas finas em qualquer posição. Sem dúvida, é considerado o modo de transferência mais adotado na indústria de estruturas metálicas. Nestas condições, a máquina de soldagem permite monitorar esta transferência através do painel de controle de parâmetros, sinalizada por leds (WONG e LING, 2014).

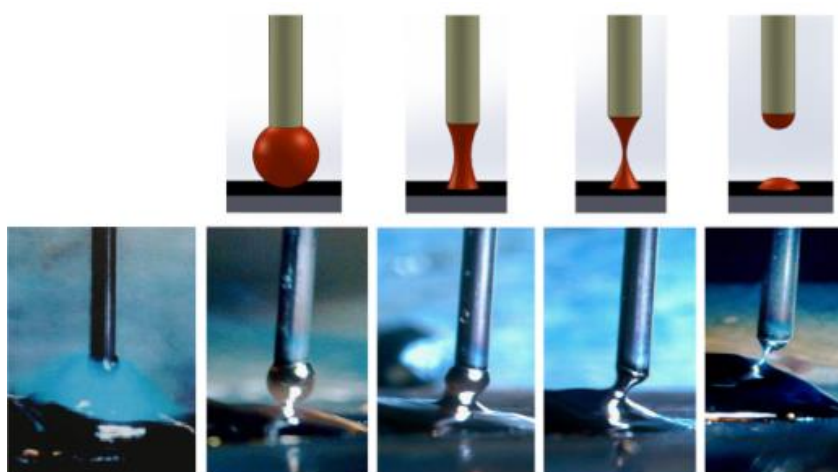


Figura 3.11 - Transferência metálica por curto-circuito
Fonte: Cuiuri, (2000); Tipi, Sani e Pariz, (2015)

Entretanto, uma limitação deste modo de transferência está no elevado nível de respingos, devido às microexplosões que ocorrem na poça de fusão. Para solucionar esta limitação, o arco deve estar estabilizado e, para isto, a corrente deve ser constante (NORRISH e CUIURI, 2014).

Sobre a Transferência globular, ela se torna executável com valores de tensão de soldagem acima do modo por curto-circuito e é ineficaz no procedimento de soldagem sobre cabeça. É caracterizada pela formação da gota, presa à ponta do arame-eletrodo com tamanho bem maior que o diâmetro do mesmo, até que se destaca e cai na poça de fusão. Não é apta para execução de passe de raiz. Apesar de proporcionar alta taxa de deposição, não é comum o seu uso na soldagem de estruturas metálicas. A Figura 3.12 ilustra como se dá a transferência globular (WANG, *et al.*, 2003).

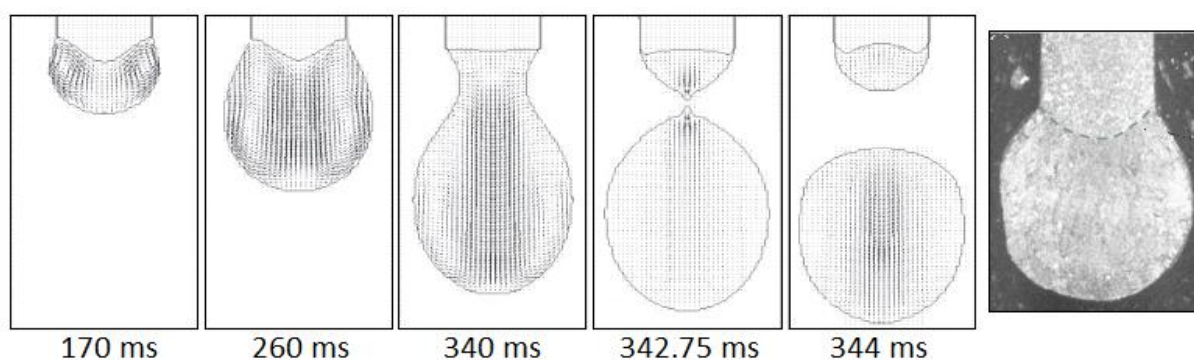


Figura 3.12 – Formação da gota e tempo médio envolvido na transferência globular com gás Ar
Fonte: Wang, *et al.*, (2003)

Em continuidade, ao se elevar a corrente de soldagem até um valor designado como corrente de transição, passa-se por uma faixa tênue em que se estabelece a transferência por spray, fazendo com que as gotas formadas sejam expulsas do arame-eletrodo de maneira semelhante a um jateamento de partículas menores que o diâmetro do arame-eletrodo. A transferência é conduzida praticamente por forças eletro-magnéticas sem gerar respingo, produzindo bom acabamento superficial do cordão de solda. A Figura 3.13 exhibe como é esse modo spray (WANG, *et al.*, 2003).

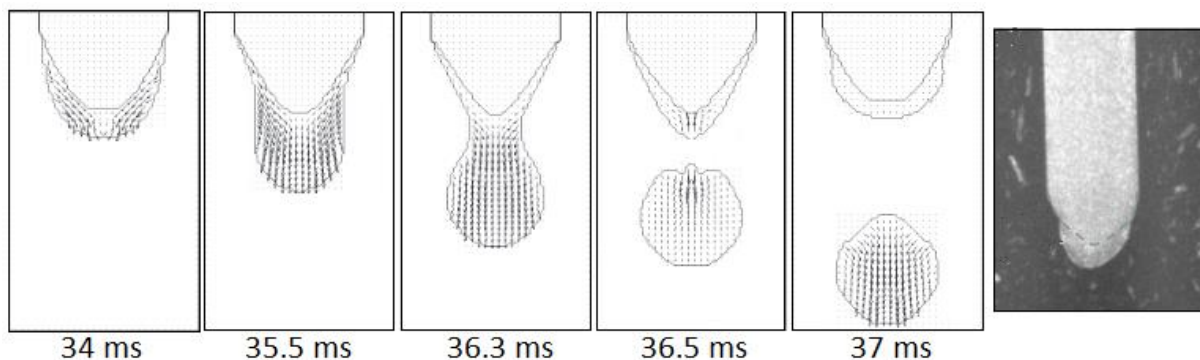


Figura 3.13 – Formação da gota na transferência spray com uso do gás Ar
Fonte: Wang, *et al.*, (2003)

Referente à transferência tipo arco pulsado, sabe-se que ela ocorre quando as gotas são transferidas por uma alta intensidade de corrente que é alternadamente aplicada ao arco. O nível da corrente de base é conservado entre os pulsos para sustentar o arco, porém impedindo a transferência do metal, formando uma onda cíclica quadrática, como se percebe na Figura 3.14 e na Figura 3.15 (ESAB, 2005).

A corrente que atua em dois níveis, de pico, acima da corrente de transição, num intervalo de tempo, e outra abaixo desta corrente, em outro intervalo de tempo, resulta no controle da gota por pulso que se desprende quando se atinge o valor da corrente de pico. Com isso se consegue menor entrada de calor, devido a níveis menores de corrente média de soldagem, favorecendo a união de chapas finas, além de possibilitar soldas em todas as posições e ser adequada a mecanização (MVOLA, *et al.*, 2013).

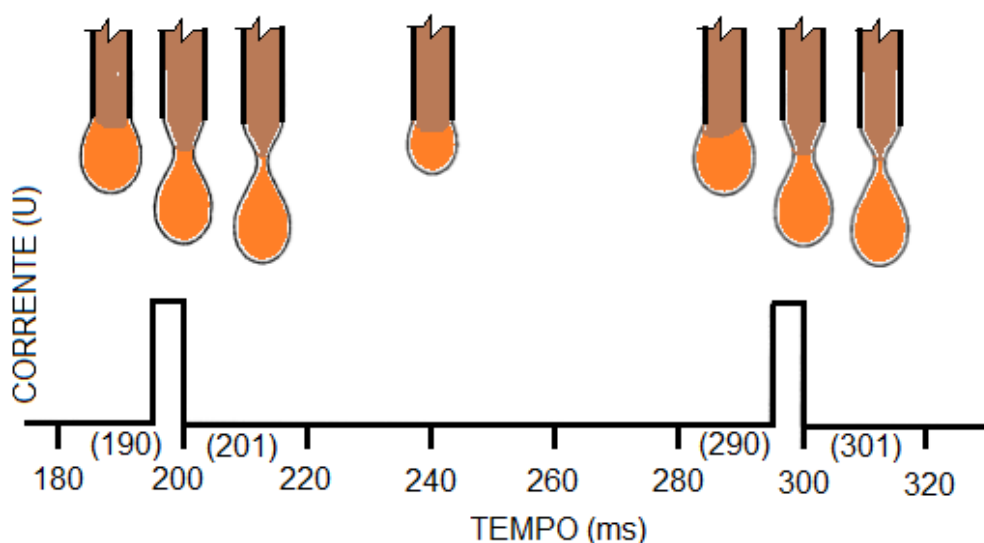


Figura 3.14 – Formação da gota na transferência por arco pulsado
Fonte: Choi, Yoo e Kim, (1998)

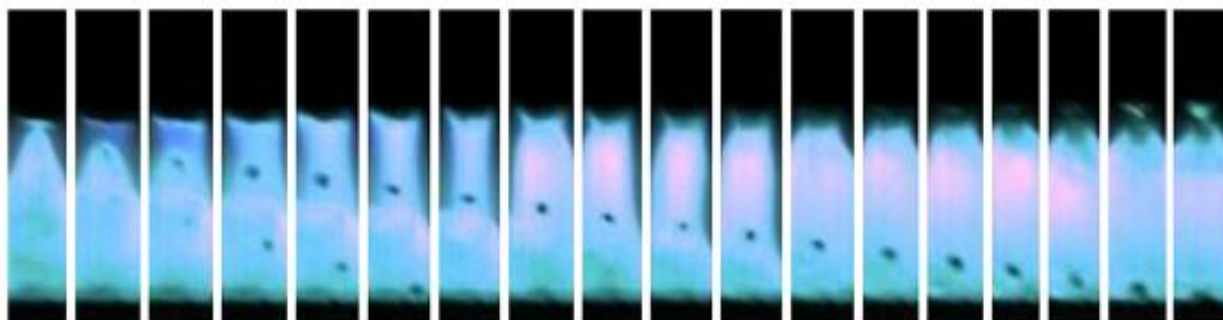


Figura 3.15 – Transferência por arco pulsado
Fonte: Ghosh, Dorn, H. e Goyal, (2007)

Sintetizando o que foi descrito acima, a Figura 3.16 mostra a classificação do tipo de transferência baseada na corrente e tensão de soldagem.

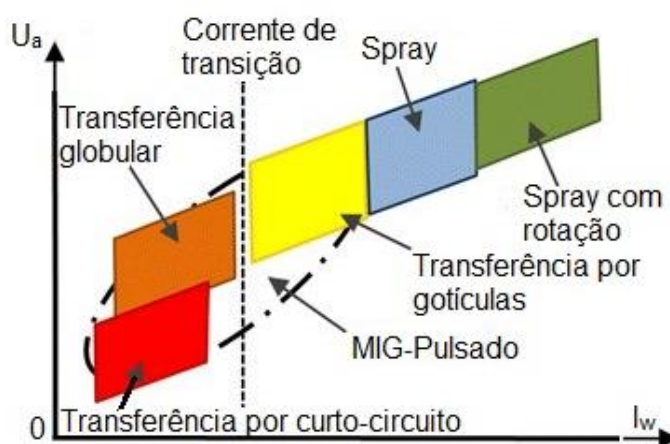


Figura 3.16 - Classificação do tipo de transferência no diagrama de tensão do arco com a corrente de soldagem.
Fonte: Kah, *et al.*, (2014)

3.5 DESENVOLVIMENTO DAS JUNTAS SOLDADAS

A ZF é a região da junta soldada que recebe energia necessária para estar no estado líquido e solidificar com o resfriamento subsequente. Sua temperatura atinge valores superiores às temperaturas de fusão do metal de base, formando a microestrutura do cordão de solda (YANG, *et al.*, 2004). A Figura 3.17 e Figura 3.18 representam, esquematicamente, as regiões que compõem a junta soldada e o gradiente térmico a que estão submetidas.

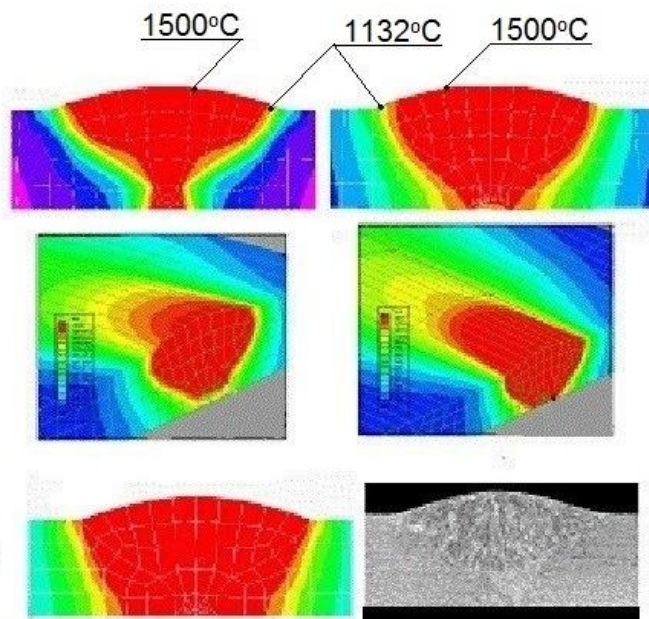


Figura 3.17 – Isotermas e regiões do cordão de solda de topo por fusão, gradiente térmico tridimensional do processo de soldagem
 Fonte: Yang, et al., (2004)

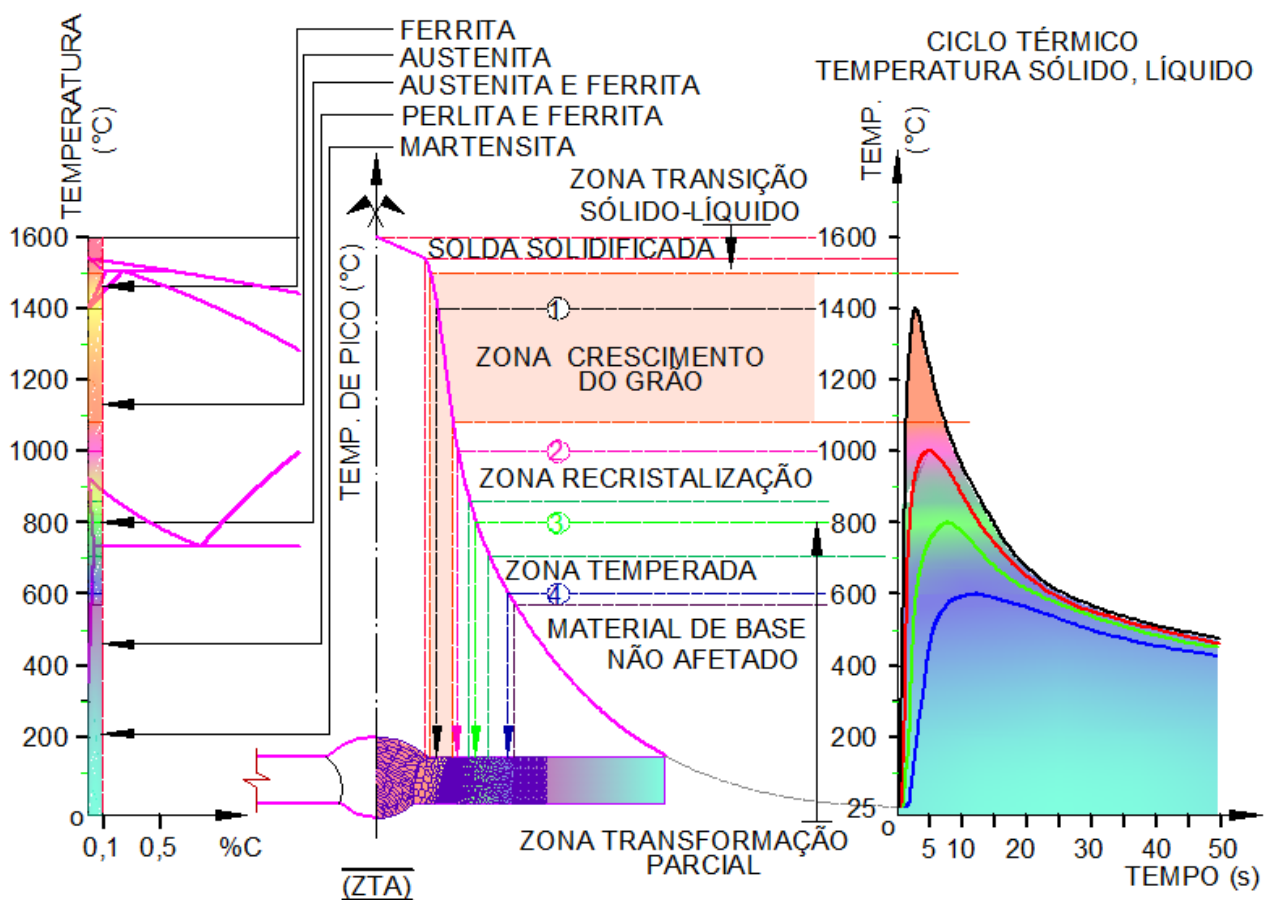


Figura 3.18 - Regiões do cordão de solda com a curva térmica
 (1) Zona de crescimento do grão, (2) Zona de recristalização, (3) Zona parcialmente transformada e
 (4) Zona temperada

Fonte: Adaptado de The Great Soviet Encyclopedia, 1970-1979

O IIW (Institute International of Welding) é um dos órgãos que classifica os microconstituintes proeminentes do metal de solda (IIW - INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING, 1991).

A evidência de cada região que compõem a ZAC, pode ser visualizada através das Figuras 3.17 e 3.18 com as correspondentes características morfológicas afetadas pelo calor.

Adjacente a ZF, situa-se a ZAC que, próxima à linha de fusão, caracteriza-se como a parte do metal de base que é afetada pelo ciclo térmico de soldagem e submetida às transformações de fase no estado sólido. A temperatura máxima alcançada nesta região é maior que a faixa de temperatura crítica de transformação de fases do metal de base, porém menor que a de fusão do mesmo. Nessas condições, tal região recebe a denominação de faixa de grãos grosseiros da ZAC.

Para além da faixa de grãos grosseiros da ZAC, vem a região de grãos refinados, entendida como a parte do metal de base que recebe a energia de soldagem em nível que não causa qualquer transformação de fases no estado sólido, mas tão somente uma diminuição no tamanho dos grãos. A temperatura nesta região fixa-se abaixo da referida temperatura crítica de transformação do metal de base.

3.6 DISTORÇÃO EM JUNTAS SOLDADAS

A distorção é resultado do aporte térmico no metal de base, causando deformações, devido a dilatação no aquecimento e contração no resfriamento durante o ciclo térmico imposto. Esta reação é imprevisível no surgimento e na intensidade (RODAN, *et al.*, 2014).

A rápida fusão e solidificação que ocorre na solda, alto gradiente térmico, inerente ao processo de soldagem, com a incidência de tensões residuais e conseqüentemente distorções que, segundo (KONG e KOVACEVIC, 2012), dependendo dos níveis atingidos, afetam a qualidade da solda.

Os efeitos da solda nas propriedades do metal de base, o preparo da junta, as tensões residuais e distorções são ignoradas pelas indústrias, porque falta métodos práticos de levantamento de dados. Entretanto, o método de modelagem tridimensional é uma forma de previsão das tensões e deformações e, evidentemente,

torna-se uma importante ferramenta a ser utilizada nas indústrias que utilizam soldagens (GOU, YANG e CHEN, 2014).

As tensões residuais, precursoras das distorções, são tensões retidas devido aos efeitos de esforços de tração que ocorrem no aquecimento do metal de base e de compressão no resfriamento, quando é introduzido o calor na chapa gerado pelo arco elétrico. Em intensidades elevadas é necessário o seu alívio por tratamento térmico, que normalmente é feito em chapas grossas. Em chapas finas, o efeito é relativamente menor comparado com a chapa grossa. Como a distorção, a tensão residual é objeto de estudos e preocupações de muitos ramos industriais (COLEGROVE, *et al.*, 2009). Essas tensões podem favorecer o surgimento de defeitos planares como microtrincas e posterior propagação, como expressa a Figura 3.19.

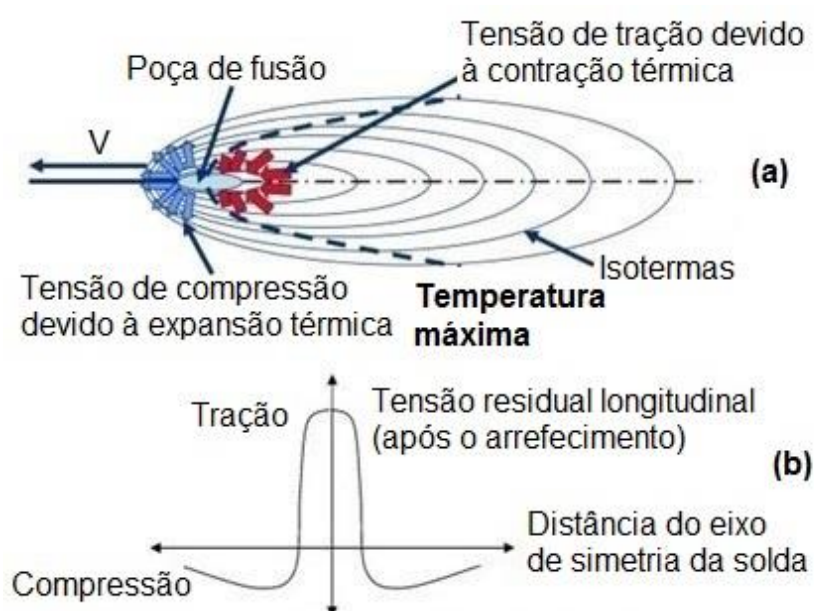


Figura 3.19 – Curvas térmicas de tensão residual
 (a) tensões térmicas durante a soldagem, (b) tensões residuais longitudinais depois da soldagem
 Fonte: Colegrove, *et al.*, (2009)

Pesquisas sobre as distorções promovidas pelas tensões residuais que se incorporam auxiliam no desenvolvimento tecnológico, como destaca Alvarenga (2006) que utilizou aplicativo voltado a esta análise com o intuito de se conhecer seus valores, sendo considerado por ele como uma análise estrutural inelástica.

3.7 CORROSÃO EM JUNTAS SOLDADAS

A corrosão é a degradação do aço quando o oxigênio se associa ao ferro na forma de óxidos, produzindo a oxidação. Nos aços não patináveis a aceleração deste fenômeno atinge o máximo em tempo relativamente curto, porém progressivo. Nos aços patináveis a aceleração da corrosão é lenta e atinge a passivação com uma película protetora (pátina) que reduz os efeitos, dando longevidade ao material (KOSTYAEVA, BALMASOVB e INASARIDZEB, 2016).

A corrosão ocorre em razão da doação de elétrons do ânodo, originando o efeito da redução, para cátodo, que recebe esses elétrons, oxidando-se. No aço tal fenômeno depende da composição química, mostrado anteriormente, quando reage com o meio. Na presença do cordão de solda, a composição química diferente do metal de base forma um par galvânico, onde os elétrons partem do elemento de menor potencial para aquele de maior potencial, porém, dependendo do meio, essa oxidação tem velocidade muito baixa ou é totalmente passivada (SAMPATH, 2007).

A taxa de corrosão, dependendo do nível alcançado, também pode propiciar o aparecimento de trincas sob tensão e, conjuntamente com as alterações térmicas, podem agravar a situação e levar a fratura do material (POULSON, 2012).

No caso de uma distribuição preferencial dentro do interior do grão, os processos de degradação ao longo da linha de soldagem são limitados e o mecanismo de fratura desempenha um papel de clivagem transgranular. A formação da corrosão é sensível na ZAC de aços não estabilizados com degradação indireta no comportamento da fratura do aço ferrítico, apresentando mecanismo de fratura dúctil (EVA SCHMIDOVÁ, 2011).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

Os aços estruturais ASTM A36 e ARBL, patinável, CSN Civil-300, respectivamente na espessura de 3,0 mm e 2,7 mm, sob a forma de perfil tipo “U” dobrado a frio, foram usados como metais de base. Os arames-eletrodos de especificação AWS ER70S-3 e AWS ER70S-6 com diâmetros, respectivamente, de 0,9 e 1,0 mm, serviram como metais de adição. Em todas as soldas, a proteção gasosa foi realizada pela mistura 75%Ar-25%CO₂, na vazão de $2,1 \times 10^{-4}$ m³/s (12,5 l/min). A Tabela 4.1 apresenta a composição química dos aços e arames-eletrodos utilizados, conforme certificado de fornecimento pelos fabricantes.

Tabela 4.1 - Teores dos elementos químicos extraídos dos C. A. dos fornecedores (% em peso)

Elementos químicos	Metal de base		Arame-eletrodo	
	ASTM A36	CSN Civil-300	AWS ER70S-6	AWS ER70S-3
C	0,1100	0,1470	0,095	0,090
Si	0,0150	0,0080	0,975	0,638
Mn	0,3880	0,5730	1,478	1,033
P	0,0130	0,0130	0,012	0,018
S	0,0760	0,0110	0,011	0,013
Al	0,0360	0,0430		
Cu	0,0060	0,0050		0,155
Ni	0,0040	0,0070		
Cr	0,0170	0,0120		
Mo	0,0010	0,0030		
V		0,0020		
Nb	0,0002	0,0020		
Ti	0,0010	0,0040		
N	0,0015	0,0044		
Sn		0,0030		
B		0,0002		
Ca		0,0000		

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Procedimentos de soldagem

Com o intuito de simular a realidade da soldagem de barras que são emendadas nas indústrias de estruturas metálicas, os CPs devem representar o completo seccionamento em duas metades sem apresentar desalinhamento, permitindo uma fresta constante e para isto foram preparadas juntas idealizando o processo de soldagem que acontece dentro da indústria, como será descrito logo em seguida.

Depois do preparo das juntas, a soldagem foi realizada pelo processo MAG convencional utilizando a fonte de soldagem EUTECTIC-PULSE 3000, com deslocamento da tocha feito por um braço robótico Motoman UP6 e controlador YASNAC XRC, especialmente adaptado e programado, através de algoritmo estruturado constituído de linhas de comando apropriado, para realizar as operações de soldagem em único passe, conforme indicado na Figura 4.1 e 4.2.



Figura 4.1 - Acoplamento do braço robótico e tocha de soldagem



Figura 4.2 - Procedimento de soldagem

A programação do robô se inicia, com o controlador no modo manual utilizando o painel de comando na posição de translação com os eixos dos motores livres para deslocá-lo como necessário para cumprir todo trajeto, consecutivamente montando as devidas linhas de comando que o robô executa. Também é imposto o momento de abertura do arco e os comandos do trajeto em linhas retas e curvas, com sua devida velocidade de soldagem. A extensa programação da sequência de soldagem pode ser vista de forma parcial na figura 4.3.

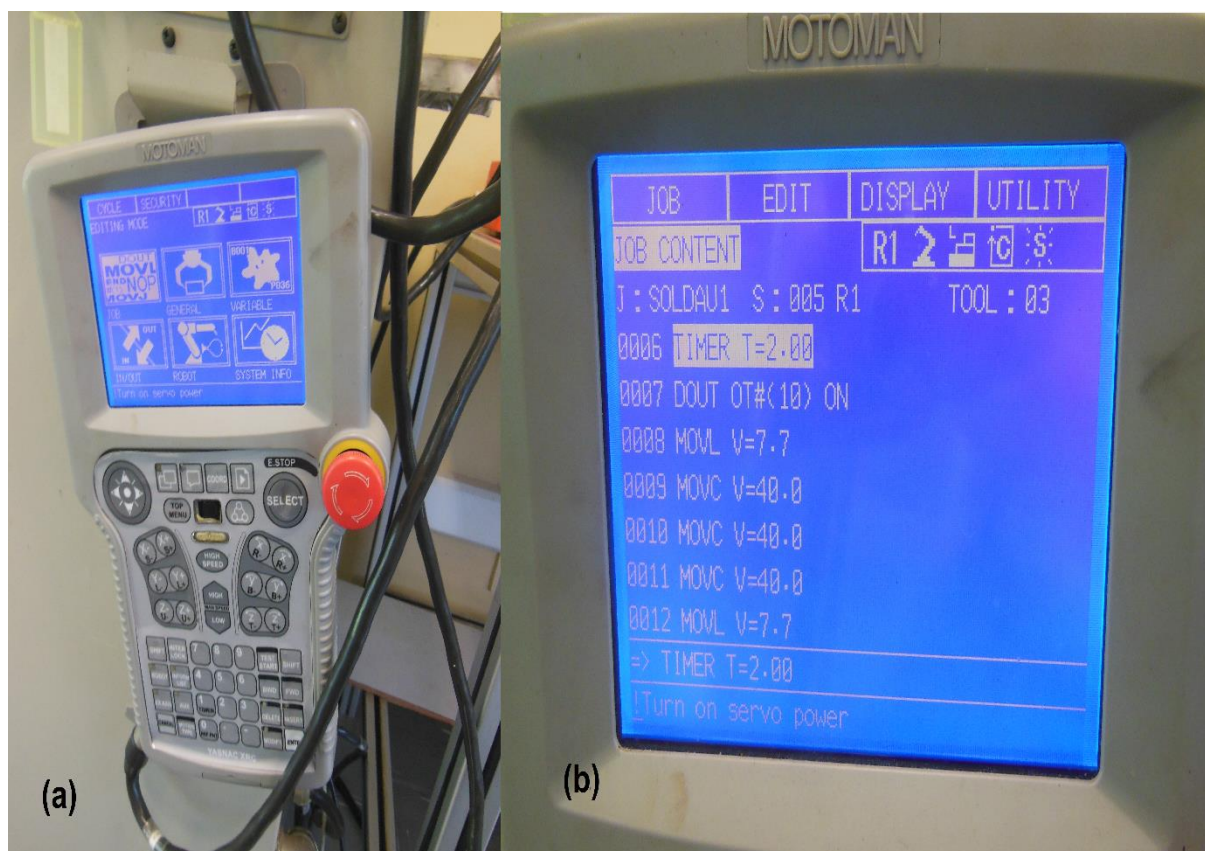


Figura 4.3 – Algoritmo da programação do robô para executar o procedimento de soldagem, sendo (a) caixa de programação do controlador YASNAC XRC e (b) programação parcial da sequência de soldagem.

Com os perfis de chapa de aço dobrado tipo “U” nas dimensões de 100x50 mm e comprimento de 170 mm definido de forma adequada para extrair os corpos de prova. Antes de se iniciar o deslocamento da tocha programado para o sentido anti-horário, as juntas de solda foram preparadas, com o seccionamento transversal por serra manual e montadas de topo, fixando a fresta média em 1,2 mm, como pode ser observado na Figura 4.4.

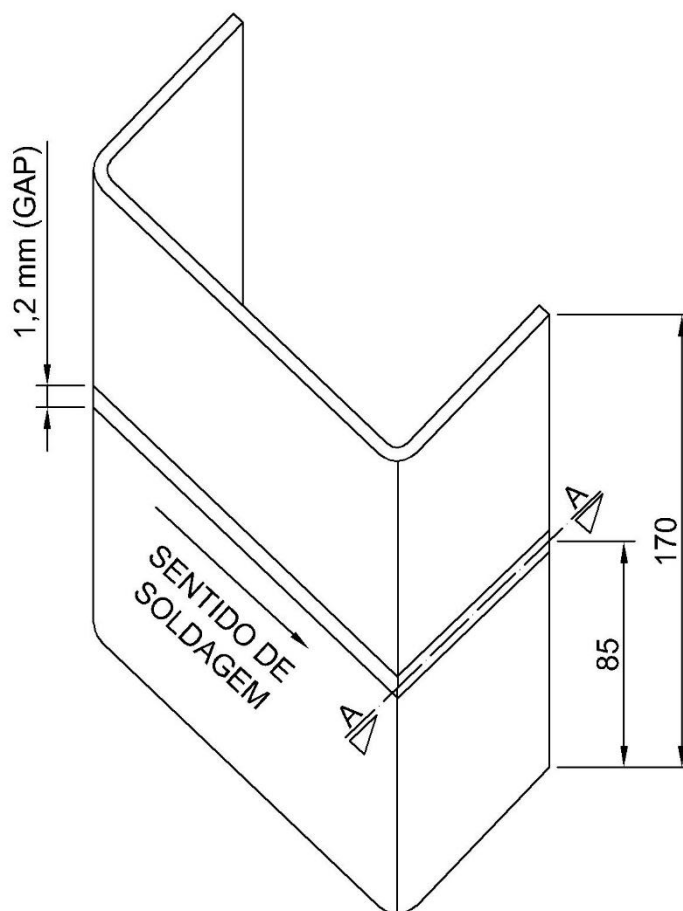


Figura 4.4 – Preparação e posicionamento padrão das juntas

Para isto, foi imprescindível recursos que mantenham os perfis como outrora, sem serem cortados. Então quatro grupos de corpos de prova foram separados pelo tipo de preparação de junta de soldagem. O primeiro com união precedente com três pontos de solda, voltados sempre para o interior do perfil deixando livre a passagem do arame-eletrodo pelo lado externo, sendo dois nas extremidades e um no centro do desenvolvimento do perfil. O segundo grupo, da mesma forma que o primeiro, tem a adição de dois pontos de solda nas curvas, totalizando cinco pontos de solda. O terceiro, devido ao seccionamento total foi elaborado um dispositivo metálico que serve de gabarito sobre a mesa de soldagem. Utilizou-se também um quarto tipo de junta, denominada experimental, que consistiu em seccionar transversalmente o perfil dobrado, deixando-o unido apenas por um pequeno elemento de material no meio da superfície superior e nas extremidades das superfícies laterais. Assim, quatro condições diferentes de juntas para serem analisadas após o procedimento de

soldagem, foram preparadas com a finalidade de conservar o perfeito alinhamento das metades.

A Figura 4.5 ilustra esquematicamente a configuração da montagem das juntas com e sem os pontos de soldas e da junta experimental com o seccionamento feito no perfil "U".

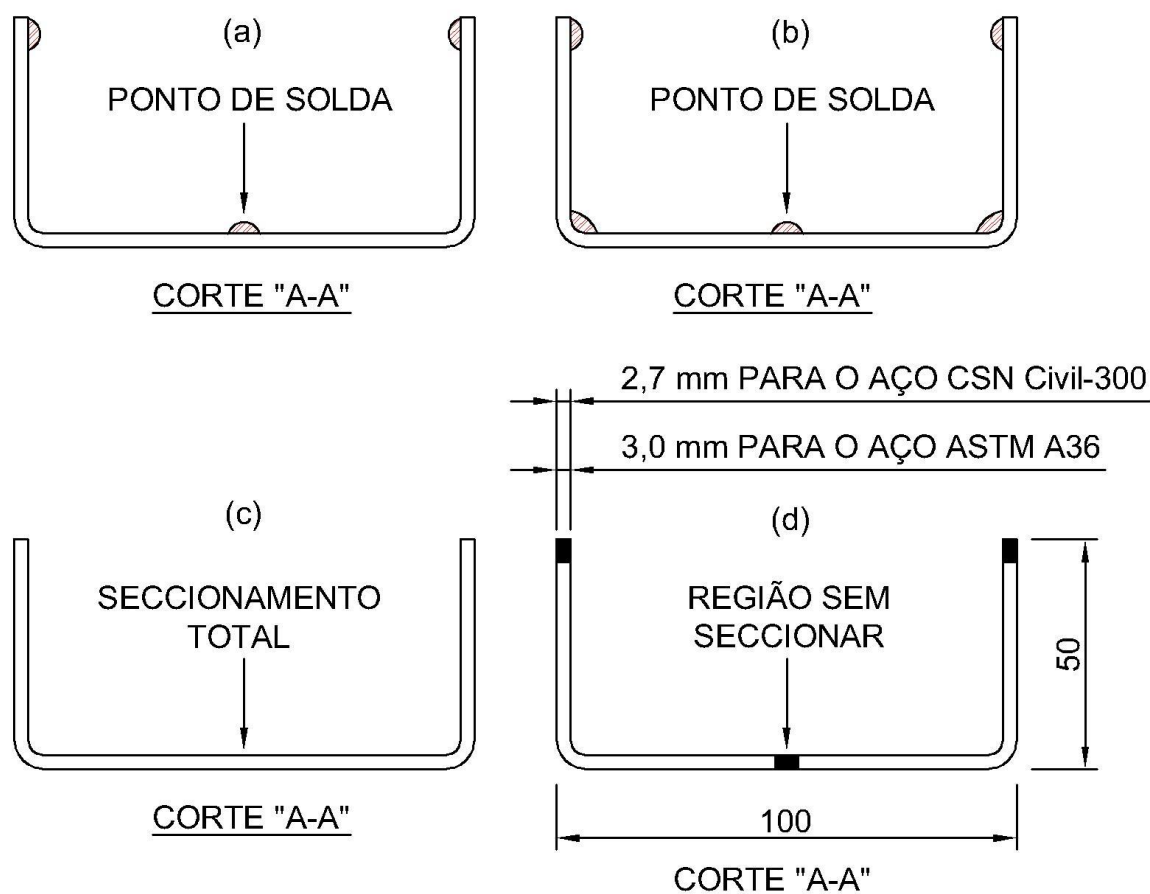


Figura 4.5 - Preparação das juntas para o procedimento de soldagem
Corte "A-A", é seccionamento passando através das juntas sendo: a) junta preparada com três pontos de soldas, b) Junta preparada com cinco pontos de soldas, c) junta seccionada sem ponto de solda e d) junta experimental preparada mostrando os elementos de união mantidos no seccionamento

Nessas condições, foram então montadas quatro conjuntos de amostras com vinte juntas para cada par metal de base com dois tipos diferentes de consumíveis, contemplando cinco repetições por condição de soldagem e assim, totalizando oitenta juntas para soldagem, como se depreende pelas informações contidas na Tabela 4.2, formando dois grupos de amostras A e B. Em síntese os grupos A e B contém quarenta juntas para soldagem cada um.

Tabela 4.2- Codificação e quantificação dos corpos de prova para soldagem

Metal de base	Cód.	Arame-eletrodo	Cód.	Tipo junta	Cód.	Repetições
ASTM A36	A	AWS ER70S-6	1	3 pontos de solda	1	5
				5 pontos de solda	2	
				Sem ponto de solda	3	
				Experimental	4	
	A	AWS ER70S-3	2	3 pontos de solda	1	5
				5 pontos de solda	2	
				Sem ponto de solda	3	
				Experimental	4	
CSN Civil-300	B	AWS ER70S-6	1	3 pontos de solda	1	5
				5 pontos de solda	2	
				Sem ponto de solda	3	
				Experimental	4	
	B	AWS ER70S-3	2	3 pontos de solda	1	5
				5 pontos de solda	2	
				Sem ponto de solda	3	
				Experimental	4	

Durante a execução das soldas, os valores instantâneos da corrente e tensão de soldagem e a velocidade de alimentação do arame-eletrodo, foram compilados por meio do sistema de aquisição e processamentos de dados SAP-V4.23-IMC. A Tabela 4.3 apresenta esses números em termos de valores médios.

Tabela 4.3 – Valores médios dos parâmetros de soldagem

Conjunto de amostras	U_s (V)	I_s (A)	V_a (mm/s)	V_s (mm/s)
A1	20,51	160,58	108,30	10,00
A2	22,65	143,87	108,30	7,70
B1	19,72	151,97	108,30	10,00
B2	22,39	144,07	108,30	7,70

U_s, I_s, V_a e V_s, são, respectivamente, tensão, corrente, velocidade de alimentação do arame-eletrodo e velocidade de soldagem

No Apêndice 8.1 constam os valores médios e eficazes da corrente e tensão de soldagem para cada conjunto de amostras. Também, os oscilogramas dessas grandezas, estão registrados para cada junta soldada durante o período de arco aberto. Com a regulagem e a seleção do programa, para o processo de soldagem, devidamente escolhido na máquina de soldagem em função do tipo de material, diâmetro do arame-eletrodo e tipo do gás de proteção que foram fixados, bem como

a velocidade de alimentação do arame-eletrodo, foram os requisitos que permitiram a constância da densidade de corrente nos arames-eletrodos em 205 A/mm².

4.2.2 Análises químicas

As análises químicas dos metais de solda obtidos foram realizadas no Laboratório de Qualidade da Jacto Fundição, localizado na cidade de Quintana-SP, por meio de um espectrômetro de emissão ótica Spectro Max-x.

Nessa análise, utilizou-se uma amostra por condição de soldagem, totalizando 16 amostras, como explicitado na Tabela 4.2 do item 4.2.1. Essas amostras foram preparadas pela prática metalográfica convencional (embutimento em baquelite, lixamento na sequência 120,220,320,400,500,600 e 1200, polimento e ataque químico superficial reagente com nital 2%), a fim de localizar precisamente o centro do cordão de solda e metal de base, objeto da análise.

4.2.3 Avaliação das distorções nas juntas soldadas

A avaliação das distorções devido à soldagem foi realizada pela técnica da sobreposição das imagens da junta, antes e depois da solda. Para isso, coletou-se uma miríade de pontos superficiais em toda a junta, a partir das imagens produzidas por um escâner “Matter and Form” tridimensional portátil de base giratória. Os dados assim coletados permitiram fazer a remontagem e a sobreposição das imagens das juntas, utilizando o aplicativo computacional de análise de superfícies Atos Professional V.75S41. Com os escaneamentos e medidas vetoriais dos pontos extremos de todos os corpos de prova, foram selecionados, aleatoriamente, um de cada conjunto amostral, totalizando quatro medições de corpos de prova para serem processadas as distorções tridimensionais. A Figura 4.6 traz como ilustração a imagem de um corpo de prova soldado, copiado por escâner.

Para melhorar a resolução da imagem escaneada e evitar o reflexo do feixe de laser na captura da nuvem de pontos na superfície metálica do corpo de prova, foi aplicado graxa uniformemente, como fixador de talco que borrifado formou camada homogênea, preservando o material e favorecendo a posterior limpeza.



Figura 4.6 – Captura tridimensional da nuvem de pontos para gerar o corpo de prova por escaneamento

4.2.4 Avaliação da corrosão nas juntas soldadas

Para realizar a simulação do que ocorre nas estruturas metálicas quanto a corrosão, foi feita a análise evolutiva do processo corrosivo acelerado, utilizando um equipamento de névoa salina Haida HD-120A-1, disponível no SENAI de Lençóis Paulista, onde as amostras utilizadas passaram primeiramente por pesagem em balança de precisão e depois inseridas na câmara de ensaio para exposição em nevoa salina com solução NaCl 5%, em temperatura de 35 ± 2 °C, durante 189 horas. Após esse tempo, as amostras foram limpas com água e secas em estufa a 40°C por aproximadamente 20 minutos e pesadas outra vez para determinar a perda de massa ocorrida.

A resistência à corrosão das juntas soldadas, particularmente na zona de fusão e seu entorno, foi avaliada através do ensaio de corrosão acelerada por névoa salina, em consonância com a norma ASTM B117.

Para tanto, inicialmente os perfis “U”, soldados, foram limpos por jateamento abrasivo com granalha de aço em procedimento padronizado pela Norma Técnica Sabesp (NTS) 185/2002. Em seguida, conforme ilustra a Figura 4.7, no comprimento

da junta foram retiradas três amostras por meio do corte transversal, com a amostra central contendo o cordão de solda e as outras duas, superior e inferior, portanto, sem a solda, representativas do metal de base da junta. Este procedimento foi necessário para estabelecer a condição comparativa da influência do processo de corrosão acelerada na junta do cordão de solda. Ainda assim, foi indispensável bipartir longitudinalmente essas amostras, a fim de propiciar corpos de prova dimensionalmente adequados para serem inseridos na câmara de ensaio.

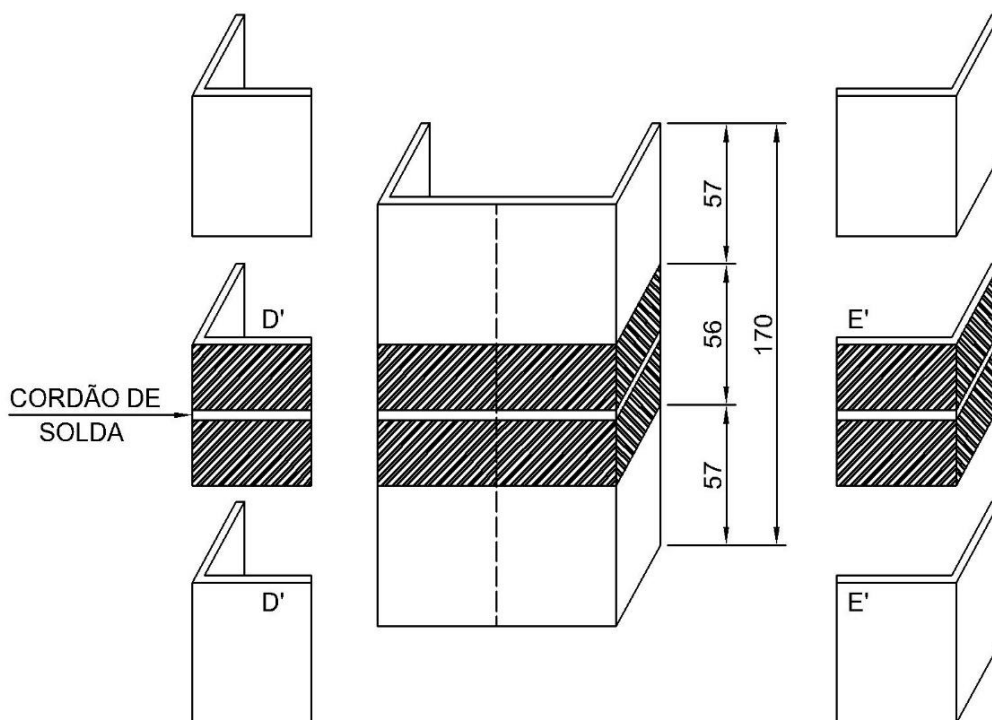


Figura 4.7 – Seccionamento dos corpos de prova para teste de corrosão

A Figura 4.8 apresenta o registro fotográfico de um corpo de prova oxidado, que foi preparado antes para o ensaio.



Figura 4.8 – Imagem do teste de corrosão no corpo de prova B146ECS

Evidentemente, observa-se que nessa etapa houve a necessidade de ampliar a codificação inicial. Sendo realizado um seccionamento longitudinal das amostras, foram acrescentadas as letras (D`) e (E`), significando, respectivamente, aba direita e aba esquerda da junta soldada, pela vista interna do perfil. E na sequência, com os cortes transversais próximo e paralelos a junta soldada, as amostras contendo o cordão de solda foram identificadas pela sigla CS (com solda), enquanto das outras quatro, duas, indistintamente, por SS (sem solda) e que assim se constituíram os corpos de prova.

4.2.5 Avaliação macroestrutural das juntas soldadas

Para a preparação das amostras utilizadas na avaliação macroestrutural foi, novamente, utilizada a convencional prática metalográfica, consistindo no embutimento em resina acrílica, lixamento na sequência 120,220,320,400,500,600 e 1200, polimento com alumina de granulação 1 μm e ataque químico feito com a solução aquosa composta de 15 ml de ácido clorídrico, 10 ml de ácido acético e 10 ml de ácido nítrico.

Quanto à caracterização macroestrutural das soldas, com as fotomicrografias digitalizadas das seções transversais das juntas soldadas, foi utilizado o aplicativo AutoCAD para calcular as regiões pertinentes do cordão de solda. Assim, foram determinadas, para cada condição de soldagem, as larguras dos cordões de solda, as dimensões das ZACs, a penetração e obter a diluição da solda no metal de base, onde essa última expressa em (%) e dada pela relação entre a área de penetração e a área total do cordão de solda; as medidas referentes à seção transversal das juntas foram tomadas em mm.

As amostras utilizadas nos ensaios para avaliação macroestrutural, incluindo as medidas de microdureza e análises químicas dos metais de soldas, foram retiradas da superfície superior das juntas, como está esquematizado na Figura 4.9.

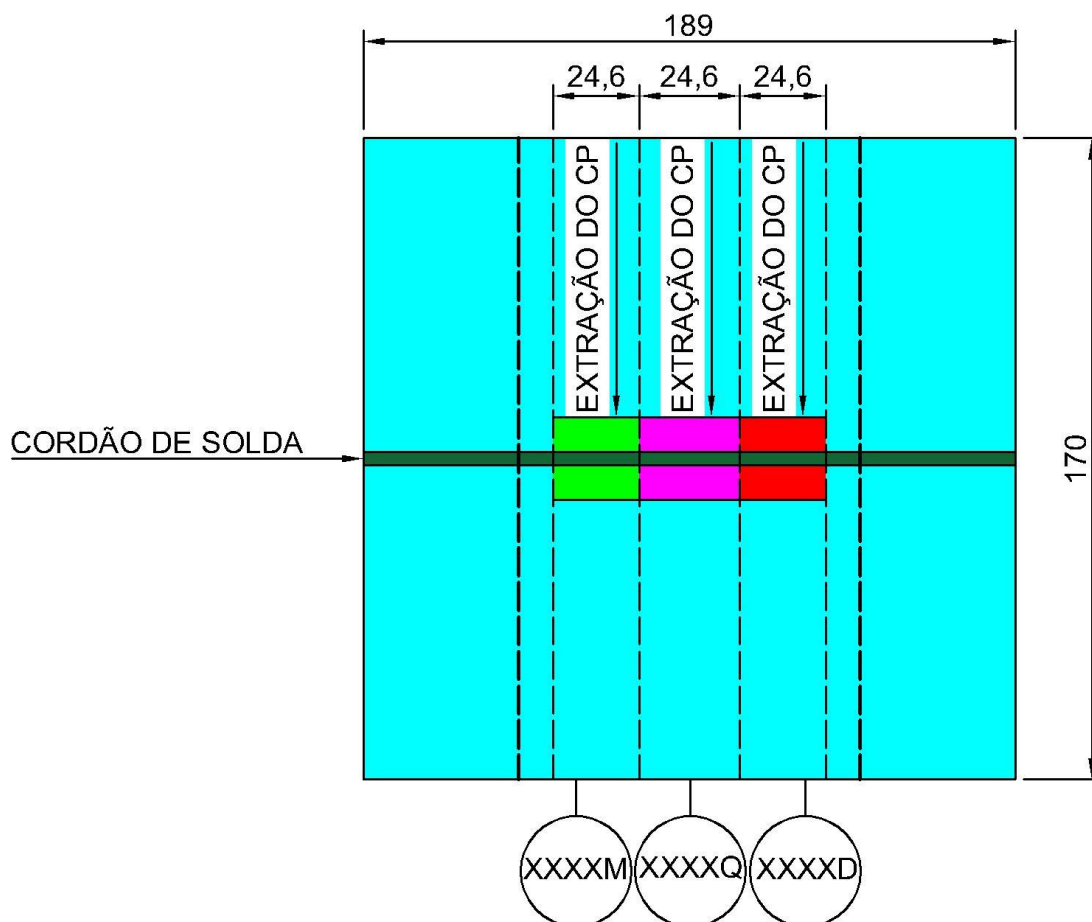


Figura 4.9 – Seccionamento dos corpos de prova para os respectivos ensaios de macrografia, análise química e microdureza

Legenda de marcação dos corpos de prova:

- Área de usinagem descartada.
- CP para fotomicrografias.
- CP para análise química.
- CP para medição de microdureza Vickers.

Sendo que, os quatro primeiros dígitos (“xxxx”) identificam os corpos de prova, marcados conforme descrito na tabela 4.2 e o quinto dígito se refere ao ensaio realizado (“M” – macrografia, “Q” – análise química e “D” - microdureza).

4.2.6 Medidas de microdureza

Foram preparadas amostras com a mesma prática metalográfica convencional usada na macrografia com exceção do ataque químico reagente na superfície, que foi o nital 1%.

Para realização das medidas de microdureza, com o Microdurômetro Digimess HV-1000 acessível no laboratório de engenharia mecânica, foram selecionadas, aleatoriamente, 16 amostras, sendo escolhida uma para cada conjunto.

Mensurou-se a microdureza pelo método Vickers aplicando carga 1,0 Kgf, com distância entre pontos de 0,25 mm, formando três faixas no sentido transversal da junta soldada, resultando um vasto conjunto de valores medidos percorrendo o metal de base, a ZAC e a zona de fusão, como mostra a Figura 4.10. No Apêndice 8.2 consta a tabela das médias de microdureza.

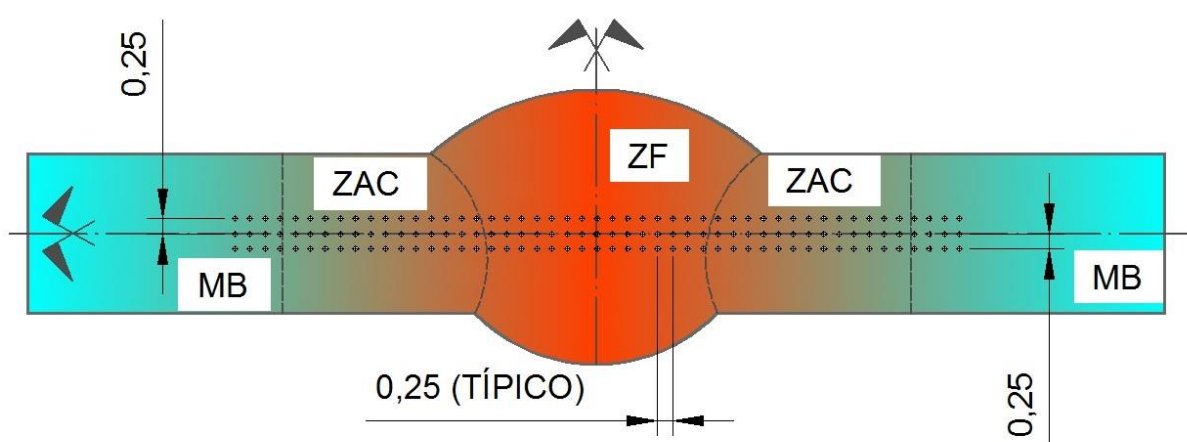


Figura 4.10 – Disposição dos pontos das medidas de microdureza na amostra

Com as medidas de microdureza tabuladas, utilizou-se o aplicativo “GeoGebra” versão 5.0, como ferramenta para análise estatística dos dados e geração da curva média dos conjuntos de amostras A1, A2, B1 e B2, codificadas na tabela 4.2. Onde, o aço ASTM A36 pertence aos conjuntos A1 que utilizou o arame-eletrodo AWS ER70S-6, como o AWS ER70S-3 para o A2 e assim sucessivamente para o aço ARBL CSN Civil-300 pertence aos conjuntos B1 e B2.

5 RESULTADO E DISCUSSÃO

5.1 PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM

Os resultados do processo de soldagem, estão representados na Figuras 5.1.



Figura 5.1 - Procedimento de soldagem elaborado no conjunto de amostras A1

Tendo em vista que o processo de soldagem atualmente, praticado nas indústrias de estruturas metálicas é o semiautomático; torna-se uma inovação a inserção do braço robótico, nos processos de soldagem de estruturas metálicas, devido a diversos fatores. Fatores como o primordialmente, econômico, em que os investidores querem vislumbrar o retorno do lucro exponencial em curto prazo. Outra questão é, a falta de padronização dos produtos, que torna a aplicação do robô um fator complicativo, nos setores de soldagem. A implantação de robô nos setores mal planejados, exigirá com certeza de reengenharia porque se trata de inúmeras as posições e sequencias de soldagem que os soldadores executam. As linhas de produção deverão estar logicamente posicionadas de modo que não pulem processos.

A aplicação iniciante, para as indústrias candidatas a robotização são as emendas inevitáveis, básicas e necessárias de perfis que dão continuidade da peça estrutural dos projetos a serem executados no setor fabril.

Neste trabalho foram produzidas durante o processo de soldagem, soldas uniformes e padronizadas com velocidades constantes que manteve o tempo de 18,7 s. Não ocorreu perda de consumível e os volumes de deposição também foram constantes, confirmando a alta taxa de produtividade do processo MAG. A velocidade de soldagem adotada, atendeu perfeitamente ao estudo proposto.

Com respeito, a geração de respingo, foi praticamente inexistente o que dispensa o uso de anti-respingo, quando se mantém o DBCP (distância do bico de contato da peça de trabalho) bem controlado dentro de 12 vezes o diâmetro do arame-eletrodo.

Outro aspecto, que é motivo de muitas pesquisas está no ruído produzido durante o processo de soldagem com o arco aberto, que permaneceu em torno de 85 DB, como um zunido de abelhas, sendo cadenciado e ininterrupto como mostra o exemplo da curva de onda da corrente na Figura 5.2.

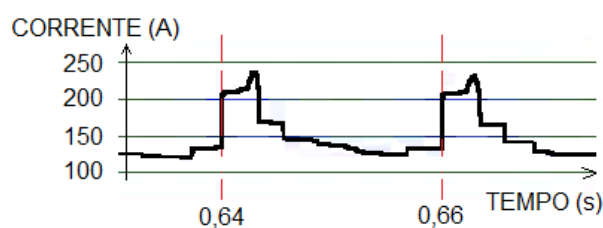


Figura 5.2 - Forma de onda típica do processo de soldagem

Reproduzindo o arco aberto de altura média de 1 mm, verificado durante a soldagem, o tempo de resfriamento da peça, após soldagem, foi na média de 20 minutos, para atingir um pouco mais que a temperatura ambiente, em torno de 27 °C.

A programação do robô, para executar o percurso de soldagem, manteve a posição do arame-eletrodo no centro da linha da fresta e conservou as características da soldagem linear equivalente a curvilínea.

Outra questão importante, é a disposição correta dos equipamentos e acessórios integrados ao robô, de modo que permitiu o melhor funcionamento da integração. Pois como, no caso foi escolhido a posição horizontal de soldagem com a tocha reta, foi necessário a fixação da posição do equipamento de soldagem de forma que a mangueira da tocha permanecesse espacialmente alinhada em todo o percurso de soldagem. Também o comprimento da mangueira foi bem adequado, sem promover o estrangulamento, principalmente nos movimentos curvos, não agravar o

efeito hélix na saída do arame-eletrodo, principalmente quando se trabalha com consumível em bobina de 1 kgf.

Com tudo isso o procedimento de soldagem não produziu interrupção nos cordões de solda.

5.2 ANÁLISES QUÍMICAS

A Tabela 5.1 apresenta os valores médios, avaliados pela espectrometria, dos elementos químicos presentes no metal de solda e base, dos conjuntos de amostras.

Espectrometria utilizada pelo método de emissão óptica em plasma, arco e centelha de Argônio com acoplamento Indutivo nas amostras.

Tabela 5.1 - Teores dos principais elementos químicos existentes nos materiais (% em peso)

Elementos químicos	Metal de base		Metal de solda			
	ASTM A36 Grupo A	CSN Civil-300 Grupo B	AWS ER70S-6		AWS ER70S-3	
			A1	B1	A2	B2
C	0,1000	0,1000	0,09	0,08	0,09	0,09
Si	0,0400	0,0400	0,60	0,53	0,32	0,27
Mn	0,4900	0,5700	0,86	0,70	0,75	0,66
P	0,0200	0,0200	0,02	0,01	0,02	0,02
S	0,0200	0,0200	0,03	0,02	0,02	0,02
Cr	0,0200	0,0200	0,01	0,01	0,02	0,01
Ni	0,0100	0,0100	0,01	0,01	0,01	0,01
Al	0,0500	0,0400	0,01	0,02	0,02	0,02
Cu	0,0200	0,0100	0,04	0,04	0,09	0,07
Mo	0,0000	0,0000				
Sn		<0,0010				
Nb	0,0001	0,0020				
V	0,0000	0,0020				
Ti	<0,0010	<0,0010				
B		<0,0050				
N	0,0015	0,0044				
Ca		0,0011				

Estes resultados comparados com a tabela 4.1 foram diferentes pelo fato de se tratarem de valores normatizados, com os reais. Porém dentro dos intervalos normativos.

Referente ao metal de base, foi observado que o teor de C apresentou a média geral de 0,10%, para ambos os aços e, o teor de Mn obtido, para o aço ASTM A36, foi o valor de 0,49% e para o aço CSN Civil-300 o valor de 0,57%; o que aumenta o risco no surgimento de trincas devido a presença do Mn. O elemento de liga presente, como Al, apresentou média percentual em massa, nos aços ASTM A36 igual a 0,05%. Por outro lado, o aço CSN Civil-300, apresentou a média de 0,04%. Com isso evidencia a diferença discreta no percentual de alumínio, como elemento antioxidante que pode conduzir a melhora da resistência a corrosão.

Simultaneamente para o metal de solda, os teores de C e Mn, diluídos no metal de base, apresentaram médias de 0,09% e 0,86% para o aço ASTM A36, com a utilização do arame-eletrodo AWS ER70S-6, contudo o arame-eletrodo AWS ER70S-3 conservou a taxa de carbono e presenciou um decréscimo de manganês com 0,75%. Mas as taxas de Mn foram superiores às do metal de base, o que pode levar ao surgimento de trincas. No aço CSN Civil-300, utilizando o arame-eletrodo AWS ER70S-6, o carbono apresentou 0,08% e o manganês 0,70%; semelhantemente, para o arame-eletrodo AWS ER70S-3, que conteve pequena variação no teor de C e o Mn diminuiu para 0,66%, demonstrando boa compatibilidade com o aço estrutural.

Do mesmo modo, para os elementos de liga, como Cr e Cu, apresentaram valores médios de 0,02% e 0,09%, para o aço ASTM A36, utilizando o arame-eletrodo AWS ER70S-3, sendo que com o arame-eletrodo AWS ER70S-6 houve redução de aproximadamente de 50% para estes elementos na diluição, o cromo para 0,01% e o cobre para 0,04%. Ao contrario no caso do aço CSN Civil-300, com uso do eletrodo AWS ER70S-6, o Cr manteve-se, tendo variação no teor Cu, quando se alterou o arame-eletrodo AWS ER70S-3, havendo adição na diluição de 0,04% para 0,07%, proporcionando significativa melhora da resistência à corrosão.

Com respeito ao Si, elemento desoxidante, houve um significativo acréscimo na diluição dos arames-eletrodos nos metais de base, sendo que o AWS ER70S-6 atinge os maiores teores, em torno de 0,57% na média geral, tendo efeito negativo na temperabilidade em relação ao AWS ER70S-3 com 0,29%.

Com estes resultados da espectrometria, do metal de solda e base, verificando as condições satisfatórias quanto à comparação geral dos elementos químicos indicados pelo fabricante de ambos. E aplicando os valores reais na equação (3.b),

que melhor explica a soldabilidade para este caso, obtém-se os valores do carbono equivalente (CE), constados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Tabela do carbono equivalente médio (CE) no metal de base

Grupo de amostras	CE real	CE calculado
A	0,20	0,18
B	0,19	0,25

O aço ASTM A36 resultou o valor médio do CE igual a 0,20, ficando próximo das estatísticas do fabricante que é de 0,18, demonstrando valores próximos ao especificado. Enquanto que o aço CSN Civil-300, o CE, ficou aproximadamente 0,19, ficando mais distante do comparado com o fabricante, que fornece 0,25; contudo confirma a eficácia do teste e a boa soldabilidade dos aços, não necessitando nenhum tipo de tratamento térmico para o procedimento de soldagem.

5.3 DISTORÇÃO NAS JUNTAS SOLDADAS

A figura 5.4 exprime a distorção semelhante à Figura 5.3 no aço ASTM A36, as figuras 5.5 e 5.6 demonstram as distorções referente ao conjunto do aço ARBL CSN Civil-300 (no Apêndice 8.3 consta o mapa e as tabelas das distorções dos corpos de prova).

Os resultados das distorções produzidas pelo aplicativo Atos, representa as amostras dos grupos de corpos de prova A1 pela Figura 5.3, A2 pela Figura 5.4, B1 pela Figura 5.5 e B2 pela Figura 5.6.

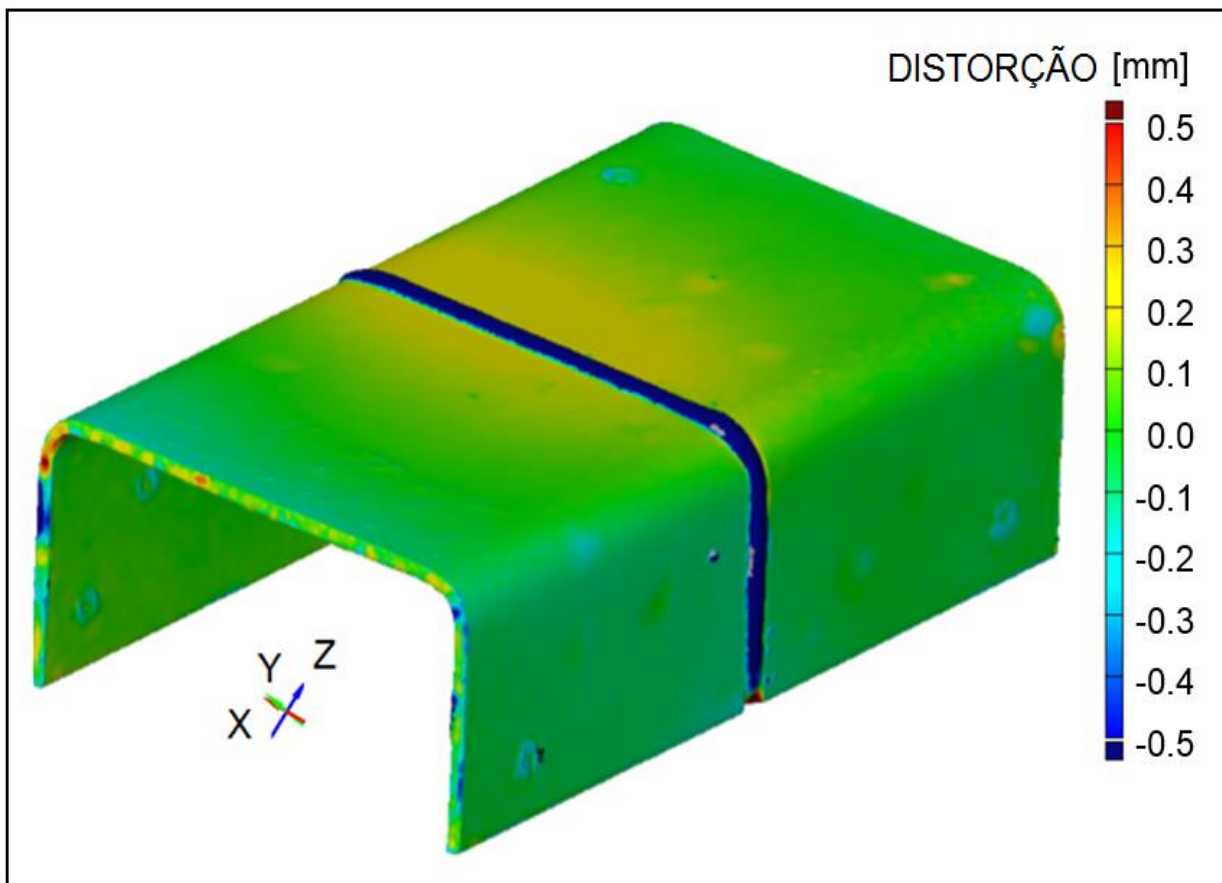


Figura 5.3 – Distorção do corpo de prova A133

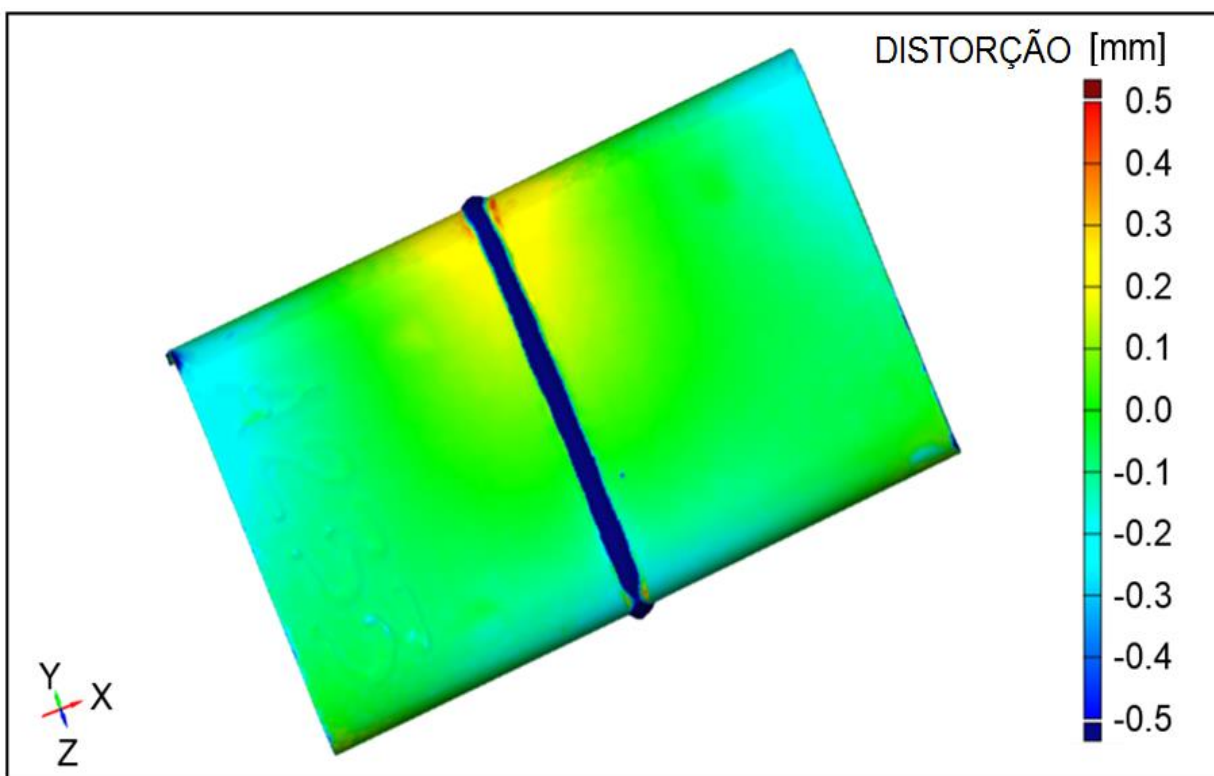


Figura 5.4 – Distorção do corpo de prova A233

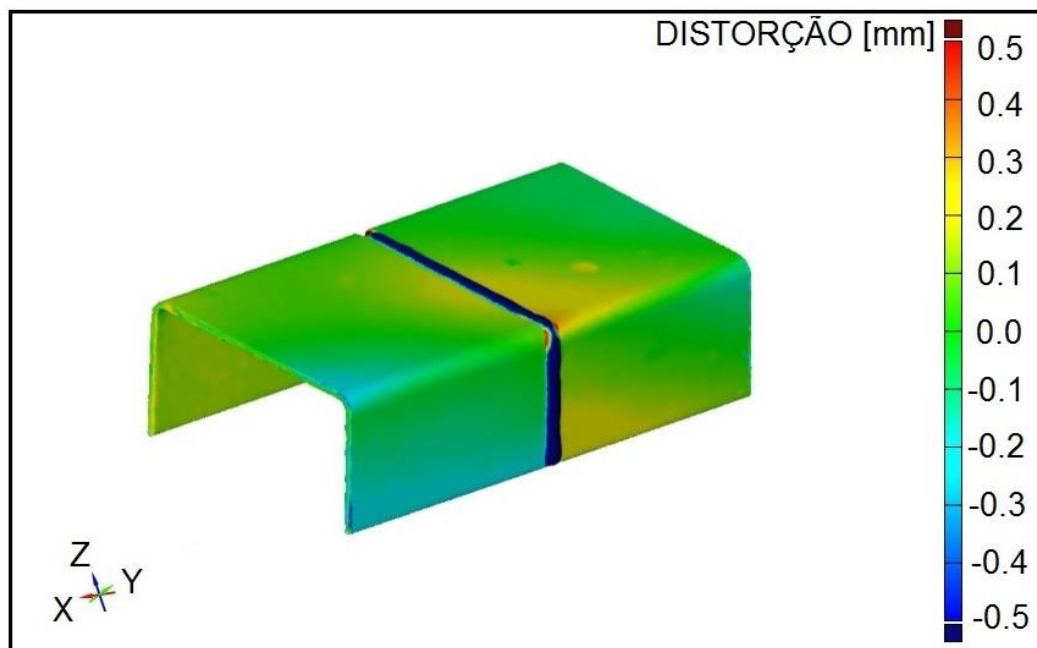


Figura 5.5 – Distorção do corpo de prova B133

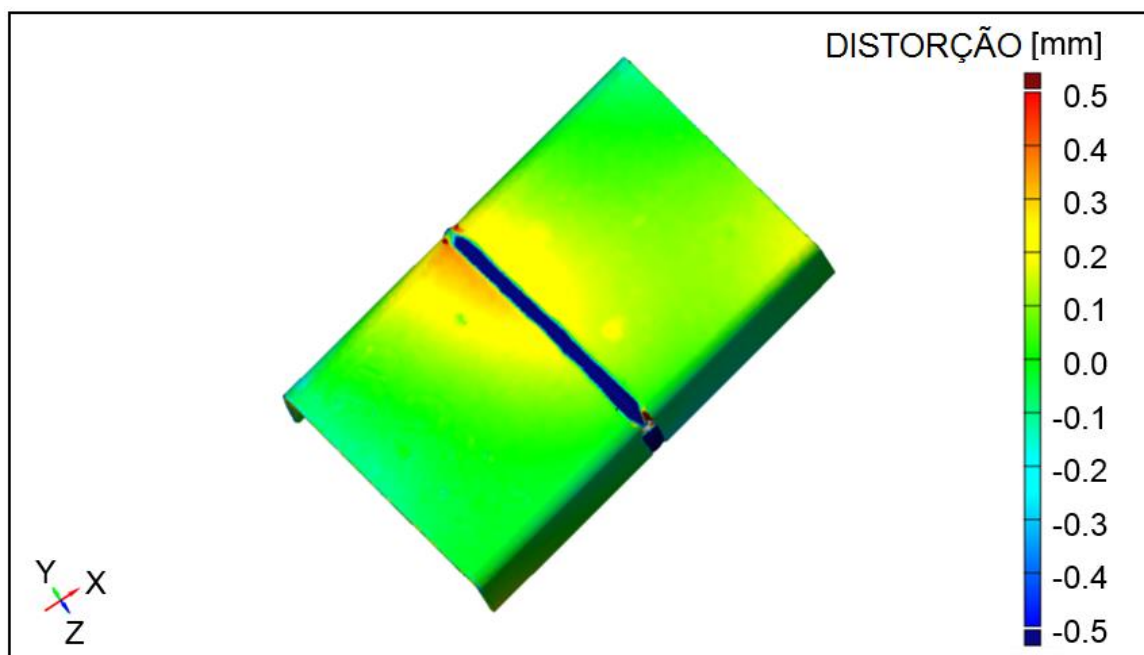


Figura 5.6 – Distorção do corpo de prova B233

As distorções nas amostras foram semelhantes, independentemente do tipo de aço, espessuras, junta ou arame-eletrodo utilizado, isto, provavelmente, devido à única direção de soldagem.

Na distorção, de modo geral, houve um comportamento semelhante para os dois tipos de aços, sendo que o aço CSN Civil-300 com o eletrodo AWS ER70S-6 apresentou acréscimo desprezível de 0,02 mm, sendo que a distorção ocorreu em

uma área maior da amostra, diferente das Figura 5.3 para o aço ASTM A36, tornando-se o menor no centro do perfil.

Na Figura 5.7, contém a distorção representativa dos conjuntos soldados A11, A12, A13, A14, A21, A22, A23, A24, B11, B12, B13, B14, B21, B22, B23, B24; que demonstram as deformações, passando pelo centro longitudinal do perfil. Sendo que estão organizados por tipos de junta e respectivos arames-eletrodos AWS ER70S-6 e AWS ER70S-3 utilizados; onde os conjuntos soldados A11, A21, B11 e B21 são os tipos de juntas com três pontos, A12, A22, B12 e B22 são as amostras com junta de cinco pontos, A13, A23, B13 e B23 são as com tipo de junta seccionada e A14, A24, B14 e B24 são as com juntas experimentais.

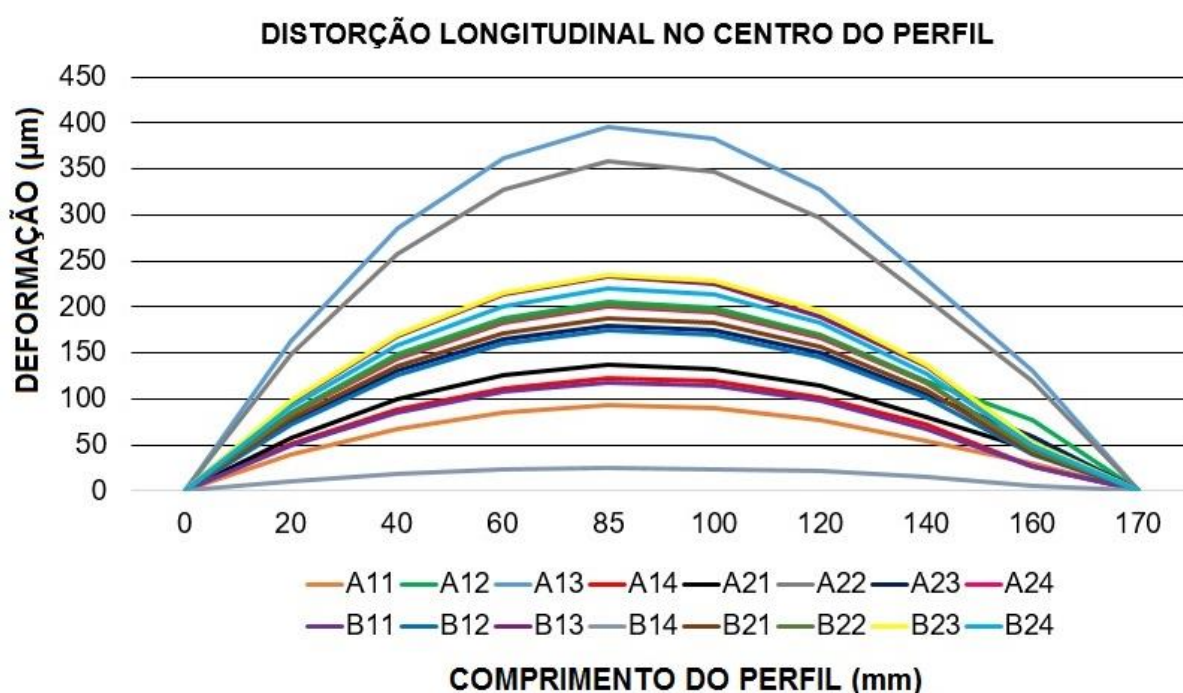


Figura 5.7 – Distorção longitudinal no centro do perfil

Foram compilados os resultados médios da depressão devido à distorção, esquematizada na Figura 5.8, e estão tabelados no quadro 5.3.

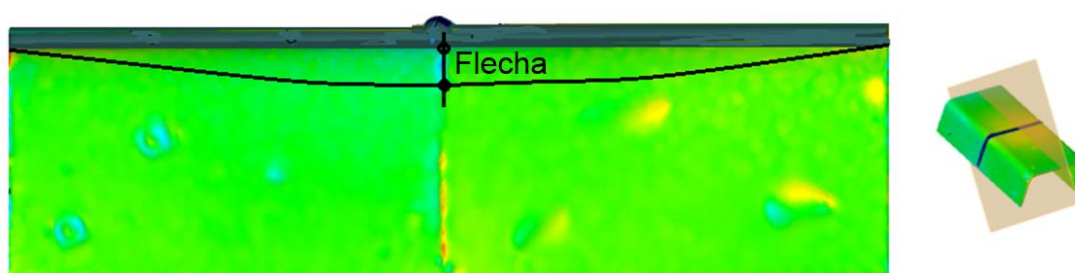


Figura 5.8 – Flexão no corpo de prova

Tabela 5.3 – Valores médios da flexão no perfil devido à distorção

Conjunto de amostras	Flecha (mm)
A1	0,27
A2	0,21
B1	0,40
B2	0,30
Média geral	0,30

Nos grupos dos aços ao carbono ASTM A36 e aços de baixa liga patináveis CSN Civil-300 os resultados das distorções foram discretamente melhores nas amostras com junta de cinco pontos de solda, acredita-se ser pela razão da minimização da deformação da junta pela presença dos pontos de solda, que garante melhor fixação da fresta. A dilatação gerada pelo aquecimento da poça de fusão com a translação da tocha promove a deformação, que encontra obstáculos, dificultando a abertura pelos pontos de solda posterior, logo após o arrefecimento do cordão de solda, causa a retração, que de certa forma também é impedida, também, pelas partes resfriadas.

As abas servem de suporte para distorção, o que leva ao empenamento dos cantos na ordem de 0,4 mm. De modo geral, os grupos dos aços CSN Civil-300 apresentaram discretamente a menor distorção global, as abas apresentaram deformações na ordem de 0,08 mm fora do plano da aba e, na alma, um repuxo de maior dimensão provavelmente por causa da maior capacidade de suporte das abas na ordem de 0,23 mm, que conseqüentemente leva ao empenamento menor de 0,27 mm.

Como o aporte de energia térmica e o tempo de resfriamento da amostra após soldagem está diretamente ligado com a distorção, conforme o exposto nos itens 3.5 e 3.6, o tempo de resfriamento para se atingir a temperatura ambiente foi de 20 minutos medianamente, em contrapartida a entrada de calor é praticamente instantânea e acumulativa pelo limite curto da chapa dobrada impedindo a radiação, que é um fator benéfico para o resfriamento. Com a presença das abas há, por outro lado, uma considerável, recaptura do calor por convecção pelo lado interno da seção. O balanço total de calor entrado é idêntico ao perdido, como é sabido, a ocorrência rápida do aquecimento, e o lento resfriamento causam as deformações. As expansões e retrações são motivadas de forma que mantendo a velocidade de soldagem, resulta no mesmo comportamento de distorção. Logo, pode-se dizer que, há influência nas

condições de deformação, a espessura da chapa usada, o formato de dobramento da chapa estrutural, e o tipo de aço em relação a sua condutividade térmica.

Além disso, somente para registrar, apesar de não ser o caso do estudo, ocorre também alterações macroestruturais durante este processo, potencializadas pelas distorções.

5.4 CORROSÃO DAS JUNTAS SOLDADAS

A tabela 5.4, contém os resultados da aceleração da corrosão pela técnica de aspersão de solução salina, que permaneceram por 189 horas dentro da câmara de exposição.

Tabela 5.4 – Resultados da aceleração corrosiva por névoa salina

Corpos de Prova (ASTM A36) – Grupo A				
CP	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Perda de massa (g)	Equivalência em anos de corrosão
A146DCS	135,39	133,02	2,37	4
A146ECS	131,94	125,98	5,96	
A146DSS	121,11	116,37	4,74	
A146ESS	125,94	123,51	2,44	
A246DCS	113,25	111,17	2,08	
A246ECS	120,75	117,44	3,31	
A246DSS	130,96	127,12	3,84	
A246ESS	127,93	125,71	2,22	
Corpos de Prova (CSN Civil-300) – Grupo B				
CP	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Perda de massa (g)	Equivalência em anos de corrosão
B146DCS	125,38	123,18	2,20	13
B146ECS	120,23	117,41	2,82	
B146DSS	110,40	106,59	3,81	
B146ESS	105,93	103,39	2,54	
B246DCS	108,47	106,66	1,81	
B246ECS	106,54	103,18	3,36	
B246DSS	111,82	107,85	3,97	
B246ESS	115,59	113,47	2,12	

Na câmara, com a ação da névoa salina, verificou-se que o tipo de aço ASTM A36 apresentou menor resistência à corrosão, como era esperado.

Com relação à ruptura da estrutura metálica, pode-se verificar que esta ocorrerá quando os esforços combinados de carregamentos permanentes e acidentais (Q) pela área efetiva (A_f) ultrapasse a tensão de ruptura σ_u , logo existe uma função da área da seção do perfil projetado (A_0) decrescido pela taxa de corrosão na seção (Δ_{acorr}), que no decorrer do tempo onde se atinge o limite de ruptura, como mostra a Figura 5.9. Sendo que Δe , camada da espessura atingida pela corrosão, é proporcional a Δ_{acorr} .

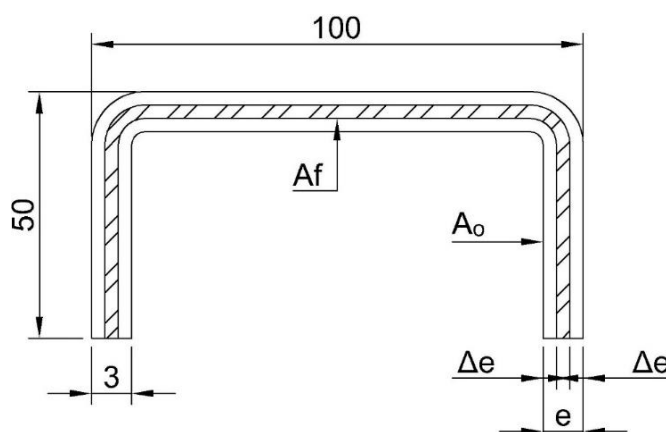


Figura 5.9 - Desenvolvimento da perda de massa nos perfis, ocasionada pela corrosão

$$\lim_{A_f \rightarrow 0} \frac{Q}{(A_0 - \Delta_{acorr})} = \sigma_u \quad (5.a)$$

A equação matemática será satisfeita somente quando a área da seção transversal do perfil A_f for diferente de zero e σ for menor ou igual à σ_u , onde Q se refere ao carregamento nominal em Kgf, A_0 é a área dimensionada para satisfazer as condições do projeto em mm^2 , Δ_{acorr} é a área perdida no decorrer do tempo e σ_u é o limite de resistência a tração em Kgf/mm^2 .

Com os resultados da Tabela 5.4 aplicados à equação (5.b), referente a taxa de corrosão (T_{corr}), resultará a perda de massa na unidade mm/ano - sendo que S_e , δ_a e t_e , respectivamente são, à exposição da área superficial em (mm^2), densidade da amostra em (Kgf/mm^3) e tempo de exposição em (s) - utilizada por Bulan Abdullah (2015, p.62) em seu trabalho de análise de corrosão, pode-se obter o diagrama da Figura 5.10 que, por motivo de escala, foi ajustado para, $\mu\text{m}/\text{ano}$ com a devida conversão.

Assim,

$$T_{\text{corr}} = \frac{8,74 \cdot 10^4 \cdot (\text{peso inicial} - \text{peso final})}{(S_e \cdot \delta_a \cdot t_e)} \quad (5.b)$$

Esta correlação da corrosão com a estrutura metálica, para os aços ao carbono ASTM A36 e aços de baixa liga patináveis CSN Civil-300, está diretamente relacionada com a tensão nominal e de ruptura. Para aplicação da equação (5.b), é necessário conhecer a área ou massa final da seção aplicada no projeto e a taxa de corrosão do aço do diagrama.

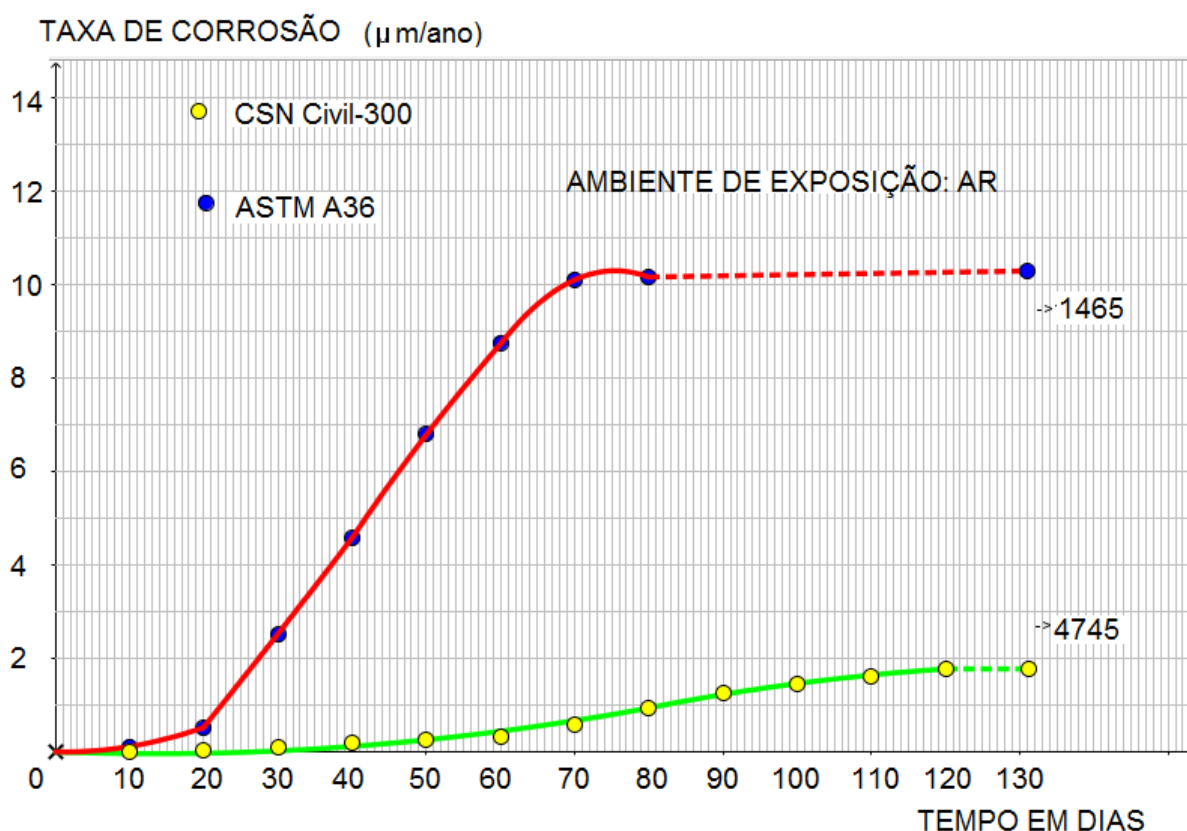


Figura 5.10 - Diagrama da taxa de corrosão no MB, para os aços ASTM A36 e CSN Civil-300

Dado isso, obtém-se as regressões lineares e senoidais pelos dados coletados das curvas de cada tipo de aço, no teste de hipótese com $\alpha = 0,05$ que prevê a vida útil do perfil dobrado em determinada situação.

Para o aço ASTM A36, na linha tracejada, expõe o intervalo até 1465 dias, equivalentes a 4 anos de corrosão, expressos na Tabela 5.2. Logo, a regressão linear deste intervalo segue a função: $-1,333 \cdot 10^{-4} x + 13690 y = 139,627$ para $t(x) > 79$, com

as variáveis x (tempo) em dias e y (taxa de corrosão) em mm/ano, sendo $T_{\text{corr}}(y) \neq 0$; relacionando a taxa de corrosão na equação (5.c).

$$T_{\text{corr (A36)}} = \frac{139,63 + 1,33 \cdot 10^{-4} t}{13690}, \text{ para } t > 79 \quad (5.c)$$

Pelo contrário, a função senoidal, $f: y = 5,02 \cdot 10^{-3} + 5,18 \cdot 10^{-3} \text{ sen}(4,48 \cdot 10^{-2} x - 1,88)$, válido para $x \neq 0$ no intervalo de $0 < x \leq 79$, pois qualquer que for o tipo de aço, a perda de massa ocorre a partir do momento que o expõe ao ambiente (origem). Assim relacionando a taxa de corrosão desta curva na equação (5.d)

$$T_{\text{corr sen(A36)}} = 5,02 \cdot 10^{-3} + 5,18 \cdot 10^{-3} \cdot \text{sen}(4,48 \cdot 10^{-2} t - 1,88), \text{ para } t \leq 79 \quad (5.d)$$

Em paralelo, no aço CSN Civil-300, o intervalo na linha tracejada, até 4745 dias, equivalente aos 13 anos, como também pode ser encontrado na tabela 5.2, e é explicado pela taxa de corrosão na regressão linear da função: $y = 1,1 \cdot 10^{-8} x + 1,77 \cdot 10^{-3}$ para $t(x) \geq 118$, sendo $T_{\text{corr}}(y) \neq 0$; obtendo a equação (5.e).

$$T_{\text{corr (Civil-300)}} = 1,1 \cdot 10^{-8} t + 1,77 \cdot 10^{-3}, \text{ para } t \geq 118 \quad (5.e)$$

Semelhantemente a função senoidal: $y = 9,912 \cdot 10^{-4} + 1,04 \cdot 10^{-3} \text{ sen}(2,473 \cdot 10^{-2} x - 2,074)$, válido para $x \neq 0$ no intervalo de $0 < x \leq 118$, onde obtém à equação (5.f) que representa a regressão senoidal.

$$T_{\text{corr sen (Civil-300)}} = 9,9 \cdot 10^{-4} + 1,04 \cdot 10^{-3} \cdot \text{sen}(2,47 \cdot 10^{-2} t - 2,07), \text{ para } 0 < t \leq 118 \quad (5.f)$$

Desta forma, a tensão nominal tenderá sair do regime elástico para o plástico, com a perda gradual de massa. E após a corrosão atingir uma massa final última, a estrutura entrará em colapso e o domínio estatístico de como for o avanço da corrosão influenciará diretamente na proteção superficial, economia e produção fabril.

Analisando os corpos de prova soldados, é notável que há diferença muito discreta no seu comportamento a partir da escala em micron, referente as diferenças de peso. Para interpretação dos resultados, que conduz a reflexão sobre a instalação

do par galvânico, onde a diferença de potencial existente é com certeza maior entre a região do cordão de solda e a ZAC, estabelecendo o ambiente propício a corrosão quando ocorre o contato com a solução salina, como se fosse uma pilha, a corrosão superficial ocorre aceleradamente por este ambiente, assim abre caminho para algumas afirmações. Primeiro que, a corrosão no metal de base é conhecida, e é de forma uniformemente distribuída. Segundo, a composição química do cordão de solda tem maior teor de desoxidante e antioxidante presentes na sua composição, o que aumenta consideravelmente a sua resistência à corrosão. Terceiro, a região da ZAC, que, ficou evidenciado nos testes, que quase a sua totalidade tem comportamento semelhante com o MB, o que ficou considerado assim. Restando então, uma região tão pequena, que liga a ZAC com o MS, que neste contexto induz ser a superfície próxima ao contorno da junta soldada que pode ser a região onde a aceleração da corrosão é maior, induzindo a maior perda de massa. Por mais que não se perceba a diferença de perda de massa entre os corpos de prova sem solda, em uma área com dimensões micrométricas reflete em uma taxa muito alta em perda de massa, o que à torna vulnerável na união soldada, e com certeza é o alvo das atenções em qualquer construção mecânico-metalúrgica que deverá ser cuidadosamente tratada, pois afetará a sua vida útil.

A Figura 5.11 ilustra a taxa de corrosão no cordão de solda, através da compilação e sobreposição das curvas na Figura 5.10.

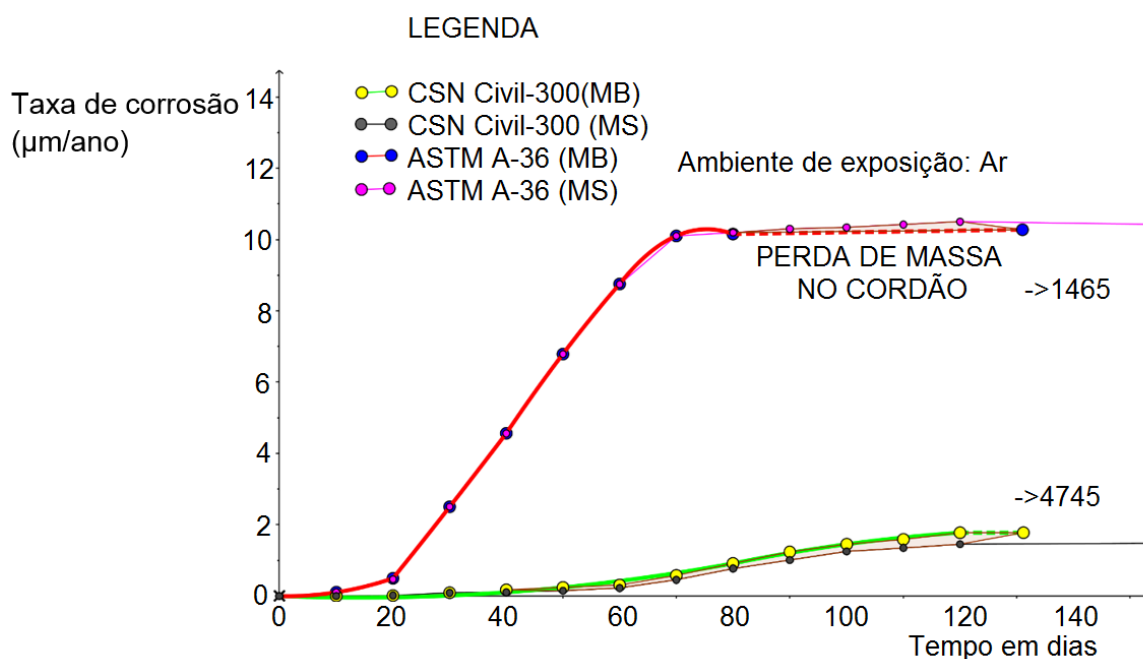


Figura 5.11 – Diagrama da taxa de corrosão no cordão de solda

Assim, percebe-se que o aço ASTM A36 e o CSN Civil-300 não tem influência perceptível pelo tipo de consumível usado sobre a corrosão e sim diretamente pela composição química resultante, porque no primeiro há maior perda de massa no cordão de solda, contrário ao outro, que no infinito tende a se igualar ao metal de base, o que torna o aço ARBL resistente a corrosão mantendo a sua integridade.

A NBR8800 norteia o projeto na teoria elástica do material, não permitindo a plasticidade com grandes deformações que leva a ruptura, o carregamento nominal é combinado e majorado na ordem média geral 1,33 as cargas permanentes com acidentais, onde dá um período de vida útil de preferência em torno de 100 anos. Se a corrosão, com o passar do tempo, absorver toda essa folga da seção projetada (A_0) atingirá fatalmente a área final (A_f) que não suportará mais as cargas nominais.

No decorrer do tempo, a corrosão degrada o material que diminui gradativamente sua área, tendenciando a seção sair do regime elástico para o regime plástico e visualmente ganhando deformações demasiadamente grandes ou na inexistência dela, por outro motivo qualquer, a ruptura instantânea.

O aço imerso num ambiente natural, à temperatura de 25 °C no tempo inicial (t_0), conserva suas propriedades mecânicas com seção de área (A_0), partindo deste instante, a corrosão inicia a partir de um determinado tempo (t_n), sendo n o índice contador, a corrosão acelera até 50 dias, como mostra o diagrama do aço ao carbono ASTM A36, e percebe-se uma desaceleração pela quantidade de perda de um ponto para o outro até chegar a um valor quase constante de saturação de óxidos na superfície. O período de tempo da aceleração e desaceleração é muito pequeno comparado com a longevidade do processo degradativo do material, até o seu consumo mantendo uma taxa de corrosão quase que constante tendo um discreto acréscimo no último ponto com 1465 dias, que quase seria desprezível matematicamente.

Até os quatro primeiros meses, a taxa de corrosão já atingiu praticamente o seu valor máximo para o ambiente estudado.

Com esta redução gradual do peso do material surge um problema quando está sob efeito de cargas permanentes, a tensão nominal (σ_f) passa também por alterações constantes e inevitavelmente acarretará deformações, passando do regime elástico para o regime plástico até a que a resistência à tração leve a ruptura, relacionando-

se com a taxa de corrosão, dependente do tempo e a propriedade do aço como a resistência à tração, onde:

$$\begin{aligned}
 A_0 &= A_0 - \Delta a_0 \rightarrow t_0, \text{ com } \Delta a_0 = 0 \text{ em } t_0 = 0 \\
 A_1 &= A_0 - \Delta a_1 \rightarrow t_1 \\
 &\vdots \\
 A_{n-1} &= A_{n-2} - \Delta a_{n-1} \rightarrow t_{n-1} \\
 A_n &= A_{n-1} - \Delta a_n \rightarrow t_n
 \end{aligned} \tag{5.g}$$

Podendo ser escrito de forma geral:

$$A_f = A_{f-1} - \Delta a_f \rightarrow t_f \tag{5.h}$$

Então:

$$\sigma_f = \frac{Q}{A_f}, \text{ para } \sigma_f < \sigma_u \tag{5.i}$$

Onde A_n em mm^2 , que se trata do somatório de área perdida gradualmente, não linear, pelo tempo decorrido que leva a ruptura do perfil metálico oxidado, A_f representa a área final última em mm^2 , que ainda suporta o carregamento antes da ruptura do material e σ_f é a última tensão nominal resistente em Kgf/mm^2 .

5.5 DESENVOLVIMENTO MACROESTRUTURAL

As fotomicrografias mostradas nas Figuras 5.12 a 5.15, expressam os cordões de solda, resultado do processo de soldagem produzido pelo braço robótico.

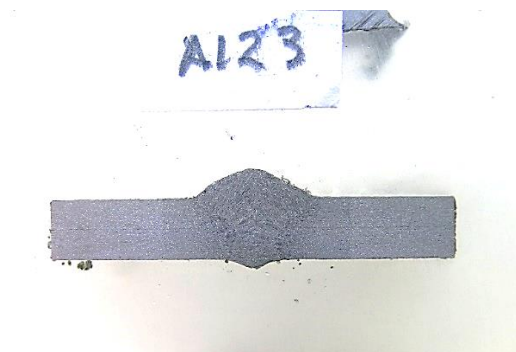


Figura 5.12 – Análise macrográfica do corpo de prova A123



Figura 5.13 – Análise macrográfica do corpo de prova A221



Figura 5.14 – Análise macrográfica do corpo de prova B121



Figura 5.15 – Análise macrográfica do corpo de prova B224

Na elaboração das fotomicrografias, as amostras dos grupos A e B apresentaram cordão de solda com bom aspecto e com penetração, evidenciando o reforço no verso do cordão.

Com respeito a fusão, ocorreram variações; como no grupo B, que estava mais tênue a transição do metal de solda para o metal de base, do que para o grupo A, isto se deu provavelmente, devido ao calor acumulado no giro do robô.

No aspecto das penetrações, o formato de cálice ocorreu predominantemente para os grupos A e B com tendência para a formação “finger”. No grupo A existiu esporadicamente o formato “finger” e a revelação com o ataque de nital 2%, permitiram também as visualizações do cordão de solda, dando o contraste das regiões MB, ZAC e MS (o Apêndice 8.4 mostra as demais macrografias dos corpos de prova).

Com isso a Tabela 5.5, resume as larguras das ZACs medidas, nas juntas de solda através dos aplicativos AutoCad e tabuladas no Excel, para organização dos dados e resultados dos valores médios.

Tabela 5.5 – Larguras médias da ZAC dos cordões de solda (mm)

Amostra	Largura do cordão	ZAC E'	ZAC D'	ZAC E' + ZAC D'
A114	5,36	3,24	3,83	7,07
A123	6,10	3,51	4,08	7,59
A134	5,79	2,82	3,84	6,67
A143	5,66	3,18	3,68	6,87
A211	6,14	3,37	3,59	6,96
A221	6,28	2,93	3,35	6,28
A235	6,49	2,93	3,46	6,39
A245	6,47	2,94	3,70	6,64
B111	5,39	2,94	3,39	6,33
B121	5,26	3,06	4,32	7,38
B133	5,57	2,61	3,46	6,07
B145	4,90	3,33	4,14	7,47
B214	6,96	3,35	4,31	7,65
B224	6,87	3,03	3,95	6,98
B232	7,64	2,50	3,62	6,13
B243	6,55	2,89	3,48	6,37

ZAC E', refere-se a zona termicamente afetada posicionada à esquerda e ZAC D', zona termicamente afetada posicionada à direita

Depois de verificados os valores medidos e calculados as respectivas áreas do cordão de solda, foram aplicados a equação 5.j e tabulados os resultados das diluições das soldas nos metais de base, como mostra a Tabela 5.6, de acordo com o esquema da Figura 5.16.

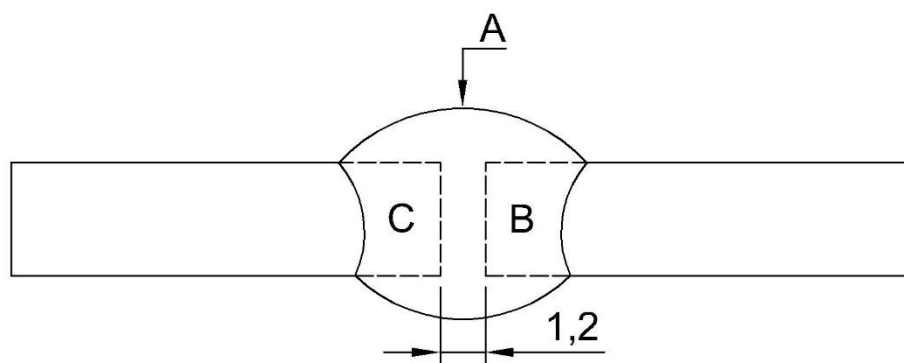


Figura 5.16 – Esquema das regiões para cálculo da diluição da solda

$$D = \frac{(C + B)}{A} \times 100\% \quad (5.j)$$

Onde, as áreas do metal de base C e B dissolvido no metal de solda A, que se refere a área do cordão de solda. Resultando o percentual de diluição da solda D.

Tabela 5.6 – Percentual de diluição da solda nos metais de base

Grupo de amostra A	Diluição %	Grupo de amostra B	Diluição %
A114	44,89	B111	52,17
A123	42,56	B121	41,47
A134	40,70	B133	40,10
A143	41,06	B145	45,96
A211	50,74	B214	51,36
A221	49,24	B224	48,15
A235	39,76	B232	53,74
A245	51,23	B243	51,62

Com o uso do braço robótico, os acabamentos superficiais foram esteticamente similares um ao outro, quase que constantes, com pequenas desigualdades na geometria. O ótimo aspecto é perceptível, com diminutas falhas, mantendo as seção do cordão de solda como especificado nas macrografias, em todo percurso de soldagem, sendo um atrativo excepcional para o processo fabril de estruturas metálicas. Considerando que se manteve a corrente, velocidade e isenção de respingo permitindo, fatores estes que geram produtividade.

No sentido, da inclusão do cordão de solda conter uma tênue transição para o metal de base como no grupo A. No contexto da produção repetitiva, isto é um ponto positivo em relação a qualidade final da soldagem. Sendo que para as juntas soldadas

do grupo A este evento descrito se deve, eventualmente, pela pequena diferença de espessura, sendo maior em 0,38 mm que do grupo B, e conseqüentemente, à medida que o calor se acumula durante o trajeto da tocha de soldagem feita pelo robô, ocorre uma melhor e mais rápida distribuição térmica reduzindo a ZAC e melhorando a fusão. Reforçando assim, a visualização das formas do cordão de solda, a Figura 5.17 compara os grupos A e B, que exibe a penetração no formato de cálice e para as amostras do grupo A apresentando também a forma “finger”.

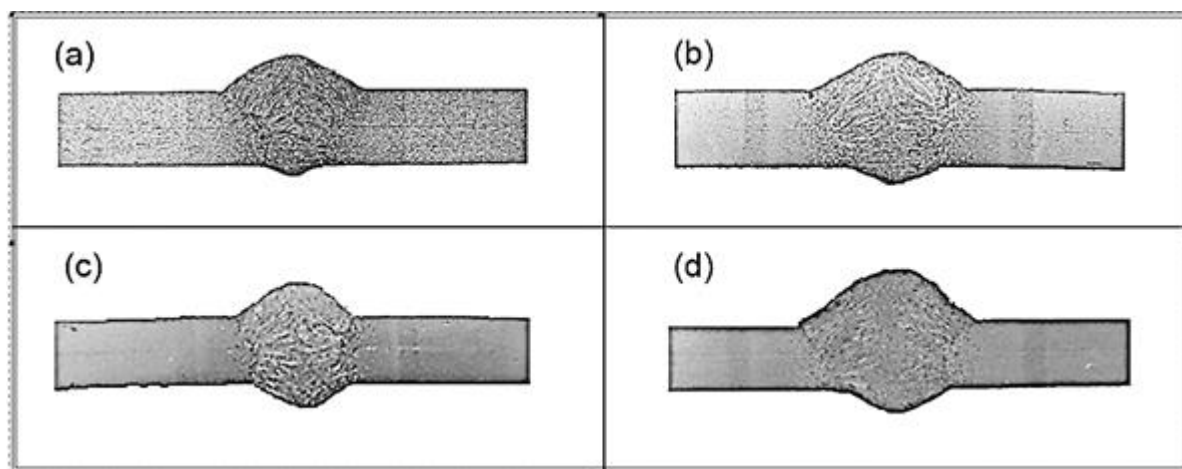


Figura 5.17 Fotomicrografias das juntas soldadas nos diferentes conjuntos de amostras de metal de base com metal de solda

(a) no aço ASTM A36 com arame-eletrodo AWS ER70S-6 (conjunto A1, forma “finger”), (b) no aço ASTM A36 com arame-eletrodo AWS ER70S-3 (conjunto A2, forma de cálice), (c) no aço CSN Civil-300 com arame-eletrodo AWS ER70S-6 (conjunto B1, forma de cálice) e (d) no aço CSN Civil-300 com arame-eletrodo AWS ER70S-3 (conjunto B2, forma de cálice).

Nota-se que a junta soldada dos conjuntos A2 e B2, utilizando o arame-eletrodo AWS ER70S-3, resultaram um cordão de solda com raiz mais aberta e com formatos semelhantes no reforço, dando aspecto mais encorpado. Ao contrário dos conjuntos A1 e B1, usando o arame-eletrodo AWS ER70S-6 resultaram a típica raiz mais delgada, apresentando maior esbeltez. Ainda, com este arame-eletrodo diluído com o aço ASTM A36, a raiz ultrapassou o verso do metal de base de forma mais razoável e de menor saliência (aparentemente mais econômico neste sentido), que no aço CSN Civil-300, contudo as alturas dos reforços foram quase idênticas, verificando a constância das densidades de corrente apesar da diferença de espessuras das chapas utilizadas.

O conjunto B1, apresentou um cordão de ótima simetria no eixo longitudinal da chapa e de boa convexidade dos reforços, tornando-a favorável a segurança por se

tratar de único passe. Outras observações positivas para a junta soldada de topo se referem quanto ao ângulo da solda, contorno coerente dos reforços e isenção de mordedura.

Com relação à ZAC, Figura 5.17, são mostradas, nos quadros (b) e (d), larguras compatíveis com o arame-eletrodo AWS ER70S-3, análogas para os quadros (a) e (c), com o arame-eletrodo AWS ER70S-6; contudo, em menores proporções, o que se observa pela diferença dessas larguras, que neste último há menor efeito do calor na chapa do que no outro.

Em outro ponto de vista, são as larguras médias do cordão de solda, apresentado nas macrografias, que revelaram ser de 6,7 mm, quando se utiliza o arame-eletrodo AWS ER70S-3, contra 5,5 mm comparado com AWS ER70S-6. O que confirma o exposto pela diluição, na Tabela 5.7, onde o grupo de amostras para o arame-eletrodo AWS ER70S-6 resultou com o valor médio aproximado de 44%, mostrando um acréscimo de 6% para o AWS ER70S-3 com 50%; representando um aumento de 13,6% no volume de cordão de solda depositado. Por este ponto de vista, o arame-eletrodo AWS ER70S-6 proporciona os menores volumes de cordão de solda, como o AWS ER70S-3 os maiores volumes e robustos, indicando assim, que nessas condições, ser o primeiro mais indicado para ligações secundárias e o segundo para ligações principais de maiores responsabilidades.

Tabela 5.7 – Percentual médio de diluição da solda nos metais de base

Conjunto de amostras	Diluição média %
A1	42,30
A2	47,70
B1	44,90
B2	51,20

5.6 MEDIDAS DE MICRODUREZA

Com o resultado das leituras das medições de microdureza de cada conjunto de amostras, analisados, organizados em planilha Excel e exportadas a outro aplicativo (GeoGebra), as curvas geradas, como indicado na Figura 5.18, o gráfico de linhas contém os valores médios, passando pelo (MB) metal de base, ZAC (zona termicamente afetada) e ZF (zona de fusão), distinguindo os conjuntos de amostras

representativas A1, A2, B1 e B2, pelo tipo de aço e arame-eletrodo utilizado no processo de soldagem, onde observa-se que o cordão de solda adquirem as maiores medidas de microdureza. Sendo que a imagem é meramente uma referência, para melhor visualização e entendimento das regiões do cordão de solda para relação das medidas de microdureza.

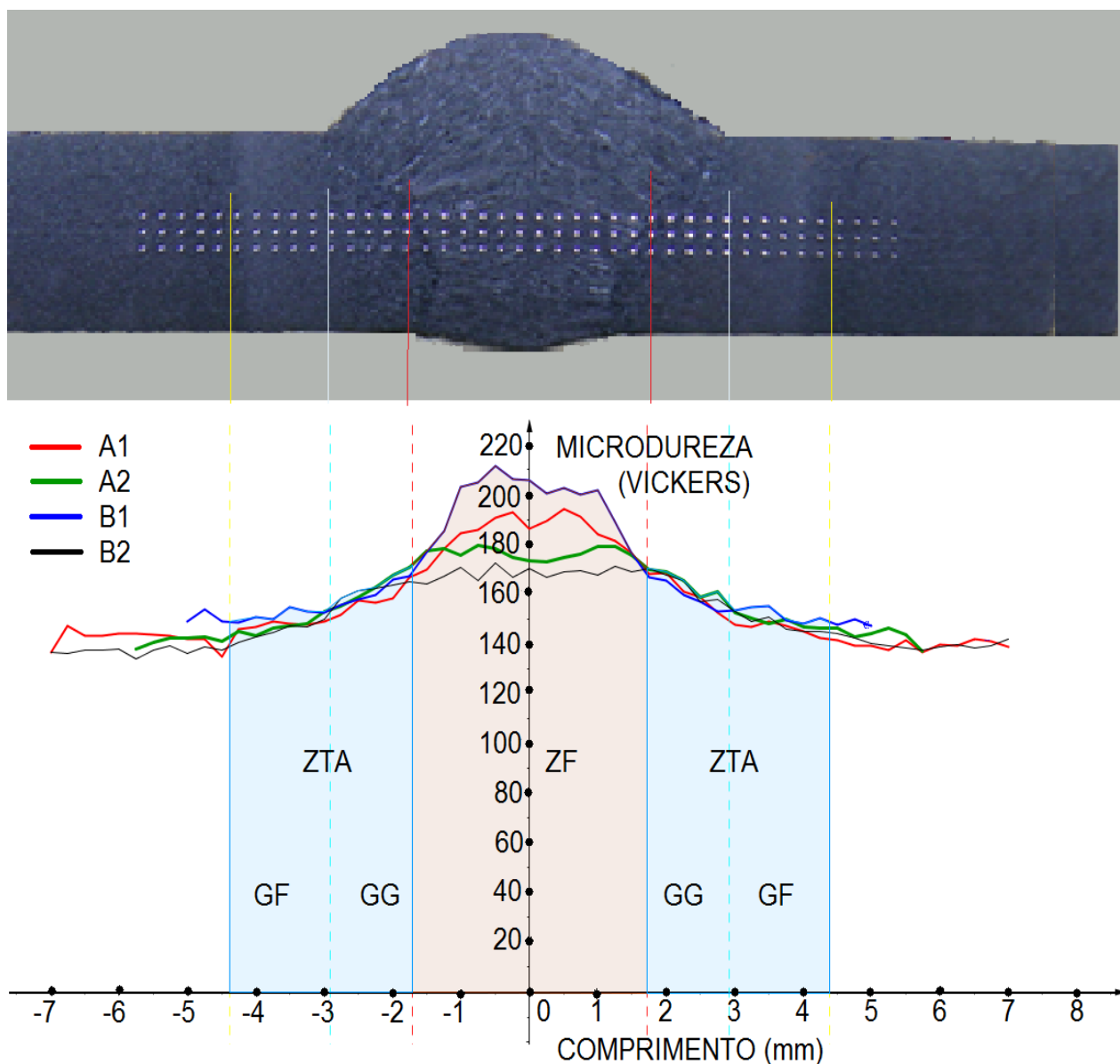


Figura 5.18 Curvas de dureza para os conjuntos A1, A2, B1 e B2

Com os resultados de cada medida, depois de tabuladas, foram refinadas as medidas médias de microdureza para cada conjunto de amostras na Tabela 5.8, fazendo uma correlação com a ZF, ZAC e MB, para procurar uma aplicabilidade no ramo de estruturas metálicas.

Tabela 5.8 - Valores médios das medidas de microdureza Vickers (HV)

Conjunto de amostras	MB	ZAC	ZAC		ZF	$\frac{ZF}{GG}$	$\frac{GG}{GF}$	$\frac{ZF}{ZAC}$	$\frac{ZAC}{MB}$
			GF	GG					
A1	141	155	149	161	188	1,17	1,08	1,21	1,10
A2	143	150	143	156	176	1,13	1,09	1,17	1,05
B1	151	161	154	165	203	1,23	1,07	1,26	1,07
B2	137	146	142	152	168	1,11	1,07	1,15	1,07

MB, ZAC, GF, GG e ZF, são, respectivamente, metal de base, zona termicamente afetada, região de grãos finos, região de grãos grosseiros e zona de fusão

Observando as medidas de microdureza os corpos de prova que expressou os maiores resultados nas regiões do MB, da ZAC e da ZF, foi o conjunto B1. Havendo percepção que o aço CSN Civil-300 utilizando o arame-eletrodo AWS ER70-S6 no processo de soldagem produziu junta soldada de maior dureza.

No metal de solda, os desvios foram pequenos, quando se comparado com a média geral por grupo, como para o A, que abrange os conjuntos A1 e A2 onde o valor de 182 HV e 185 HV para o Grupo B, como também é possível visualizá-los no gráfico da Figura 5.18. Índícios de pequena variação na microdureza, mostrando que o metal de base ASTM A36 tem participação na redução da microdureza no cordão de solda em média de 3 HV, quando diluído com o arame-eletrodo. Investigando o metal de solda através da abrangência dos conjuntos A1 e B1, formando o grupo que o processo de soldagem utilizou o arame-eletrodo AWS ER70S-6 e observando os valores médios tabulados, que são maiores quando a soldagem foi executada com o arame-eletrodo AWS ER70S-3, torna-se claro que esse último influencia reduzindo, em média, 6 HV no valor da microdureza no metal de solda executado no MB do aço ASTM A36 e 7 HV no MB do aço ARBL CSN Civil-300.

Ponderando este exposto, quando a aplicação é voltada para a estrutura metálica e exigir do projeto componentes estruturais com ligações que necessitar de menor dureza, é recomendado o uso do arame-eletrodo AWS ER70S-3, mas quando o elemento estrutural necessitar de maior dureza o mais apropriado será o arame-eletrodo AWS ER70S-6, o que também contribuirá com projetos dependendo da sua aplicação.

Na ZF, o conjunto A1 tem valor médio exibido de 188 HV e o conjunto A2, 176 HV. Tomando os valores de MB como baliza para medir a eficiência da rigidez da ligação soldada, de forma que o valor de ZF deve ser o mais próximo dos respectivos

141 HV e 143 HV. Assim, compreende-se que o arame-eletrodo AWS ER70S-3 é mais eficiente, ratificada pela mesma analogia com o grupo B.

No grupo de amostras B, na ZF apresentou dureza média de 203 HV para o conjunto B1 comparado com 168 HV para o B2. Por esses valores também se percebe que o arame-eletrodo AWS ER70S-3 tem influência na redução da microdureza no ZF em aproximadamente 7% para o aço ASTM A36 e 21% para o aço CSN Civil-300, que possui baixos teores de Si e Mn.

Pela relação ZF/GG para os conjuntos A2 e B2, existe uma perda média de 12% na medida de microdureza e para A1 e B1 a perda média é maior, com 20% para a região de crescimento de grão. Deduzindo que a integração da ZF com MB é a interação quando existe homogeneidade, logo as amostras que utilizaram o arame-eletrodo AWS ER70S-3 permitiu melhor interação entre ZF e MB.

Na coluna GG/GF há uma taxa média coincidente com declínio de 8% na medida de microdureza, independente do aço e arame-eletrodo utilizado na zona de recristalização da ZAC, entre os grãos grosseiros para os grãos refinados, devido ao efeito térmico mais próximos da ZF.

Analisando a coluna ZF/ZAC, nos valores adimensionais médios descritos, como 1,21 para A1 e 1,26 para B1, demonstra que há um decréscimo médio de 24% na medida de microdureza partindo da ZF para a ZAC, em paralelo ao A2 com 1,17 e B2 igual 1,15 fornecendo um decréscimo de 16% na média, assim o arame-eletrodo AWS ER70S-3 se habilita melhor para solda de raiz e multipasse, porque tem dessa forma melhores característica de soldabilidade e conseqüentemente menor susceptibilidade a trincas. O que pode conduzir a aplicação prática para as ligações de vigas e tesouras que necessita de material de boa tenacidade. E o arame-eletrodo AWS ER70S-6 que apresentou cordões de solda com valores de microdureza superiores, conseqüentemente de mais resistência e menor plasticidade, o torna apto a soldagem de chumbadores e placas de bases.

Houve uma semelhança térmica no grupo B, como se observa a coluna ZAC/MB, diferente do grupo A o que pode ser devido à diferença de espessura das chapas de 2,7 mm para 3,0 mm e a diferença química do tipo do aço.

6 CONCLUSÃO

A robotização é adaptável à indústria de estruturas metálicas para os setores de soldagem.

O processo de soldagem executado com o braço robótico Motoman UP6, que produz soldas regulares e com qualidade, promovendo a produtividade.

E para o processo de soldagem com robô dentro da indústria de estruturas metálica, é admissível o uso de diversos tipos de consumíveis e mais adequados no setor fabril com aplicações específicas apropriadas, como o AWS ER70S-3 além do AWS ER70S-6 que é o usual.

Com a aplicação do processo de soldagem MAG robotizado, a integração do Motoman UP6 é relativamente simples na sua instalação e sua operabilidade descomplicada.

No ponto de vista da soldabilidade, o aço CSN Civil-300 foi o que apresentou melhor soldabilidade, com CE igual a 0,19.

Quanto a distorção, os aços ASTM A36 e CSN Civil-300 apresentaram distorções semelhantes, não ultrapassando o valor máximo de 0,45 mm.

E como é amplamente utilizado o perfil estrutural de chapa dobrada na fabricação, a presença de abas na chapa impõe resistência à distorção.

Sob a perspectiva da deformação, sempre é maior no lado onde se inicia o cordão de solda. E com a expansão causada pelo aquecimento, a deformação na junta, é maior no CSN Civil-300, porém com o menor empenamento, e como a espessura da chapa é menor e a composição química tem maior teor de Mn, apresentou a maior rigidez. Condição, favorável ao projeto de treliças.

Em relação a montagem da estrutura metálica quando se preparam as juntas a serem soldadas, o melhor desempenho frente a distorção, é o perfil com mais pontos de solda, devido à retração impedida pelos pontos à frente do percurso de soldagem.

A Verificação da maior resistência à corrosão do aço CSN Civil-300, com perda de massa três vezes menor que a do aço ASTM A36, confirma a durabilidade da obra realizada com este aço ARBL.

Ainda na ótica de longevidade da construção em aço, a velocidade e taxa de corrosão do aço ASTM A36 é superior à do aço CSN Civil-300, o que mostra que deve haver critérios de utilização pela exposição em que a estrutura metálica for submetida.

Como estrutura metálica possui inúmeras ligações soldadas em diferentes aplicações, a menor corrosão demonstrada na amostra soldada usando o arame-eletrodo AWS ER70S-3, devido a sua composição química, se torna uma das opções importantes a serem aplicadas em ambientes abrasivos.

Tendo em vista que a região interfacial entre a ZAC e o MS, é a região vulnerável a corrosão, ela necessita de tratamento superficial especialmente adequado ao ambiente.

Em relação ao consumível, o arame-eletrodo AWS ER70S-3 produz cordão de solda, contendo o dobro de teor de Cu que o AWS ER70S-6 favorecendo a resistência a corrosão, o que garante a vida útil da estrutura metálica.

Mais um enfoque sobre o arame-eletrodo AWS ER70S-3, é o resultado do cordão de solda com teores menores de Mn e Si, o que propicia valores inferiores de dureza.

Uma visão a respeito da economia para os setores de soldagem, está nos cordões de solda executados, usando o arame-eletrodo AWS ER70S-6, que constituíram os menores volumes e indicado para as soldas secundárias, e o AWS ER70S-3 com os maiores, sendo recomendado para soldas principais.

Por outro lado, o aço CSN Civil-300 soldado com o consumível AWS ER70S-6, foram as juntas soldadas que apresentaram as melhores geometrias de cordão para fim de projeto.

O arame-eletrodo AWS ER70S-6 demonstrou os menores efeitos térmicos na ZAC, ao contrário do AWS ER70S-3, as maiores.

Em outro aspecto, o arame-eletrodo AWS ER70S-6 é suficiente para promover menores deformações, por propiciar maior dureza, ao invés do AWS ER70S-3 para ligações soldadas sujeitas a maiores deformações, como nas tesouras treliçadas que necessitam de material de boa tenacidade.

7 BIBLIOGRAFIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Acções e segurança nas estruturas - procedimento, Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14672**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio, Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-2**: Edificações habitacionais - desempenho, Rio de Janeiro, 2013.

Al, Y. et al. Welded joints integrity analysis and optimization for fiber laser welding of dissimilar materials. **Optics and laser in engineering**, Wuhan, v. 86, p. 62-74, mai. 2016.

ALORAIER, A. et al. Role of welding parameters using the flux-cored arc welding process of low alloy steels on bead geometry and mechanical properties. **Journal of materials engineering and performance**, [S.l.], v. 21, n. 4, p. 540–547, abr. 2012.

ALORAIER, A. S. et al. Hardness, microstructure, and residual stresses in low carbon steel welding with post-weld heat treatment and temper bead welding. **The minerals, metals & materials society and ASM international 2014**, Concordia, v. 45, n. 4, p. 2030-2037, abr. 2014.

ALVARENGA, R. A. (22 a 28 de Maio de 2006). Efeito das tensões residuais na análise avançada de estruturas simples de aço. (ResearchGate, Ed.) **Anais das XXXII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural**, p. 1493-1503, 2006.

AMOUZEGARA, H.; SCHAFERB, B. W.; TOOTKABONIA, M. An incremental numerical method for calculation of residual stresses and strains in cold-formed steel members. **Thin-walled structures**, North Dartmouth, v. 106, p. 61-74, mar. 2016.

AMPAIBOON, A.; LASUNON, O.-U.; BUBPHACHOT, B. Optimization and prediction of ultimate tensile strength in metal active gas welding, maha sarakham. **Hindawi publishing corporation the scientific world journal**, [S.l.], set. 2015.

ANTUNES, P. D. Influência do metal de adição na susceptibilidade à corrosão sob tensão de juntas soldadas do aço inoxidável ferrítico AISI 444 em meios contendo cloreto de magnésio. Itajubá, jun. 2010.

ASHBY, M. F. Os processos: conformação, união, acabamento. In:_____. **Seleção dos materiais no projeto mecânico**. 4. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2012. p. 338-351.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM-B117-11**: Standard practice for operating salt spray (fog) apparatus, West Conshohocken, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM-A572**: Standard specification for high-strength low-alloy columbium-vanadium structural steel, West Conshohocken, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM-A36**: Standard specification for carbon structural steel, West Conshohocken, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM-A6**: Standard specification for general requirements for rolled structural steel bars, plates, shapes, and sheet piling, West Conshohocken, 2009.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS-D1.1**: Structural welding code-steel, 2000.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS A5.18/A5.18M**: Specification for carbon steel electrodes and rods for gas shielded arc welding, 2005

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS-ANSI Z49.1**: Safety in welding, cutting and allied processes, Florida, 2005.

ARIF, N.; CHUNG, H. Alternating current-gas metal arc welding for application to thick plates. **Journal of materials processing technology**, Republic of Korea, p. 75-83, mar. 2015.

AZADEH, M.; TOROGHINEJAD, M. R. Effect of heat treatment on formability of hot-dip galvanized low carbon steel sheet. **ISIJ international**, Isfahan, v. 49, n. 12, p. 1945-1951, may. 2009.

AZAR, A. S. A heat source model for cold metal transfer (CMT) welding. **Journal of thermal analysis and calorimetry**, Blindern, v. 122, n. 2, p. 741-746, june 2015.

BAGHEL, P. K. Effect of welding parameters of gas metal arc welding on weld bead geometry: a review. **International journal of engineering science and technology**, Delhi, v. 4, n. 7, p. 3446-3449, july 2012.

BENDIKIENE, R.; JANUSUS, G.; ZIZYS, D. Comparative analysis of microstructure and quality of gas metal arc welded and shielded metal arc welded joints. **Mechanika**, Kaunas, p. 323-328, aug. 2015.

BRANCO, M. C.; FERNANDES, A. A.; CASTRO, P. M. S. T. **Fadiga de estruturas soldadas**. 1. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1986.

BRITISH STANDARD – GROUP BSI. **BS 7453-1**: Procedures for UK registration for open systems standards. Procedures for the UK name registration authority, United Kingdom, 1991.

BULAN ABDULLAH, S. I. M. H. J. Investigation on corrosion rate of butt-joint in gas metal arc welding, fluxe core arc welding and submersible arc welding, **Journal teknologi (sciences & engineering)**, Selangor, v. 76, n. 6, p. 61-65, may. 2015.

CAIMACAN, D.; MISHCHENKO, A.; SCOTTI, A. Avaliação do uso de curto-circuito controlado em soldagens de passes de enchimento por MIG/MAG duplo arame. **Revista soldagem & inspeção**, Uberlândia, v. 20, n. 1, p. 16-27, feb. 2015.

CALLISTER, W. D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros técnicos e científicos editora Ltda., 2006.

CHEN, Y. et al. Microstructure and mechanical properties of HSLA thick plates welded by novel double-sided gas metal arc welding. **The international journal of advanced manufacturing technology**, Shanghai, v. 78, n. 1, p. 457-464, apr. 2015.

CHO, K. S. et al. Influence of ti addition on the microstructure and mechanical properties of a 5% Cr–Mo–V steel. **Journal of alloys and compounds seoul**, v. 626, n. 1, p. 314-322. Mar. 2015.

CHOI, S. K.; YOO, C. D.; KIM, Y. S. The dynamic analysis of metal transfer in pulsed current gas metal arc welding. **Journal of physics. d, applied physics**, Seoul, v. 31, n. 2, p. 207-215, 1998.

COLEGROVE, P. et al. Welding process impact on residual stress and distortion. **Science and technology of welding and joining**, Bedfordshire, v. 14, n. 8, p. 717-725, nov. 2009.

COSTA, A. L.; MEI, S. P. R. **Aços e ligas especiais**. 2 ed. Sumaré: Eletrometal S.A. Metais Especiais, 1988.

CUIURI, D. Control of the short-circuit gas metal arc welding process using instantaneous current regulation. **Wollongong: research online** v. 1, p. 405, 2000.

DING, D. et al. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests, **The international journal of advanced manufacturing technology**, Wollongong, 81, n. 1, p. 465-481, may 2015.

DOBROTĂ, D.; PETRESCU, V. Dependence of the mechanical properties of joints welded according to the parameters of the metal active gas (MAG) welding regime, **Metalurgija**, Romênia, v. 55, p. 51-54, oct. 2015.

DU, D. et al. Effects of chloride and oxygen on stress corrosion cracking of cold worked 316/316L austenitic stainless steel in high temperature water. **Corrosion science**, Schenectody, v. 110, n. 1, p. 134-142, set. 2016.

EKICI, M.; OZSARAC, U. Investigation of mechanical properties of microalloyed steels joined by MIG/MAG and electrical arc welding. **ACTA physica polonica A**, Yalova, v. 123, n. 26, p. 289-290, apr. 2012.

ESAB. **Soldagem MIG/MAG**. São Paulo: ESAB, 2005. 68 p. Apostila.

EVA SCHMIDOVÁ. Effect of welding on the fracture behaviour of the ferritic corrosion resistant steel. **Materials & Engineering**, v. 18, p. 79-84, aug. 2011.

FAKIĆ, B. et al. Change of physical-metallurgical properties of lowalloy steel 16Mo3 in the heat affected zone in welding processes mma and mag, **15th international research/expert conference**, Zenica, n. 15, p. 129-132, Sep. 2011.

FORTES, C. **Metalurgia da soldagem**. Contagem, ESAB, 2005, p. 48. Apostila.

GHIOTTI, A. et al. Tribological performances of Zn-based coating in direct hot stamping. **Tribology international**, Padova, 78, n. 1, p. 142-151, oct. 2014.

GHOSH, P. K. et al. Arc characteristics and behaviour of metal transfer in pulsed current GMA welding of aluminium alloy. **Journal of materials processing technology**, v. 194, n. 1, p. 163-175, apr. 2007.

GOLOB, M. Integrated models of a gas metal arc welding process and inverter based power supply for process control simulation studies. **Elektronika ir elektrotehnika**, Maribor, v. 20, p. 3-6, july 2014.

GOMES, J. F. et al. Efeito dos modos de transferência e da composição de gás de proteção na emissão de partículas ultrafinas na soldadura MAG de aços. **Soldagem & inspeção**, Lisboa, v. 19, n. 16, p. 168-176, june 2014.

GOU, G.; YANG, Y.; CHEN, H. An ICME approach for optimizing thin-welded structure design. **Engineering**, Chengdu, v. 6, n. 1, p. 936-947, dec. 2014.

GRUJICIC, M. et al. Optimization of Gas Metal Arc Welding (MIG/MAG) Process for maximum ballistic limit in MIL A46100 steel welded all-metal armor. **Journal of materials engineering and performance**, Clemson, v. 24, n. 1, p. 229-244, jan. 2015.

HABIBI, M. et al. Enhancing the mechanical properties and formability of low carbon steel with dual-phase microstructures. **Journal of materials engineering and performance**, Tehran, v. 25, n. 2, p. 382-389, feb. 2016.

HAIVORONS'KYI, O. A. et al. Structure and mechanical properties of the heat-affected zone of restored railway wheels. **Materials science**, Ukrainian, v. 27, n. 1, p. 563-569, apr. 2016.

HEBDA, M.; SADY, R. Software for the estimation of steel weldability. **Advances in engineering software**, Krakow, v. 58, n. 1, p. 13-17, Jan. 2013.

IBRAHIM, I. A. et al. The effect of gas metal arc welding (MIG/MAG) processes on different welding parameters. **International symposium on robotics and intelligent sensors 2012**, Mara, v. 41, n. 2012, p. 1502-1506, July 2012.

INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING. Guide to the light microscope examination of ferritic steel weld metals. **Welding in the world: springerlink**, v. 29, p. 160-176, 1991.

INFORMATIITEHNICE. MIG/MAG, June 2014.

KAH, P., et al. Usability of arc types in industrial welding, **International journal of mechanical and materials engineering**, Lappeenranta, v. 9, n. 15, p. 1-12, oct. 2014.

KAH, P., et al. Robotic arc welding sensors and programming in industrial applications. **International journal of mechanical and materials engineering**, Lappeenranta, v. 10, n. 17, p. 1-16, July 2015.

KAH, P.; SALMINEN, A.; MARTIKAINEN, J. The influence of parameters on penetration, speed and bridging in laser hybrid welding. **Mechanika**, Lappeenranta, v. 17, n. 3, p. 324-333, 2011.

KARKOSZKA, T.; SOKOVIC, M. Integrated risk estimation of metal inert gas (MIG) and metal active gas (MAG) welding processes. **Metalurgija**, Gliwice, p. 179-182, apr. 2012.

KONG, F.; KOVACEVIC, R. Development of a Comprehensive Process Model for Hybrid Laser-Arc Welding. **Welding processes**, Dallas, v. 8, n. 1, p. 165-190, 2012.

KOSTYAEVA, A. A.; BALMASOVB, A. V.; INASARIDZEB, L. N. Russian. Effect of inhibitors on carbon steel corrosion in foaming solutions. **Journal of general chemistry**, Ivanovo, v. 86, n. 2, p. 429–433, 2016.

KRUPPA, R. D. G. et al. A influência do aporte térmico na metalurgia de soldagem de revestimentos de aço inoxidável com cobalto. **Revista de engenharia e tecnologia**, v. 3, n. 2, p. 1-9, ago. 2011.

KÜHN-KAUFFELDT, M.; MARQUÈS, J. L.; SCHEIN, J. Time resolved Thomson scattering diagnostic of pulsed gas metal arc welding (MIG/MAG) proces. **Journal of physics: conference series**, Neubiberg, p. 1-7, 2014.

LEHTO, P. et al. Characterisation of local grain size variation of welded structural steel. **Weld world**, Aalto, v. 60, p. 673–688, mar. 2016.

LI, F. et al. A new calculating method to perform springback predictions for varied curvature sheet bending based on the B-spline function. **International journal of mechanical sciences**, Xi'an, v. 113, p. 71-80, apr. 2016.

LIN, H.-L.; YAN, J.-C. Optimization of weld bead geometry in the activated GMA welding process via a grey-based taguchi method. **Journal of mechanical science and technology**, Kaohsiung, v. 28, n. 1, p. 3249-3254, mar. 2014.

LINCOLN ELECTRIC. Tandem MIG Process. **Lincoln electric**, Cleveland, v. 1, n. 1, p. 5, Aug. 2016.

LUSTOSA, M. C. J. **Meio ambiente, inovação e competitividade na industria brasileira: a cadeia produtiva do petróleo**. 2002, 246 f. Tese (Doutorado em economia) - Instituto de economia, Universidade federal do rio de janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

MARIANE, A. Estrutura metálica x estrutura em concreto armado. **CBCA - centro brasileiro da construção em aço**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 1, p. 1, Ago. 2014.

MENDEZ, P. F. et al. Welding processes for wear resistant overlays. **Journal of manufacturing processes**, Alberta, v. 16, n. 1, p. 4-25, jan. 2014.

MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA E COMÉRCIO SECRETARIA DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL. Manual Brasileiro para Cálculo de Estruturas Metálicas. In:_____.

Manual brasileiro para cálculo de estruturas metálicas. 1. ed. Brasília: Ministério da indústria e do comércio. Secretaria de tecnologia industrial, 1986, vol. 1, p. 1-413.

MODENESI, P. J.; AVELAR, R. C. D. The influence of small variations of wire characteristics on gas metal arc welding process stability. **Journal of materials processing technology**, Belo Horizonte, v. 86, n. 1, p. 226-232, July 1999.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. 2012. 208 f. Pós-graduação. Departamento de engenharia metalúrgica e de materiais, Universidade federal de Minas Gerais, Belo Horizonte: UFMG, 2012.

MOREIRA, A. F. **Influência da atmosfera protetora no cordão de solda obtido através dos processos de soldagem MIG/MAG e FCAW**. 2008. p. 146. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica). Faculdade de engenharia, Universidade estadual paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2008.

MVOLA, B. et al. Applications and benefits of adaptive pulsed MIG/MAG/Adaptivusis impulsinis dujinis lankinis metalo suvirinimas ir jo privalumai. **Mechanika**, Lappeeranta, v. 19, n. 6, p. 694-701, dec. 2013.

MVOLA, B.; KAH, P.; MARTIKAINEN, J. Dissimilar ferrous metal welding using advanced gas metal arc welding processes. **Reviews on advanced materials science**, Lappeenranta, v. 38, n. 2, p. 125-137, 2014.

MVOLA, B.; KAH, P.; MARTIKAINEN, J. Welding of dissimilar non-ferrous metals by MIG/MAG processes. **International journal of mechanical and materials engineering**, Lappeenranta, p. 1-11, sep. 2014.

NGUYEN, T. C. et al. High speed fusion weld bead defects. *Science and technology of welding and joining*, Ontario, v. 11, n. 6, p. 618-633, dec. 2006.

NGUYEN, V. B. et al. Finite element simulation on mechanical and structural properties of cold-formed dimpled steel. **Thin-walled structure**, Telford, v. 64, p. 13-22, jan. 2013.

NORRISH, J.; CUIURI, D. The controlled short circuit MIG/MAG process: A tutorial. **Journal of manufacturing processes**, Wollongong, v. 16, n. 1, p. 86-92, jan. 2014.

NORMA TÉCNICA DA SABESP. **NTS 185**: Preparo de superfícies metálicas – métodos alternativos ao jato de areia seca, São Paulo, 2002.

PARK, L. et al. Tensile failure of 4130 steel having different ultrafine grained structures. **Materials science and engineering**, Taejon, 527, n. 3, p. 645-651, jan. 2010.

PERRET, W. et al. Approach to assess a fast welding simulation in an industrial environment - application for an automotive welded part. **International journal of automotive technology**, Berlin, 12, n. 6, p. 895-901. feb. 2011.

PESSOA, A. R. P. et al. Seleção dos parâmetros através dos custos de soldagem para aplicação de revestimento com ligas de níquel depositadas pelo processo MIG/MAG. **ABS-Associação brasileira de soldagem e inspeção**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 71-78, mar. 2011.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de aço**. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2010.

POULSON, B. Some developments in slow strain rate testing for stress corrosion cracking. **Corrosion engineering, science and technology**, Newcastle, v. 47, n. 3, p. 209-222, may 2012.

RAMAZANI, A. et al. Microstructure evolution simulation in hot rolled DP600 steel during gas metal arc welding. **Computational materials science**, Aachen, v. 68, p. 107-116, feb. 2013.

RANKY, P. G. A method for planning industrial robot networks for automotive welding and assembly lines. **Industrial robot: an international journal newark**, v. 29, n. 1, p. 530-537, 2002.

RAO, Z. H.; LIAO, S. M.; TSAI, H. L. Effects of shielding gas compositions on arc plasma and metal transfer in gas metal arc welding. **Journal of applied physics**, Rolla, v. 107, n. 044902, p. 1-11, feb. 2010.

RESENDE, A. A. D. et al. Influence of welding current in plasma-MIG weld process on the bead weld geometry and wire fusion rate. **Welding international**, Belo Horizonte, v. 25, n. 12, p. 910-916, dec. 2011.

RIBEIRO, J. C. R. D. S. **Análise de tensões residuais e deformações em soldadura**. 2010. p.70. Dissertação (Mestre em engenharia mecânica) – Faculdade de ciências e tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

RODAN, C. E. et al. Influence of the filler metal in welded points of duplex stainless steels. **European scientific journal**, Querétaro, v. 10, n. 18, p. 38-44, june 2014.

ROLDAN, C. E. et al. Influence of the filler metal in welded points of duplex stainless steels. **European scientific journal**, Querétaro, 10, n. 18, p. 38-44, june 2014.

SAMPATH, K. Constraints based modeling for innovative product & process designs. **Journal of materials engineering and performance**, Johnstown, v. 16, n. 6 p. 694-702, dec. 2007.

SANTOS, T. B. D. S. Desenvolvimento financeiro e crescimento econômico. **Revista estratégica**, São Paulo, v. 8, n. 1, p. 103-114, June 2010.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG melhor entendimento melhor desempenho**. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2014.

Eva Schmidová, P. H. (9 de August de 2011). EFFECT OF WELDING ON THE FRACTURE BEHAVIOUR OF THE FERRITIC CORROSION RESISTANT STEEL. *Materials Engineering*, 18(2011), pp. 79-84. Acesso em 10 de Janeiro de 2017, disponível em <http://fstroj.uniza.sk/PDF/2011/14-2011.pdf>

SEIDU, S. O.; KUTELU, B. J. Effect OF HEAT TREATMENTS ON CORROSION OF WELDED LOW-CARBON STEEL IN ACID AND SALT ENVironments. **Journal of minerals and materials characterization and engineering**, Ado-Ekiti, v. 1, n. 2013, p. 95-100, may 2013.

SEN, M.; MUKHERJEE, M.; PAL, T. K. Evaluation of Correlations between DP-MIG/MAG Process Parameters and Bead Geometry Higher mean current, higher pulse frequency, lower thermal pulse frequency, and standard arc voltage may generate optimum bead geometry when using double pulsed gas metal arc. **Welding research**, Kolkata, v. 94, n. 8, p. 265-279, aug. 2015.

SHI, L.; TIAN, X.; ZHANG, C. Automatic programming for industrial robot to weld intersecting pipes. **Int J adv manuf technol**, Shandong, v. 81, n. 9, p. 2099-2107, june 2015.

SHI, L.; TIAN, X.; ZHANG, C. Automatic programming for industrial robot to weld intersecting pipes. **The international journal of advanced manufacturing technology**, Londres, v. 81, p. 2099-2107, june 2016.

SHUJUN CHEN, et al. Sustaining the inter-wire arc in twin-wire indirect arc welding. **Journal of manufacturing processes**, Kaohsiung, v. 21, n. 2016, p. 69-74, jan. 2016.

SILVA, A. B. D. et al. Inibidores de corrosão para meios de elevada salinidade. **COPPE UFRJ**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 1, p. 1-2, out. 2012.

SOARES, H. C. G. **Estudo de sequência de soldagem para redução e eliminação de distorções**. 2006. 94 f. Dissertação (Mestre em engenharia mecânica) – Universidade federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

SOEIRO J., J. C.; ROCHA, D. B.; BRANDI, S. D. Uma breve revisão histórica do desenvolvimento da soldagem dos aços API para tubulações. **Soldagem & inspeção**, v. 18, p. 176-195, june 2013.

STREBKOV, V. T. Anti-corrosion protection for structural members and buildings at metallurgical plants, **Metallurgist**, Chelyabinsk, v. 49, n. 5, p. 65-66, may 2005.

SUBAN, M.; TUSEK, J. Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used. **Journal of materials processing technology**, v. 119, n. 1-3, p. 185-192, dec. 2001.

SULAIMAN, M. S. et al. Simulation and experimental study on distortion of butt and T-joints using WELD PLANNER. **Journal of mechanical science and technology**, Mara, v. 25, n. 10, p. 2641-2646, june 2011.

TATAGIBA, L. C. S.; GONÇALVES, R. B.; PARANHOS, R. Tendências no desenvolvimento de gases de proteção utilizados na soldagem MIG/MAG. **Revista soldagem & inspeção**, São Paulo, v. 17, n. 3, p. 218-228, sept. 2012.

TAWEEJUN, N.; KANCHANOMAI, C. Effects of carbon and nitrogen on the microstructure and mechanical properties of carbonitrided low-carbon steel. **Journal of materials engineering and performance**, Pathum Thani, v. 24, n. 12, p. 4853-4862, oct. 2015.

THE GREAT SPVIET ENCYCLOPEDIA. **Welded joint**. 3 ed., vol. 1. The Gale Group, Inc. Moscow, 1970-1979.

TIPI, A. R. D.; SANI, S. K. H.; PARIZ, N. Improving the dynamic metal transfer model of gas metal arc welding (MIG/MAG) process. **The international journal of advanced manufacturing technology**, Mashhad, 76, n. 1, p. 657-668, jan. 2015.

VERGÍLIO, S. A. L. **Ligações em estruturas metálicas com ênfase em perfis formados a frio**. 2011. 156 f. Dissertação (Mestre em engenharia mecânica) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2016.

VIÑAS, J. F. A.; JUAREZ, L. I.; CABRERA, R. R. Acquisition of welding skills in industrial robots. **Industrial robot: an international journal**, Coahuila, 42, n. 2, p. 156-166, p. 2015.

WANG, F. et al. Modelling and analysis of metal transfer in gas metal arc welding. **Journal of physics. D, applied physics**, v. 36, n. 9, p. 1143 -1152, apr. 2003.

WANG, J. et al. Effect of Arc Swing Parameters on Narrow Gap Vertical GMA Weld Formation. **ISIJ International**, Jiangsu, v. 56, n. 5, p. 844-850, apr. 2016.

WANG, L. . et al. Effects of shielding gas composition on arc profile and molten pool dynamics in gas metal arc welding of steels. **Journal of physics. D, applied physics**, Shanghai, 47, n. 1, p. 1-14, sep. 2014.

WANG, L. et al. Backward flowing molten metal in weld pool and its influence on humping bead in high-speed MIG/MAG. **Journal of materials processing technology**, Jinan, p. 342-350, june 2016.

WEI, H. L. et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. **Welding process of consumable double electrode with a single arc MIG/MAG**, Londres, p. 435-446, set. 2014.

WILHELM, G. et al. Study of the welding gas influence on a controlled short-arc MIG/MAG process by optical emission spectroscopy. **Journal of physics D: applied physics**, Leibniz, v. 43, p. 1-9, out. 2010.

WONG, Y. R.; LING, S. F. Novel classification method of metal transfer modes in gas metal arc welding by real time input electrical impedance. **Science and technology of welding and joining**, Nanyang, v. 19, n. 3, p. 224-230, nov. 2014.

WONG, Y.-R.; LING, S.-F. An investigation of dynamical metal transfer in MIG/MAG—Effects of argon shielding gas. **Journal of materials processing technology**, Singapore, 214, n. 1, p. 106-111, jan. 2015.

XUAN, Y.; YUE, Q. Forecast of steel demand and the availability of depreciated steel scrap in China. **Resources, conservation and recycling**, Shenyang, 109, n. 1, p. 1-12, feb. 2012.

YANG, Y. P. et al. Weld modeling of thin structures with VFT software, **ASME/JSME 2004 Pressure vessels and piping conference**, San Diego, n. 2653, p. 25-29, july 2004.

YAR-MUKHAMEDOVA, G. et al. Iron binary and ternary coatings with molybdenum and tungsten. **Applied surface science**, Kharkov, v. 383, n. 1, p. 346-352, oct. 2016.

YE, D. et al. Analysis of arc interference and welding stability in twin wire MIG/MAG welding. **Int J adv manuf technol**, London, v. 81, p. 627-633, may 2015.

YE, J. et al. Development of more efficient cold-formed steel channel sections in bending. **Thin-walled structures**, Sheffield, v. 101, p. 1-13, apr. 2016.

YOUNG, B.; LUI, W.-M. Tests of cold-formed high strength stainless steel compression members. **Thin-walled structures**, Hong Kong, n. 2, v. 44, p. 224-234, mar. 2006.

YURIOKA, N. Physical Metallurgy of Steel Weldability. **ISIJ International chiba**, v. 6, n. 41, p. 566-570, jan. 2001.

ZHANG, Y. M.; NA, S.-J.; COOK, G. E. Introduction to special issue: Recent developments in welding processes. **Journal of manufacturing processes**, Vanderbilt, v. 16, n. 1, p. 1-3, jan. 2014.

ZHONG, Y.-B. et al. Effect of transverse static magnetic field on microstructure and properties of GCr15 bearing steel in electroslag continuous casting process. **Materials science and engineering**, Shanghai, p. 118-126, apr. 2016.

ZHOU, C. et al. **The minerals, metals & materials society**, Integration of advanced simulation and visualization for manufacturing process optimization, n. 68, p. 1363-1369, 31 mar. 2016.

ZONG, R. et al. **Journal of materials processing technology**, Influence of shielding gas on undercutting formation in gas metal arc welding, Jinan, p. 169-176, 22 mar. 2016.

8 APÊNDICES

8.1 AQUISIÇÃO DE DADOS DE CORRENTE

Tabela 8.1 – Resultados da soldagem do conjunto A11

Amostra	Im (A)	Ie (A)	Um (V)	Ue (V)	ta (s)	Cc (mm)	En (kJ)	En/C (kJ/mm)
A111	154,80	163,70	20,20	22,70	19,60	187	60,00	0,32
A112	163,20	169,20	20,90	22,90	19,60	187	63,30	0,34
A113	157,60	171,20	19,60	22,40	17,40	187	49,60	0,27
A114	158,50	164,70	20,50	22,30	18,40	187	58,00	0,31
A115	168,10	173,30	20,50	22,30	18,60	187	61,80	0,33
Média Geral	160,44	168,42	20,34	22,52	18,72	187	58,54	0,31

Im, Ie, Um, Ue, ta, Cc, En e En/C, são, respectivamente, valor médio da corrente do cordão; valor eficaz da corrente do cordão; valor médio da tensão do cordão; valor eficaz da tensão do cordão; tempo de arco do cordão; comprimento do cordão; energia e energia por comprimento

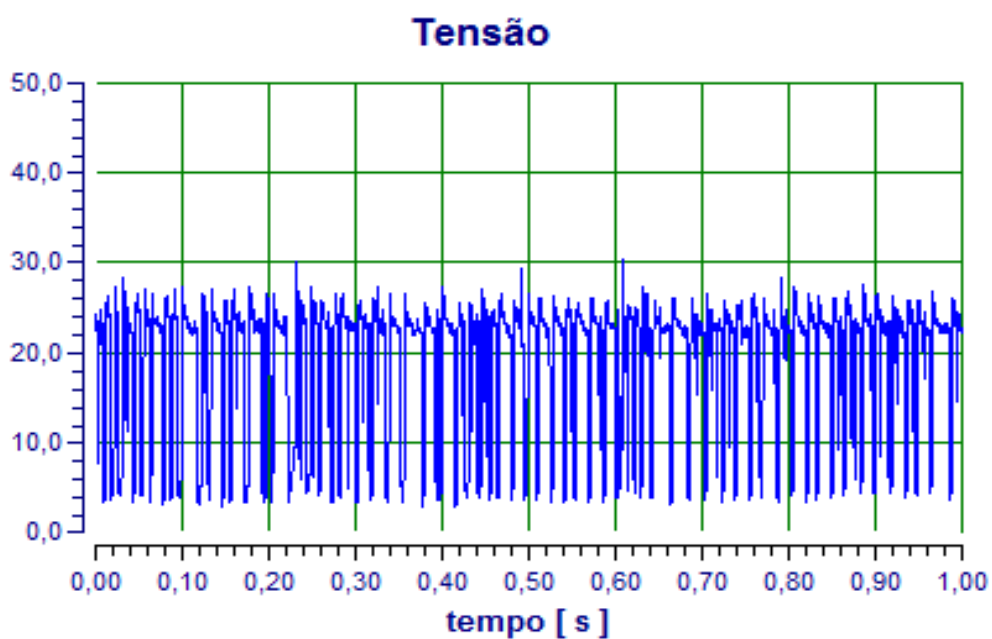


Figura 8.1 – Formas de onda da tensão do conjunto A11

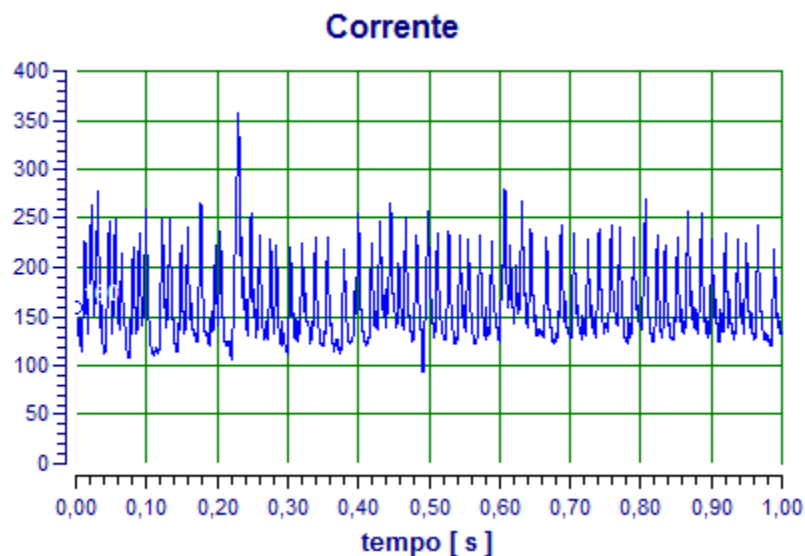


Figura 8.2 – Formas de onda da corrente do conjunto A11

Tabela 8.2 – Resultados da soldagem do conjunto A12

Amostra	I_m (A)	I_e (A)	U_m (V)	U_e (V)	t_a (s)	C_c (mm)	E_n (kJ)	E_n/C (kJ/mm)
A121	162,80	168,90	20,80	22,80	19,40	187	62,40	0,33
A122	167,40	170,70	20,10	21,20	19,00	187	62,70	0,34
A123	162,90	168,90	20,00	21,80	19,40	187	62,60	0,33
A124	162,00	168,30	20,30	22,10	19,30	187	61,80	0,33
A125	164,10	170,70	20,80	23,20	18,30	187	58,90	0,31
Média Geral	163,84	169,50	20,40	22,20	19,08	187	61,68	0,33

I_m , I_e , U_m , U_e , t_a , C_c , E_n e E_n/C , são, respectivamente, valor médio da corrente do cordão; valor eficaz da corrente do cordão; valor médio da tensão do cordão; valor eficaz da tensão do cordão; tempo de arco do cordão; comprimento do cordão; energia e energia por comprimento

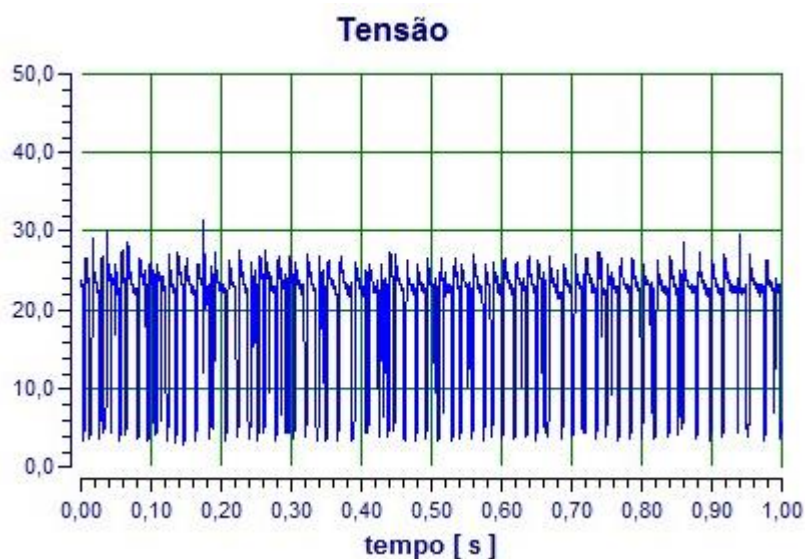


Figura 8.3 – Formas de onda da tensão do conjunto A12

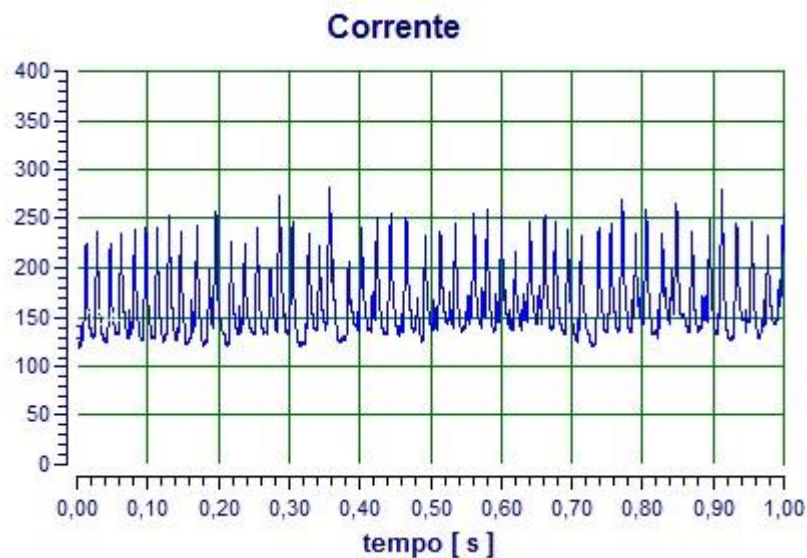


Figura 8.4 – Formas de onda da corrente do conjunto A12

Tabela 8.3 – Resultados da soldagem do conjunto A13

Amostra	Im (A)	Ie (A)	Um (V)	Ue (V)	ta (s)	Cc (mm)	En (kJ)	En/C (kJ/mm)
A131	159,99	166,12	21,04	22,75	0,96	187	59,40	0,32
A132	162,40	168,30	0,00	0,00	19,30	187	0,00	0,00
A133	158,10	162,30	20,70	21,90	18,90	187	60,10	0,32
A134	159,30	163,40	20,40	21,90	18,90	187	59,70	0,32
A135	157,50	162,90	20,80	22,50	18,60	187	58,50	0,31
Média Geral	159,46	164,60	16,59	17,81	15,33	187	47,54	0,25

Im, Ie, Um, Ue, ta, Cc, En e En/C, são, respectivamente, valor médio da corrente do cordão; valor eficaz da corrente do cordão; valor médio da tensão do cordão; valor eficaz da tensão do cordão; tempo de arco do cordão; comprimento do cordão; energia e energia por comprimento

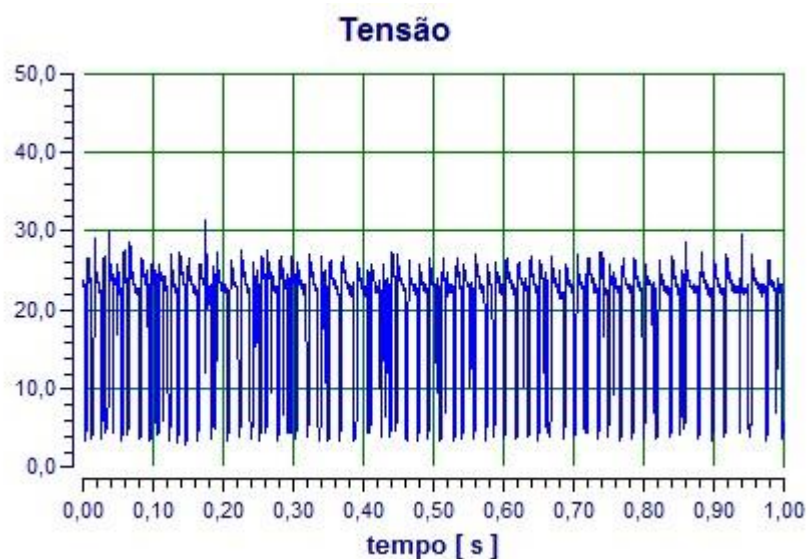


Figura 8.5 – Formas de onda da tensão do conjunto A13

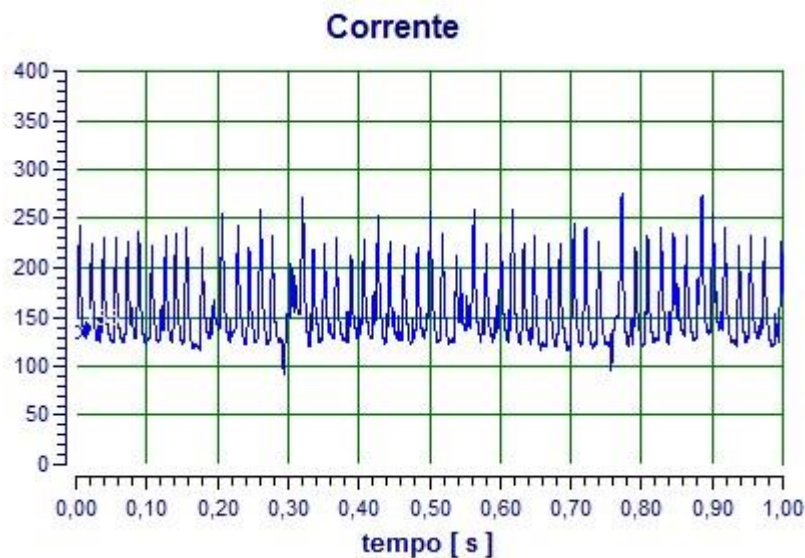


Figura 8.6 – Formas de onda da corrente do conjunto A13

Tabela 8.4 – Resultados da soldagem do conjunto A14

Amostra	I_m (A)	I_e (A)	U_m (V)	U_e (V)	t_a (s)	C_c (mm)	E_n (kJ)	E_n/C (kJ/mm)
A141	157,60	161,60	20,10	21,70	18,80	187	57,60	0,31
A142	161,80	168,10	20,50	22,70	19,30	187	61,40	0,33
A143	157,70	164,50	21,00	23,30	19,20	187	59,80	0,32
A144	158,50	165,10	20,80	23,00	19,30	187	60,40	0,32
A145	157,30	163,60	20,50	22,60	19,30	187	60,00	0,32
Média Geral	158,58	164,58	20,58	22,66	19,18	187	59,84	0,32

I_m , I_e , U_m , U_e , t_a , C_c , E_n e E_n/C , são, respectivamente, valor médio da corrente do cordão; valor eficaz da corrente do cordão; valor médio da tensão do cordão; valor eficaz da tensão do cordão; tempo de arco do cordão; comprimento do cordão; energia e energia por comprimento

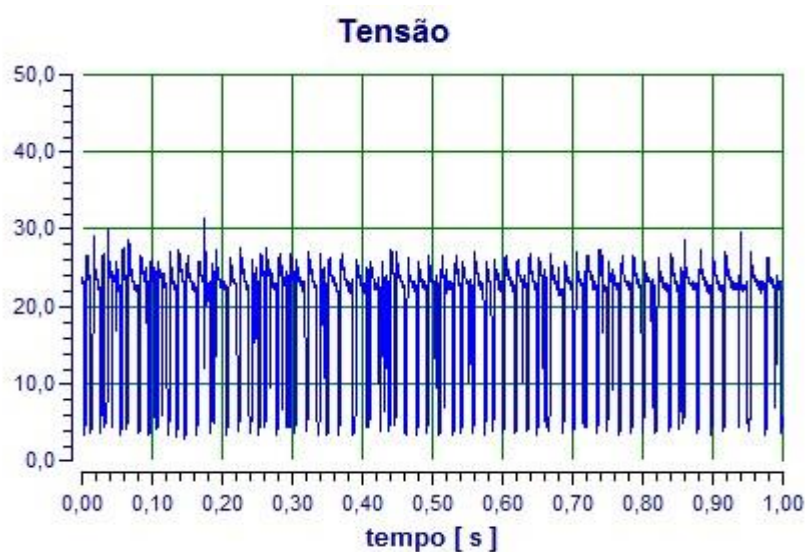


Figura 8.7 – Formas de onda da tensão do conjunto A14

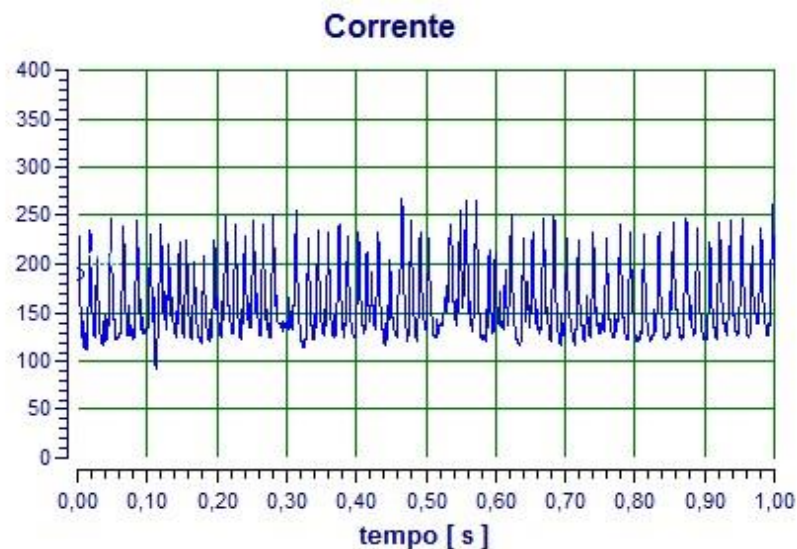


Figura 8.8 – Formas de onda da corrente do conjunto A14

Tabela 8.5 – Resultados da soldagem do conjunto A21

Amostra	Im (A)	Ie (A)	Um (V)	Ue (V)	ta (s)	Cc (mm)	En (kJ)	En/C (kJ/mm)
A211	141,80	147,00	22,50	24,00	24,20	187	74,80	0,40
A212	142,00	147,30	22,30	23,70	24,10	187	75,30	0,40
A213	146,00	148,90	22,50	23,20	24,00	187	76,80	0,41
A214	142,00	146,80	22,60	24,00	24,30	187	75,10	0,40
A215	142,00	146,70	22,80	24,30	24,30	187	75,50	0,40
Média Geral	142,76	147,34	22,54	23,84	24,18	187	75,50	0,40

Im, Ie, Um, Ue, ta, Cc, En e En/C, são, respectivamente, valor médio da corrente do cordão; valor eficaz da corrente do cordão; valor médio da tensão do cordão; valor eficaz da tensão do cordão; tempo de arco do cordão; comprimento do cordão; energia e energia por comprimento

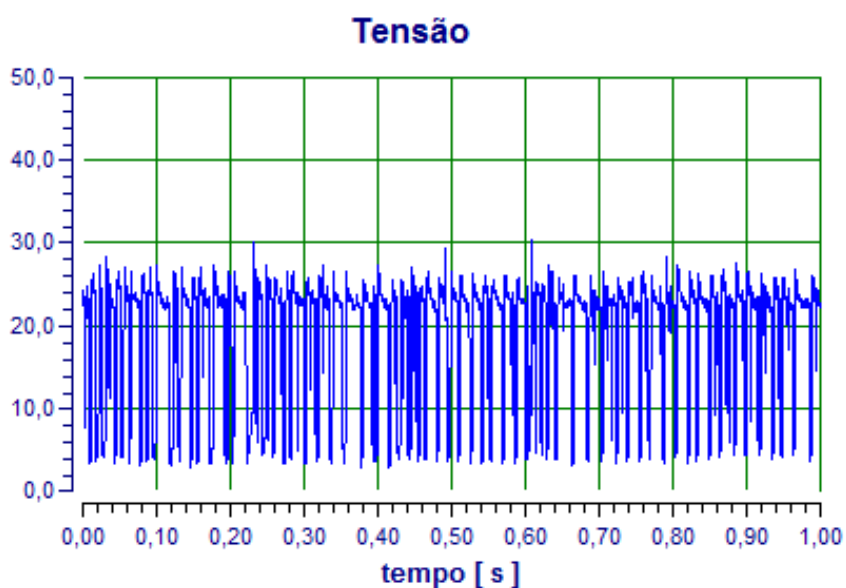


Figura 8.9 – Formas de onda da tensão do conjunto A21

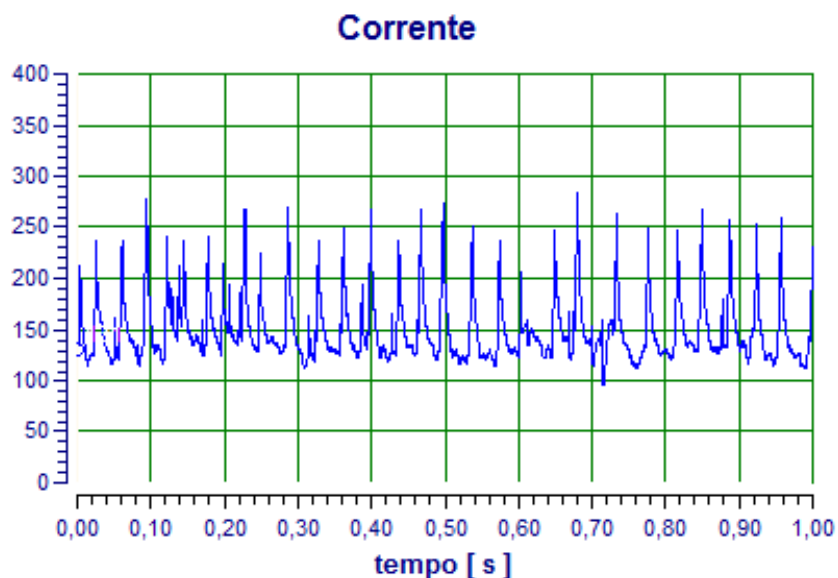


Figura 8.10 – Formas de onda da corrente do conjunto A21

Tabela 8.6 – Resultados da soldagem do conjunto A22

Amostra	Im (A)	Ie (A)	Um (V)	Ue (V)	ta (s)	Cc (mm)	En (kJ)	En/C (kJ/mm)
A221	141,70	147,00	22,40	23,80	24,10	187	74,90	0,40
A222	142,00	147,10	22,20	23,60	23,20	187	71,60	0,38
A223	145,90	148,60	22,40	23,20	24,00	187	76,50	0,41
A224	143,40	148,00	22,90	24,40	24,40	187	76,50	0,41
A225	144,00	148,60	22,80	24,30	24,30	187	76,10	0,41
Média Geral	143,40	147,86	22,54	23,86	24,00	187	75,12	0,40

Im, Ie, Um, Ue, ta, Cc, En e En/C, são, respectivamente, valor médio da corrente do cordão; valor eficaz da corrente do cordão; valor médio da tensão do cordão; valor eficaz da tensão do cordão; tempo de arco do cordão; comprimento do cordão; energia e energia por comprimento

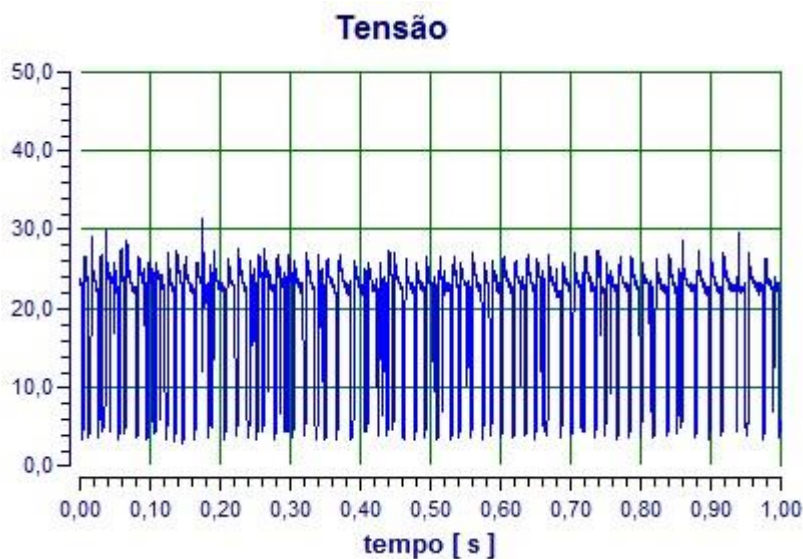


Figura 8.11 – Formas de onda da tensão do conjunto A22

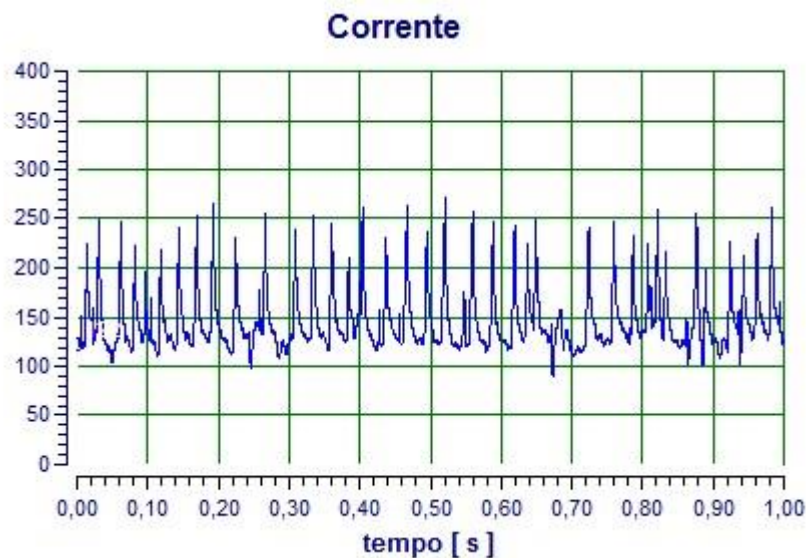


Figura 8.12 – Formas de onda da corrente do conjunto A22

Tabela 8.7 – Resultados da soldagem do conjunto A23

Amostra	Im (A)	Ie (A)	Um (V)	Ue (V)	ta (s)	Cc (mm)	En (kJ)	En/C (kJ/mm)
A231	142,30	146,00	23,10	24,20	22,60	187	71,90	0,38
A232	146,40	149,30	22,80	23,70	24,90	187	80,80	0,43
A233	144,80	148,10	22,80	23,80	24,80	187	79,30	0,42
A234	139,10	144,70	23,10	24,60	24,90	187	77,60	0,41
A235	141,10	146,00	22,70	24,00	25,10	187	79,00	0,42
Média Geral	142,74	146,82	22,90	24,06	24,46	187	77,72	0,42

Im, Ie, Um, Ue, ta, Cc, En e En/C, são, respectivamente, valor médio da corrente do cordão; valor eficaz da corrente do cordão; valor médio da tensão do cordão; valor eficaz da tensão do cordão; tempo de arco do cordão; comprimento do cordão; energia e energia por comprimento

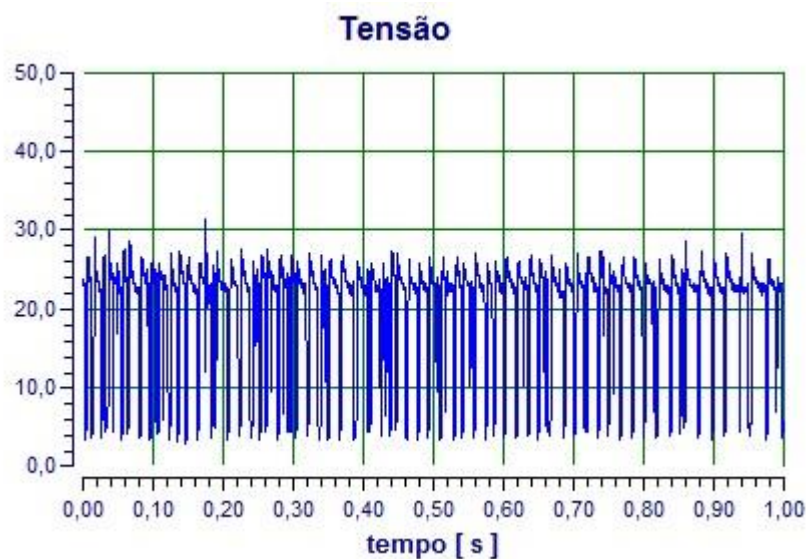


Figura 8.13 – Formas de onda da tensão do conjunto A23

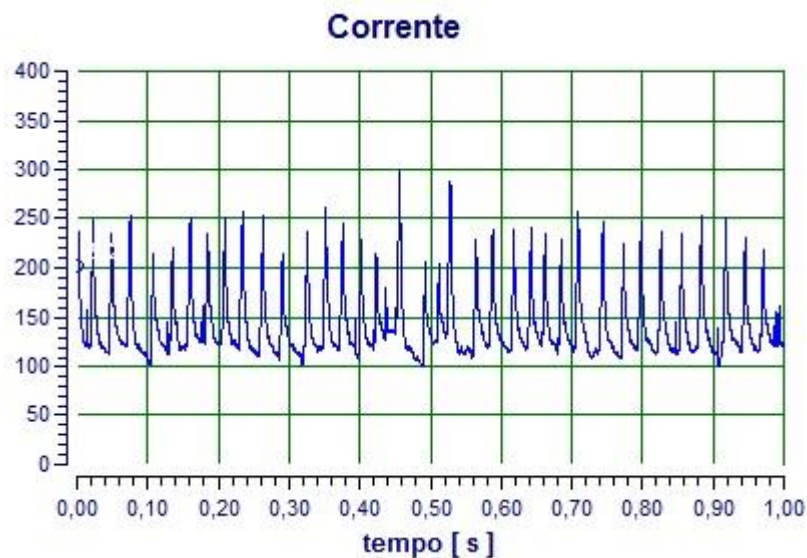


Figura 8.14 – Formas de onda da corrente do conjunto A23

Tabela 8.8 – Resultados da soldagem do conjunto A24

Amostra	Im (A)	le (A)	Um (V)	Ue (V)	ta (s)	Cc (mm)	En (kJ)	En/C (kJ/mm)
A241	146,00	149,50	23,10	24,20	24,60	187	80,50	0,43
A242	140,40	145,70	22,50	23,90	25,10	187	78,00	0,42
A243	148,90	151,90	22,50	23,50	24,90	187	81,10	0,43
A244	148,90	151,80	22,30	23,20	25,00	187	81,10	0,43
A245	148,60	152,00	22,60	23,70	24,80	187	80,30	0,43
Média Geral	146,56	150,18	22,60	23,70	24,88	187	80,20	0,43

Im, le, Um, Ue, ta, Cc, En e En/C, são, respectivamente, valor médio da corrente do cordão; valor eficaz da corrente do cordão; valor médio da tensão do cordão; valor eficaz da tensão do cordão; tempo de arco do cordão; comprimento do cordão; energia e energia por comprimento

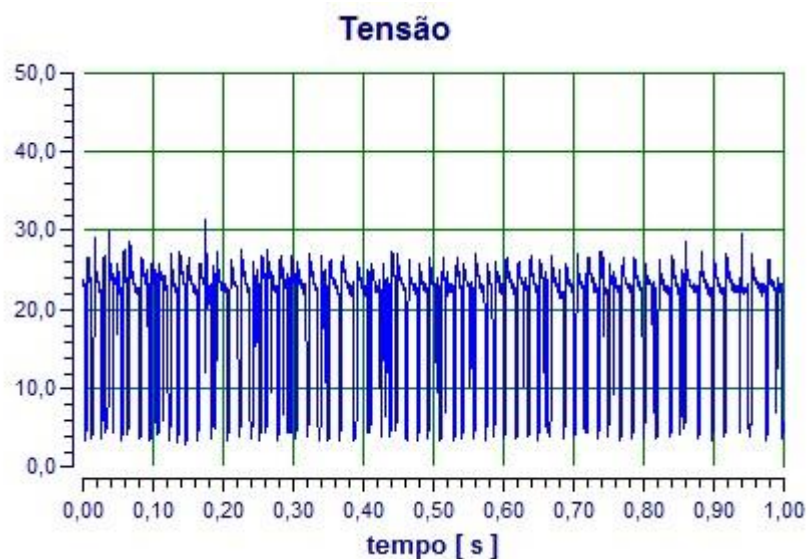


Figura 8.15 – Formas de onda da tensão do conjunto A24

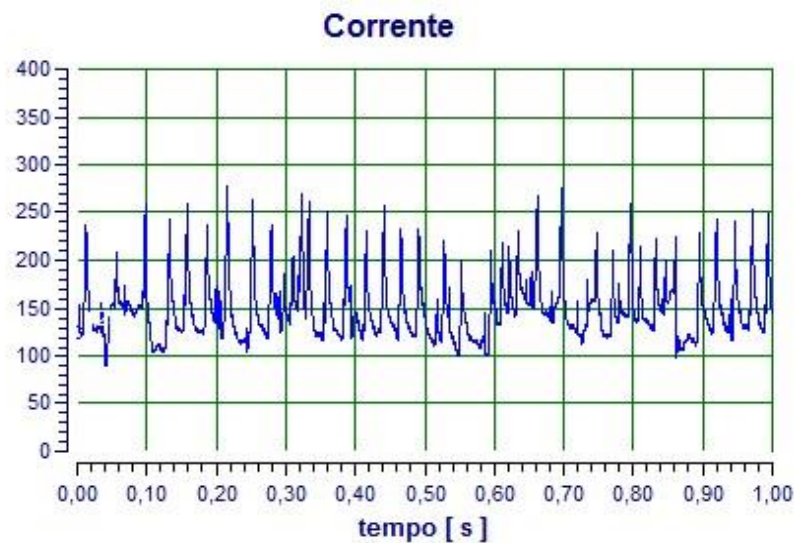


Figura 8.16 – Formas de onda da corrente do conjunto A24

Tabela 8.9 – Resultados da soldagem do conjunto B11

Amostra	Im (A)	Ie (A)	Um (V)	Ue (V)	ta (s)	Cc (mm)	En (kJ)	En/C (kJ/mm)
B111	161,00	165,70	20,70	22,50	18,70	187	59,00	0,32
B112	155,00	163,40	19,90	22,50	18,70	187	56,40	0,30
B113	147,80	157,10	19,20	22,00	18,60	187	50,50	0,27
B114	148,10	156,40	19,60	22,40	18,80	187	50,80	0,27
B115	156,20	164,30	19,30	21,80	19,10	187	54,40	0,29
Média Geral	153,42	161,38	19,74	22,24	18,78	187	54,22	0,29

Im, Ie, Um, Ue, ta, Cc, En e En/C, são, respectivamente, valor médio da corrente do cordão; valor eficaz da corrente do cordão; valor médio da tensão do cordão; valor eficaz da tensão do cordão; tempo de arco do cordão; comprimento do cordão; energia e energia por comprimento

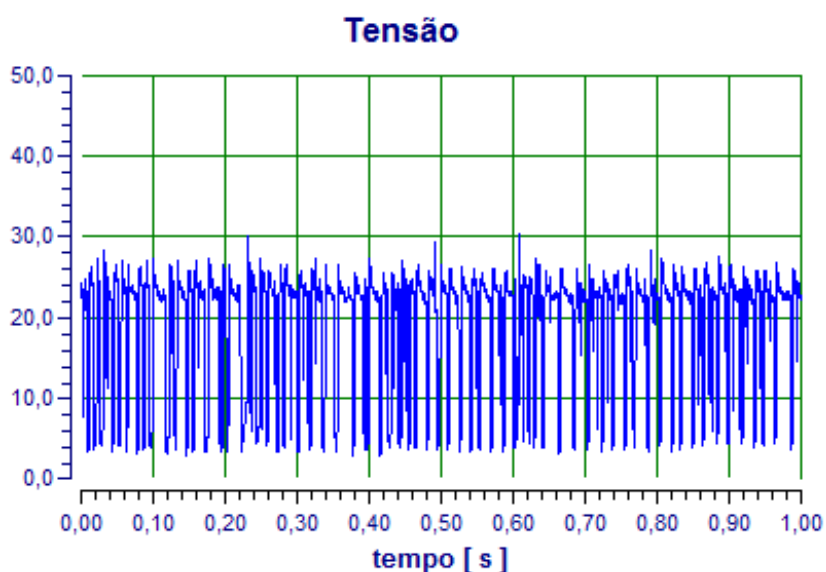


Figura 8.17 – Formas de onda da tensão do conjunto B11

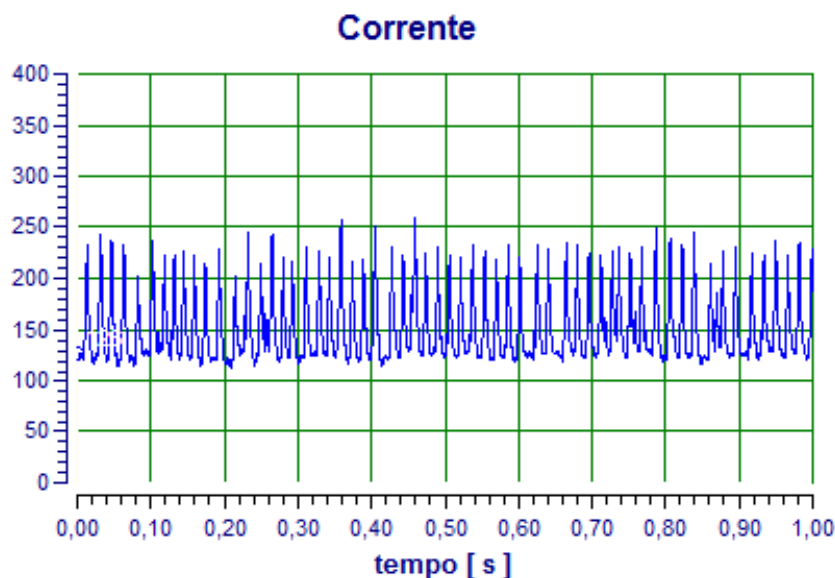


Figura 8.18 – Formas de onda da corrente do conjunto B11

Tabela 8.10 – Resultados da soldagem do conjunto B12

Amostra	I_m (A)	I_e (A)	U_m (V)	U_e (V)	t_a (s)	C_c (mm)	E_n (kJ)	E_n/C (kJ/mm)
B121	147,00	156,90	19,50	22,00	18,50	187	52,00	0,28
B122	155,30	161,40	19,70	21,60	18,50	187	54,50	0,29
B123	155,40	161,40	19,40	21,40	18,50	187	54,00	0,29
B124	156,40	162,20	19,60	21,40	18,60	187	55,40	0,30
B125	148,90	158,90	19,20	21,90	18,50	187	51,80	0,28
Média Geral	152,60	160,16	19,48	21,66	18,52	187	53,54	0,29

I_m , I_e , U_m , U_e , t_a , C_c , E_n e E_n/C , são, respectivamente, valor médio da corrente do cordão; valor eficaz da corrente do cordão; valor médio da tensão do cordão; valor eficaz da tensão do cordão; tempo de arco do cordão; comprimento do cordão; energia e energia por comprimento

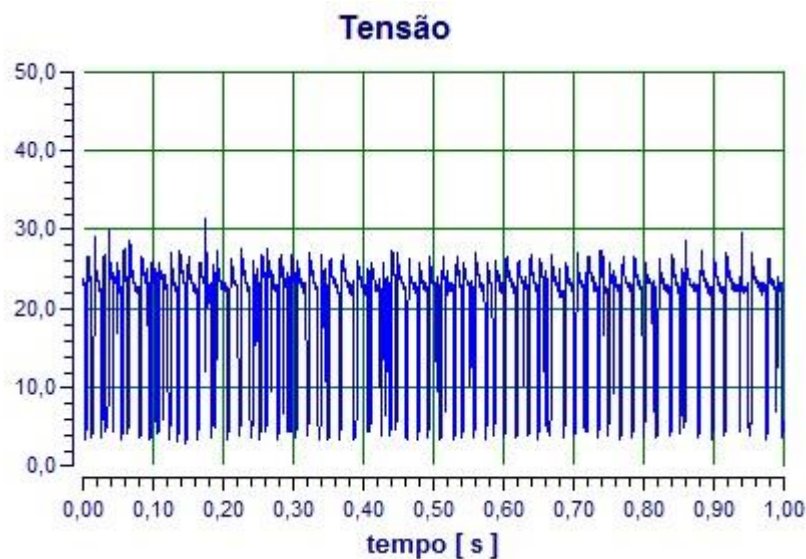


Figura 8.19 – Formas de onda da tensão do conjunto B12

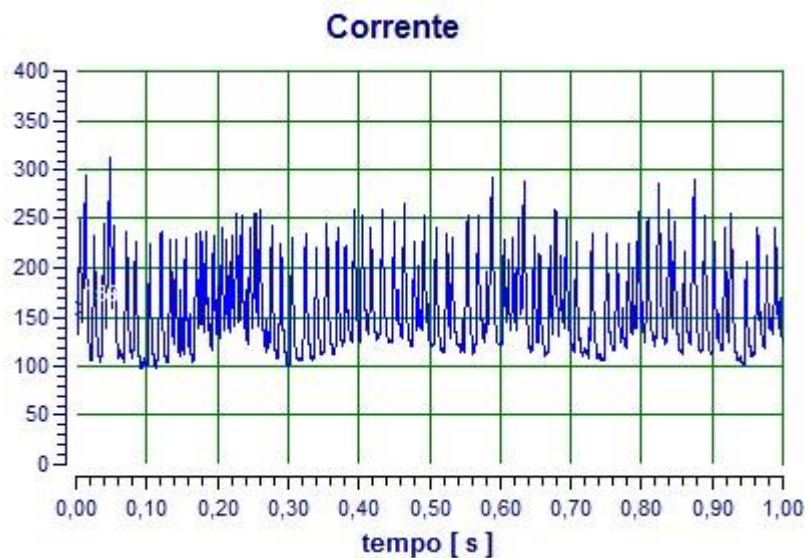


Figura 8.20 – Formas de onda da corrente do conjunto B12

Tabela 8.11 – Resultados da soldagem do conjunto B13

Amostra	Im (A)	le (A)	Um (V)	Ue (V)	ta (s)	Cc (mm)	En (kJ)	En/C (kJ/mm)
B131	153,00	159,70	20,70	22,60	18,60	187	55,10	0,29
B132	151,90	158,20	20,30	21,90	18,50	187	54,70	0,29
B133	151,10	158,20	20,00	21,80	18,40	187	53,40	0,29
B134	147,50	158,10	19,60	22,40	18,50	187	51,60	0,28
B135	150,40	158,30	19,50	21,40	18,40	187	52,10	0,28
Média Geral	150,78	158,50	20,02	22,02	18,48	187	53,38	0,29

Im, le, Um, Ue, ta, Cc, En e En/C, são, respectivamente, valor médio da corrente do cordão; valor eficaz da corrente do cordão; valor médio da tensão do cordão; valor eficaz da tensão do cordão; tempo de arco do cordão; comprimento do cordão; energia e energia por comprimento

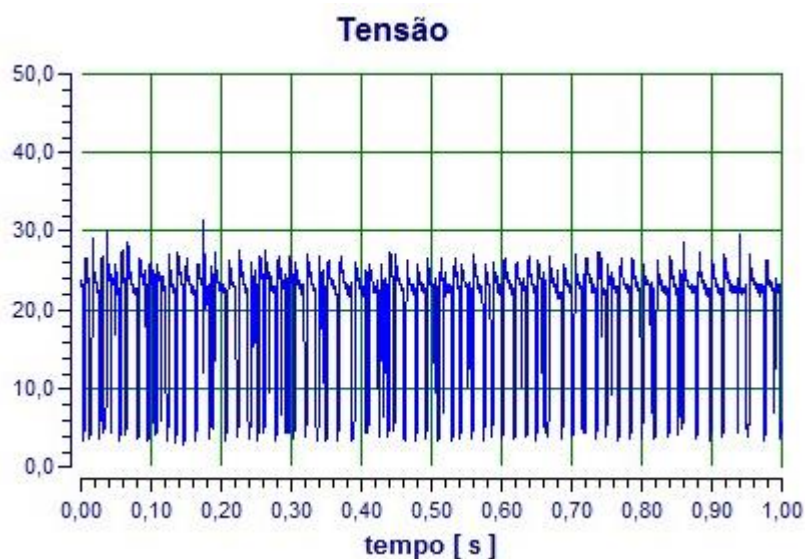


Figura 8.21 – Formas de onda da tensão do conjunto B13

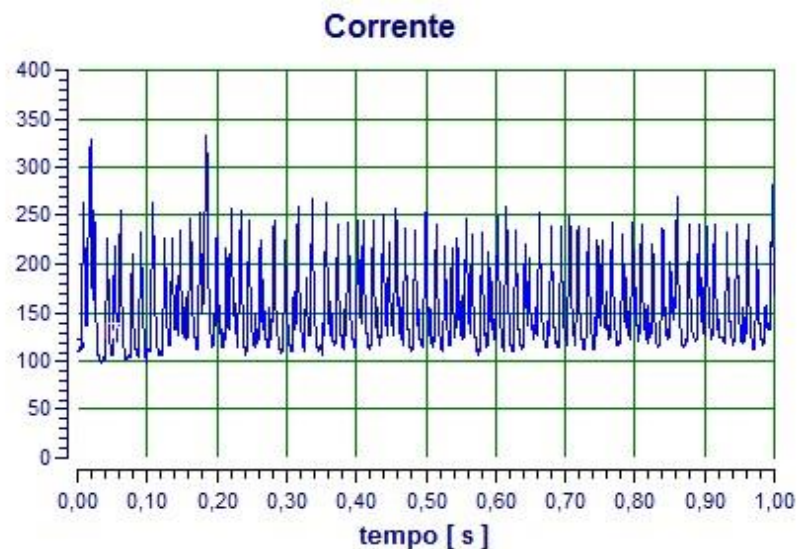


Figura 8.22 – Formas de onda da corrente do conjunto B13

Tabela 8.12 – Resultados da soldagem do conjunto B14

Amostra	I_m (A)	I_e (A)	U_m (V)	U_e (V)	t_a (s)	C_c (mm)	E_n (kJ)	E_n/C (kJ/mm)
B141	145,10	156,60	19,30	22,00	18,50	187	50,10	0,27
B142	153,90	160,80	19,90	22,00	18,50	187	53,40	0,29
B143	152,30	159,00	19,60	21,40	18,40	187	52,70	0,28
B144	153,10	160,10	19,70	21,50	18,40	187	52,90	0,28
B145	151,00	158,10	19,60	21,40	18,40	187	52,40	0,28
Média Geral	151,08	158,92	19,62	21,66	18,44	187	52,30	0,28

I_m , I_e , U_m , U_e , t_a , C_c , E_n e E_n/C , são, respectivamente, valor médio da corrente do cordão; valor eficaz da corrente do cordão; valor médio da tensão do cordão; valor eficaz da tensão do cordão; tempo de arco do cordão; comprimento do cordão; energia e energia por comprimento

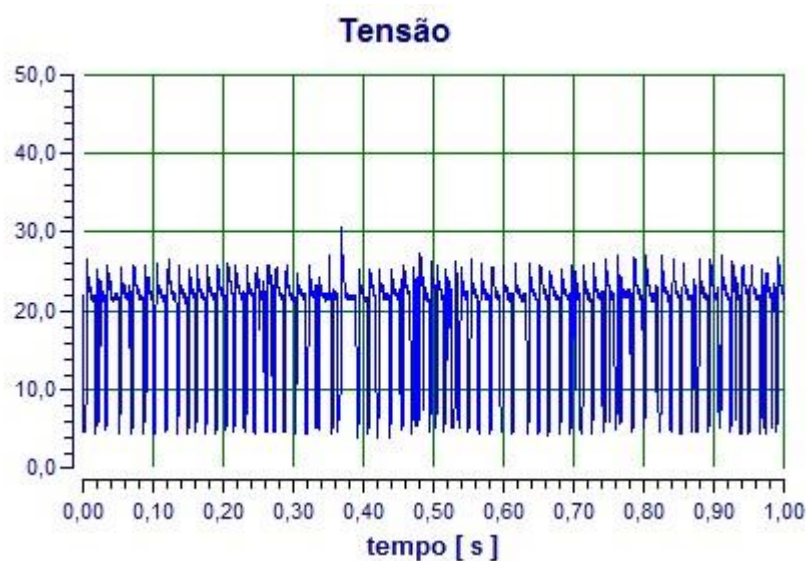


Figura 8.23 – Formas de onda da tensão do conjunto B14

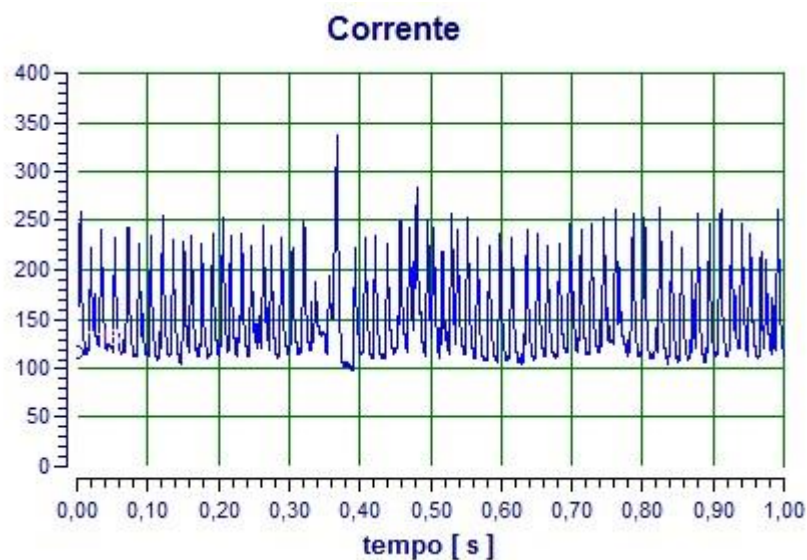


Figura 8.24 – Formas de onda da corrente do conjunto B14

Tabela 8.13 – Resultados da soldagem do conjunto B21

Amostra	Im (A)	le (A)	Um (V)	Ue (V)	ta (s)	Cc (mm)	En (kJ)	En/C (kJ/mm)
B211	147,50	151,30	22,70	24,10	24,60	187	78,30	0,42
B212	145,70	149,50	22,70	24,10	24,60	187	77,60	0,41
B213	144,40	148,70	22,60	23,90	24,70	187	76,90	0,41
B214	142,50	149,00	22,20	24,00	24,80	187	76,60	0,41
B215	142,00	148,40	22,20	23,90	24,70	187	76,20	0,41
Média Geral	144,42	149,38	22,48	24,00	24,68	187	77,12	0,41

Im, le, Um, Ue, ta, Cc, En e En/C, são, respectivamente, valor médio da corrente do cordão; valor eficaz da corrente do cordão; valor médio da tensão do cordão; valor eficaz da tensão do cordão; tempo de arco do cordão; comprimento do cordão; energia e energia por comprimento

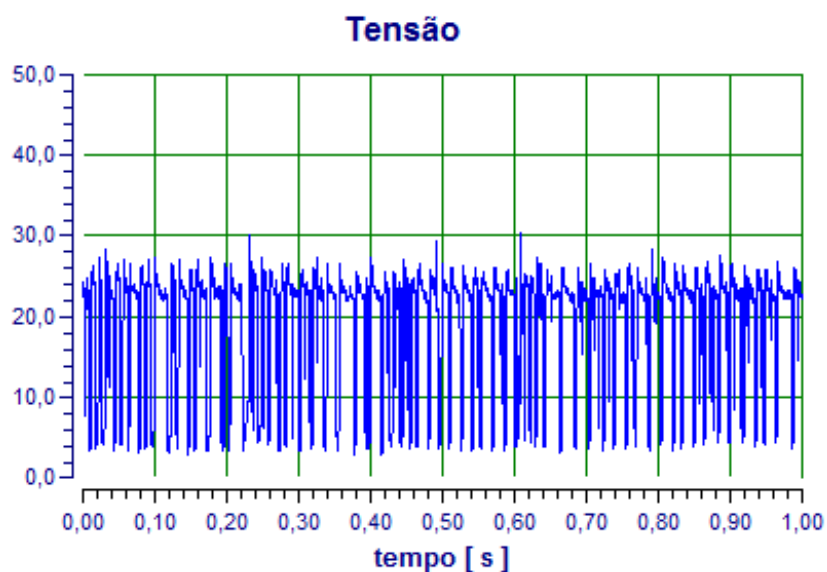


Figura 8.25 – Formas de onda da corrente do conjunto B21

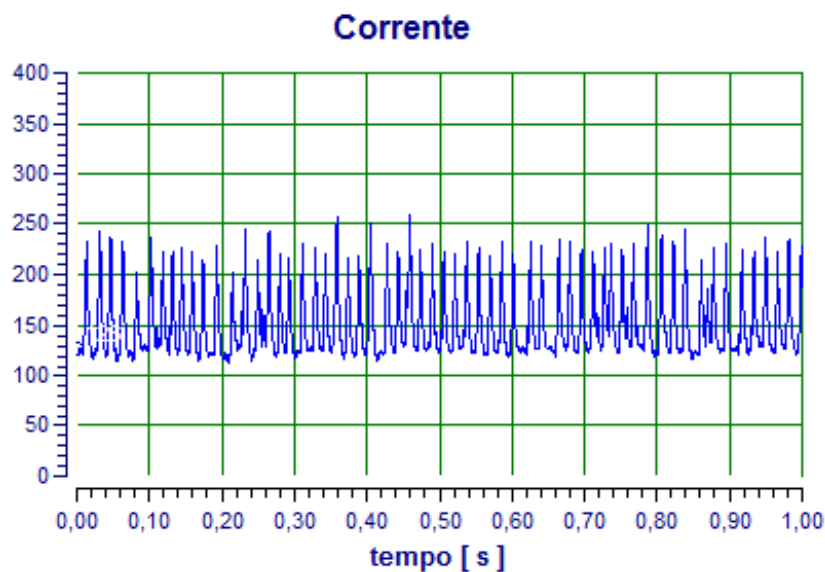


Figura 8.26 – Formas de onda da tensão do conjunto B21

Tabela 8.1.14 – Resultados da soldagem do conjunto B22

Amostra	Im (A)	le (A)	Um (V)	Ue (V)	ta (s)	Cc (mm)	En (kJ)	En/C (kJ/mm)
B221	139,80	144,60	22,40	23,70	24,30	187	74,00	0,40
B222	145,00	148,90	22,40	23,60	24,70	187	77,90	0,42
B223	147,10	150,80	22,60	23,80	24,70	187	79,00	0,42
B224	145,60	149,60	22,30	23,50	24,70	187	77,60	0,41
B225	139,20	144,60	23,70	25,70	23,20	187	70,70	0,38
Média Geral	142,10	146,75	23,05	24,65	23,95	187	74,30	0,41

Im, le, Um, Ue, ta, Cc, En e En/C, são, respectivamente, valor médio da corrente do cordão; valor eficaz da corrente do cordão; valor médio da tensão do cordão; valor eficaz da tensão do cordão; tempo de arco do cordão; comprimento do cordão; energia e energia por comprimento

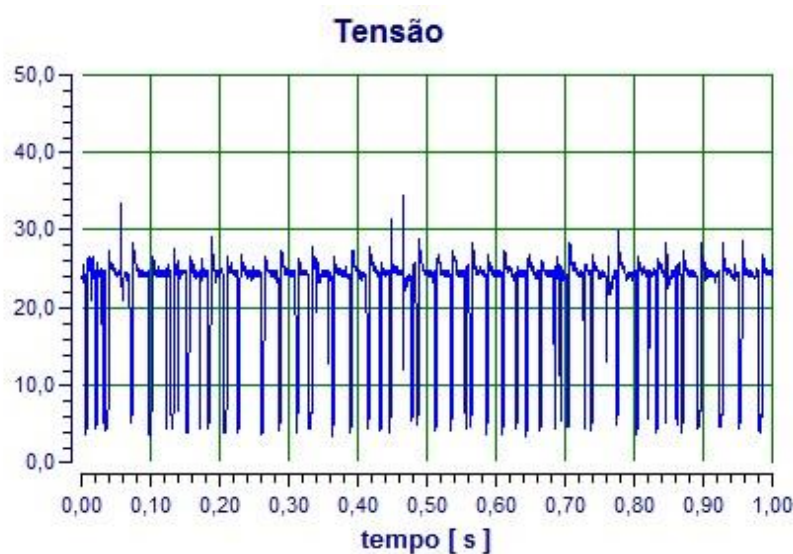


Figura 8.27 – Formas de onda da corrente do conjunto B22

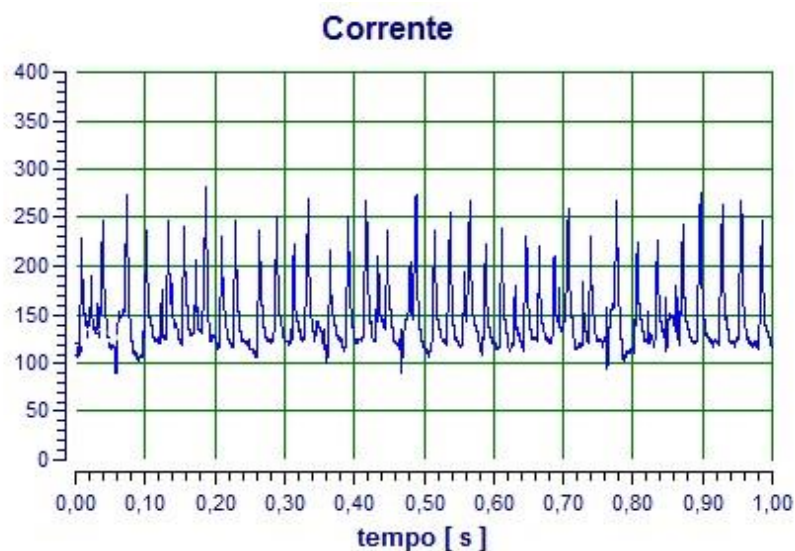


Figura 8.28 – Formas de onda da corrente do conjunto B22

Tabela 8.15 – Resultados da soldagem do conjunto B23

Amostra	Im (A)	Ie (A)	Um (V)	Ue (V)	ta (s)	Cc (mm)	En (kJ)	En/C (kJ/mm)
B231	143,70	149,30	22,40	24,20	25,00	187	77,80	0,42
B232	145,60	150,00	22,10	23,40	24,40	187	77,40	0,41
B233	140,10	146,90	22,00	23,80	24,60	187	74,30	0,40
B234	144,40	148,10	22,60	23,90	24,50	187	77,50	0,41
B235	140,60	147,00	22,10	23,90	24,60	187	75,20	0,40
Média Geral	142,88	148,26	22,24	23,84	24,62	187	76,44	0,41

Im, Ie, Um, Ue, ta, Cc, En e En/C, são, respectivamente, valor médio da corrente do cordão; valor eficaz da corrente do cordão; valor médio da tensão do cordão; valor eficaz da tensão do cordão; tempo de arco do cordão; comprimento do cordão; energia e energia por comprimento

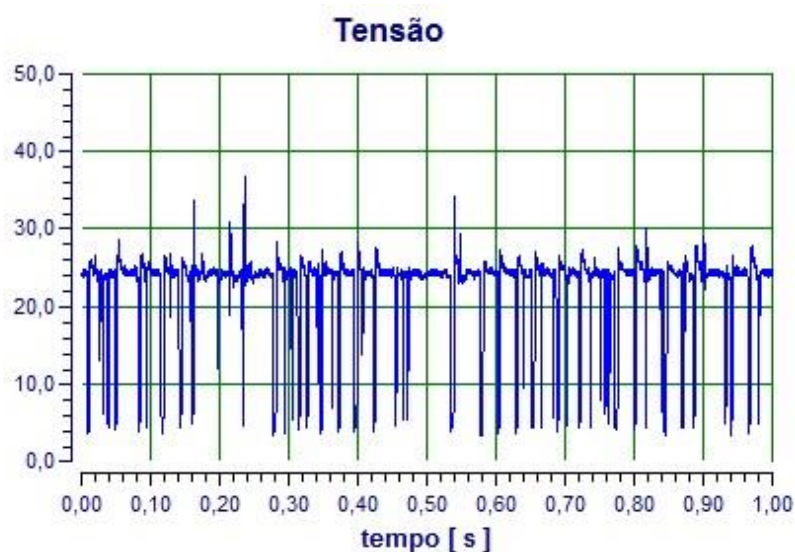


Figura 8.29 – Formas de onda da corrente do conjunto B23

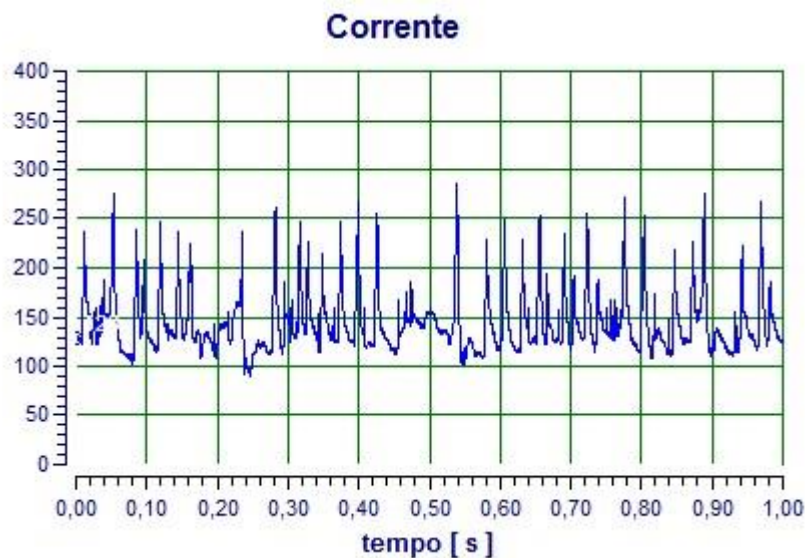


Figura 8.30 – Formas de onda da corrente do conjunto B23

Tabela 8.16 – Resultados da soldagem do conjunto B24

Amostra	Im (A)	Ie (A)	Um (V)	Ue (V)	ta (s)	Cc (mm)	En (kJ)	En/C (kJ/mm)
B241	143,10	148,00	22,20	23,80	24,30	187	74,50	0,40
B242	145,10	149,30	22,40	23,70	24,50	187	76,80	0,41
B243	146,90	150,60	22,70	23,90	23,70	187	75,60	0,40
B244	138,70	145,20	22,10	24,00	24,70	187	73,90	0,40
B245	142,70	147,20	22,70	24,20	24,60	187	75,70	0,40
Média Geral	143,40	148,06	22,42	23,92	24,36	187	75,30	0,40

Im, Ie, Um, Ue, ta, Cc, En e En/C, são, respectivamente, valor médio da corrente do cordão; valor eficaz da corrente do cordão; valor médio da tensão do cordão; valor eficaz da tensão do cordão; tempo de arco do cordão; comprimento do cordão; energia e energia por comprimento

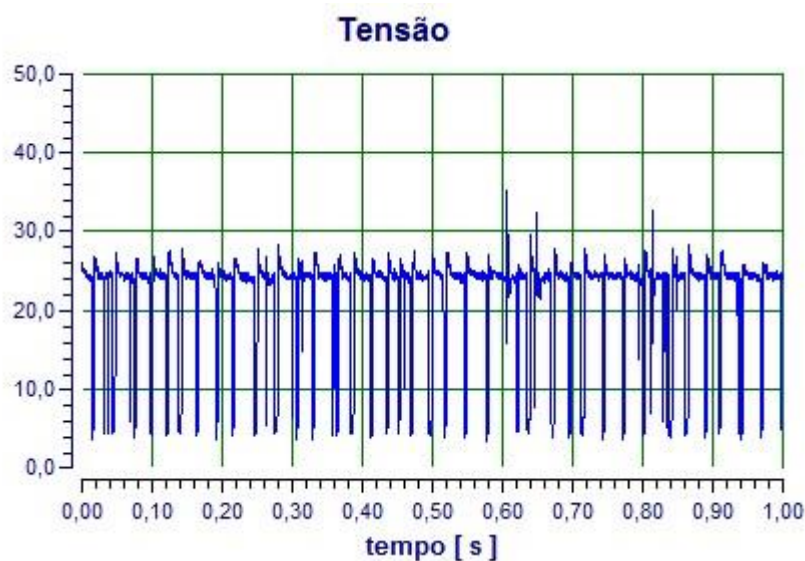


Figura 8.31 – Formas de onda da corrente do conjunto B24

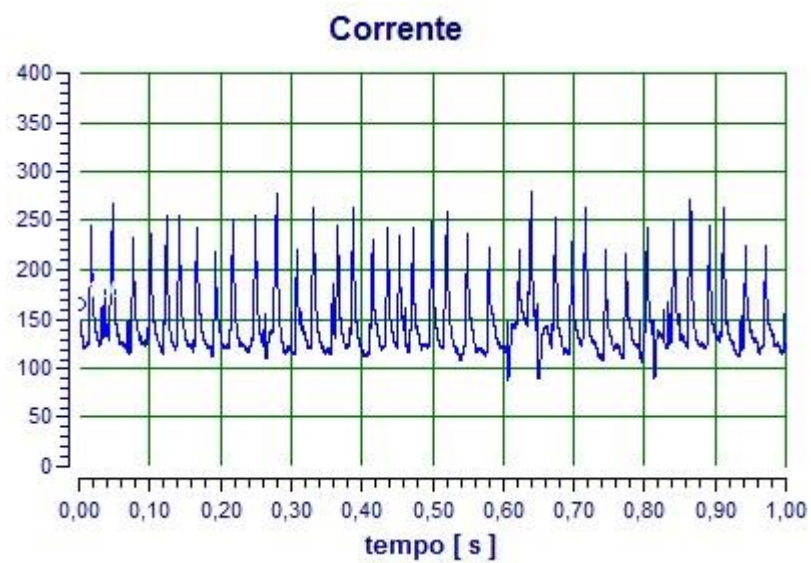


Figura 8.32 – Formas de onda da corrente do conjunto B24

8.2 MÉDIAS DE MICRODUREZA VICKERS DOS CORPOS DE PROVA

Tabela 8.17 – Média de microdureza (HV) das amostras

Amostra	MB	ZAC	ZF
A111	158,22	168,13	190,19
	159,06	167,38	187,94
	160,65	169,14	192,09
A121	153,39	159,88	175,94
	149,86	159,06	180,32
	150,46	156,65	177,01
A135	169,55	177,31	202,22
	173,78	181,15	206,70
	173,97	180,12	209,71
A142	152,53	157,66	172,80
	156,81	162,68	182,80
	154,26	159,61	181,32
A214	173,73	177,81	190,86
	170,49	174,08	189,66
	169,27	172,06	186,99
A222	154,54	157,33	171,11
	158,60	161,51	177,14
	153,89	157,43	172,42
A234	156,80	159,73	175,52
	149,72	152,34	170,43
	154,63	157,27	170,36
A242	152,72	156,76	168,33
	151,27	155,16	170,11
	154,90	158,50	175,86
B113	167,09	178,84	202,88
	162,27	171,91	197,63
	171,17	183,16	208,77
B122	169,90	178,96	203,08
	172,64	180,85	204,78
	171,24	178,29	204,99
B141	167,58	172,51	196,77
	171,75	176,49	200,46
	167,14	174,43	201,96
B215	145,78	150,77	161,01
	150,00	154,97	165,41
	148,28	152,70	165,70
B223	148,06	152,84	164,68
	146,83	150,60	160,39
	148,11	152,77	168,42
B235	156,68	161,03	171,80
	156,92	161,14	174,04
	158,04	162,68	175,98
B242	151,34	156,26	168,96
	153,03	157,57	169,76
	153,23	157,74	170,71

MB, ZAC e ZF, são, respectivamente, metal de base; zona termicamente afetada; zona de fusão

CP	DESLOCAMENTOS em (mm)														
	A	B	C		D	E	F	G	H	I	J	K		L	
	X	X	X	Y	X	X	X	Y	Y	X	X	X	Y	X	Y
B134	0,94	0,94	0	0	0	0	0	0,30	0,30	0,99	0,99	0	0,60	0	0,60
B135	0,35	0,35	0	0	0	0	0	0,32	0,32	0,45	0,45	0	0,64	0	0,64
B141	0	0	0	0	0	0	0	0,55	0,55	0,10	0,10	0	1,10	0	1,10
B142	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B143	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B144	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B145	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B211	0,09	0,09	0	0	0	0	0	0,10	0,10	0,69	0,69	0	0,20	0	0,20
B212	0,29	0,29	0	0	0	0	0	0	0	0,40	0,40	0	0	0	0
B213	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B214	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B215	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B221	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B222	0,41	0,41	0	0	0	0	0	0,28	0,28	0,41	0,41	0	0,56	0	0,56
B223	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B224	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B225	0,35	0,35	0	0	0	0	0	0	0	0,41	0,41	0	0	0	0
B231	0	0	0	0,17	0	0	0	0,23	0,23	0,94	0,94	0	0,46	0	0,46
B232	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B233	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B234	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B235	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B241	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B242	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B243	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B244	0,42	0,42	0	0	0	0	0	0,22	0,22	0,47	0,47	0	0,44	0	0,44
B245	0,35	0,35	0	0	0	0	0	0,30	0,30	0,50	0,50	0	0,60	0	0,60

As ordenadas que não aparecem se anulam, como exemplo a direção Z

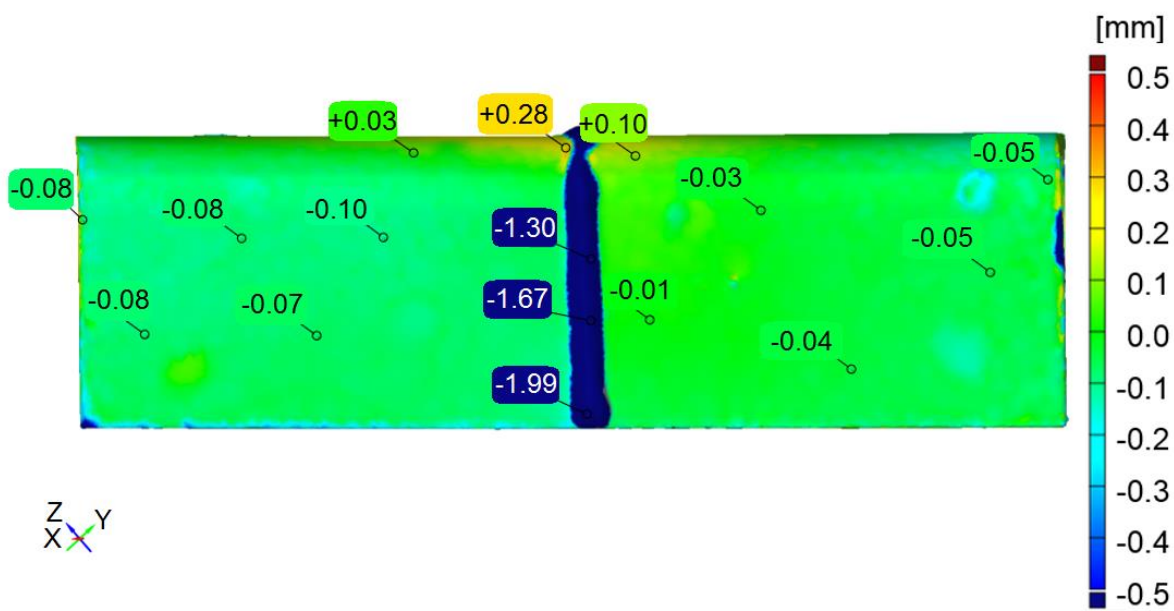


Figura 8.34 – Distorção do corpo de prova A133

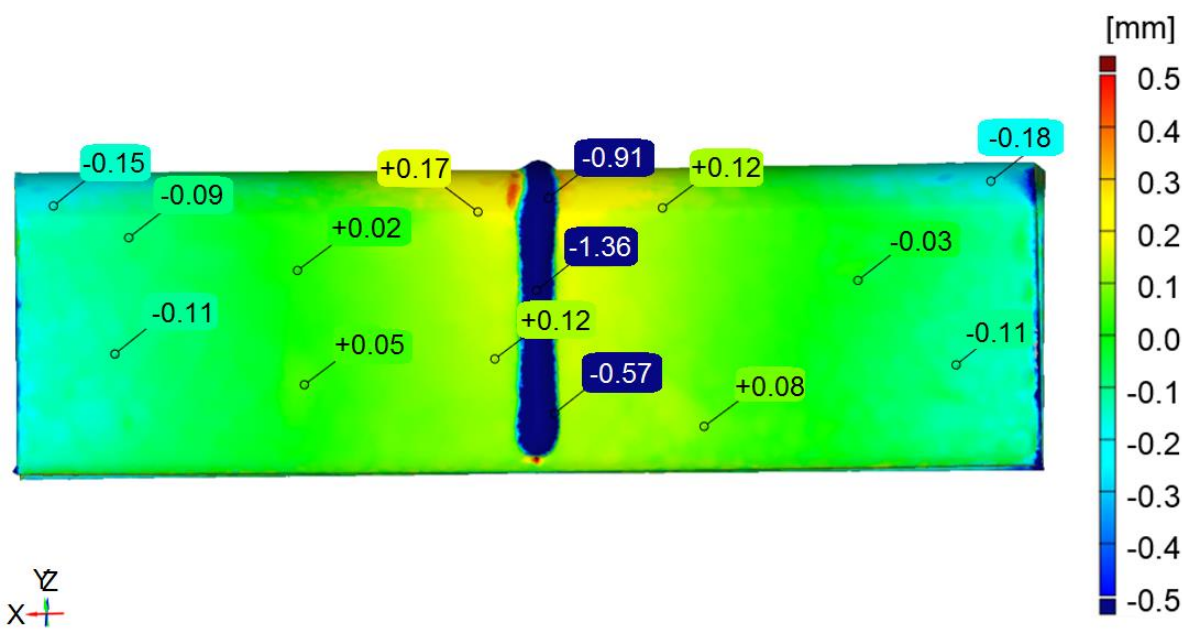


Figura 8.35 – Distorção do corpo de prova A233

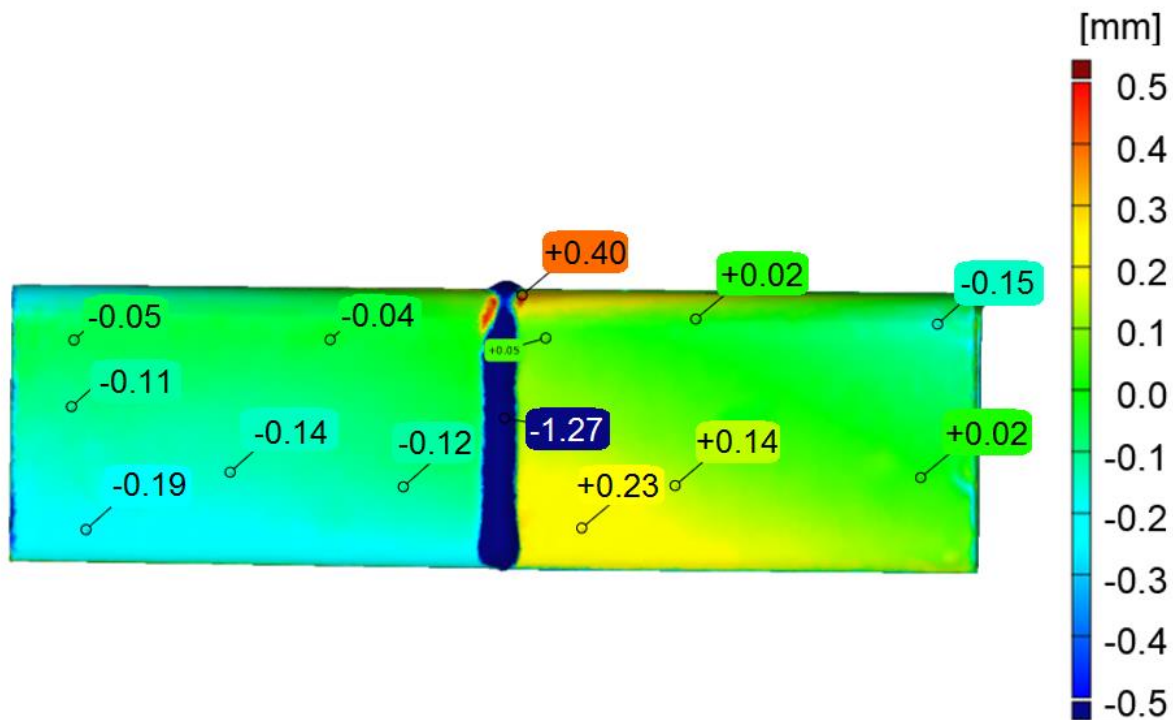


Figura 8.36 – Distorção do corpo de prova B133

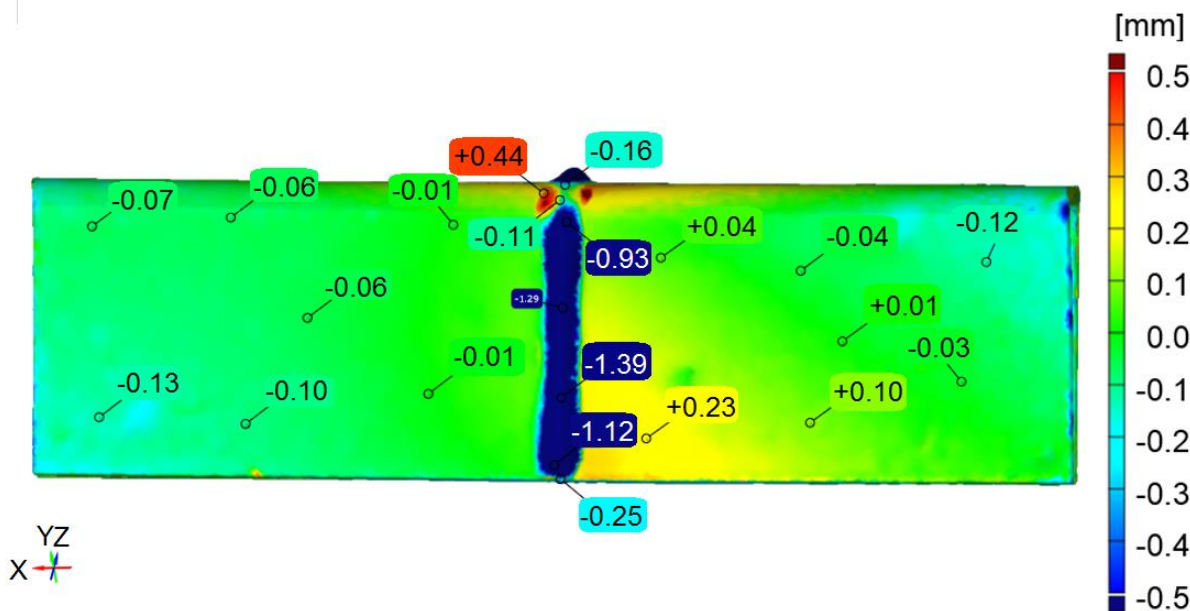


Figura 8.37 – Distorção do corpo de prova B233

8.4 IMAGENS DA MACROGRAFIA

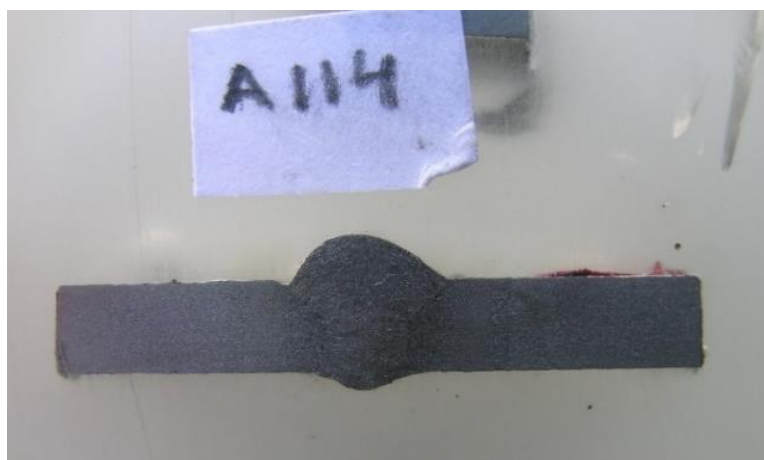


Figura 8.38 – Análise macrográfica do corpo de prova A114



Figura 8.39 – Análise macrográfica do corpo de prova A123



Figura 8.40 – Análise macrográfica do corpo de prova A134

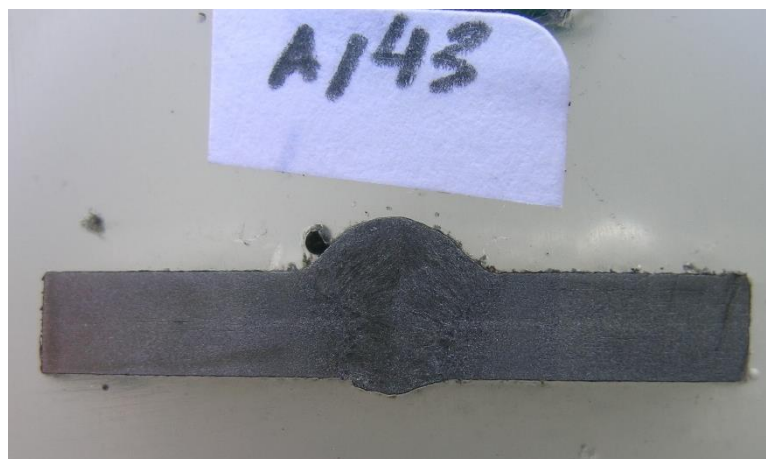


Figura 8.41 – Análise macrográfica do corpo de prova A143

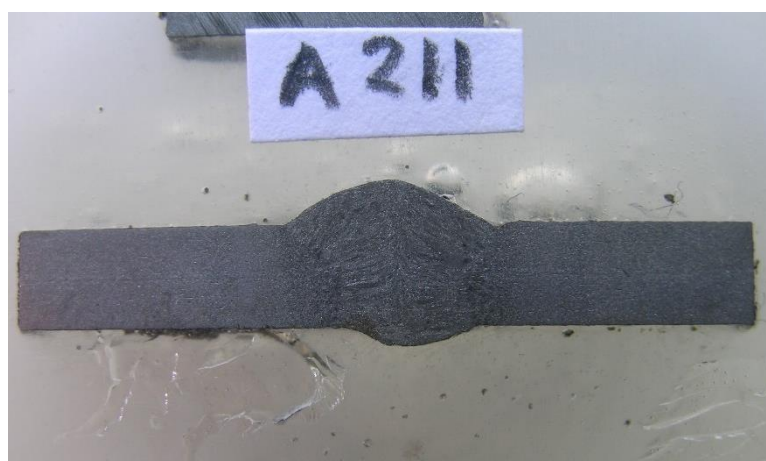


Figura 8.42 – Análise macrográfica do corpo de prova A211



Figura 8.43 – Análise macrográfica do corpo de prova A221

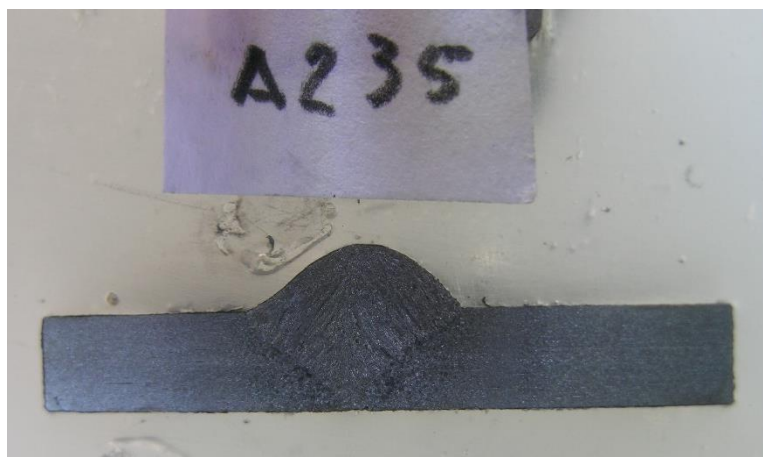


Figura 8.44 – Análise macrográfica do corpo de prova A235



Figura 8.45 – Análise macrográfica do corpo de prova A245

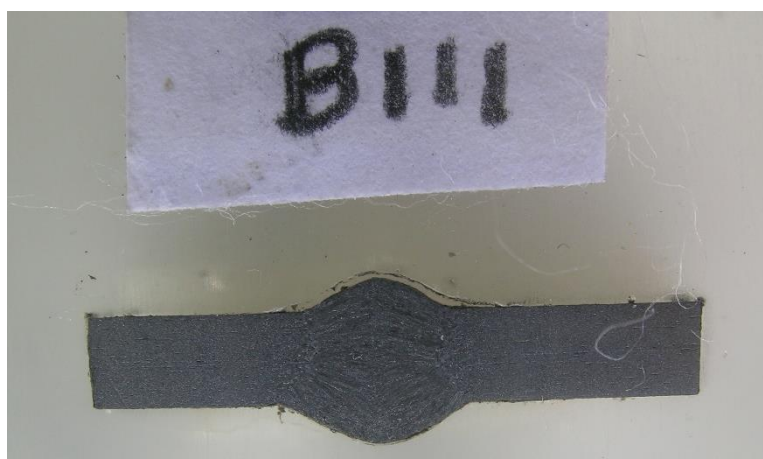


Figura 8.46 – Análise macrográfica do corpo de prova B111

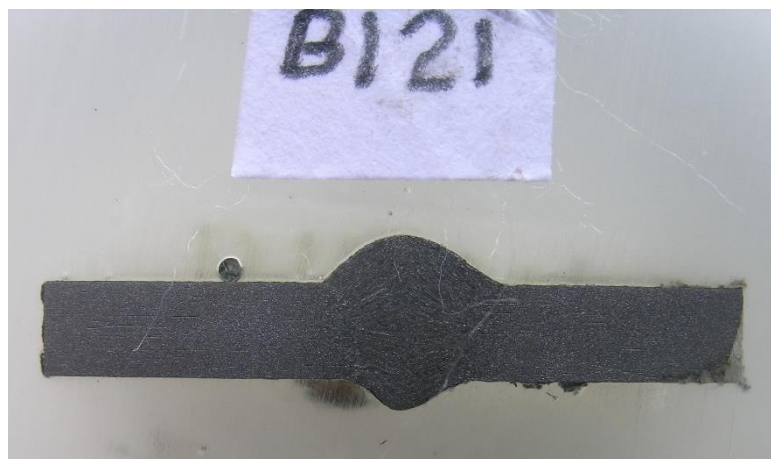


Figura 8.47 – Análise macrográfica do corpo de prova B121



Figura 8.48 – Análise macrográfica do corpo de prova B133



Figura 8.49 – Análise macrográfica do corpo de prova B145

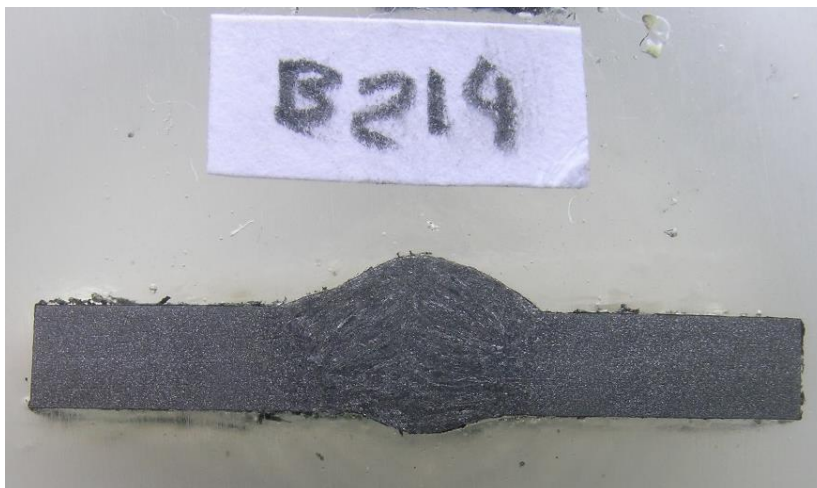


Figura 8.50 – Análise macrográfica do corpo de prova B214

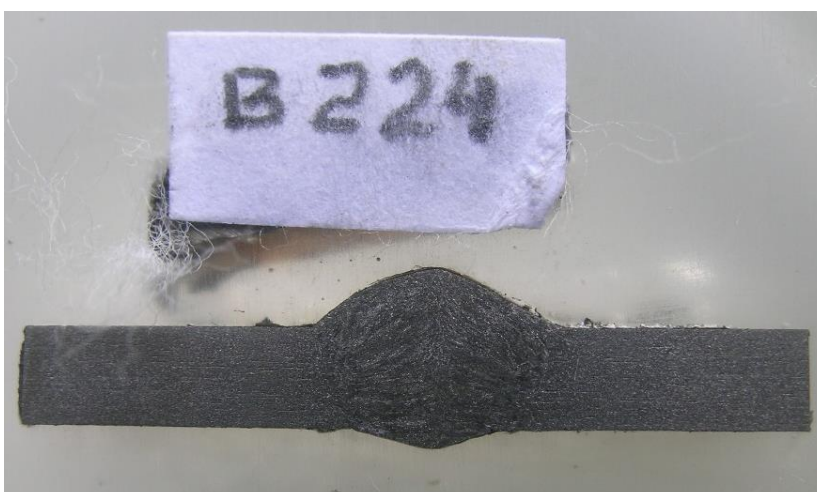


Figura 8.51 – Análise macrográfica do corpo de prova B224

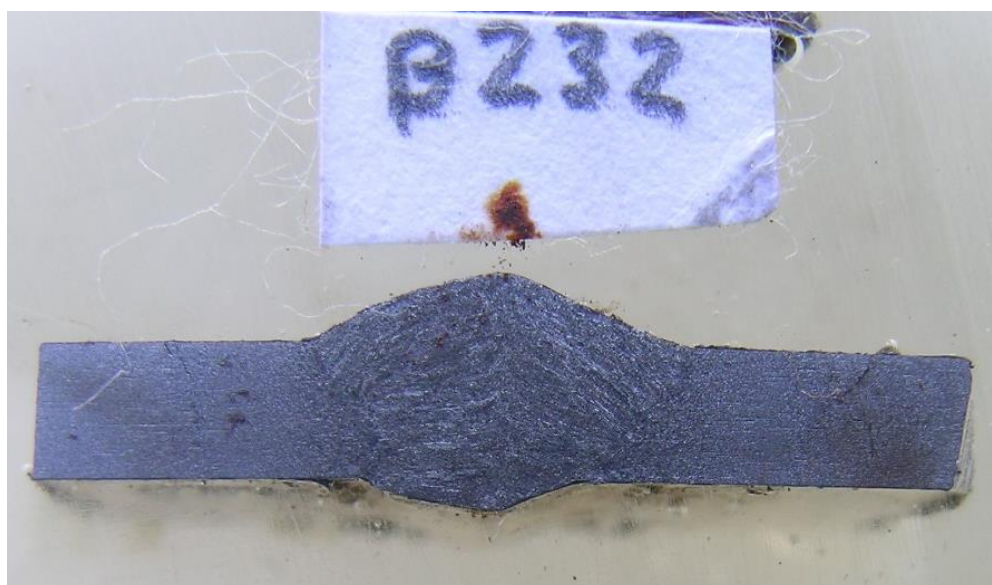


Figura 8.52 – Análise macrográfica do corpo de prova B232



Figura 8.53 – Análise macrográfica do corpo de prova B243

8.5 TESTE DE ACELERAÇÃO DA CORROSÃO POR NÉVOA SALINA

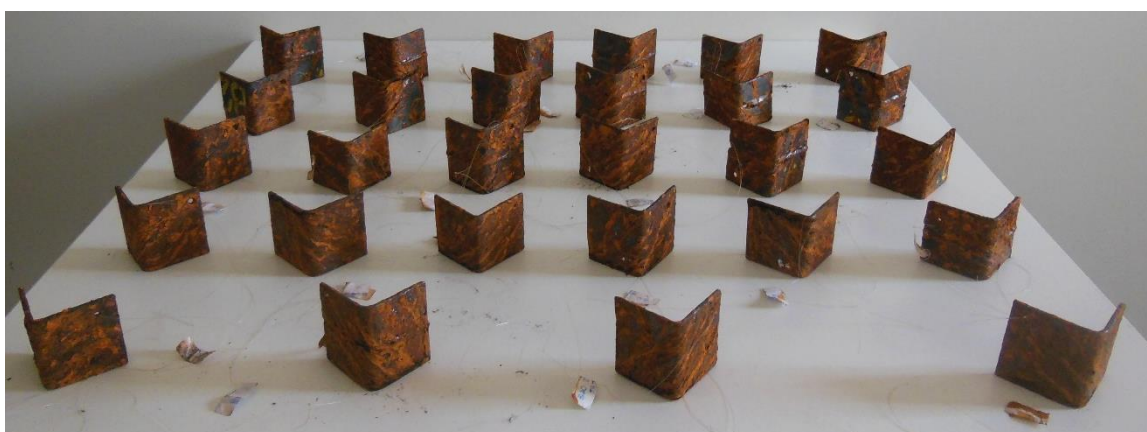


Figura 8.54 – Corpos de prova retirados da câmara de aceleração da corrosão



Figura 8.55 – Imagem do corpo de prova B146DSS



Figura 8.56 – Imagem do corpo de prova B246ECS



Figura 8.57 – Corpos de prova limpos depois da estufa



Figura 8.58 - Conjuntos de corpos de prova A1 e A2



Figura 8.59 - Conjuntos de corpos de prova B1 e B2