

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM

**DESENVOLVIMENTO DE ENVELOPES OPERACIONAIS PARA PROCESSO
MIG/MAG ROBOTIZADO COM DIFERENTES GASES DE PROTEÇÃO**

por

Valtair de Jesus Alves

Dissertação para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre
2009

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM

**DESENVOLVIMENTO DE ENVELOPES OPERACIONAIS PARA PROCESSO
MIG/MAG ROBOTIZADO COM DIFERENTES GASES DE PROTEÇÃO**

VALTAIR DE JESUS ALVES
Tecnólogo em Mecânica

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre
2009

Esta Dissertação foi julgada adequadamente para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Guerra Machado

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Aleir Antonio Fontana De Paris (UFSM)

Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro (PROMEC – UFRGS)

Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha (PPGEM – UFRGS)

Prof. Dr. Carlos Perez Bergmann
Coordenador do PPGEM

DEDICATÓRIA

A minha esposa Marli, minha luz, por dividir e compartilhar os momentos bons e difíceis, pela compreensão e atenção aos nossos filhos nos momentos em que estava distante neste período da minha carreira Profissional.

A meus filhos, Kerlin Paola, Kevin Eduardo, Kenton Rafael, que são minha fonte de energia e que me motivam a viver e lutar por eles.

A meus pais, Alfredo Alves (*in memorian*) e Leandrina Alves, por suas histórias de sucesso na educação dos filhos, diante de todas as adversidades.

A meus irmãos, José Valeri, Maria de Lurdes, Ana Luisa e Luciane, por fazerem parte da minha vida.

“Tudo o que nós somos é o resultado daquilo que pensamos no passado”.
(The Secret)

AGRADECIMENTOS

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu sincero reconhecimento.

Ao professor Dr. Ivan Guerra Machado pelo estímulo, dedicação e confiança depositada durante o desenvolvimento do trabalho e pela sua capacidade de ensinar.

Ao Gerente, Supervisor e a Empresa JOHN DEERE BRASIL pelo apoio e recursos prestado para que viabilizasse o desenvolvimento do trabalho que foi de suma importância.

Aos colegas de Laboratório, Doutorando Richard Lermen e Roger N. Verástegui, ao engenheiro Douglas de Paula Santos e ao técnico Luiz M. H. Zaniratti pelas sugestões e observações valiosas para que concretizasse o trabalho.

Aos professores da UFRGS e colegas que, de alguma forma, colaboram na minha formação e para desenvolvimento do trabalho.

Aos Supervisores de Produção, colegas de trabalho, soldadores e técnicos de laboratório da empresa pelo suporte prestado no desenvolvimento do trabalho.

A minha família: Esposa, filhos, mãe e irmãos que estão sempre comigo. Meu agradecimento.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABELAS.....	XII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XIV
RESUMO.....	XVII
ABSTRACT.....	XVIII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo Geral.....	2
1.2 Objetivo Específico	2
1.3 Justificativas.....	3
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	5
2.1 Soldagem Robotizada.....	5
2.2 Processo de Soldagem MIG/MAG (GMAW).....	7
2.2.1 Principais Características do Processo.....	8
2.2.2 Vantagem e Desvantagem do Processo MIG/MAG	8
2.2.3 Princípio dos Equipamentos e Consumíveis do Processo MIG/MAG	9
2.2.4 Fontes de Potência.....	10
2.2.5 Alimentador de Arame.....	12
2.3 Gás de Proteção.....	13
2.3.1 Introdução	13
2.3.2 Propriedades dos Gases	14
2.3.3 Gases de Proteção na Soldagem.....	16
2.4 Eletrodo ou Metal de Adição	17
2.5 Variáveis do Processo na Soldagem MIG/MAG.....	18
2.5.1 Tensão de Soldagem.....	18
2.5.2 Corrente de Soldagem.....	19
2.5.3 Velocidade de Soldagem.....	19
2.5.4 Extensão do Eletrodo.....	20
2.5.5 Posição Eletrodo.....	20
2.5.6 Posição de Soldagem.....	21
2.6 Modos de Transferência do Metal de Solda.....	22
2.6.1 Controle de Transferência do Metal de Solda	28
2.7 Tipos de Juntas na Soldagem.....	29
2.7.1 Geometria do Cordão de Solda.....	30
2.7.2 Efeitos Metalúrgicos.....	31
2.7.3 Diluição	31

2.7.4	Energia de Soldagem	32
2.8	Distorções Em Juntas Soldadas	32
2.8.1	Tipos De Distorções	33
2.8.2	Distorção Longitudinal de Flexão em Soldas de Filete.....	39
2.9	Descontinuidades em Juntas Soldadas	40
2.9.1	Tipos de Descontinuidades	40
2.9.2	Porosidade.....	40
2.9.3	Mordeduras	41
2.9.4	Fusão Incompleta	41
2.9.5	Penetração Incompleta Na Junta.....	41
2.9.6	Trinca.....	41
2.9.7	Perfil do Cordão	42
3	MATERIAIS E METODOLOGIA	43
3.1	Materiais e Métodos para a Soldagem	43
3.2	Materiais e Métodos para Caracterização das Soldas	57
3.3	Materiais e Métodos para Medição da Taxa de Deposição	58
3.4	Materiais e Métodos para Determinar Distorções.....	59
3.5	Materiais e Métodos para Determinar as Equações	60
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	61
4.1	Resultados Obtidos com os Parâmetros de Soldagem Utilizados.....	61
4.2	Envelope Operacional I.....	61
4.2.1	Envelope Operacional II.....	65
4.2.2	Envelope Operacional III.....	68
4.2.3	Envelope Operacional IV.....	72
4.2.4	Envelope Operacional V.....	75
4.2.5	Envelope Operacional VI.....	78
4.3	Perfis dos Cordões.....	94
4.4	Avaliação das Distorções.....	124
4.4.1	Distorção Longitudinal de Flexão	131
4.4.2	Distorção Angular	136
4.4.3	Distorção Longitudinal e Distorção Angular em Juntas sem Restrição	142
5	CONCLUSÃO	146
6	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	147
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	148

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Envelope operacional para soldagem MAG robotizada (82 % Ar + 18 % CO ₂) arame de aço ao carbono 1,2 mm.	2
Figura 2.1 Representação esquemática de um sistema de soldagem robotizada.....	6
Figura 2.2 Equipamento básico empregado no processo MIG/MAG	9
Figura 2.3 Curva característica de fontes (TC) e (CC), (Barra, <i>et al</i> , 1998).....	11
Figura 2.4 Perfil do cordão e penetração com diferentes tipos de gás (Welding Handbook, 2008).	17
Figura 2.5 Representação esquemática da extensão do eletrodo.....	20
Figura 2.6 Efeito da posição do eletrodo e técnica de soldagem.	21
Figura 2.7 (a) Taxa de fusão do arame em função da corrente de soldagem e extensão do arame com arame maciço 1,6 mm (b) e metal cored (Suban e Tusek, 2001).	24
Figura 2.8 Diagramas ilustrando os modos de transferências, (a) classificação IIW (Ponomarev <i>et al.</i> ,2003). (b) modo de transferência convencionais para uma clássica fontes de potência (Andersen, 1990). (c) diagramas combinados com modos natural/controlado (Andersen, 2003) and (d) variação somente de um modo de transferência (Weman, 2003; Iordachesc e Quintino, 2008).	25
Figura 2.9 Modos de transferência MIG/MAG de acordo com IIW.....	26
Figura 2.10 Modos de Transferência Fundamental – U (I) diagrama baseado na nova classificação (Iordachesc e Quintino, 2008).	27
Figura 2.11 Representação esquemática do diagrama de tempo-corrente de uma fonte de potência pulsada (Murugan e Palani, 2006).....	29
Figura 2.12 Tipos de juntas (AWS A3. 0 2001; AWS D1. 1 2004).....	29
Figura 2.13 Forma e geometria do cordão de solda junta de filete “T”.....	30
Figura 2.14 Seção transversal de uma junta soldada.	31
Figura 2.15 Diluição de uma solda de filete com penetração parcial.	32
Figura 2.16 Tipos de distorções na soldagem (The Procedure Handbook o Arc Welding, 2000. Bhide, <i>et al.</i> 2006).	34
Figura 2.17. (a) Força de irregular de contração em solda de filete junta em T (b) e distorção angular em solda de filete (Puchaicela, 1998).....	35
Figura 2.18 Variação da distorção angular de solda de filete sem restrição, θ , em função da	

espessura da chapa (e), e peso do metal de adição consumido por comprimento de solda (AWS Welding Process, 1976. Puchaicela, 1998).	36
Figura 2.19 Distorção causada por mudança angular em dois tipos de solda de filete em estruturas (AWS Welding Process, 1976. Puchaicela, 1998).	37
Figura 2.20 Distorção longitudinal de flexão (Puchaicela, 1998).	39
Figura 2.21 Perfil de soldas aceitável e não aceitável (AWS D1. 1 2004).	42
Figura 3.1 Modelo do dispositivo para posicionamento das chapas.	44
Figura 3.2 Desenho da junta soldada.	44
Figura 3.3 Posição da tocha de soldagem em relação ao eixo do cordão de solda.	45
Figura 3.4 Robô KR 30-3 e fonte de potência TPS 5000.	45
Figura 3.5 Barrica de arame tipo Marathon Pack.	46
Figura 3.6 Perfil do cordão analisado.	58
Figura 3.7 Medição do ângulo da junta após a soldagem (junta restringida).	59
Figura 3.8 Medição do ângulo da junta após a soldagem (junta livre).	59
Figura 3.9 Distorção Longitudinal de Flexão.	60
Figura 4.1 Envelope operacional para soldagem MAG robotizada (82% Ar + 18% CO ₂), arame de aço ao carbono, Ø 1,2 mm	62
Figura 4.2 Perfil do cordão com excelentes características CP 22.	63
Figura 4.3 Cordão de solda com falta de fusão na flange CP 1.1.	63
Figura 4.4 Cordão de solda com início de mordedura CP 24.1.	64
Figura 4.5 Envelope operacional para soldagem MAG robotizada(95% Ar + 5% O ₂), arame de aço ao carbono, Ø 1,2 mm.	65
Figura 4.6 Perfil do cordão com excelentes características apresentando formação.	66
Figura 4.7 Cordão de solda com falta de fusão na flange e alma CP 25.1.	67
Figura 4.8 Cordão de solda com início de mordedura CP 48.1	67
Figura 4.9 Envelope operacional para soldagem MAG robotizada (90% Ar + 8% CO ₂ + 2% O ₂), arame de aço ao carbono, Ø 1,2 mm.	69
Figura 4.10 Perfil do cordão com excelentes características CP 62.	70
Figura 4.11 Cordão de solda com falta de fusão na alma CP 49.1.	70
Figura 4.12 Cordão de solda apresentando porosidade interna CP 72.1.	71
Figura 4.13 Envelope operacional para soldagem MAG robotizada(85% Ar + 15% CO ₂), arame de aço ao carbono, Ø 1,2 mm.	72
Figura 4.14 Perfil do cordão com excelentes características CP 94.	73
Figura 4.15 Cordão de solda com pouca fusão na flange CP 73.1.	73

Figura 4.16 Cordão apresentando boa penetração CP 96.1.	74
Figura 4.17 Envelope operacional para soldagem MAG robotizada(98% Ar + 2% O ₂), arame de aço ao carbono, Ø 1,2 mm.	75
Figura 4.18 Perfil do cordão com excelentes características e formação	76
Figura 4.19 Cordão de solda com pouca fusão na flange e alma CP 97.1.....	77
Figura 4.20 Cordão de solda apresentando porosidade interna e formação de.....	77
Figura 4.21 Envelope operacional para soldagem MAG robotizada(CO ₂), arame de aço ao carbono, Ø 1,2 mm.	79
Figura 4.22 Perfil do cordão apresentado boas características CP 133.	80
Figura 4.23 Perfil do cordão apresentando boas características CP 121.1.	80
Figura 4.24 Perfil do cordão apresentado boas características com pequena	81
Figura 4.25 Envelope operacional para soldagem MAG robotizada com diferentes misturas de gás arame de aço ao carbono, Ø 1,2 mm.	82
Figura 4.26 Correlação entre taxa de fusão e velocidade de alimentação do arame para diferentes misturas gasosas.	89
Figura 4.27 Correlação entre taxa de deposição e corrente de soldagem com diferentes misturas gasosas.	91
Figura 4.28 Velocidade de alimentação do arame e corrente de soldagem com diferentes misturas gasosas.	92
Figura 4.29 Comparativo entre os gases que apresentaram melhor eficiência na deposição de material na soldagem dos corpos de prova.	93
Figura 4.30 . Perfis dos cordões soldados com diferentes parâmetros de soldagem e tipos de gás de proteção.	94
Figura 4.31 Correlação do tamanho do cordão com a energia de soldagem (J/mm).	101
Figura 4.32 Largura da face do cordão em função da energia de soldagem com diferentes misturas.	103
Figura 4.33 Tamanho da garganta em função da energia de soldagem com diferentes misturas.	105
Figura 4.34 Penetração em função da energia de soldagem com diferentes misturas.....	107
Figura 4.35 Convexidade em função da energia de soldagem com diferentes misturas.	108
Figura 4.36 Área A da seção das soldas em função da energia de soldagem com diferentes misturas.	116
Figura 4.37 Área B da seção das soldas em função da energia de soldagem com diferentes misturas.	117

Figura 4.38 Área do reforço da seção das soldas em função da energia de soldagem com diferentes mistura.	119
Figura 4.39 Área total da secção transversal do cordão em função da energia de soldagem com diferentes misturas.	121
Figura 4.40 Diluição em função da energia de soldagem com	123
Figura 4.41 Análise comparativo da distorção entre calculado e medido para.....	131
Figura 4.42 Análise comparativo da distorção entre calculado e medido para.....	131
Figura 4.43 Análise comparativo da distorção entre calculado e medido para.....	132
Figura 4.44 Análise comparativo da distorção entre calculado e medido para mistura	132
Figura 4.45 Análise comparativo da distorção entre calculado e medido	133
Figura 4.46 Análise comparativo da distorção entre calculado e medido para mistura	133
Figura 4.47 Distorção longitudinal em função da energia de soldagem.....	134
Figura 4.48 Distorção longitudinal em função da área seção	135
Figura 4.49 Análise comparativo da distorção angular entre calculado e medido para	136
Figura 4.50 Análise comparativo da distorção angular entre calculado e medido para	137
Figura 4.51 Análise comparativo da distorção angular entre calculado e	137
Figura 4.52 Análise comparativo da distorção angular entre calculado e	138
Figura 4.53 Análise comparativo da distorção angular entre calculado e	138
Figura 4.54 Análise comparativo da distorção angular entre calculado e	139
Figura 4.55 Distorção angular em função da energia de soldagem.....	140
Figura 4.56 Distorção angular em função da área da seção transversal do cordão de solda.	141
Figura 4.57 Distorção longitudinal <i>versus</i> energia de soldagem.....	142
Figura 4.58 Distorção longitudinal <i>versus</i> área da seção.....	143
Figura 4.59 Distorção angular <i>versus</i> energia de soldagem.....	144
Figura 4.60 Distorção angular <i>versus</i> área da seção.....	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Propriedades físicas de alguns gases utilizados em processos de soldagem (ASM Handbook, 1993).	14
Tabela 2.2 Valores dos coeficientes da Equação da velocidade de fusão para.....	23
Tabela 3.1 Composições químicas e propriedades mecânicas do metal base.....	43
Tabela 3.2 Composições químicas e propriedades mecânicas consumível.	46
Tabela 3.3 Misturas gasosas utilizadas	47
Tabela 3.4 Parâmetros de soldagem com mistura 82% Ar + 18% CO ₂	48
Tabela 3.5 Parâmetros de soldagem com mistura 95% Ar + 5% O ₂	49
Tabela 3.6 Parâmetros de soldagem com mistura 90% Ar + 8% CO ₂ + 2% O ₂	50
Tabela 3.7 Parâmetros de soldagem com mistura 85% Ar + 15% CO ₂	51
Tabela 3.8 Parâmetros de soldagem com mistura 98% Ar + 2% O ₂	52
Tabela 3.9 Parâmetros de soldagem com mistura 90% Ar + 8% CO ₂ + 2% O ₂	53
Tabela 3.10 Parâmetros de soldagem com mistura 100% CO ₂	54
Tabela 3.11 Parâmetros de soldagem considerados não recomendados para soldar.....	55
Tabela 3.12 Parâmetros de soldagem considerados não recomendados para soldar.....	55
Tabela 3.13 Parâmetros de soldagem considerados não recomendados para soldar.....	55
Tabela 3.14 Parâmetros de soldagem considerados não recomendados para soldar.....	56
Tabela 3.15 Parâmetros de soldagem considerados não recomendados para soldar.....	56
Tabela 3.16 Parâmetros de soldagem considerados não recomendados para soldar.....	56
Tabela 4.1 Resultados obtidos dos parâmetros de soldagem com mistura 82% Ar + 18% CO ₂	83
Tabela 4.2 Resultados obtidos dos parâmetros de soldagem com mistura 95% Ar + 5% O ₂ ...	84
Tabela 4.3 Resultados obtidos dos parâmetros de soldagem com mistura 90% Ar + 8% CO ₂ + 2% O ₂	85
Tabela 4.4 Resultados obtidos dos parâmetros de soldagem com mistura 85% Ar + 15% CO ₂	86
Tabela 4.5 Resultados obtidos dos parâmetros de soldagem com mistura 98% Ar + 2% O ₂ ...	87
Tabela 4.6 Resultados obtidos dos parâmetros de soldagem com mistura 100% CO ₂	88
Tabela 4.7 Dimensão dos cordões das soldas mistura 82% Ar + 18% CO ₂	95
Tabela 4.8 Dimensão dos cordões das soldas mistura 95% Ar + 5% O ₂	96

Tabela 4.9 Dimensão dos cordões das soldas mistura 90% Ar + 8% CO ₂ + 2% O ₂	97
Tabela 4.10 Dimensão dos cordões das soldas mistura 85% Ar + 15% CO ₂	98
Tabela 4.11 Dimensão dos cordões das soldas mistura 98% Ar + 2% O ₂	99
Tabela 4.12 Dimensão dos cordões das soldas mistura 100% CO ₂	100
Tabela 4.13 Valores empregados das constantes para determinar tamanho de cordão.....	102
Tabela 4.14 Valores empregados das constantes para determinar a largura da face.....	104
Tabela 4.15 Valores empregados das constantes para determinar a garganta	106
Tabela 4.16 Valores empregados das constantes para determinar a penetração.....	108
Tabela 4.17 Valores empregados das constantes para determinar a convexidade.	109
Tabela 4.18 Área dos cordões das soldas mistura 82% Ar + 18% CO ₂	110
Tabela 4.19 Área dos cordões das soldas mistura 95% Ar + 5% O ₂	111
Tabela 4.20 Área dos cordões das soldas mistura 90% Ar + 8% CO ₂ + 2% O ₂	112
Tabela 4.21 Área dos cordões das soldas mistura 85% Ar + 15% CO ₂	113
Tabela 4.22 Área dos cordões das soldas mistura 98% Ar + 2% O ₂	114
Tabela 4.23 Área dos cordões das soldas mistura 100% CO ₂	115
Tabela 4.24 Valores empregados das constantes para determinar a área do metal de adição fundida.	117
Tabela 4.25 Valores empregados das constantes para determinar a área do metal fundido..	118
Tabela 4.26 Valores empregados das constantes para determinar a área do reforço.	120
Tabela 4.27 Valores empregados das constantes para determinar a área total da seção da solda.	122
Tabela 4.28 Valores das constantes empregados para determinar a diluição da solda.....	124
Tabela 4.29 Resultados das distorções dos CPs soldados com mistura 82% Ar + 18% CO ₂ .	125
Tabela 4.30 Resultados das distorções dos CPs soldados com mistura 95% Ar + 5% O ₂	126
Tabela 4.31 Resultados das distorções dos CPs soldados com mistura 90% Ar + 8% CO ₂ + 2% O ₂	127
Tabela 4.32 Resultados das distorções dos CPs soldados com mistura 85% Ar + 15% CO ₂ .	128
Tabela 4.33 Resultados das distorções dos CPs soldados com mistura 98% Ar + 2% O ₂	129
Tabela 4.34 Resultados das distorções dos CPs soldados com mistura 100% CO ₂	130

LISTA DE SÍMBOLOS

- f – Distorção angular
- l – Distância entre as soldas
- d – Distorção longitudinal de flexão
- h – rendimento do processo
- (I_b) – Corrente de base
- (I_p) – Corrente de pico
- (T_b) – Tempo de base
- (T_p) – Um tempo de pico
- A ou A_{maf} – Área do metal de adição fundido
- a, b e c – Constantes
- A_r – Área do reforço do cordão
- Ar – Argônio
- A_s – Área seção transversal do cordão de solda
- A_s – Seção transversal do cordão de solda
- B ou A_{mbf} – Área do metal base fundido
- C – Altura do reforço
- CP – Corpo de prova
- D – Diâmetro do eletrodo
- D_{CP} – Distância do Bico de Contato e a Peça
- e – Espessura
- e_{cr} – Espessura crítica
- E_{da} – Eficiência de deposição do arame (%)
- EN – Tempo efetivo na taxa de crescimento do volume da gota.
- ER – Eletrodo Revestido
- EV – Eletronvolt
- F – Força de contração
- GMAW - Gas Metal Arc Welding
- GTAW – Gas Tungsten Arc Welding
- h – espessura do flange

I ou I_s – Corrente de Soldagem (A)
 I_{cc} – Corrente de Curto Circuito (A)
 I_z – Momento de inércia do conjunto
 l – comprimento da junta soldada
 ℓ – Extensão do Arame em Relação ao Bico de Contato (Stickout)
 L – Largura da face do cordão
 ℓ_0, ℓ_1 ou ℓ_2 – Comprimento do Arco Elétrico (mm)
 LBW – Laser Beam Welding
 M – Momento
 MAG – Metal Active Gas
 MIG – Metal Inert Gas
 MS – Metal de solda
 P – Penetração
 PV – Polaridade variável
 R^2 – Coeficiente de ajuste
 RSW – Resistant Spot Welding
 S_1 e S_2 – Tamanho das pernas
 t – Garganta da solda
 TC – tensão constante,
 T_{da} – Taxa de deposição (kg/h)
 T_{fa} – Taxa de fusão do arame (kg/h)
 T_{fa} – Taxa de fusão do eletrodo ou arame
 T_{xa} – Taxa de alimentação do arame (m/min)
 U ou U_s – Tensão de Soldagem (V)
 U ou V_0 – Tensão em Vazio (V)
 U_{cc} – Tensão de Curto Circuito (V)
 v – velocidade de soldagem
 V_a – Velocidade de alimentação do arame (m/min)
 W – Largura do flange
 $y, x, e z$ – Coordenadas
 ZAC – Zona afetada pelo calor
 α – coeficiente de fusão do arame
 β – Coeficiente de resistividade de aquecimento
 Δ ou Δl – Variação da distorção longitudinal de flexão

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho foi o estabelecimento de “envelopes operacionais” para a soldagem pelo processo MAG robotizado, ou seja, foram detalhadamente investigados intervalos admissíveis, nos quais os parâmetros operacionais podem ser alterados sem que sejam produzidos defeitos no cordão de solda devidos ao procedimento, para as condições experimentais escolhidas.

Desta forma, a soldagem MAG robotizada foi realizada sobre juntas de filete na posição plana, usando fonte de potência inversora com curva característica tensão constante, em corrente contínua eletrodo positivo (CCEP). O metal base foi um aço estrutural de alta resistência mecânica e o eletrodo classificado como AWS ER70S-6. Foram empregadas diversas combinações de parâmetros de soldagem (tensão, intensidade da corrente, velocidade de soldagem) e gases de proteção, i. e., dióxido de carbono (CO₂) puro e argônio (Ar) com distintas proporções de oxigênio (O₂) e/ou CO₂.

Os resultados indicaram que misturas dos gases argônio com relativamente pequenas proporções de O₂ e CO₂ possibilitam, para as mesmas condições, soldagens com menores energias. Entretanto, não foi detectado significativa variação da taxa de deposição.

Com relação à geometria do cordão de solda (altura, largura e penetração), verificou-se que o tipo do gás de proteção altera a mesma e modifica a diluição. Além disto, misturas contendo CO₂ e O₂ produziram maior penetração.

Para todas as condições avaliadas, as medições mostraram deformação nas direções longitudinal e transversal. Foi identificado que ocorre maior distorção angular no sentido perpendicular ao eixo da solda e que este fato é principalmente afetado pela restrição da junta, energia de soldagem e área da seção transversal do cordão de solda.

Os resultados mostram que os modelos desenvolvidos são capazes de prever parâmetros de soldagens para uma dada geometria do cordão, diluição e distorção com razoável precisão.

ABSTRACT

The main aim of this work, was to establish “operational envelopes” to welding through robotized *GMAW*, i. e., there were thoroughly investigated allowable ranges in which the operating parameters can be changed without being produced defects in the weld bead due to procedure, for the chosen experimental conditions.

Therefore, welds were made by robotized *GMAW* on fillet joints in the flat position, using an inverter power source with constant voltage characteristic curve, direct current electrode positive (DCEP). The base metal was a high strength structural steel plate, and the electrode classified as AWS ER70S-6. There were used many combinations of welding parameters (voltage, current intensity, welding speed) and shielding gases, i. e., pure carbon dioxide (CO_2) and argon with different proportions of oxygen (O_2) and / or CO_2 .

The results have shown that gas mixtures of argon with relatively low percentages of O_2 and CO_2 allow, for the same effect, weldings with lower heat inputs. However, it was not noticed significant deposition rate variation.

Related to weld bead geometry (height, width and penetration), it was found that the shielding gas type alters it and modifies dilution. Besides, mixtures containing CO_2 and O_2 produced greater penetration.

For all conditions evaluated, the measurements have shown distortion in the longitudinal and transverse directions. It was noticed that more angular distortion occurs at the perpendicular direction to the weld axis, and that this fact is mainly affected by joint restriction, heat input and weld bead cross-sectional area.

The results have shown that the developed models are able to predict welding parameters for a given weld bead geometry, dilution and distortion with a reasonable accuracy.

1 INTRODUÇÃO

O estudo de novas tecnologias em processos de soldagem Robotizado MAG é uma das linhas de pesquisa do Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas – LS&TC da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Com o desenvolvimentos de novas tecnologias foram criados e analisados os envelopes operacionais com objetivo da aplicação de soldas com qualidade e produtividade.

Soldagem a arco elétrico com gás de proteção, denominado pela American Welding Society (AWS) *Gas Metal Arc Welding* (**GMAW**) é largamente utilizado pela indústria na soldagem de uma ampla variedade de materiais ferrosos e não ferrosos, através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo consumível (alimentado continuamente) e a peça de trabalho. No entanto, existe bastante interesse, pela necessidade em melhorar procedimentos de soldagem, no processo GMAW para atingir soldas consistentes e de alta qualidade. Isto pode ser alcançado através do melhor controle da transferência do metal do eletrodo para a peça (Praveen, *et al*, 2005).

A transferência do metal do eletrodo para a peça através do arco se caracteriza, por três modos: curto-circuito, globular, aerossol (*spray*), os quais dependem dos seguintes parâmetros operacionais (no mínimo): intensidade e polaridade da corrente, diâmetro e composição química do eletrodo, tipo do gás de proteção, comprimento do arco elétrico e pressão do ambiente. Uma quarta forma de transferência (pulsada) é possível com fontes de potência especiais graças ao avanço da indústria eletrônica e o conhecimento dos fenômenos do arco elétrico (Xu, *et al*, 2009. Praveen, *et al*, 2005). Porém, dependendo de todas estas variáveis citadas anteriormente, serão determinados os limites de operação para cada modo de transferência do metal formando um envelope operacional.

Estes envelopes operacionais ou diagramas conhecidos como Diagramas de Ilustração das Categorias dos Modos de Transferência (*Diagrams Illustrating Transfer Modes Categories*) vêm sendo estudados por muitos pesquisadores principalmente na ilustração e aplicação dos modos do metal de adição (Ponomarev, *et. al.*, 2003. Norrish, 2003. Iordachescua e Quintino, 2008).

Os envelopes ou diagramas se caracterizam pelas suas faixas e limites de tensão, corrente e velocidade de soldagem, diâmetro do arame, gás de proteção. A **Figura 1.1** mostra a representação de um envelope operacional.

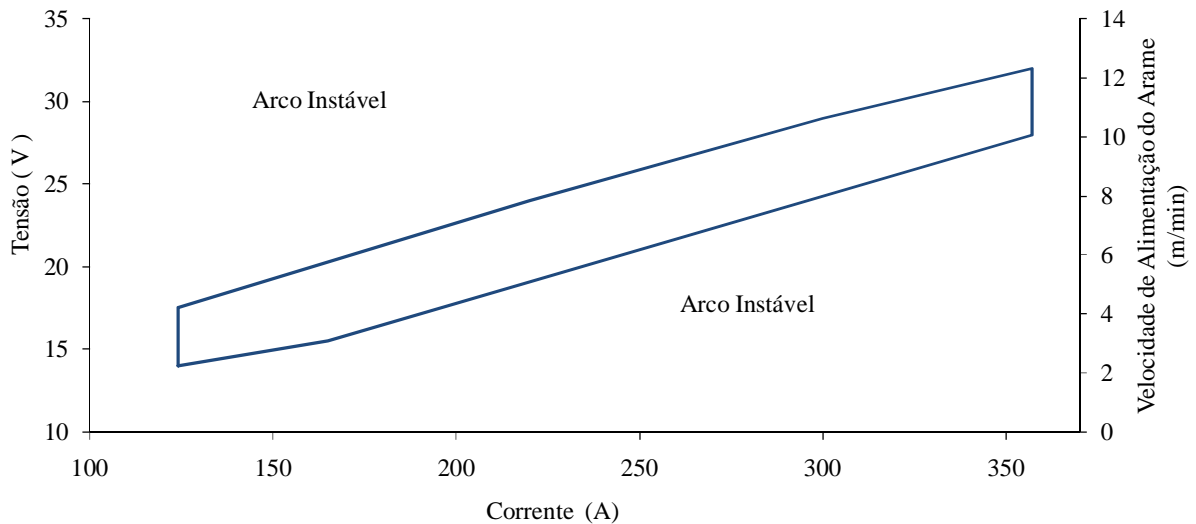


Figura 1.1 Envelope operacional para soldagem MAG robotizada (82 % Ar + 18 % CO₂) arame de aço ao carbono 1,2 mm.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é apresentar um estudo, sobre a construção e a caracterização de envelopes operacionais para soldagem MAG Robotizada utilizando diferentes misturas de gás de proteção. Juntamente, a caracterização das soldas realizadas sobre as chapas. Obtendo soldas com qualidades, e parâmetros de soldagem aplicáveis dentro da indústria em processos similares.

1.2 Objetivo Específico

Para que o objetivo geral do trabalho seja alcançado, os seguintes objetivos específicos foram perseguidos:

- Determinar os limites mínimos, intermediário e máximo de: tensão *versus* corrente para cada tipo de gás, velocidade de soldagem *versus* corrente, velocidade de soldagem *versus* tensão, tamanho de cordão *versus* energia de soldagem, penetração

do cordão de solda *versus* energia de soldagem, penetração do cordão de solda *versus* corrente, penetração do cordão de solda *versus* tensão, para cada tipo de gás, taxa de fusão do arame e taxa de deposição.

- Determinar os parâmetros como tensão, corrente e velocidade de alimentação.
- Caracterização das soldas.
- Analisar e quantificar a geometria do cordão de solda. Esta análise compreende em medir toda geometria do cordão de solda e analisar possíveis defeitos, através de macrografia da região soldada.
- Realizar soldagem sobre chapas de aço com espessura de 4,75 mm.
- Determinar os tipos de misturas do gás de proteção a ser utilizado nos testes.

1.3 Justificativas

A dissertação proposta, desenvolvida através de um trabalho acadêmico, visa atender as expectativas de profissionais atuantes na área da engenharia da soldagem, relacionando as principais variáveis envolvidas no processo de soldagem MAG robotizada, com os resultados obtidos através de experimentos e aplicáveis ao produto.

Um processo de soldagem a arco robotizado desempenha um papel importante na fabricação de produtos. No entanto, otimização nas variáveis, como corrente de soldagem, tensão, velocidade de soldagem e a inter-relação com as variáveis do processo ainda são grandes problemas para conseguir a qualidade elevada de soldagem em termos e características de soldagem desejada. Consequentemente, as definições incorretas de variáveis de processo geram desvios nas características da geometria do cordão de solda desejado. Basicamente a geometria do cordão desempenha um papel fundamental para determinar as propriedades mecânicas da junta e os custos de soldagem. Entretanto, considera-se muito importante a seleção dos parâmetros de soldagem para obter geometrias ótimas dos cordões de solda. No entanto, é difícil a identificação por métodos tradicionais, o fornecimento de um modelo preciso, porque a otimização do processo de soldagem não é linear (Sung, *et al*, 2007).

Determinar procedimentos ótimos é importante porque estes garantirão a qualidade, confiabilidade da solda e do processo de soldagem, aumentando a produtividade e eliminação de retrabalhos.

Atualmente, seleção de processo de soldagem, escolha dos consumíveis e otimização dos parâmetros de soldagem são tarefas independentes. Muitas vezes procedimentos de soldagem são desenvolvidos através de manuais ou recomendação de fabricantes baseado em grande quantidade de dados empíricos e os parâmetros de solda são freqüentemente encontrados pela tentativa e erro. Conseqüentemente, o procedimento de soldagem não será ideal em relação à qualidade da solda e produtividade (Murray, 2002).

A solda deve atender aos critérios de aceitação e requisitos necessários para garantir a qualidade da solda e integridade mecânica da junta, reduzindo defeitos, distorções, melhorando as propriedades mecânicas da solda, reduzindo custos. Estas são algumas considerações que se deve levar em conta na seleção dos parâmetros de soldagem.

O método para analisar os procedimentos do processo de soldagem a arco robotizado foi desenvolvido selecionando parâmetros de soldagem que levem a uma condição de operação desejada.

Relações analíticas entre parâmetros de soldagem e processo das variáveis foram estabelecidos por meio de regressão e análise dimensionais suportados por dados experimentais.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Esta revisão da literatura consiste em descrever os conceitos fundamentais sobre o processo de soldagem MAG Robotizado para o desenvolvimento deste trabalho, isto é, apresentar estudo envolvido para desenvolvimento de novas tecnologias da soldagem MAG robotizada.

2.1 Soldagem Robotizada

O alto custo de produção, aumento na capacidade de demanda, qualidade e melhores condições de trabalho é o caminho para automatização dos processos. A indústria da automação e robótica começou, aproximadamente, há uns 30 anos atrás ([Merrifield, 2005](#)). Os robôs industriais tiveram uma evolução muito rápida desde seu início. Durante vários anos, robôs industriais foram usados em diversos processos de soldagem, inclusive solda ponto por resistência (RSW), soldagem a arco com proteção gasosa (GMAW) e soldagem a laser (LBW), entre outros. Muitos fatores contribuíram para o crescimento da automatização da robótica industrial podendo-se citar:

- Controle de processo: se faz necessário monitorar os robôs, pois fornecem muitos recursos com relação ao processo e desenvolvimento de modos para identificar e prevenir erros antes que eles aconteçam.
- Falta de mão de obra qualificada. Utilizando robôs diminui o nível de requisitos de qualificação do operador.
- Saúde e segurança: o processo de soldagem é um trabalho árduo devido ao soldador estar exposto ao calor, radiações, gases e fumos metálicos. Robôs podem eliminar esse contato direto com o processo e oferecem melhores condições de trabalho para os soldadores.

- Padrões de qualidade inaceitáveis: consumidores exigem qualidade consistente isto faz com que mude o modo de fabricar produtos ou componentes. Tolerâncias mais apertadas são requeridas nos projetos de modo que o produto se torne confiável, com a automação consegue se assegurar um nível de qualidade diminuindo custo com rejeição ou retrabalhos.
- Incremento de produção: um produto pode ser produzido em quantidades maiores no mesmo tempo ou até mesmo com tempos reduzidos com pouco ou nenhum aumento na força de trabalho limitando somente ao espaço para a expansão.
- Custos de produção: para fabricar, são vários fatores que aumentam os custos de produção como, salários, inflação, impostos mais altos e despesas de utilidade, aumentos materiais e custo operacional (Merrifield, 2005; Villafuerte, 2005).

Para as indústrias, robôs são atualmente usados para os processos de GTAW e GMAW, principalmente porque o trabalho de soldagem normalmente consiste em operações repetidas com trajetórias fixas, e os controladores podem ser pré-programados para operar juntos nos pontos determinados. Alguns pesquisadores estão usando artifícios, como equipamentos de visão, sensores ou modelos matemáticos para melhorar os processos GTAW e GMAW. Porém, estes processos requerem equipamentos de grande complexidade que não são fáceis de mover de um lado para outro, conforme **Figura 2.1** (Tung, 2004. Kim, *et al* , 2007).

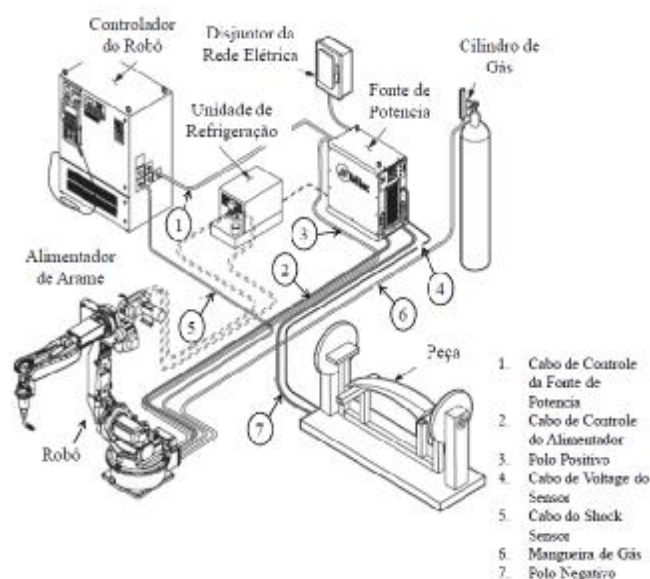


Figura 2.1 Representação esquemática de um sistema de soldagem robotizada.

2.2 Processo de Soldagem MIG/MAG (GMAW)

O processo de soldagem MIG/MAG, (*Metal Inerte Gas/Metal Active Gas*) ou GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), é caracterizado pela abertura e manutenção do arco elétrico entre o metal de base (poça de fusão quando em regime) e o metal de adição (arame alimentado continuamente). Como o arame ou eletrodo não apresenta revestimento torna-se necessário inserção de uma proteção gasosa suprida com pressão e vazão adequadas. Tal inserção é justificada pela necessidade de, ao mesmo tempo, viabilizar a proteção da gota metálica e da poça de fusão contra a atmosfera vizinha ao arco voltaico e, além disso, auxiliar na formação e manutenção do arco elétrico.

O conceito básico de MIG/MAG foi introduzido no ano 1920, e tornado comercialmente viável após 1948. Inicialmente foi empregado com um gás de proteção inerte na soldagem do alumínio. Conseqüentemente, o termo soldagem MIG foi aplicado e ainda é uma referência ao processo. Emprego em uma ampla gama de materiais, e o uso de gases de proteção reativos ou ativos como, argônio, nitrogênio hidrogênio, dióxido de carbono e oxigênio e misturas. Esse desenvolvimento posterior levou à aceitação formal do termo (“GMAW – Gas Metal Arc Welding”) para o processo, visto que tanto gases inertes quanto reativos são empregados. No entanto, quando se empregam gases reativos, muito comum usar o termo soldagem MAG (MAG – Metal Active Gas) (Machado, 1996. Kim, *et al* , 2007. Jang, 2005).

O processo de soldagem MIG/MAG proporciona muitas vantagens na soldagem semi-automática e automática. É muito usado na soldagem robotizada, produz soldas com qualidade, limpas sem escória, pouco respingos e altas taxas de deposição com baixo custo (Machado, 1996. Kim, *et al* , 2007. Jang, 2005).

O processo MIG/MAG, em relação ao nível de atividade do gás de proteção, pode ser subdividido em, Metal Inert Gas (MIG), onde o gás (Ar ou He) não reage metalurgicamente com a gota metálica ou com a poça de fusão, atuando apenas na proteção destas regiões, auxiliando na formação e manutenção do arco voltaico e melhorando a molhabilidade nas ligas ferrosas.

Metal Active Gas (MAG), onde o gás (CO₂) ou mistura (Ar+CO₂ ou Ar+CO₂+O₂), além das funções acima citadas, reage metalurgicamente com a gota e com a poça de fusão (Machado, 1996. Altshuller 1998).

2.2.1 Principais Características do Processo

O processo MIG/MAG, em função da possibilidade do destacamento da gota metálica em diferentes níveis de correntes e modos de transferência (curto-circuito, globular, axial em aerossol, gotas repelidas e projetadas, axial por corrente pulsada), viabiliza sua aplicação numa faixa ampla de espessura dos materiais, além de proporcionar condições para a soldagem em todas as posições. A versatilidade do processo MIG/MAG, alavancado pelo crescimento industrial, vem elevando sua participação no mercado de soldagem, substituindo e contribuindo para o declínio de processos menos produtivos.

2.2.2 Vantagem e Desvantagem do Processo MIG/MAG

Vantagens:

A soldagem MIG/MAG é um processo bastante versátil, abaixo estão enumeradas as vantagens e desvantagem que este processo proporciona (Machado, 1996. Street, 1990. Sadler, 1999. Kapustka, *et al*, 2008):

- Versatilidade de soldagem em todas as posições e possibilidade de adaptação à automação.
- Alta taxa de deposição devido à elevada densidade de corrente possível de ser aplicado (300 A/mm²), o que corresponde até 10 vezes a densidade empregada no eletrodo revestido.
- Ampla faixa de aplicação em diferentes ligas e espessuras de juntas tubulares e não tubulares.
- Possibilidade de elevadas velocidades de soldagem, isto é, maiores que outros processos como o eletrodo revestido (ER), que torna o processo MIG/MAG o mais atrativo industrialmente.
- Alimentação contínua do eletrodo nu, não formação de escória (menor tempo de limpeza) e reduzido nível de hidrogênio aportado (na ordem de 5 ml/100 g de metal).

Desvantagens:

Alta velocidade de resfriamento (ausência de escória) propiciando a tendência ao

surgimento de trincas.

- Investimento inicial em equipamento mais alto, quando comparado ao processo com eletrodo revestido.
- Problemas de operação em locais de difícil acesso (penetração do bocal) e em ambientes com forte ventilação (deslocamento e contaminação da coluna gasosa).
- Difícil relação entre flexibilidade e requisitos metalúrgicos do arame maciço.
- Grande emissão de raios ultravioleta e produção de ozônio dependendo da faixa de corrente.

Conforme mostra a **Figura 2.2** o sistema é composto por vários periféricos como:

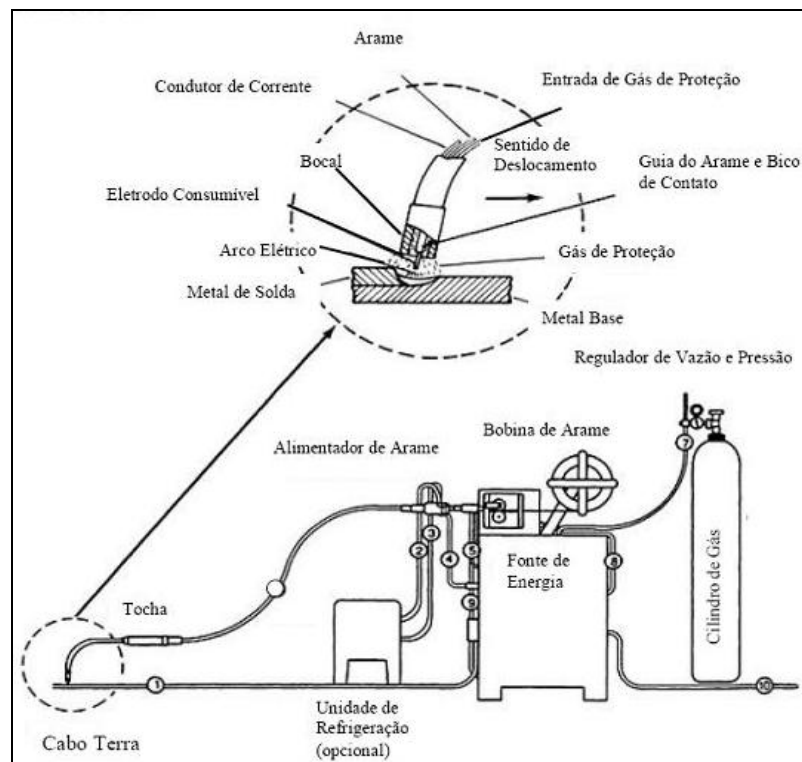


Figura 2.2 Equipamento básico empregado no processo MIG/MAG
(ASM Handbook, 1993).

2.2.3 Princípio dos Equipamentos e Consumíveis do Processo MIG/MAG

- Fonte de soldagem em corrente contínua, eletrodo positivo (CCEP) que é usada na maioria das aplicações ou eletrodo no negativo (CCEN) que pode ser usado em algumas aplicações apresentado instabilidade no arco e menor penetração (Praveen, *et*

[al, 2005. Anderson, 2006](#)).

- Sistema de alimentação do arame em conjunto com um tipo específico de tocha de soldagem.
- Sistema de arrefecimento da tocha, (opcional).
- Suprimento externo de gás ou misturas, devidamente acompanhado de reguladores de pressão e vazão.
- Rolo de arame.
- Sistema de movimentação da tocha na soldagem automatizada.

2.2.4 Fontes de Potência

O avanço da eletrônica (iniciado nos anos 60), representado através do desenvolvimento de componentes eletrônicos do estado sólido (como os diodos que viabilizam o controle, os tiristores SCR, os transistores IGBT e os sistemas de memórias – EPROM, EEPROM e FLASH ROM, entre outros). Em conjunto com o avanço da informática (iniciada nos anos 80), representado aqui pela disponibilidade de computadores (hardware) e programas (software) com velocidade de processamento cada vez maior, possibilitaram o desenvolvimento, de fontes de soldagem eletrônicas com controle sobre a dinâmica de resposta (flutuação da corrente, tensão e velocidade de alimentação do arame em função do tempo). Tal controle viabiliza o melhoramento, o desenvolvimento e a inserção de novas variantes na soldagem MIG/MAG, como ([Modenesi, 1997. Barra, et al, 1998. Praveen, et al, 2005](#)):

- Imposição de corrente pulsada com forma de onda próxima do formato retangular (idealizada como quadrada).
- Controle no processo de abertura do arco (avanço do arame ou nível de corrente), crítico na soldagem do alumínio e suas ligas.
- Controle da potência liberada no momento do curto-circuito, isto é, redução do nível de salpicos através do controle do efeito indutivo (simulação da indutância) ou do controle do patamar da corrente de curto-circuito (I_{cc}).
- Pulsação de energia através do controle da frequência de pulsação (denominado de MIG/MAG Térmico ou pulsação térmica), como proposição para a obtenção de melhoramentos metalúrgicos e controle sobre o processo de deposição.
- Soldagem MIG/MAG em CA.

No processo MIG/MAG existe a possibilidade do emprego de fontes retificadoras (convencionais) ou de fontes eletrônicas. A característica do arco determinará qual o tipo de fonte a ser utilizada, ou seja, característica estática do tipo tensão constante (ou plana) ou do tipo corrente constante (ou tombante), conforme esquematizado na **Figura 2.3**.

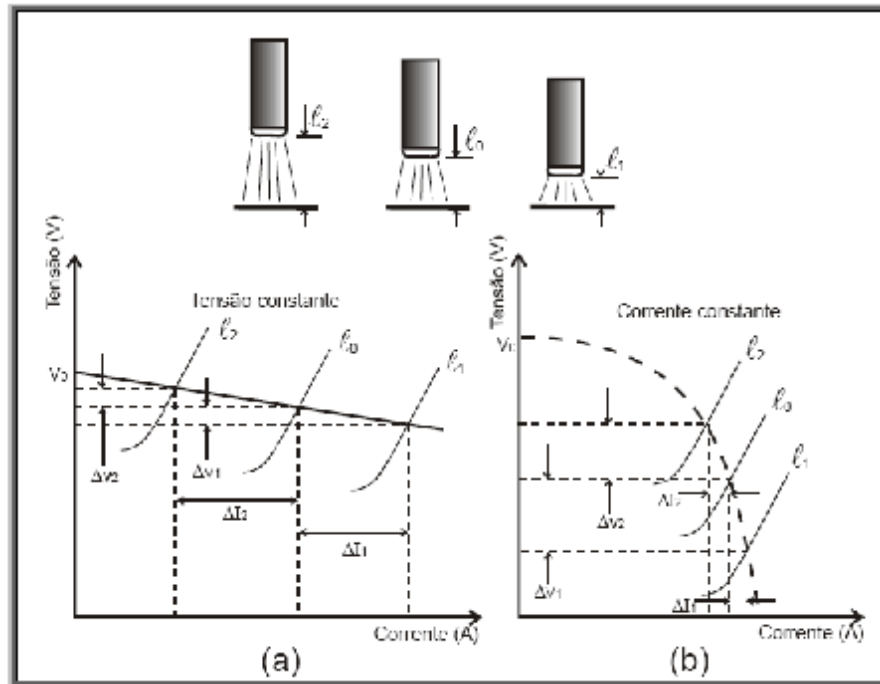


Figura 2.3 Curva característica de fontes (TC) e (CC), (Barra, *et al*, 1998).

A tensão em vazio (V_0 ou U_0), também chamada de tensão de circuito aberto, Esta situada na ordem de 70 V (com valor máximo normalizado de 100 V). Em regime, este valor decresce para o patamar da tensão de soldagem (U_s), também chamado tensão do arco 15 a 40 V.

A escolha pela aplicação de fontes do tipo tensão constante, **Figura 2.3a**, recai no chamado controle interno, onde qualquer variação na distância entre o bico de contato e a peça (DCP) provocará uma mudança no comprimento do arco em relação a condição de equilíbrio (l_0), além de uma alteração na taxa de fusão (alteração brusca na corrente de soldagem (I_s) tendendo a manter o comprimento do arco constante e em l_0 e, conseqüentemente, alterando a projeção do arame), sem alteração na velocidade de alimentação do arame.

As vantagens de se utilizar fontes convencionais deste tipo são:

§ Prevenção de fusão do bico de contato.

§ Manutenção de ℓ_0 .

Facilidade na abertura do arco (para as fontes eletrônicas operando em CC, o processo de abertura do arco – monitoração e variação nos valores de I_s e V_a , por exemplo – é realizado eletronicamente. Portanto, a abertura do arco não se constitui um problema para estas fontes).

Como desvantagens deste tipo de característica estática, pode-se destacar a variação no aporte térmico, gerando perfis diferenciados na penetração e na zona afetada pelo calor (ZAC).

A dificuldade na abertura do arco deriva da não elevação da corrente de soldagem (I_s), para valores na ordem da corrente de curto-circuito (I_{cc}), no momento em que o arame toca o metal de base. Como forma de facilitar a abertura do arco emprega-se um alimentador que possibilite patamares variados de velocidade de alimentação (*slow-run-in*), em outras palavras, um avanço lento do arame durante a formação do arco elétrico e, quando em regime, manutenção da velocidade de alimentação do arame no valor de operação (Johnsen, *et al.*, 2006). É importante ressaltar que para as fontes eletrônicas o processo de abertura do arco também pode ser realizado pelo controle da corrente de curto-circuito.

2.2.5 Alimentador de Arame

O desenvolvimento mais significativo em tecnologia de alimentadores de arame durante os últimos cinco anos foram principalmente duas categorias que surgiram, os micro processados e tecnologia de alimentação aprimorada. Esta é uma informação relatada pelos fabricantes de alimentadores de arame. Eles consideram muito importantes para produzir soldas de alta qualidade.

Basicamente, existem duas configurações quanto à localização do alimentador de arame, ou seja, alimentadores acoplados na fonte ou alimentadores separados da fonte

Como funções básicas do par alimentador/tocha podem-se enumerar:

- Controle da velocidade de avanço do arame, objetivando uniformidade no valor de ℓ_0 (igualdade entre a taxa de fusão – T_{fa} e a taxa de alimentação do arame - T_{xa}).
- Transferência da corrente de soldagem para o arame o mais próximo possível do arco

(bico de contato).

- Distribuir o gás de proteção de forma uniforme na região do arco elétrico.
- Permitir controle local das variáveis envolvidas (velocidade de alimentação, vazão de gás e a abertura e o fechamento do circuito elétrico de soldagem).
- Quanto ao modo de alimentação do arame, tem-se a seguinte classificação.
- Combinação alimentador/tocha do tipo empurra (*push*), onde o arame é empurrado do alimentador em direção à tocha de soldagem. Este sistema apresenta problema quando da utilização de tocha longa e arame muito dúcteis, que pode enrolar (embolar) após a passagem pelos rolos de tração.
- Combinação, alimentador com tocha do tipo puxa (*pull*) onde o arame é puxado pelo alimentador situado na tocha, praticamente empurrando o arame somente no bico de contato. Este sistema apresenta o inconveniente de ser afetado pelo atrito entre o arame e o conduto.
- Combinação, alimentador com tocha do tipo empurra-puxa ou (*push-pull*), onde quando unidas características dos dois sistemas anteriores. Este sistema permite a soldagem de materiais de grande comprimento (maior flexibilidade de operação para o soldador) (Johnsen, *et al*, Vandenberg, 2005, Anderson, 2006).

2.3 Gás de Proteção

2.3.1 Introdução

O gás de proteção usado nos processos de soldagem influencia diretamente no desempenho da operação de soldagem. Sua função primária é proteger a poça de fusão da atmosfera, nitrogênio e oxigênio na formação de óxidos e nitretos. A contaminação do metal de solda pode resultar em baixa resistência, baixa ductilidade, bem como, porosidade e falta de fusão. O gás de proteção também é responsável pela abertura e estabilidade do arco elétrico. Na soldagem MIG/MAG o gás de proteção utilizado também tem influência fundamental na transferência do metal de solda durante a soldagem.

Porém, o conhecimento básico de algumas propriedades dos gases de proteção ajudará na escolha certa para uma aplicação de soldagem. Utilizando a melhor mistura de gás, melhora a qualidade, aumenta a produtividade e reduz custos com retrabalhos (Machado, 1996, AWS. *Welding Process*, 1991, AWS. *Welding Handbook*, 1978, ASM *Handbook*, 1993).

2.3.2 Propriedades dos Gases

As propriedades físicas mais importantes quanto ao gás de proteção são: a eficiência da proteção, densidade/viscosidade; o potencial de ionização. A **Tabela 2.1** mostra as principais propriedades dos gases ([ASM Handbook, 1993](#), [AWS. Welding Handbook, 1978](#))

Tabela 2.1 Propriedades físicas de alguns gases utilizados em processos de soldagem
([ASM Handbook, 1993](#)).

Gás	Símbolo Químico	Massa Molecular (g/mol)	Gravidade Específica ^(A)	Densidade (g/l)	Potencial de Ionização (eV)
Argônio	Ar	39,95	1,38	1,784	15,7
Dióxido de carbono	CO ₂	44,01	1,53	1,978	14,4
Hélio	He	4,0	0,1368	0,178	24,5
Hidrogênio	H ₂	2,016	0,0695	0,090	13,5
Nitrogênio	N ₂	28,01	0,967	12,5	14,5
Oxigênio	O ₂	32,0	1,105	1,43	13,2

A - Gravidade específica em relação ao ar com 1 atm e 0 °C.

2.3.2.1 Potencial de Ionização

É a energia expressa em elétron-volt (eV), necessária para remover um elétron de um átomo de um gás, tornando-o um íon, ou um átomo de um gás eletricamente carregado. Mantendo-se todos os outros fatores constantes, o valor do potencial de ionização decresce quando o peso molecular do gás aumenta. A ignição e a estabilidade do arco são influenciadas diretamente pelo potencial de ionização do componente do gás de proteção usado no processo.

O gás com baixo potencial de ionização como o argônio, pode facilmente remover íons de dentro do átomo. Porém o Hélio, com potencial de ionização alto, dificulta a abertura do arco e diminui a estabilidade do arco ([ASM Handbook, 1993](#), [Kou, 2002](#)).

2.3.2.2 Condutividade Térmica

Esta propriedade refere-se à capacidade que um determinado gás tem de conduzir calor, influenciando diretamente as perdas radiais de calor do centro em direção a periferia da coluna do arco.

O argônio possui baixa condutividade térmica, produzindo um arco elétrico com duas zonas distintas, uma região central extremamente quente rodeada por um pequeno cone frio. Devido a esta característica, o perfil de penetração se apresenta do tipo "taça". Por outro lado, quando um gás apresenta alta condutividade térmica, há uma maior condução de calor para a região externa, resultando em perfil de penetração mais arredondado. Este tipo de distribuição de calor ocorre com o uso de hélio, CO₂ e misturas Ar-H₂ e Ar-CO₂, fornecendo um maior aporte térmico à peça ([ASM Handbook, 1993](#), [Kou, 2002](#), [Dillenbeck e Castangno, 1987](#), [Vaidya, 2002](#)).

2.3.2.3 Potencial de Dissociação

Quando dois ou mais átomos combinam-se, forma-se uma molécula. Gases como CO₂, H₂, O₂ e N₂ são moleculares e quando estes gases são aquecidos há temperaturas elevadas, tais como a do plasma, dissociam seus átomos constituintes, tornam parcialmente ionizados, produzindo elétrons livres e fluxo de corrente. Conforme estes átomos dissociados colidem com a peça relativamente fria (comparando com a do plasma), estes átomos recombinaem-se, liberando energia adicional sob a forma de calor. Este processo não ocorre com o argônio, porque este é atômico ([ASM Handbook, 1993](#)).

2.3.2.4 Densidade

Por definição, a densidade de um gás é seu peso por unidade de volume. Esta propriedade é responsável direta pela eficiência de um determinado gás de proteção. Basicamente, os gases mais densos do que o ar, necessitam de menor vazão do que os gases menos densos, a fim de conseguir uma proteção efetiva da poça de fusão ([Machado, 1996](#), [AWS. Welding Process, 1991](#), [AWS. Welding Handbook, 1978](#), [ASM Handbook, 1993](#)).

2.3.2.5 Tensão Superficial

Em qualquer líquido, a tensão superficial é uma força atrativa exercida pelas moléculas imediatamente abaixo da superfície. Logo, uma força direcionada para o interior é criada, a qual tende a restringir o escoamento do líquido. Esta tensão varia com a natureza química do líquido.

Em soldagem, a tensão superficial entre a poça de fusão e a atmosfera circunvizinha, tem uma pronunciada influência no formato do cordão de solda.

Se a tensão superficial for alta, o cordão se apresentará convexo, irregular e o defeito mais comum em decorrência disto é o aparecimento de mordeduras. Se a tensão superficial for baixa, o cordão se apresentará côncavo, com acabamento suave e isento de mordeduras (Machado, 1996, AWS. *Welding Process*, 1991, AWS *Welding Handbook*, 1978, Canto, 1990, Stenbacka e Persson, 1989).

2.3.3 Gases de Proteção na Soldagem

O gás influencia em muitas características no processo de soldagem, portanto é preciso escolher o gás certo para uma determinada aplicação. A versatilidade dos processos MIG/MAG faz com que seja utilizado em inúmeras aplicações tanto semi-automático como automático além de poder soldar uma gama de metais ferrosos como, aço carbono de alta resistência e baixa liga, aços inoxidáveis, ou como não ferrosos: cobre e suas ligas, alumínio e níquel.

A finalidade principal do gás proteção na soldagem MIG/MAG é proteger a solda da contaminação atmosférica. Isto é necessário porque a maioria dos metais quando aquecido ao ponto de fusão, em contato com o ar tem uma forte tendência de formar óxidos, absorção de H₂ e formação de nitretos. As diversas reações podem causar (descontinuidade) como, porosidade, inclusão de escoria. Além de proteger a poça de fusão como mostra a **Figura 2.4**, outras funções são listadas abaixo: (Machado, 1996, Canto, 1990, Stenbacka e Persson, 1989, *Welding Handbook*, 2008,).

- Características do arco elétrico (comprimento e estabilidade do arco).

- Modo de transferência do metal de solda.
- Penetração e perfil do cordão de solda
- Velocidade de soldagem
- Tendência à mordedura
- Ação de limpeza no metal de solda
- Propriedades mecânicas do metal de solda

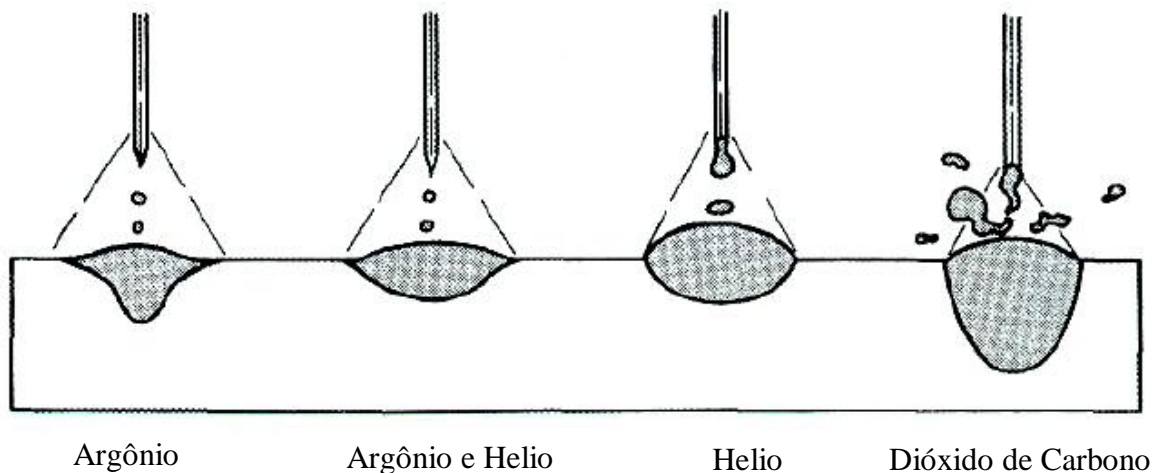


Figura 2.4 Perfil do cordão e penetração com diferentes tipos de gás (Welding Handbook, 2008).

2.4 Eletrodo ou Metal de Adição

O desenvolvimento de consumíveis acompanha os avanços dos materiais, em muitos aspectos. Também tem sido regido pelo crescente apelo a uma melhor qualidade, economia e soldabilidade dos metais com menos defeitos possíveis, a fim de evitar reparações, desperdícios e re-soldagem, numa fase posterior. Esta tendência começou durante a década de 90, com o objetivo de alcançar a melhoria da produção e economia (uma maior redução no teor de hidrogênio para soldagem dos metais, a fim de evitar pré-aquecimento), o aumento da utilização de processos de alta eficiência, ainda mais rigorosos nos requisitos relativo à resiliência mesmo em baixas temperaturas e da utilização de aço com elevada resistência (Backman e Gustavasson, *et al*, 1990).

Os eletrodos maciços (arame) estão cobertos pela norma (AWS) A5. 18, a sua classificação e especificação estão baseadas na sua composição química e nas propriedades mecânicas do metal de solda e também no tipo de gás a ser empregado.

No processo de soldagem MIG/MAG, a escolha do material de adição a ser usado na aplicação é caracterizada como um fator de extrema importância na qualidade e custo final da junta soldada. A qualidade do material depositado e o custo dependem da escolha do metal de adição. Portanto, na escolha do mesmo devemos levar em consideração os seguintes fatores (Cortina, 2005):

- Metal base a ser soldado (propriedades mecânicas e químicas).
- Gás de proteção a ser usado.
- Taxa de deposição e fusão necessária (Está ligado diretamente com a corrente A/mm^2).
- Desempenho da fonte de soldagem e corrente.
- Tamanho de cordão, penetração e diluição.
- Espessura do metal base a ser soldado.
- Tipo de transferência metálica pretendida.

2.5 Variáveis do Processo na Soldagem MIG/MAG

A seleção correta e utilização do processo MIG/MAG dependerá do perfeito conhecimento de como as diversas variáveis envolvidas na operação de soldagem podem influenciar nos resultados finais de uma soldagem como, estabilidade do arco, qualidade, acabamento da solda, penetração, e defeitos. O objetivo deste tópico é fazer uma abordagem dos principais parâmetros de soldagem, mostrando características e peculiaridade de cada um.

2.5.1 Tensão de Soldagem

A tensão de soldagem influencia no insumo de calor e apresenta uma relação direta com o comprimento do arco e a largura do arco.

Teoricamente, para uma dada corrente, uma tensão baixa provocará cordões mais estreitos e maior penetração, o oposto acontecendo para tensões mais altas, além da ocorrência de salpicos grosseiros, porosidades e mordeduras.

De um modo geral, tensões baixas favorecem a transferência por curto-circuito e em tensões mais altas haverá tendência à transferência no modo aerossol.

Portanto, para maior tensão no arco maior será a distância da ponta do arame em

relação a poça de fusão alterando a forma como o metal de adição é transferido através do arco. Com menor tensão do arco o efeito é contrário. Reduzindo excessivamente a tensão do arco, o arame tem dificuldade em fundir fazendo então, com que o arco se torne instável. (Machado, 1996, Praveen, *et al*, 2005, Kim e Son, *et al*, 2003, Iordachescua e Quintino, 2008).

2.5.2 Corrente de Soldagem

A velocidade de alimentação do arame ou taxa de fusão é a variável que controla a corrente de soldagem numa relação quase linear. A fonte de energia de tensão constante supre a quantidade de calor necessária para fundir o arame a uma taxa requerida para manter a voltagem escolhida e resultante comprimento de arco.

Um acréscimo na velocidade de alimentação do arame, com todos os outros parâmetros constantes, requer que mais eletrodo seja fundido na mesma unidade de tempo, para se manter a mesma voltagem e resultante comprimento do arco. Maior quantidade de corrente é automaticamente fornecida pela fonte, implicando o aumento da taxa de deposição (kg/h). Mais metal de solda e maior quantidade de calor são aplicados no metal de base por unidade de comprimento de solda, resultando em penetração mais profunda e cordões de solda maiores e vice-versa (AWS Welding Handbook, 1978, Shi, *et al*, 2008, Karadeniz e Ozsarac, *et al*, 2005).

Com todas as variáveis mantidas constantes, um acréscimo na corrente de soldagem (velocidade de alimentação) resultará em:

- Acréscimo de profundidade de penetração.
- Aumento da taxa de deposição.
- Aumento das dimensões do reforço do cordão de solda.

2.5.3 Velocidade de Soldagem

A velocidade de soldagem é um valor linear o qual o arco desloca ao longo da junta soldada em uma unidade de tempo. A penetração decresce com o aumento na velocidade e muda a geometria do cordão, com o aumento na velocidade o cordão fica mais estreito, ao

contrário o cordão aumenta a largura, isto diminuído a velocidade de solda aumenta a geometria do cordão. Porém, diminui a fusão do metal base e ocorre próximo a superfície do metal. Dessa forma, a penetração e largura do cordão são reduzidas. Quando a velocidade de soldagem é aumentada, além disso, há tendência de ocorrer mordeduras na interface do cordão da solda, porque existe insuficiente deposição de material de adição para preencher o caminho fundido pelo arco (AWS Welding Handbook, 1978. Allen e Richardson, *et al*, 2002).

2.5.4 Extensão do Eletrodo

A extensão do eletrodo é distância entre a extremidade do tubo de contato e a ponta do eletrodo onde inicia o arco elétrico. Portanto, sendo o comprimento energizado do eletrodo. Entretanto, quanto maior for o comprimento do eletrodo, maior será o aquecimento do eletrodo por efeito Joule e portanto, menor a corrente necessária para fundir o eletrodo numa dada velocidade de arame ou inversamente, para mesma corrente de soldagem será maior o consumo de eletrodo.

Com isso, o aumento da extensão do eletrodo pode ser um método para aumentar um pouco a taxa de fusão do eletrodo. Uma extensão do eletrodo boa é de 6 mm a 13 mm para transferência em curto circuito e de 13 mm á 25 mm para outros modos conforme **Figura 2.5** (AWS Welding Handbook, 1978, Suban e Tusek, 2001, Allen e Richardson, *et al*, 2002, Hartwig, *et al*, 2006, Shahi e Pandey, 2006, Modenesi, 2007).

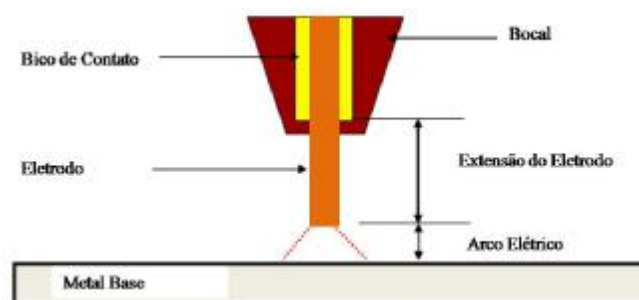


Figura 2.5 Representação esquemática da extensão do eletrodo.

2.5.5 Posição Eletrodo

Como em todos os processos de soldagem a arco, a posição do eletrodo em relação a

junta da solda tem efeito sobre a geometria do cordão da solda e a penetração. Os efeitos são mais percebidos que a tensão ou a velocidade. Sendo que a posição do eletrodo é determinada pelo seu eixo em relação à direção da soldagem, o ângulo de deslocamento e o ângulo com superfície de trabalho. Quando a posição do eletrodo é o oposto da direção da soldagem é chamado de ângulo positivo (puxando a tocha), quando a soldagem é feita na mesma direção de soldagem é chamado de ângulo negativo (empurrando a tocha).

Os efeitos da posição do eletrodo em relação a direção da soldagem podem ser verificados na **Figura 2.6**. Quando o eletrodo muda da posição perpendicular ou ângulo neutro para a posição empurrando outros parâmetros são alterados, a penetração decresce, e aumenta a largura do cordão com sua forma mais plana. A máxima penetração é obtida na posição plana com ângulo positivo (puxando) com um ângulo de aproximadamente de 25° e perpendicular a superfície de trabalho. A técnica puxando produz um cordão mais convexo, com sua geometria estreita, um arco mais estável e menos respingos na peça.

Em soldas de filete na posição horizontal o eletrodo deve estar posicionado num ângulo de aproximadamente 45° graus entre as partes e em outras posições o ângulo do eletrodo no sentido de deslocamento pode ficar entre 5 a 15° (AWS Welding Handbook, 1978, Suban e Tusek, 2001).

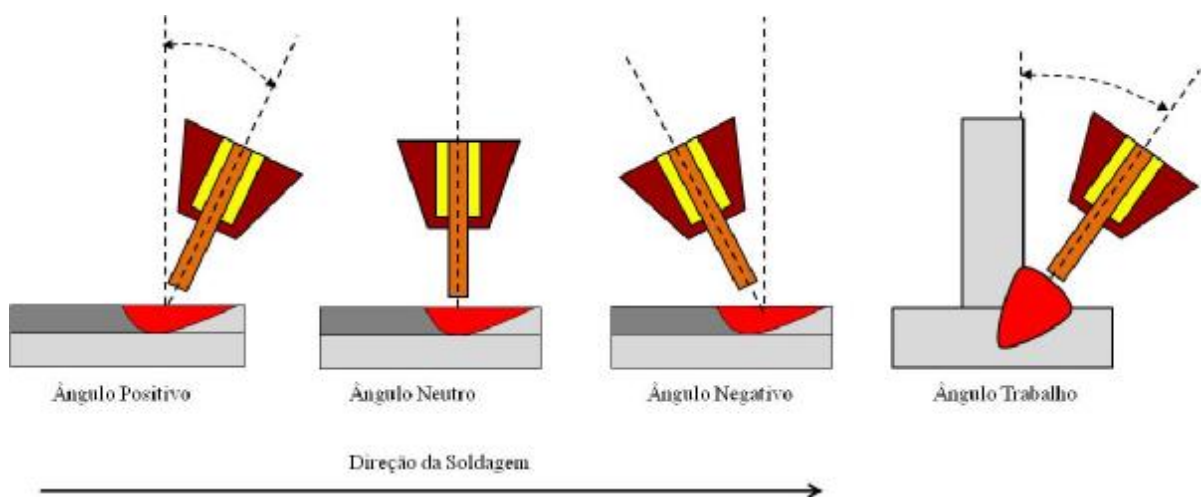


Figura 2.6 Efeito da posição do eletrodo e técnica de soldagem.

2.5.6 Posição de Soldagem

A posição da peça a ser soldada e a linha do eixo da solda determina a posição de

soldagem, pode ser plana, horizontal, vertical (ascendente ou descendente) e sobre cabeça. Em soldagem de tubulações fixas a posição muda conforme a operação. A posição de soldagem impõe uma grande influência sobre o grau de dificuldade da sua execução, na produtividade e custo, sendo a soldagem na posição plana a mais fácil de ser executada e que possibilita maiores produtividades.

Na soldagem vertical descendente deve ser incrementada a velocidade de soldagem, o cordão tende ficar mais plano ou dependendo o tipo de junta mais côncavo, a penetração decresce possibilitando a soldagem de chapas finas, na soldagem vertical ascendente ocorre exatamente o oposto da soldagem vertical descendente (Nguyen e Weckman, *et al*, 2005, Ramini e Rissone, *et al*, 2005, Nguyen e Weckman, *et al*, 2005).

2.6 Modos de Transferência do Metal de Solda

Principalmente processos de soldagem robotizados e automatizados requerem sistemas de controle com respostas dinâmicas, incluindo unidades de controles baseados nos modelos de processo. Para criar esses modelos, ambos são importantes tanto teóricos como práticos, aumentando o conhecimento sobre a fusão do metal transferido e modo de transferência elétrica do arco, como estes influenciam no resultado da solda (Iordachesc e Quintino, 2008. Zielińska, *et al*, 2009. Norrish, 2003. Ponomarev, *et al*, 2003).

Teoricamente modelados durante a década passada com notáveis aplicações práticas, a transferência do metal através do arco tem ajudado muito no desenvolvimento, na concepção de vários sistemas industriais flexíveis. Isto é extremamente importante para todos os especialistas envolvidos nos estudos de projetos ou aplicações industriais da tecnologia da soldagem para conhecer os modos de transferência do metal, as implicações nos parâmetros dos processos e as influências nas características da solda, estabilidade do arco, aparência do cordão e qualidade (Iordachesc e Quintino, 2008. Zielińska, *et al*, 2009. Norrish, 2003. Ponomarev, *et al*, 2003).

O modo de transferência do metal fundido no arco depende principalmente da composição do gás, diâmetro do eletrodo e composição, da velocidade de alimentação do arame e a densidade da corrente de soldagem. Lancaster (1984), também descreveu as três maneiras na qual a transferência do metal pode ocorrer, de acordo com a corrente do arco e a mistura do gás: curto-circuito (arco curto), transferência globular, Aerossol (spray)

(Iordachesc e Quintino, 2008. Zielińska, *et al*, 2009. Norrish, 2003. Ponomarev, *et al*, 2003. Xu, *et al*, 2009).

A estabilidade do arco no modo de transferência é determinada pelo equilíbrio entre a taxa de alimentação (T_{xa}) e a taxa de fusão do eletrodo (T_{fa}), podendo ser calculada usando a **Equação 2.1** proposta por (Lesnewich, 1958) para o processo MIG/MAG (Harwig, D.D. *et al*, 2006; Suban e Tusek, 2001; Chandel, *et al*, 1997; Modenesi e Reis, 2007).

$$T_{fa} = a * I + b * L * I^2 \quad (2.1)$$

Onde T_{fa} = (mm/s), a = coeficiente de fusão (mm/s – ampère), I = corrente (ampère), β = coeficiente de resistividade de aquecimento (ampère² – s)⁻¹, e L = extensão do arame energizado (mm).

Os valores dos coeficientes para arame maciço de aço estão descritos na **Tabela 2.2** abaixo (Harwig, D.D. *et al*, 2006; Suban e Tusek, 2001):

Tabela 2.2 Valores dos coeficientes da Equação da velocidade de fusão para (Harwig, D.D. *et al*, 2006; Suban e Tusek, 2001).

Processo	Diametro do Eletrodo(mm)	Polaridade	Tempo de EN (ms)	α (mm-A ⁻¹ s ⁻¹)	β (10 ⁻⁴ -A ⁻² s ⁻¹)
TC Aerossol	0,8	CCEP		0,56	2,9
TC Aerossol	1,14	CCEP		0,25	0,7
MIG/MAG - P	0,8	CCEP		0,55	3.5 – 3.7
MIG/MAG - P	1,0	CCEP		0,47	0,91
MIG/MAG - P	1,2	CCEP		0,27	0,59
PV MIG/MAG	1,14	CCEN	0,0-5,9	0,80	6,0
			6,0-8,0	0,80	5,9
			9,0-11,9	0,72	5,4
			12-14,8	0,78	4,2
			14,9-17,9 ,	0,85	2,9
			18,0-23,3	0,82	2,9
PV MIG/MAG	1,14	CCEP	0,0 - 5,9	0,80	6,0
TC Aerossol	1,14	CCEP		- 0,35 - ,.55	0,7 – 1,2

*TC = tensão constante, PV = Polaridade variável, EN = Tempo efetivo na taxa de

crescimento do volume da gota.

A **Equação 2.1** mostra que uma vez estabelecidos os coeficientes α e β , a extensão do arame energizada, L , tem grande influência na velocidade de alimentação do arame como mostra a **Figura 2.7**.

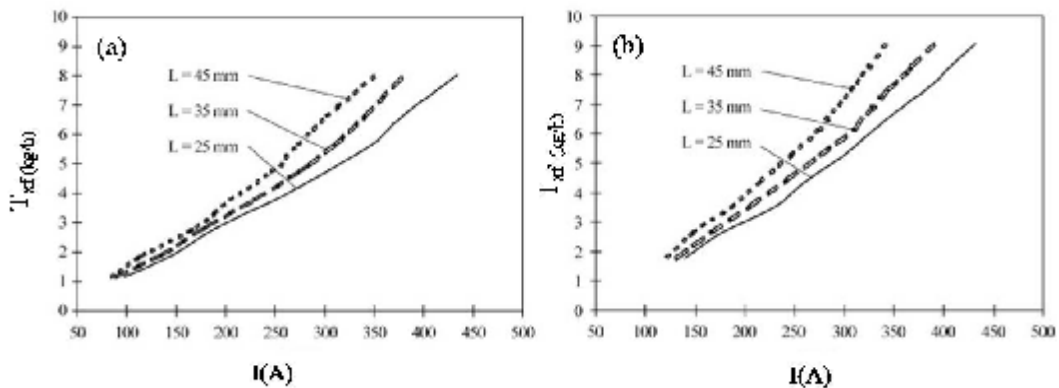


Figura 2.7 (a) Taxa de fusão do arame em função da corrente de soldagem e extensão do arame com arame maciço 1,6 mm (b) e metal cored (Suban e Tusek, 2001).

Uma contribuição determinante neste campo é o IIW (Instituto Internacional of Welding). A classificação dos modos de transferência metálica foi obtida pelo grupo de pesquisa SG212 e publicados por (Lancaster, 1984). Sendo que a primeira contribuição sobre este assunto foi em 1976 (referenciado por Lancaster, 1984), e até hoje são introduzidas adaptações à medida que evolui a tecnologia da soldagem, para melhor compreensão dos modos de transferências pode-se verificar os diagramas: conforme **Figura 2.8** (Iordachesc e Quintino, 2008; Zielińska, *et al*, 2009; Norrish, 2003; Ponomarev, *et al*, 2003; Xu, *et al*, 2009).

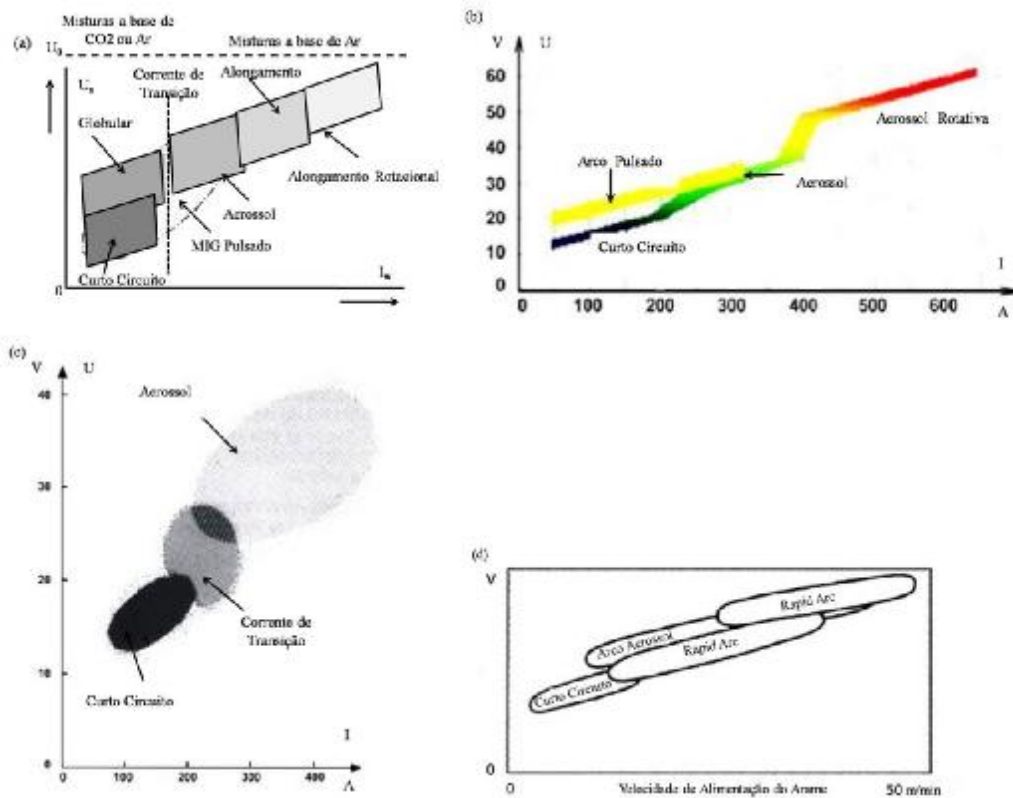


Figura 2.8 Diagramas ilustrando os modos de transferências, (a) classificação IIW (Ponomarev *et al.*,2003). (b) modo de transferência convencionais para uma clássica fontes de potência (Andersen, 1990). (c) diagramas combinados com modos natural/controlado (Andersen, 2003) and (d) variação somente de um modo de transferência (Weman, 2003; Iordachesc e Quintino, 2008).

Depois de vários estudos foram definidos, seis modos de transferência fundamental para o processo MIG/MAG como mostra a **Figura 2.9**, isto ocorre em ambos os casos, quando utilizadas fontes de potência com ou sem controles de corrente, tensão ou pulsos conhecidos como convencionais ou fontes de potência com controles. Portanto, é possível controlar o modo de transferência ocorrendo em condições forçadas, mas somente é possível programar em fontes de potência que possuem este recurso de controle do pulso (Iordachesc e Quintino, 2008).

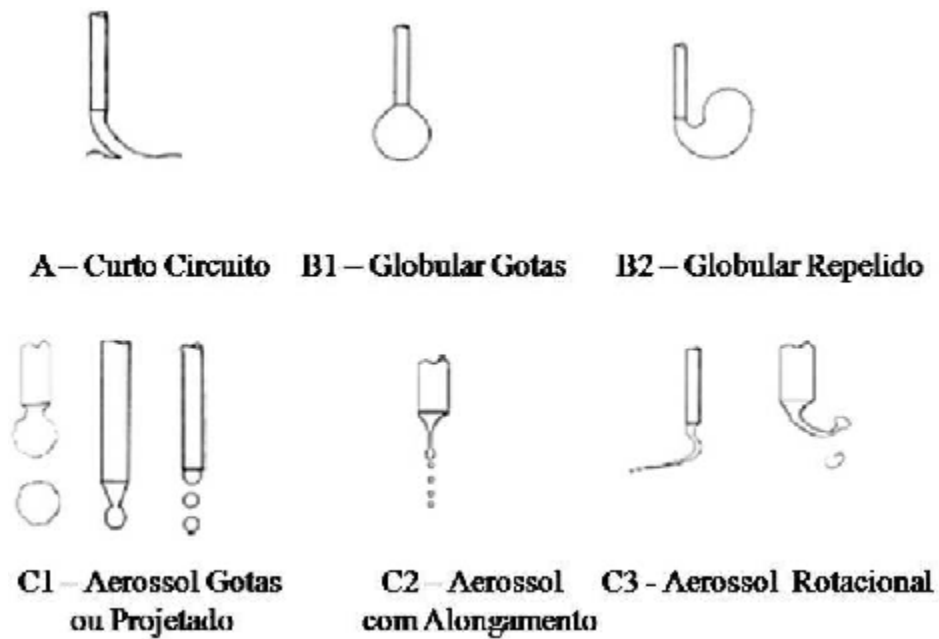


Figura 2.9 Modos de transferência MIG/MAG de acordo com IIV.

Modo de transferência curto-circuito (*Short-circuiting*) caracterizado por um arco muito curto, acontece quando o eletrodo toca na poça de fusão e a gota metálica que se forma na ponta do eletrodo é transferida para a poça de solda **Figura 2.9A**. Quando a gota toca a poça de solda, o sistema fecha um curto-circuito, de modo que a corrente aumenta, sendo esta gota rapidamente atraída para a poça, como consequência da ação da tensão superficial (Iordachesc e Quintino, 2008; Zielińska, *et al*, 2009; Norrish, 2003. Ponomarev, *et al*, 2003; Xu, *et al*, 2009).

Globular (*Globular-drop*) ocorre a transferência de grandes gotas de metal fundido (maior que o diâmetro do eletrodo), com uma frequência reduzida (normalmente, existe apenas uma única gota se transferindo em um determinado momento). Aumentando a corrente de soldagem ocorre a modo de transferência globular repelida (*Globular repelled*), caracterizada pelo uso de CO₂ no processo MAG. esta consiste em um sentido contrário repelindo o metal fundido formando uma grande gota (longa), conforme **Figura 2.9B2**, Nestes dois modos de transferência o principal fator é a força resultante da gravidade o qual é responsável pelo o equilíbrio do destacamento da gota na ponta do eletrodo (Iordachesc e Quintino, 2008. Zielińska, *et al*, 2009; Norrish, 2003; Ponomarev, *et al*, 2003; Xu, *et al*, 2009).

Aerossol goticular (*Drop spray*) foi descrito por (Norrish, 2003) como um único fenômeno o qual ocorre aerossol na região de transição da corrente, **Figura 2.10C1**. As gotas

de metal são definidas perto da esfera, com o diâmetro levemente maior que o eletrodo (20-40%), enquanto a transferência é totalmente axial, produzindo baixos fumos. Pela nova classificação dos modos de transferência aerossol goticular pode ser entendido também por aerossol projetado (*Spray projected*), onde as gotas do metal são fortemente projetadas contra a poça de fusão com seu diâmetro menor ($\pm 50\%$) comparado com o eletrodo (Iordachesc e Quintino, 2008; Zielińska, et al, 2009; Norrish, 2003; Ponomarev, et al, 2003; Xu, et al, 2009).

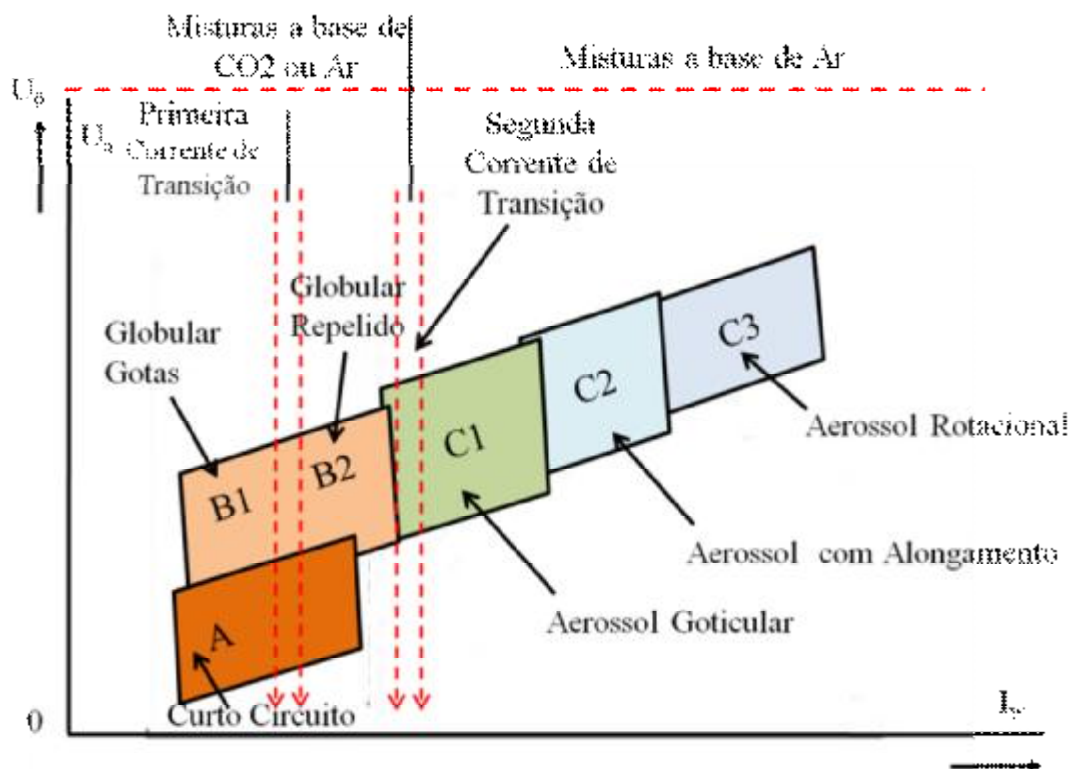


Figura 2.10 Modos de Transferência Fundamental – U (I) diagrama baseado na nova classificação (Iordachesc e Quintino, 2008).

Com o aumento da corrente, diminui cada vez mais o tamanho das gotas aumentando a frequência com que as mesmas são destacadas formando praticamente um jato, a transferência torna-se aerossol com alongamento (*Streaming*). Finalmente, isto ocorre em valores muito altos de corrente de soldagem onde o metal puramente flui, mas o jato (*stream*) é rotacional devido às altas forças eletromagnética geradas pelos altos valores de corrente **Figura 2.10C3**. Estas são as descrições dos seis modos fundamentais de transferência do metal de solda, começando com valores muito baixos de tensão e corrente, até valores elevados. A corrente

de soldagem desempenha um papel fundamental na determinar dos modos de transferências, **Figura 2.10** (Iordachesc e Quintino, 2008. Zielińska, *et al*, 2009. Norrish, 2003. Ponomarev, *et al*, 2003. Xu, *et al*, 2009).

2.6.1 Controle de Transferência do Metal de Solda

Em meados de 1960 foi criada uma técnica alternativa de transferência denominada MIG/MAG Pulsado (GMAW-P). Esta forma superou alguns inconvenientes do modo de transferência globular e atingiu alguns benefícios da transferência aerossol. Isso se caracterizou por pulsação da corrente entre dois níveis de corrente. Um nível baixo, conhecido como corrente de base (I_b) e um tempo de base (T_b) que tem como finalidade manter o arco e gerar aquecimento do arame e, um nível alto, conhecido como corrente de pico (I_p) e um tempo de pico (T_p), que gera energia suficiente para destacar a gota da extremidade do arame e projetá-la através da coluna do arco (Murugan e Palani, 2006; Praveen, *et al*, 2005; Wu, *et al*, 2004; Zhang e Li, 2006).

Devido à existência de modo de transferência, como já citado anteriormente e mostrado na **Figura 2.10**, é de conhecimento a zona da corrente de transição entre globular e aerossol. Esta região de operação do pulso é muito estreita e dependente das variações e mudanças nas condições de soldagem durante a operação de soldagem. Portanto, um processo estável e qualidade da solda somente podem ser obtidos controlando o modo de transferência do metal. Com o avanço da eletrônica, tem sido feito significativos progressos no desenvolvimento de equipamentos de soldagem a arco de alto desempenho. Na **Figura 2.11** podemos ver tipo de curva característica de uma fonte de potência pulsada (Murugan e Palani, 2006; Praveen, *et al*, 2005; Wu, *et al*, 2004; Zhang e Li, 2006).

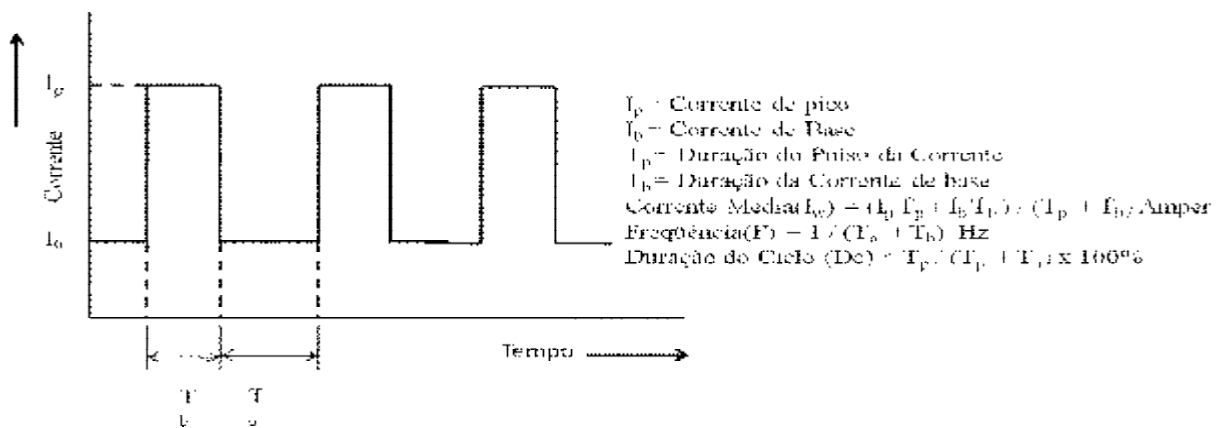


Figura 2.11 Representação esquemática do diagrama de tempo-corrente de uma fonte de potência pulsada (Murugan e Palani, 2006).

2.7 Tipos de Juntas na Soldagem

Caracteriza - se junta soldada a região onde é unida as partes por soldagem. A **Figura 2.12** mostra os principais tipos de juntas utilizadas.

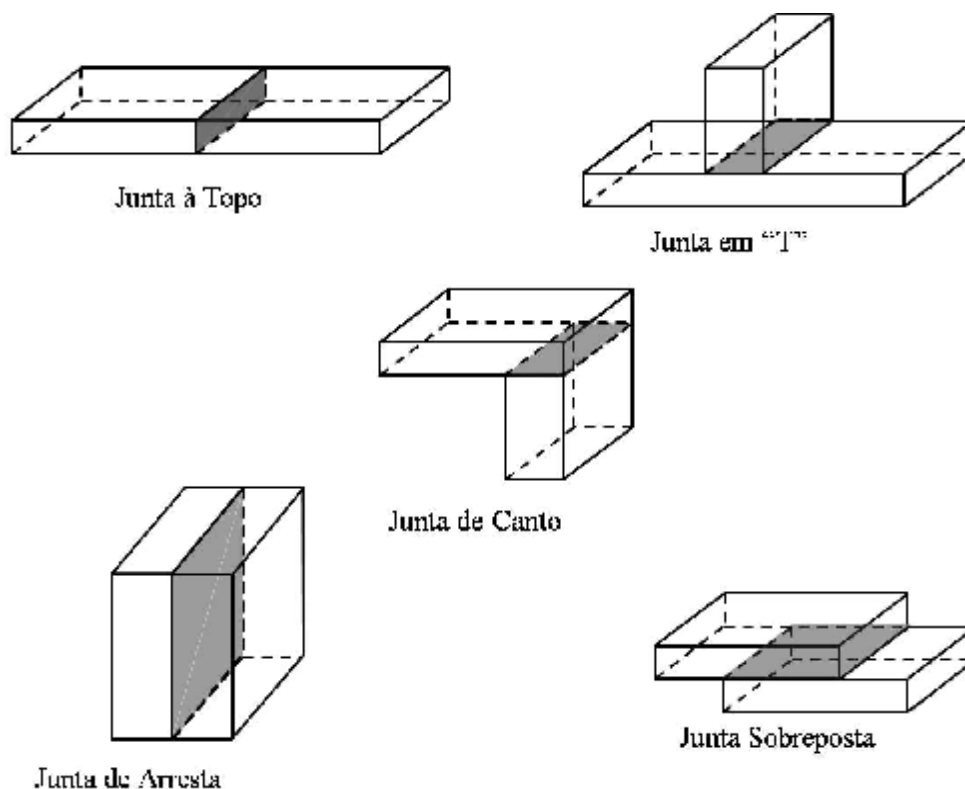


Figura 2.12 Tipos de juntas (AWS A3. 0 2001; AWS D1. 1 2004).

As partes das juntas devem ser cuidadosamente dimensionadas pelo seu uso considerando seus requisitos de projeto tanto quanto sua resistência mecânica como

economicamente (AWS A3.0, 2001; AWS D1.1, 2004).

2.7.1 Geometria do Cordão de Solda

Existe um grande número de termos e definições para definir formatos e geometrias de cordões de solda, portanto aqui neste trabalho somente foi abordado sobre solda de filete em junta “T”. A forma do cordão de solda, diluição e penetração é governada pela geometria do cordão, que desempenha uma função fundamental na resistência mecânica da junta. Para obter soldas com qualidade, é essencial ter um controle completo sobre o processo em relação aos parâmetros, para obtenção correta da geometria da solda e garantir a integridade da junta soldada. **Figura 2.13.** Portanto, é muito importante para o processo de soldagem a escolha de parâmetros ótimos para geometria do cordão (AWS A3. 0 2001; AWS D1.1, 2004; The Procedure Handbook o Arc Welding, 2000; Palani e Murugan, 2007).

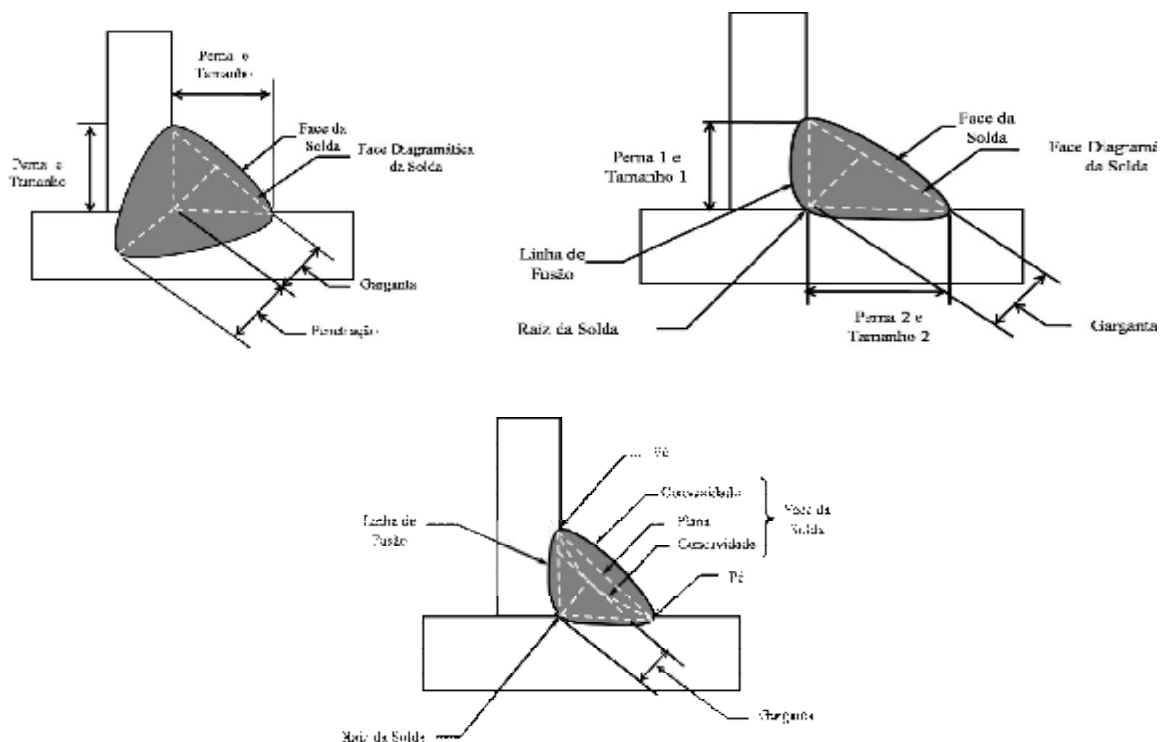


Figura 2.13 Forma e geometria do cordão de solda junta de filete “T”.

A solda de filete é dimensionada pelo tamanho das pernas (s_1 e s_2), pelo maior triângulo isóscele inscrito na área da secção transversal da face da solda. A garganta(t), sendo a secção resistente da junta, é definida pela menor distância entre a raiz da junta até a face diagramática da solda. Portanto, a garganta efetiva é igual a 0, 707 multiplicado pelo

comprimento da perna ou $(s/\sqrt{2})$ (AWS D1.1, 2004, The Procedure Handbook o Arc Welding, 2000. Palani e Murugan, 2007).

2.7.2 Efeitos Metalúrgicos

Existem fenômenos metalúrgicos inerentes aos processos de soldagem por fusão: a solidificação do material que atingiu a fusão durante os passes de solda e o aquecimento do metal de base ao redor do cordão. A soldagem é caracterizada pela fusão de uma massa de metal que rapidamente se resfria devido à absorção de calor pelos materiais de união. Isto significa que ocorrem ciclos térmicos com elevadas taxas de resfriamento que podem produzir áreas no material com elevada dureza, especialmente próximas à solda. Estas zonas atingidas pelo aquecimento no metal de base são conhecidas como zonas afetadas pelo calor (ZAC), assim como a presença de tensões durante o processo de aquecimento e resfriamento da soldagem (afetadas também pelas transformações de fase), e a presença de tensões residuais que no final do processo podem provocar o aparecimento de trinca à frio e distorções. A região da solda é dividida em várias regiões, entretanto aqui serão abordadas somente três regiões como mostra a **Figura 2.14** abaixo (Palani e Murugan, 2007, Chandel, *et al* ,1997, Shahi e Pandey, 1999).

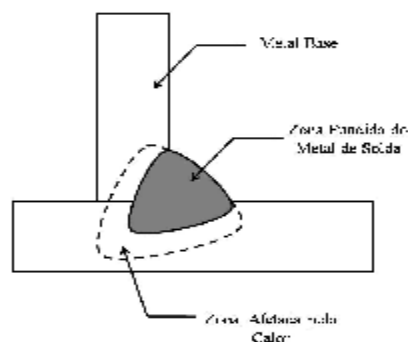


Figura 2.14 Seção transversal de uma junta soldada.

2.7.3 Diluição

A composição química de uma solda não é a mesma que a composição química especificada para o metal de adição depositado, devido a participação do metal base na constituição da zona fundida. A diluição indica a participação do metal de adição na

constituição da zona fundida conforme **Figura 2.15** e **Equação 2.2**. A diluição é influenciada principalmente pela energia de soldagem imposta na junta. (Palani e Murugan, 2007. Chandel, *et al.* 1997. Shahi e Pandey, 2008. Mohandas, *et al.*).

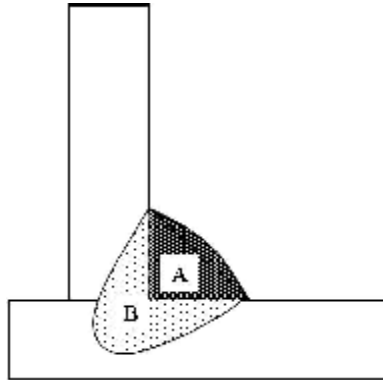


Figura 2.15 Diluição de uma solda de filete com penetração parcial.

$$Diluição = \frac{A}{A + B} \times 100 = \% \quad (2.2)$$

Onde A área do material de adição fundido e B área da zona fundida com o metal de base.

2.7.4 Energia de Soldagem

É a razão entre a quantidade de energia imposta por unidade de comprimento da solda pelo deslocamento de uma fonte de calor, por exemplo, um arco, expressa em joules por milímetros (J/mm), dado pela **Equação 2.3** abaixo (Machado, 2000. Wu, *et al.* 2007, Wahab, *et al.* 1998. Wang, *et al.* 2009).

$$E = h \frac{UI}{v} = J/mm \quad (2.3)$$

Sendo, energia de soldagem E , rendimento térmico η , velocidade de soldagem v (mm/s), tensão U , corrente I .

2.8 Distorções Em Juntas Soldadas

Recentemente muitos pesquisadores têm usado cálculos numéricos e recursos

experimentais para exemplificar e prever diferentes tipos de distorções na soldagem e têm contribuído muito para o entendimento do problema. Muitos métodos analíticos nas fórmulas empíricas têm sido desenvolvidos para dar informações quantitativas. Para muitas aplicações práticas é possível usar fórmulas empíricas para prevenir problemas de distorções na soldagem.

Neste tópico foram abordados todos os tipos de distorções, porém um dos objetivos deste trabalho é entender e comparar aplicações práticas com as equações numéricas existentes para prever distorções do tipo angular e distorção de flexão longitudinal em soldas de filete junta 'T'.

2.8.1 Tipos De Distorções

As distorções no processo de soldagem é o resultado da expansão e contração não uniforme do metal de solda e adjacente ao metal base durante o ciclo de aquecimento e resfriamento, o qual pode causar elevadas tensões térmicas. As tensões resultantes das deformações causadas pelas tensões internas causam a contração do material.

Entretanto, as distorções encontradas em estruturas soldadas são causadas por três fundamentais mudanças dimensionais que ocorre durante a soldagem:

- Contração transversal, que ocorre perpendicular ao eixo da solda.
- Contração longitudinal, que ocorre paralelo ao eixo da solda.
- Distorção angular que consiste em uma alteração rotacional em torno do eixo da solda.

Estas três mudanças dimensionais estão esquematicamente ilustradas na **Figura 2.16** (AWS Welding Process, 1976. The Procedure Handbook o Arc Welding,2000. Murugan e Gunaraj, 2005. Puchaicela, 1998).

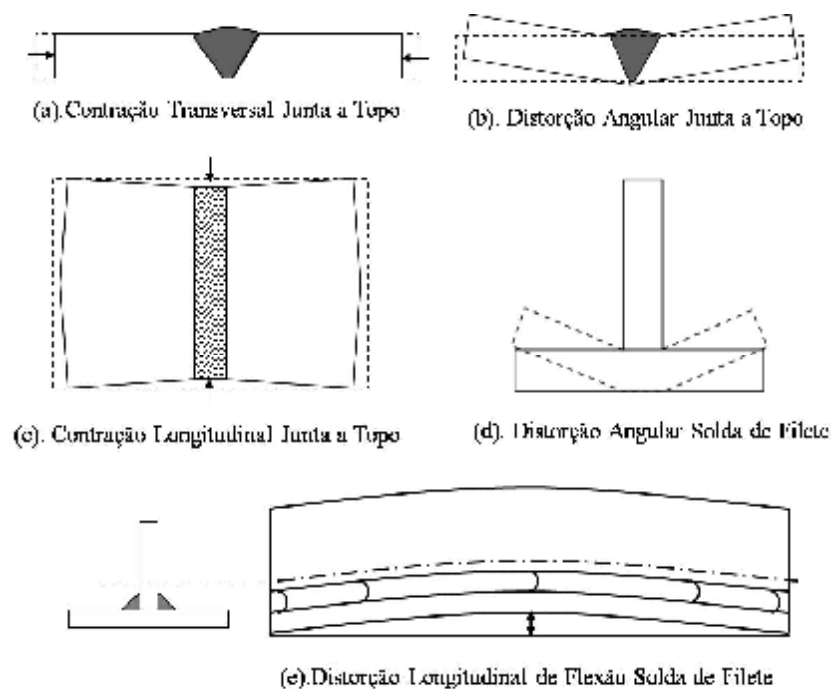


Figura 2.16 Tipos de distorções na soldagem ([The Procedure Handbook o Arc Welding, 2000. Bhide, et al. 2006](#)).

2.8.1.1 *Contração Transversal em Juntas a Topo*

A contração transversal ocorre principalmente em solda de juntas a topo, é uma redução dimensional que ocorre na direção ortogonal ao eixo da solda **Figura 2.16 (a)**, a qual acontece depois de ser resfriada na temperatura ambiente. Para uma determinada espessura de solda, a contração transversal da solda aumenta diretamente com a área da seção transversal da solda. ([The Procedure Handbook o Arc Welding, 2000. Murugan e Gunaraj, 2005. Puchaicela, 1998](#)).

2.8.1.2 *Distorção Angular em Juntas a Topo*

Distorção angular em soldas de juntas a topo **Figura 2.16 (b)** é uma alteração no ângulo que ocorre devido à uniformidade da contração térmica através da espessura do material. A alteração angular depende de vários fatores como, a geometria e as dimensões da junta, espessura do material e procedimentos de soldagem ([The Procedure Handbook o Arc Welding, 2000. AWS Welding Process, 1976. Murugan e Gunaraj, 2005. Puchaicela, 1998,](#)

Blodgett, 1963).

2.8.1.3 Contração Longitudinal em Juntas a Topo

A contração longitudinal **Figura 2.16 (c)** é uma redução dimensional que ocorre paralelo ao eixo da solda. A redução dimensional é pequena em relação à contração transversal, aproximadamente $1/1000$ do comprimento total da solda, contudo pode causar efeitos importantes como flexão de peças com solda aplicadas fora da linha neutra ([The Procedure Handbook o Arc Welding, 2000](#). [AWS Welding Process, 1976](#). [Murugan e Gunaraj, 2005](#). [Puchaicela, 1998](#), [Blodgett, 1963](#)).

2.8.1.4 Distorção Angular em Soldas de Filete

Distorção angular é similar a distorção em soldas a topo **Figura 2.16 (d)**, a não uniformidade da contração térmica através da espessura da chapa **Figura 2.17 (b)** cria um momento M próximo a linha neutra a qual produz mudança angular durante a soldagem de filete. Sendo que a mudança angular depende principalmente da seção transversal do cordão de solda (A_s), da espessura do flange (E) e da energia de soldagem imposta **Figura 17 (a)**.

O resultado da mudança angular f , é menor em juntas restringidas do que em juntas livres f_o , que também é influenciada pela rigidez do material da chapa ([The Procedure Handbook o Arc Welding, 2000](#). [AWS Welding Process, 1976](#). [Murugan e Gunaraj, 2005](#). [Puchaicela, 1998](#), [Blodgett, 1963](#). [Gonghyun, 2003](#). [Liu e Zhang, 2009](#)).

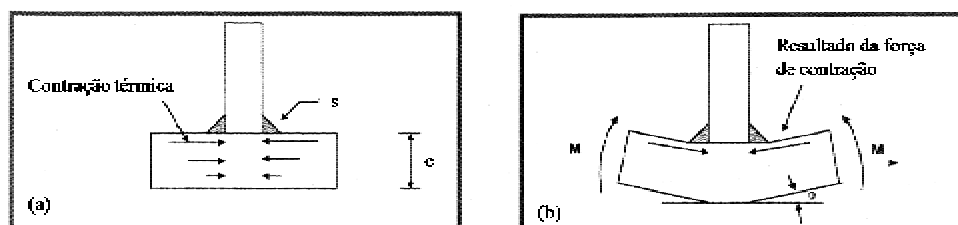


Figura 2.17. (a) Força de irregular de contração em solda de filete junta em T (b) e distorção angular em solda de filete (Puchaicela, 1998).

Porém, alguns gráficos foram criados **Figura 2.18** e equações desenvolvidas para ajudar a entender como os efeitos de vários parâmetros afetam a mudança angular.

Na **Figura 2.18** correlaciona-se a mudança angular com a espessura do material, onde os efeitos são maiores em espessuras de chapas até 12 mm, a distorção angular aumenta conforme aumenta seção a transversal do cordão de solda (A_s), e demonstra onde ocorre a maior distorção devido existir uma faixa crítica de espessura (e) do flange conhecida com e_{cr} a qual a mudança angular é máxima, sendo a e_{cr} aproximadamente entre 9 -10 mm. Também através deste gráfico é possível prever a distorção em juntas sem restrição utilizando LOG_{10} de A_s (AWS Welding Process, 1976. Puchaicela, 1998).

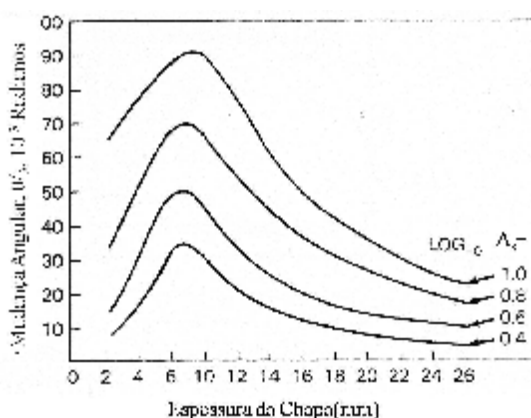


Figura 2.18 Variação da distorção angular de solda de filete sem restrição, θ , em função da espessura da chapa (e), e peso do metal de adição consumido por comprimento de solda (AWS Welding Process, 1976. Puchaicela, 1998).

Portanto, para espessuras menores que e_{cr} , existe uma redução na distorção devido à contração térmica responsável pela mudança angular, em chapas menos espessas o aquecimento é mais uniforme através da espessura. Para materiais com espessuras maiores que e_{cr} , existe uma redução na mudança angular com aumento da rigidez do material aumentado a resistência do flange em relação ao momento M .

Muitos pesquisadores propuseram equações para prever distorção angular em soldas de filete em juntas T, incluindo os efeitos dos parâmetros de soldagem, material de adição e espessura do material como mostra a **Equação 2.4** abaixo: (Watanabe, M. and Satoh, K, 1961. AWS Welding Process, 1976. Puchaicela, 1998. Gonghyun, 2003.)

$$f = C_1 \left(\frac{I}{h\sqrt{vh}} \right)^{2.5} \cdot \exp \left(-C_2 \frac{I}{h\sqrt{vh}} \right) \quad (2.4)$$

$$C_1 \propto \left(\frac{hV}{D^{0.25}} \right)^{2.5}, C_2 \propto \left(\frac{hV}{D^{2.25}} \right)$$

Onde h espessura da chapa (cm), D diâmetro do eletrodo (mm), h rendimento do processo, V tensão, I corrente de soldagem e v velocidade de soldagem (cm/s).

Em casos simples da distorção não uniforme, a relação entre a mudança angular e a distorção na solda é dada pela **Equação 2.5** (AWS Welding Process, 1976).

$$\frac{d}{l} = \frac{1}{4} f - \left[\frac{x}{l} - \frac{1}{2} \right]^2 f \quad (2.5)$$

Sendo d distorção, l distância entre as soldas, f mudança angular, x é a distância do centro da alma até o ponto, onde a distorção é mediada, como mostra a **Figura 2.19**.

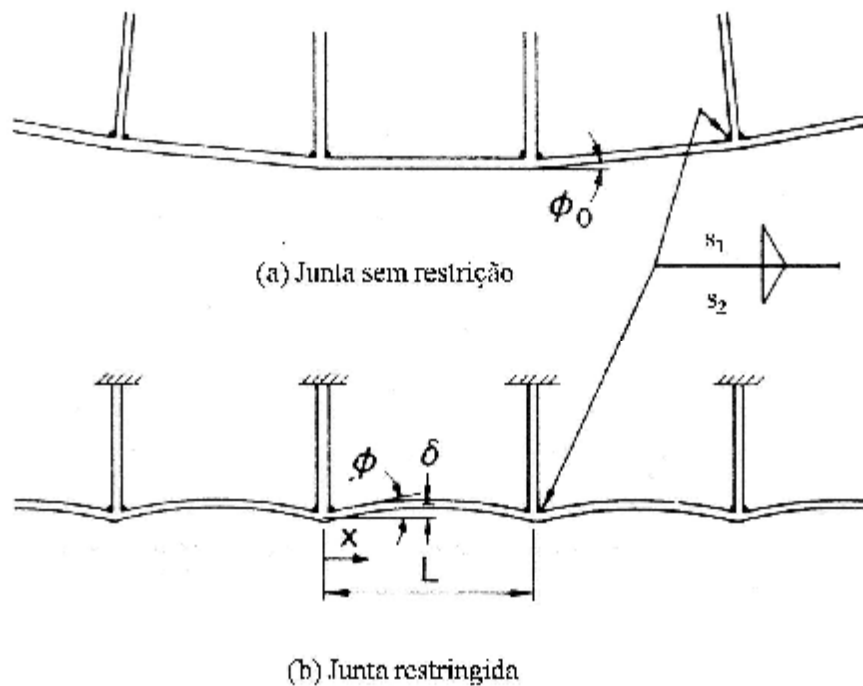


Figura 2.19 Distorção causada por mudança angular em dois tipos de solda de filete em estruturas (AWS Welding Process, 1976. Puchaicela, 1998).

Sendo que a distorção angular f , é menor em juntas restringidas do que em juntas livres, f_o , e a quantidade de f também muda quando há rigidez do material, como mostra a **Equação 2.6**.

$$D = Eh^3 \left(12 \left[1 - n^2 \right] \right) \quad (2.6)$$

Também o comprimento de l pode ser calculado conforme a **Equação 2.7** (AWS Welding Process, 1976).

$$f = \frac{f_o}{1 + \frac{2D}{l} \cdot \frac{1}{C}} \quad (2.7)$$

Onde C é o coeficiente determinado pelas condições de soldagens e espessura da chapa.

O valor determinado de f_o como uma função da espessura da chapa, $h(mm)$, e o peso do metal de adição consumido por comprimento de solda, $w (g/cm)$ **Equação 2.8** (AWS Welding Process, 1976).

$$C = \frac{h^4}{1 + \frac{w}{5}} \quad (2.8)$$

Onde h espessura da chapa, mm e w massa do material de adição depositado por comprimento de solda, g/cm .

Então utilizando as **equações (2.5)** até **(2.8)**, é possível calcular a distorção que ocorre quando uma junta é soldado com um dado procedimento de soldagem (AWS Welding Process, 1976). Também a distorção angular pode ser estimada pela **Equação 2.9** (The Procedure Handbook o Arc Welding, 2000. Blodgett, 1963).

$$\Delta = \frac{0,002 W s^{1,3}}{h^2} \quad (2.9)$$

Sendo W largura do flange em (in), s tamanho da solda (in), h espessura do flange em (in).

2.8.2 Distorção Longitudinal de Flexão em Soldas de Filete

Este tipo de distorção é causado por tensões induzidas por forças de contração longitudinal de soldas que não coincidem com a linha neutra do conjunto soldado **Figura 2.16 (e)**.

A força de contração F , que é determinada através do centro da solda até a distância d da linha neutra da junta soldada, produz um momento M e coloca a junta em flexão como mostra a **Figura 2.20** (AWS Welding Process, 1976. The Procedure Handbook o Arc Welding, 2000. Puchaicela, 1998. Blodgett, 1963. Bhide, *et al.* 2006).

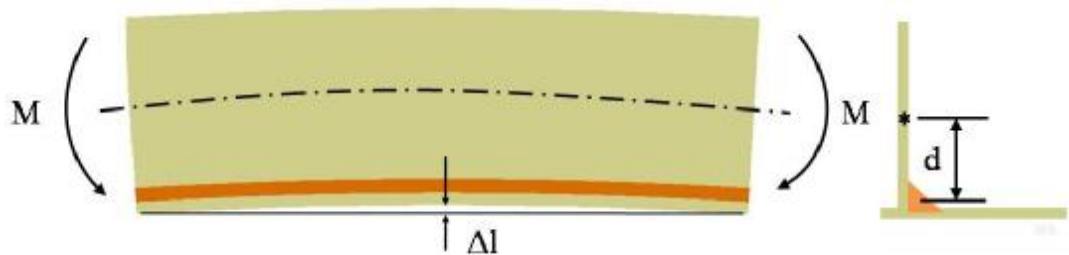


Figura 2.20 Distorção longitudinal de flexão (Puchaicela, 1998).

Portanto, o grau de distorção é diretamente controlado pela magnitude do momento causado pela contração e a resistência do conjunto a flexão como é indicado pelo momento de inércia.

Assumindo que não tem nenhuma tensão inicial, a **Equação 2.10** indica a quantidade da distorção ou flexão que resultará em qualquer soldagem longitudinal de um determinado conjunto.

$$\Delta = 0.005 \frac{A_s dL^2}{I_z} \quad (2.10)$$

Onde A_s é a área total da seção transversal da solda (in^2), d distância entre o centro de gravidade das soldas e a linha neutra do conjunto (in), L o comprimento da solda, assumido a soldagem em todo comprimento (in), I_z momento de inércia do conjunto (in^4), Δ resultado da

flexão (*in*).

Em aplicações de solda onde são simétricos balanceados sobre a linha neutra na seção, os momentos são iguais, porém a distorção final dependerá da sequência da soldagem. Se ambos os flanges são soldados simultâneos, a área da junta resistindo é igual para ambos os momentos de flexão e não existira distorção (AWS Welding Process, 1976. The Procedure Handbook o Arc Welding, 2000. Puchaicela, 1998. Bhide, *et al.* 2006).

2.9 Descontinuidades em Juntas Soldadas

O aumento pela demanda de produção torna-se necessário a criação de métodos de inspeção mais críticos e aprovados pelas normas. De modo que, as normas deveriam representar requisitos mínimos de tolerâncias para qualidade da solda que podem ser assegurados e satisfaçam o desempenho da junta soldada, sendo que deveria ser baseado em testes sobre corpos de prova contendo a descontinuidade abaixo dos requisitos.

2.9.1 Tipos de Descontinuidades

Neste trabalho não será visto todos os tipos de descontinuidades existentes em juntas soldadas, isto porque existem muitas descontinuidades e muitas literaturas que descrevem os tipos de imperfeições em soldagem e porque não é de interesse deste trabalho abordar todos os tipos de descontinuidades. Entretanto, vão ser abordadas descontinuidades, como, porosidade, falta de fusão, trinca, falta de penetração, mordeduras, perfil do cordão.

2.9.2 Porosidade

Porosidade na solda é uma descontinuidade tipo uma cavidade formada pelo aprisionamento de gás durante a solidificação. A porosidade na solda é formada enquanto o metal fundido da solda está solidificando, contendo gases dissolvidos acima do limite de solubilidade no metal. Também se existir insuficiente gás de proteção do arco durante a soldagem, pode absorver nitrogênio e oxigênio para dentro da poça de fusão do metal (Wei, *et al.* 2006).

2.9.3 Mordeduras

Mordedura (*undercut*) pode ser definida como um desnível ao longo da interface entre a solda e o metal base, causado pelo procedimento de solda e resultando em falta de material. Durante o processo de soldagem, a cavidade no metal base pode ocorrer próximo da interface da solda seguido por uma subsequente solidificação no metal de solda, sem que o desnível esteja preenchido. Mordeduras podem ser formadas em soldagem totalmente mecanizadas ao longo do filete de solda na posição horizontal, devido a alta energia de soldagem. O metal de solda em chapas verticais escorre antes de solidificar sem ter dado a forma requerida no cordão de solda. Em solda manual o manuseio incorreto do eletrodo também pode causar mordeduras na solda (Mashiri, *et al.* 2001. Nguyen, *et al.* 1998).

2.9.4 Fusão Incompleta

Fusão incompleta ou falta de fusão conhecida como uma descontinuidade adjacente ao metal de solda e o metal base por não estarem fundidos completamente. Esta descontinuidade geralmente ocorre em um ponto da solda.

A fusão incompleta pode ocorrer devido um aquecimento inadequado da junta ou por falha na remoção da escória e ou algum material existente na superfície da chapa, como óxidos (Valérie, *et al.* 2002).

2.9.5 Penetração Incompleta Na Junta

Este termo é usado para descrever a condição na qual a penetração na junta é menor que o requerido. A causa maior deste defeito é propiciado por um inadequado chanfro da junta (AWS Welding Process, 1976).

2.9.6 Trinca

Exceto em algumas operações de soldas de revestimentos, trincas são consideradas nocivas à integridade da junta. Trincas podem ocorrer no metal depositado ou na zona afetada pelo calor (ZAC) do metal base adjacente à linha de fusão da solda. Uma das maiores causas

da trinca no metal de solda ou no metal base é o alto carbono ou liga que contém aumentando a dureza. A dureza combinada com altas taxas de resfriamentos produz condições de fragilidade que aumentam o surgimento de trincas. Outros fatores que podem propiciar o surgimento de trincas na junta são restrição da junta, perfil impróprio do cordão, absorção de hidrogênio e contaminantes no material ([The Procedure Handbook o Arc Welding, 2000](#)).

2.9.7 Perfil do Cordão

O perfil final da solda pode ter efeitos consideráveis no desempenho da junta, pode ficar abaixo da sua resistência, perfis com um passe ou perfis com mais de uma camada tem tendência de produzir soldas com defeitos como, fusão incompleto ou inclusão de escórias. Existem vários tipos de defeitos relacionados ao perfil do cordão como:

Sobreposição das soldas, geralmente Esta associada a soldas de filete, mas também ocorre em soldas de arestas. O termo descrito ocorre num aumento do metal de solda mais afastado da interface do cordão. Estas condições tendem a produzir entalhe resultando em concentrações de tensão e reduzindo o tamanho efetivo do filete. Geralmente é causado por técnicas incorretas de soldagem ou procedimentos errados **Figura 2.21** ([AWS Welding Process, 1976](#). [AWS D1. 1., 2004](#)).

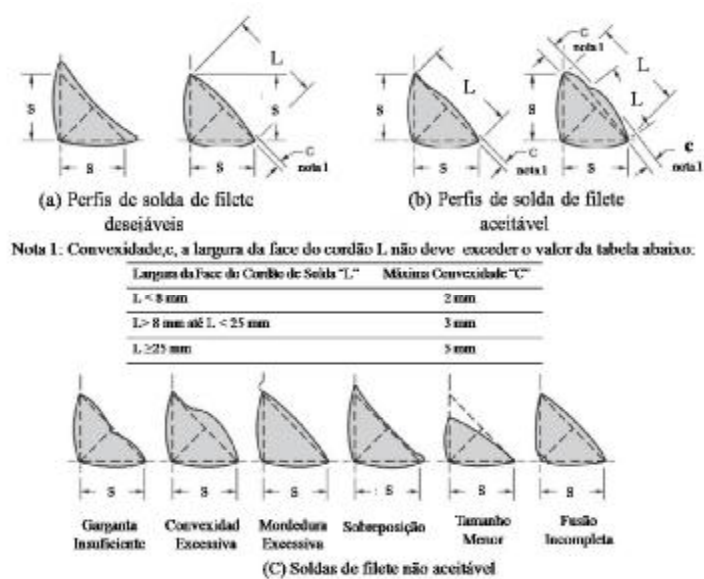


Figura 2.21 Perfil de soldas aceitável e não aceitável ([AWS D1. 1 2004](#)).

3 MATERIAIS E METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os materiais, os equipamentos e a metodologia empregados no estudo para o desenvolvimento dos envelopes operacionais para soldagem robotizada.

Portanto, os experimentos deste trabalho se basearam na realização de cordões de solda para posterior análise.

3.1 Materiais e Métodos para a Soldagem

As soldas foram realizadas em chapas de aço de baixo carbono de 4,75 mm de espessura com a composição química e propriedades mecânicas apresentada na **Tabela 3.1**, sendo que a composição química foi obtida através de análise de espectrometria ótica. As chapas foram seccionadas mecanicamente em forma de retângulos de 75 mm por 250 mm. A seguir estes corpos de prova foram submetidos a um processo de desempenho.

Tabela 3.1 Composições químicas e propriedades mecânicas do metal base.

Materiais	Elemento Químico (%)				
	C	Si	Mn	P	S
NBR 6656 LNE 38	0,10	0,08	0,57	0,008	0,003

	Resistência à Tração (MPa)	Limite Escoamento (MPa)	Alongamento (%)
NBR 6656 LNE 38	460-600	350 - 530	23

Para o posicionamento das chapas, fixação e a garantia da formação da junta em “T”, foi projetado um dispositivo com auxílio do software 3D Pro/ENGINEER e construído o dispositivo utilizando chapas de aço **Figura 3.1**.

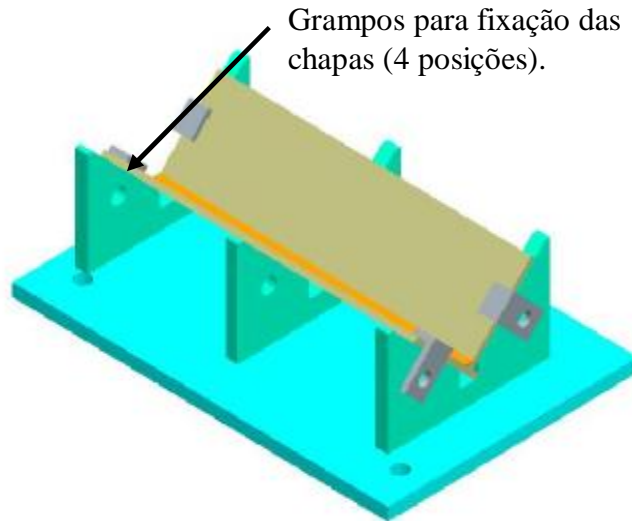


Figura 3.1 Modelo do dispositivo para posicionamento das chapas.

As dimensões de montagem da junta foram: largura 75 mm, altura 79,7 mm, comprimento 250 mm **Figura 3.2**. Antes da aplicação de cada solda, o corpo de prova foi submetido a limpeza para remover a fina camada de óleo existente na superfície da chapa devido ao processo de fabricação da chapa ser oleada e decapada, também antes da aplicação da solda os corpos de provas foram pesados em uma balança digital para registrar seu peso inicial.



Figura 3.2 Desenho da junta soldada.

Todos os cordões realizados foram sob a forma de junta de filete em “T”, posição plana com o arame posicionado num ângulo de 45° entre as duas chapas, 90° em relação ao eixo da solda e distância da extensão do arame após o bico de contato de 20 mm e, as soldas somente foram aplicadas em um lado da junta conforme ilustrado na **Figura 3.3**.

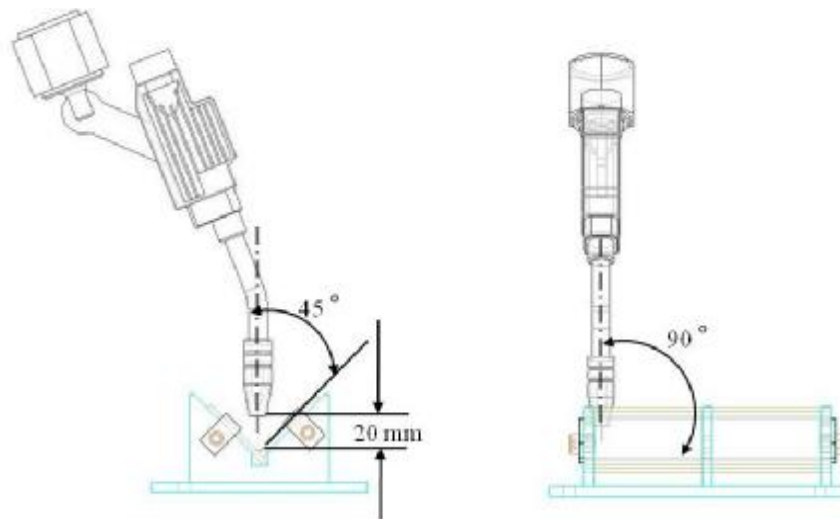


Figura 3.3 Posição da tocha de soldagem em relação ao eixo do cordão de solda.

Para garantir os parâmetros como, velocidade de soldagem, distância da extensão do arame até a peça depois do bico de contato, foi utilizado um robô KUKA modelo KR 30-3, com seis graus de liberdade, equipado para soldagem com MIG/MAG, da empresa John Deere Brasil de Horizontina, conforme **Figura 3.4**. A fonte de potência inversora Fronius Trans Puls Synergic 5000, curva característica tensão constante, polaridade do eletrodo positiva (CCEP), totalmente digitalizada e controlada por microprocessadores, com capacidade para soldagem em curto circuito, aerossol (*spray*), pulsada e saída de corrente de até 500 A, utilizando um alimentador de arame Fronius modelo 1500-22 com 4 rolos e capacidade de até 22 m/min.



Figura 3.4 Robô KR 30-3 e fonte de potência TPS 5000.

Para depositar os cordões de solda nos corpos de prova e para garantir que os mesmos fossem soldados com metal de adição igual utilizou-se uma barrica de arame 1,20 mm de 250 kg conforme mostra **Figura 3.5.**



Figura 3.5 Barrica de arame tipo Marathon Pack.

O consumível (arame maciço, AWS ER70S-6) com 1,2 mm de diâmetro é aquele descrito na AWS A5.18 , o qual juntamente com outras informações encontra-se na **Tabela 3.2.**

Tabela 3.2 Composições químicas e propriedades mecânicas consumível.

Materiais	Elemento Químico (%)							
	C	Si	Mn	P	S	Cu		
AWS ER70S-6	0,07-0,15	0,80-1,15	1,40-1,85	0,025	0,035	0,50	-	-
	Resistência à Tração (mínimo)		Limite Escoamento (mínimo)		Alongamento (mínimo)			
	MPa		MPa		%			
AWS ER70S-6	480		400		22			

Inicialmente foram realizados os experimentos exploratórios, com objetivo de encontrar os parâmetros de soldagem a serem estudados. As condições de soldagem foram selecionadas de modo que a solda aplicada atendesse os requisitos de uma junta soldada para cada mistura gasosa. Denomina-se aqui, como um cordão de solda que atenda os requisitos (sob o aspecto técnico e operacional), aquele que apresente uma boa aparência, arco elétrico mais estável, livre de descontinuidades superficiais e com menor quantidade de respingo. Assim foram determinadas as condições de soldagem empregadas no desenvolvimento deste trabalho.

Gases de proteção foram usados misturas armazenadas em cilindros fornecidas pelo fabricante mostrados na **Tabela 3.3**.

Tabela 3.3 Misturas gasosas utilizadas

CPs*	% Ar	% CO ₂	% O ₂
1 - 24	82	18	
25 - 48	95		5
49 - 72	90	8	2
73 - 96	85	15	
97 - 120	98		2
120 - 144		100	

*Corpos de provas

Cada mistura foi submetida a 24 diferentes condições de soldagem, conforme estarão sendo apresentadas no decorrer do trabalho. Os parâmetros primários como: tensão, corrente de soldagem e velocidade de soldagem foram ajustados para cada mistura de gás, sempre buscando a melhor condição de soldagem. Entretanto, as 24 condições de soldagem estão divididas em três faixas para formar o envelope operacional, sendo faixa mínima, intermediária e máxima, sempre buscando o melhor intervalo de tensão admissível para uma mesma corrente de soldagem.

Nas tabelas **Tabela 3.4** a **Tabela 3.16** a seguir estarão dispostos os parâmetros utilizados para soldagem dos corpos de provas.

Tabela 3.4 Parâmetros de soldagem com mistura 82% Ar + 18% CO₂.

CP	Faixa	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade Arame (m/min)	Velocidade Soldagem (mm/s)	Vazão (l/min)
1	Mínima	15	124	3,8	5,0	14
2		16	165	4,6	5,0	14
3		18	200	5,8	5,0	14
4		20	220	6,9	5,0	16
5		22	245	7,7	6,7	16
6		24	265	8,5	6,7	16
7		26	300	10,0	10,0	18
8		28	357	12,4	11,7	18
9	Intermediária	16	124	3,8	5,0	14
10		18	165	4,6	5,0	14
11		20	200	5,8	5,0	18
12		22	220	6,9	5,0	16
13		23	245	7,7	6,7	16
14		26	265	8,5	6,7	16
15		27	300	10,0	10,0	18
16		29	357	12,4	11,7	18
17	Máxima	17	124	3,8	5,0	14
18		19	165	4,6	5,0	14
19		21	200	5,8	5,0	14
20		23	220	6,9	5,0	16
21		24	245	7,7	6,7	16
22		27	275	8,5	6,7	16
23		28	300	10,0	10,0	18
24		30	357	12,4	11,7	18

Tabela 3.5 Parâmetros de soldagem com mistura 95% Ar + 5% O₂.

CP	Faixa	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade Arame (m/min)	Velocidade Soldagem (mm/s)	Vazão (l/min)
25	Mínima	14	160	4,5	5,0	14
26		15	200	6,0	5,0	14
27		17	240	7,5	5,0	16
28		19	260	8,5	6,7	16
29		22	310	10,0	10,0	18
30		23	330	11,0	10,0	18
31		24	345	11,5	10,0	18
32		25	370	12,4	10,0	18
33	Intermediária	15	160	4,5	5,0	14
34		16	200	6,0	5,0	14
35		18	240	7,5	5,0	16
36		20	260	8,5	6,7	16
37		23	310	10,0	10,0	18
38		24	330	11,0	10,0	18
39		25	345	11,5	10,0	18
40		26	370	12,4	10,0	18
41	Máxima	16	160	4,5	5,0	14
42		17	200	6,0	5,0	14
43		19	240	7,5	5,0	16
44		21	260	8,5	6,7	16
45		24	310	10,0	10,0	18
46		25	330	11,0	10,0	18
47		26	345	11,5	10,0	18
48		27	370	12,4	10,0	18

Tabela 3.6 Parâmetros de soldagem com mistura 90% Ar + 8% CO₂ + 2% O₂.

CP	Faixa	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade Arame (m/min)	Velocidade Soldagem (mm/s)	Vazão (l/min)
49	Mínima	15	152	3,8	5,0	14
50		16	175	4,6	5,0	14
51		17	205	6,0	5,0	16
52		19	240	7,5	5,0	16
53		20	260	8,5	6,7	16
54		22	275	9,5	6,7	16
55		24	320	11,0	10,0	18
56		26	360	12,4	11,7	18
57	Intermediária	16	152	3,8	5,0	14
58		17	175	4,6	5,0	14
59		18	205	6,0	5,0	16
60		20	240	7,5	5,0	16
61		21	260	8,5	6,7	16
62		23	275	9,5	6,7	16
63		25	320	11,0	10,0	18
64		27	360	12,4	11,7	18
65	Máxima	17	152	3,8	5,0	14
66		18	175	4,6	5,0	14
67		19	205	6,0	5,0	16
68		21	240	7,5	5,0	16
69		22	260	8,5	6,7	16
70		24	275	9,5	6,7	16
71		26	320	11,0	10,0	18
72		28	360	12,4	11,7	18

Tabela 3.7 Parâmetros de soldagem com mistura 85% Ar + 15% CO₂

CP	Faixa	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade Arame (m/min)	Velocidade Soldagem (mm/s)	Vazão (l/min)
73	Mínima	15	150	3,8	5,0	14
74		17	180	4,6	5,0	14
75		19	215	6,0	5,0	16
76		20	245	7,5	5,0	16
77		21	260	8,5	6,7	16
78		24	287	9,5	6,7	16
79		26	330	11,0	10,0	18
80		27	355	12,4	11,7	18
81	Intermediária	16	150	3,8	5,0	14
82		18	180	4,6	5,0	14
83		20	215	6,0	5,0	16
84		21	245	7,5	5,0	16
85		22	260	8,5	6,7	16
86		25	287	9,5	6,7	16
87		27	330	11,0	10,0	18
88		28	355	12,4	11,7	18
89	Máxima	17	150	3,8	5,0	14
90		19	180	4,6	5,0	14
91		21	215	6,0	5,0	16
92		22	245	7,5	5,0	16
93		23	260	8,5	6,7	16
94		26	287	9,5	6,7	16
95		28	330	11,0	10,0	18
96		29	355	12,4	11,7	18

Tabela 3.8 Parâmetros de soldagem com mistura 98% Ar + 2% O₂.

CP	Faixa	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade Arame (m/min)	Velocidade Soldagem (mm/s)	Vazão (l/min)
97	I Mínima	14	150	3,8	5,0	14
98		16	170	4,6	5,0	14
99		17	230	7,0	5,0	16
100		19	253	7,5	5,0	16
101		21	270	9,0	6,7	16
102		24	315	10,0	6,7	16
103		26	360	11,5	10,0	18
104		27	400	14,0	10,0	18
105	Intermediária	15	150	3,8	5,0	14
106		15	170	4,6	5,0	14
107		16	230	7,0	5,0	16
108		18	253	7,5	5,0	16
109		20	270	9,0	6,7	16
110		23	315	10,0	6,7	16
111		25	360	11,5	10,0	18
112		26	400	14,0	10,0	18
113	Máxima	16	150	3,8	5,0	14
114		17	170	4,6	5,0	14
115		18	230	7,0	5,0	16
116		20	253	7,5	5,0	16
117		22	270	9,0	6,7	16
118		25	315	10,0	6,7	16
119		27	360	11,5	10,0	18
120		28	400	14,0	10,0	18

Tabela 3.9 Parâmetros de soldagem com mistura 90% Ar + 8% CO₂ + 2% O₂.

CP	Faixa	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade Arame (m/min)	Velocidade Soldagem (mm/s)	Vazão (l/min)
121	Mínima	20	145	3,8	5,0	14
122		21	170	4,6	5,0	14
123		23	195	5,8	5,0	16
124		25	220	6,9	5,0	16
125		26	240	7,7	6,7	16
126		27	260	8,5	6,7	16
127		30	290	10,0	10,0	18
128		32	330	12,4	11,7	18
129	Intermediária	21	145	3,8	5,0	14
130		22	170	4,6	5,0	14
131		24	195	5,8	5,0	16
132		26	220	6,9	5,0	16
133		27	240	7,7	6,7	16
134		28	260	8,5	6,7	16
135		31	290	10,0	10,0	18
136		33	330	12,4	11,7	18
137	Máxima	22	145	3,8	5,0	14
138		23	170	4,6	5,0	14
139		25	195	5,8	5,0	16
140		27	220	6,9	5,0	16
141		28	240	7,7	6,7	16
142		29	260	8,5	6,7	16
143		32	290	10,0	10,0	18
144		34	330	12,4	11,7	18

Tabela 3.10 Parâmetros de soldagem com mistura 100% CO₂.

CP	Faixa	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade Arame (m/min)	Velocidade Soldagem (mm/s)	Vazão (l/min)
121	Mínima	20	145	3,8	5,0	14
122		21	170	4,6	5,0	14
123		23	195	5,8	5,0	16
124		25	220	6,9	5,0	16
125		26	240	7,7	6,7	16
126		27	260	8,5	6,7	16
127		30	290	10,0	10,0	18
128		32	330	12,4	11,7	18
129	Intermediária	21	145	3,8	5,0	14
130		22	170	4,6	5,0	14
131		24	195	5,8	5,0	16
132		26	220	6,9	5,0	16
133		27	240	7,7	6,7	16
134		28	260	8,5	6,7	16
135		31	290	10,0	10,0	18
136		33	330	12,4	11,7	18
137	Máxima	22	145	3,8	5,0	14
138		23	170	4,6	5,0	14
139		25	195	5,8	5,0	16
140		27	220	6,9	5,0	16
141		28	240	7,7	6,7	16
142		29	260	8,5	6,7	16
143		32	290	10,0	10,0	18
144		34	330	12,4	11,7	18

**Tabela 3.11 Parâmetros de soldagem considerados não recomendados para soldar
(82% Ar + 18% CO₂).**

CP	Faixa	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade Arame (m/min)	Velocidade Soldagem (mm/s)	Vazão (l/min)
1.1	Mínima	14	124	5,0	3,8	14
5.1		21	245	6,7	7,7	16
8.1		26	357	11,7	12,4	18
17.1	Máxima	19	124	5,0	3,8	14
21.1		24	245	6,7	7,7	16
24.1		31	357	11,7	12,4	18

**Tabela 3.12 Parâmetros de soldagem considerados não recomendados para soldar
(95% Ar + 5% O₂).**

CP	Faixa	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade Arame (m/min)	Velocidade Soldagem (mm/s)	Vazão (l/min)
25.1	Mínima	13	160	5,0	4,5	14
28.1		18	260	6,7	8,5	16
32.1		20	370	10,0	12,4	18
41.1	Máxima	17	160	5,0	4,5	14
44.1		23	260	6,7	8,5	16
48.1		28	370	10,0	12,4	18

**Tabela 3.13 Parâmetros de soldagem considerados não recomendados para soldar
(90% Ar + 8% CO₂ + 2% O₂).**

CP	Faixa	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade Arame (m/min)	Velocidade Soldagem (mm/s)	Vazão (l/min)
49.1	Mínima	14	152	5,0	3,8	14
52.1		18	240	5,0	7,5	16
56.1		23	360	11,7	12,4	18
65.1	Máxima	18	152	5,0	3,8	14
68.1		22	240	5,0	7,5	16
72.1		28	360	11,7	12,4	18

**Tabela 3.14 Parâmetros de soldagem considerados não recomendados para soldar
(85% Ar + 15% CO₂).**

CP	Faixa	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade Arame (m/min)	Velocidade Soldagem (mm/s)	Vazão (l/min)
73.1	Mínima	15	150	5,0	3,8	14
76.1		19	245	5,0	7,5	16
80.1		24	355	11,7	12,4	18
89.1	Máxima	18	150	5,0	3,8	14
92.1		23	245	5,0	7,5	16
96.1		30	355	11,7	12,4	18

**Tabela 3.15 Parâmetros de soldagem considerados não recomendados para soldar
(98 % Ar + 2 % O₂).**

CP	Faixa	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade Arame (m/min)	Velocidade Soldagem (mm/s)	Vazão (l/min)
97.1	Mínima	14	150	5,0	3,8	14
100.1		17	245	5,0	7,5	16
104.1		23	400	10,0	14,0	18
113.1	Máxima	17	150	5,0	3,8	14
116.1		21	245	5,0	7,5	16
120.1		29	400	10,0	14,0	18

**Tabela 3.16 Parâmetros de soldagem considerados não recomendados para soldar
(100% CO₂).**

CP	Faixa	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade Arame (m/min)	Velocidade Soldagem (mm/s)	Vazão (l/min)
121.1	Mínima	19	145	5,0	3,8	14
124.1		24	220	5,0	6,9	16
128.1		31	330	11,7	12,4	18
137.1	Máxima	23	146	5,0	3,8	14
140.1		28	220	5,0	6,9	16
144.1		35	330	11,7	12,4	18

Portanto, realizaram-se 180 cordões de solda (30 condições vezes seis tipos de misturas), destes 24 são parâmetros considerados ideais para soldagem e estão dentro do envelope operacional e os outros 6 são considerados parâmetros não indicados para soldagem e estão fora do envelope operacional.

Os valores médios de corrente de soldagem para criação dos envelopes foram os seguintes: 230 A, 233 A, 250, A 253 A, 262 A e 285 A. Para todas as condições foram variadas principalmente a tensão e velocidade de soldagem, buscando sempre manter corrente e velocidade de arame como referência. Observou que nas condições onde se usou misturas mais ricas em argônio e com adição de oxigênio a corrente média foi maior, também se verificou que as tensões médias foram as seguintes: 20 V, 21 V, 22 V, 22 V, 23 V e 27 V, neste caso a tensão média ficou menor nas misturas ricas em argônio e com adição de oxigênio, isto devido a melhor ionização do arco que ocorre em misturas com maior quantidade de Ar.

3.2 Materiais e Métodos para Caracterização das Soldas

Para cada corpo de prova soldado, foi realizada macrografia da secção transversal do cordão, através do processo de corte e polimento das superfícies usando os seguintes equipamentos:

- Máquina de corte STRUERS DISCOTOM-2.
- Macroscópico WILDM3.
- Máquina. Embutimento - BUEHLER SIMPLIMET 2000.
- Politriz - BUEHLER ECOMET 4.
- Disco magnético abrasivo 300 mm 15 micron, com água filtrada.
- Disco magnético e abrasivo, diâmetro de 300 mm, com suspensão de diamante 9 micron.
- Pano para polimento 6 micron, com suspensão de diamante 6 micron.

As macrografias foram atacadas com Nital 3,5 % para revelação dos perfis dos cordões. Na análise dos perfis dos cordões foi usado um Macroscópico WILDM3 sendo as macrografias ampliadas 6 vezes com auxílio de uma câmera fotográfica Sony.

Os cordões foram caracterizados através da medida de penetração P , garganta t , tamanhos S_1 e S_2 , reforço c , área fundida B , metal de adição depositado A , diluição e defeitos **Figura 3.6**, sendo que para realizações das medições foi usado o software *IT - Image Tool 3.0*,

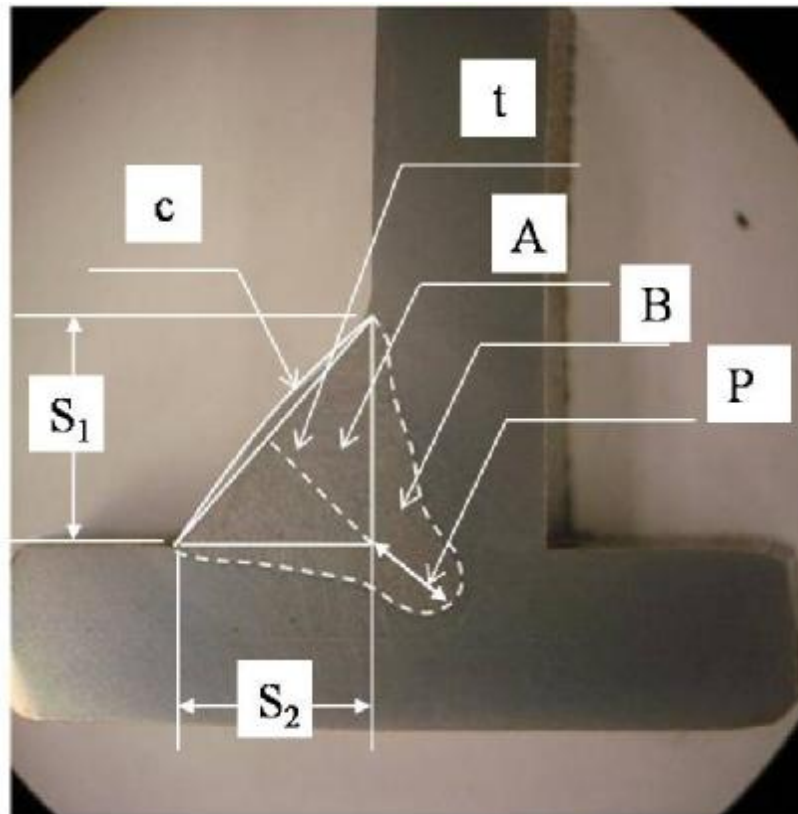


Figura 3.6 Perfil do cordão analisado.

3.3 Materiais e Métodos para Medição da Taxa de Deposição

Em cada corpo de prova foi realizado um cordão de solda com os parâmetros especificados nas **Tabelas 3.4 a Tabela 3.10**. Cada chapa de aço NBR 6656 com as seguintes dimensões (4,75 mm X 75 mm X 250 mm) foi pesada utilizando uma balança digital com precisão de 1 g e identificada antes de soldar. O tempo de arco aberto foi medido, bem como o comprimento dos cordões. Após a soldagem foi pesado novamente cada corpo de prova para verificar a quantidade de massa depositada. Para calcular a taxa de deposição foi utilizada a **Equação 3.1**.

$$\text{Taxa de Deposição (kg/h)} = \frac{(\text{Massa Final} - \text{Massa Inicial}) (\text{kg})}{\text{Tempo de Arco Aberto (h)}} \quad (3.1)$$

3.4 Materiais e Métodos para Determinar Distorções

Foram realizadas as medições em todos os CP's soldados com os parâmetros de soldagem indicados nas **Tabelas 3.4 a Tabela 3.10**.

As medições das distorções causadas pela soldagem nos corpos de prova foram realizadas usando três métodos diferentes:

Medição da distorção angular, ou seja, a qual ocorre uma mudança no ângulo ao redor do eixo da solda na direção (y, z) **Figura 3.7**, Distância 38 mm e 52 mm na **Figura 3.7**, indica os pontos de restrição da junta, onde a mesma está fixa.

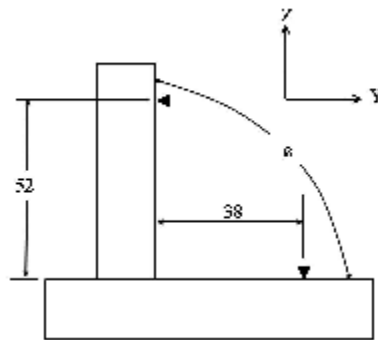


Figura 3.7 Medição do ângulo da junta após a soldagem (junta restringida).

Medição da distorção angular, as soldas foram realizadas com uma das chapas livre, ou seja, somente foi restringido um lado junta do flange **Figura 3.8**, para soldagem utilizaram-se os parâmetros de soldagem dos corpos de prova da sequência 129 a 136, os quais constam na **Tabela 3.10**.

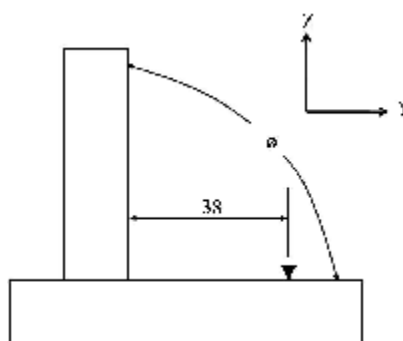


Figura 3.8 Medição do ângulo da junta após a soldagem (junta livre).

Para verificação da distorção angular foi medido o ângulo (θ) entre o chapa e a alma de cada corpo de prova **Figura 3.7** e **Figura 3.8** utilizando um instrumento de medição denominado transferidor de grau com precisão de 5 minutos.

Medição da distorção longitudinal de flexão, ou seja, a mesma ocorre numa variação ΔL no sentido longitudinal paralelo ao eixo da solda ao longo do comprimento (x) **Figura 3.9.**, Distâncias 38 mm e 125 mm indicam os pontos onde foi realizada a medição.

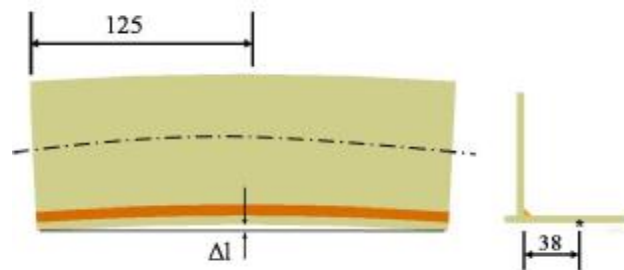


Figura 3.9 Distorção Longitudinal de Flexão.

Os CP's foram posicionados sobre blocos magnéticos em "V", e realizadas as medições com auxílio de um relógio comprador mecânico com precisão de 0,05 mm.

A quantificação das distorções causada pela soldagem nos CP's foi apresentada graficamente e comparada com outras variáveis, valores que estiveram muito acima da média da amostra foram desconsiderados.

3.5 Materiais e Métodos para Determinar as Equações

Para determinar as equações utilizou-se o método de regressão não linear com auxílio de um software de estatística DatFit 8.9

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A apresentação e discussão dos resultados foram suportadas pelos resultados dos experimentos propostos, macrografias dos cordões de solda, área fundida, medições dos perfis dos cordões e medições das distorções.

4.1 Resultados Obtidos com os Parâmetros de Soldagem Utilizados

Este assunto vai apresentar e correlacionar os principais parâmetros de soldagem através do desenvolvimento dos envelopes operacionais utilizando os parâmetros de soldagem definidos nas **Tabelas 3.4 a Tabela 3.10**.

4.2 Envelope Operacional I

Para determinar este envelope operacional utilizaram-se os parâmetros de soldagem especificados na **Tabela 3.4** para soldagem dos corpos de prova cuja sequência é 1 a 24, conforme mostra **Figura 4.1**.

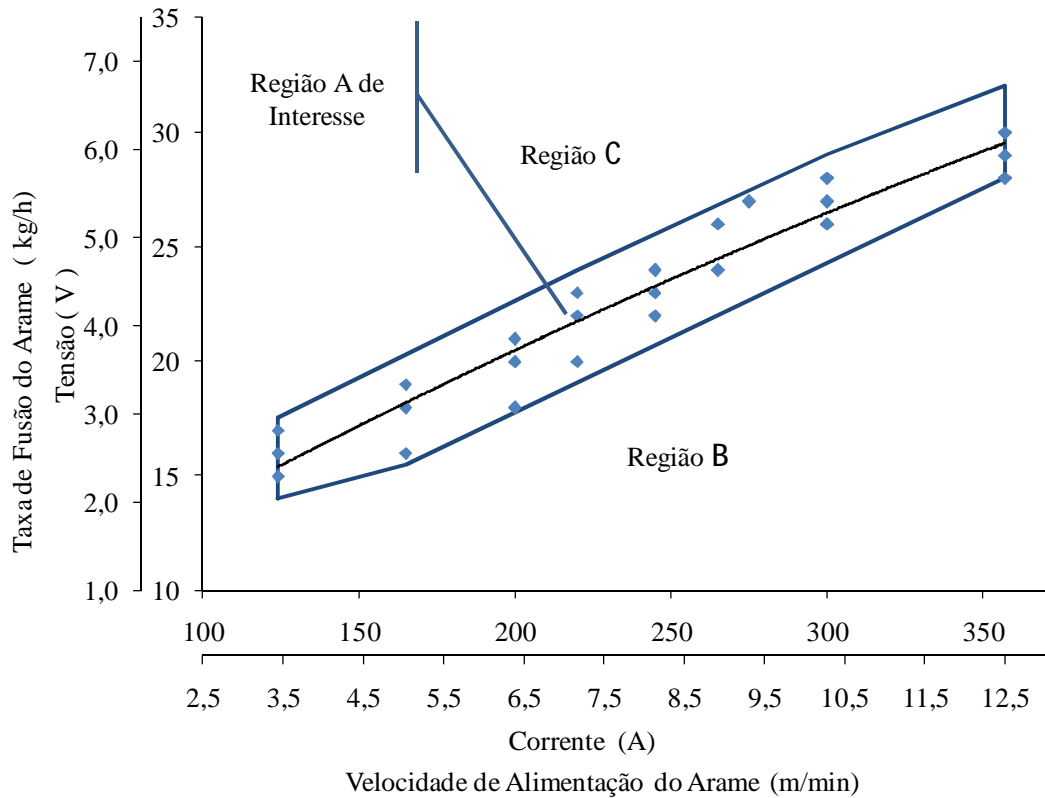


Figura 4.1 Envelope operacional para soldagem MAG robotizada (82% Ar + 18% CO₂), arame de aço ao carbono, Ø 1,2 mm

A **Figura 4.1** correlaciona tensão *versus* corrente e taxa de fusão *versus* velocidade de alimentação do arame. Apresentando as faixas de operações mínima, intermediária e máxima a linha central indica a tendência dos parâmetros para estas condições. Sendo que a tensão variou de 15 a 30 volts, a corrente de 124 a 357 ampères, velocidade de alimentação do arame de 3,8 a 12,4 m/min e taxa de fusão do arame entre 2,02 a 6,6 kg/h. Os resultados mostram que o aumento da tensão em função da corrente é praticamente linear, o mesmo acontece com a taxa de fusão em relação à velocidade de arame.

Segundo (Stenbacka, *et. al*, 1989), uma condição essencial para haver estabilidade no processo a arco MIG/MAG é que seja estabelecido um equilíbrio entre a velocidade de alimentação e a taxa de fusão do eletrodo.

Região A de Interesse: é compreendida como, a região dentro do envelope operacional onde se encontra nos melhores parâmetros para soldagem nestas condições. Parâmetros ótimos para soldagem estão localizados próximos a linha, dentro do envelope. A **Figura 4.2** mostra um exemplo de solda realizada nestas condições.

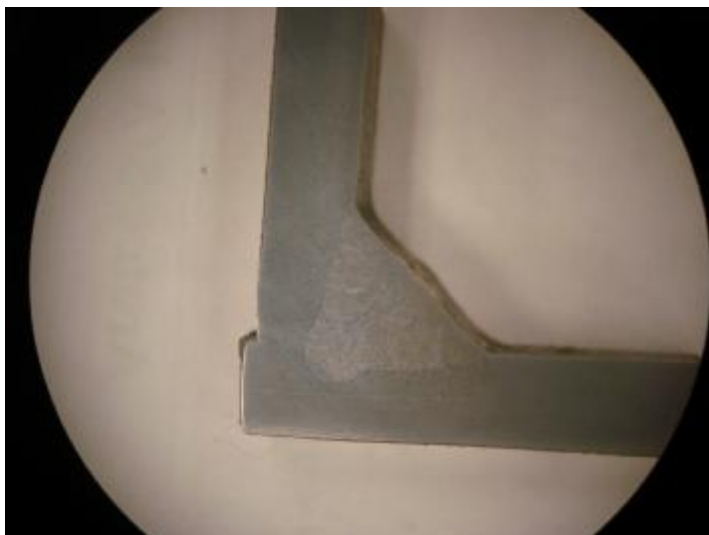


Figura 4.2 Perfil do cordão com excelentes características CP 22.

Região B: é compreendida como, região fora do envelope operacional que está localizada abaixo do limite inferior do envelope. Esta região não é recomendada para soldagem, conforme parâmetros **Tabela 3.11**, porque, causa muita instabilidade no arco elétrico, ocorrendo falta de fusão no material adjacente à linha da solda e salpico. A **Figura 4.3** mostra um exemplo de solda realizada nestas condições.

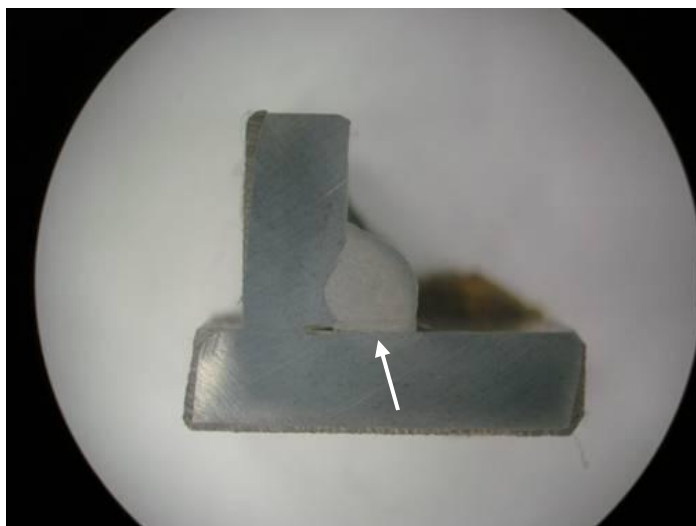


Figura 4.3 Cordão de solda com falta de fusão na flange CP 1.1.

Região C: é compreendida como, região fora do envelope operacional que esta localizada acima do limite superior do envelope operacional. Esta região não é recomendada

para soldagem, conforme parâmetros **Tabela 3.11**, porque, causa muita instabilidade no arco elétrico, início de mordedura e bastante salpico como mostra a **Figura 4.4**.

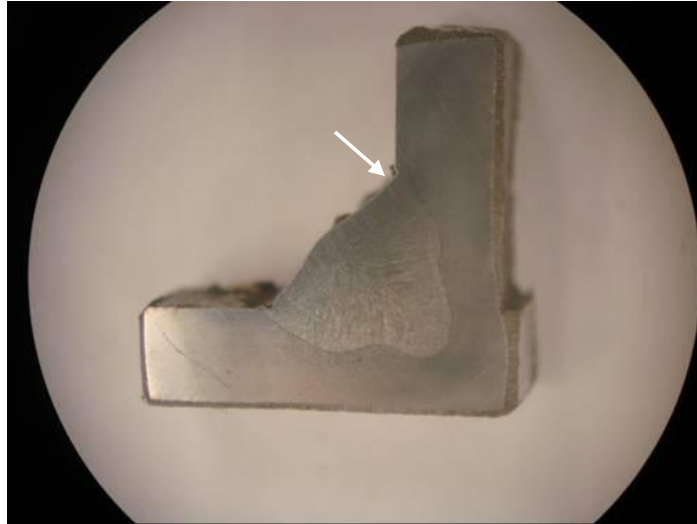


Figura 4.4 Cordão de solda com início de mordedura CP 24.1.

Com base nos resultados da **Figura 4.1**, foi desenvolvido uma equação para correlacionar os quatro parâmetros de soldagem usados para formação do envelope, a equação foi desenvolvido através de regressão linear polinomial de segunda ordem, que calcula o ajuste por mínimos quadrados através de pontos usando a seguinte **Equação 4.1**.

$$y = b + c_1x + c_2x^2 + c_3x^3 + \mathbf{L} + c_6x^6 \dots\dots\dots (4.1)$$

Onde *b* e *c* são constantes a determinar.

Também se usou o valor de R-quadrado, que é a medida de qualidade do ajuste, isto é, de como a linha de tendência se ajusta aos dados. Em que um ajuste perfeito, $R^2 = 1$ e pior ajuste $R^2 = 0$ (Bloch, 2003).

Portanto, a tensão é determinada pela **Equação 4.2**:

$$U = a * I^2 + b * I + c \dots\dots\dots (4.2)$$

Onde I é corrente de soldagem e as constantes a é igual $-4,024941 \cdot 10^{-5}$, b igual $8,010545 \cdot 10^{-2}$ e c igual $6,0577076$, o coeficiente de ajuste R^2 igual a $0,919$.

A taxa de fusão do Arame é determinada pela **Equação 4.3**:

$$T_{fa} = a * V_a^2 + b * V_a + c \dots\dots\dots (4.3)$$

Onde V_a é velocidade de alimentação do arame e as constantes a é igual $-7,141159 \cdot 10^{-5}$, b igual $0,534639$, e c igual $-0,009057$, o coeficiente de ajuste R^2 igual a $0,999$.

4.2.1 Envelope Operacional II

Para determinar este envelope operacional utilizou-se os parâmetros de soldagem especificados na **Tabela 3.5** para soldagem dos corpos de prova cuja sequência é 25 a 48, conforme mostra **Figura 4.5**.

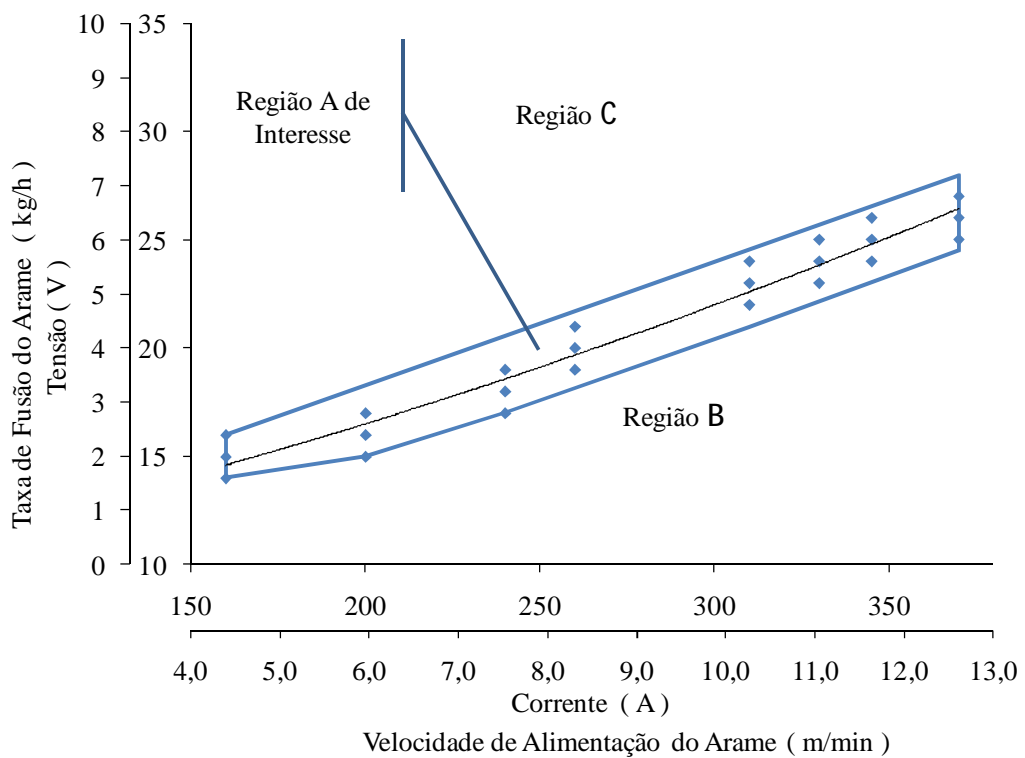


Figura 4.5 Envelope operacional para soldagem MAG robotizada(95% Ar + 5% O2), arame de aço ao carbono, Ø 1,2 mm.

A **Figura 4.5** correlaciona tensão *versus* corrente e taxa de fusão *versus* velocidade de alimentação do arame. Apresentando as faixas de operações mínima, intermediária e máxima a linha central indica a tendência dos parâmetros para estas condições. Sendo que a tensão variou de 14 a 27 volts, a corrente de 160 a 370 ampères, velocidade de alimentação do arame de 4,5 a 12,4 m/min e taxa de fusão do arame entre 2,40 a 6,6 kg/h. Os resultados mostram que o aumento da tensão em função da corrente é praticamente linear, o mesmo acontece com a taxa de fusão em relação à velocidade de arame.

Região A de Interesse: é compreendida como a região dentro do envelope operacional onde se encontra os melhores parâmetros para soldagem nestas condições. Parâmetros ótimos para soldagem estão localizados próximos à linha dentro do envelope como mostra a **Figura 4.6**.

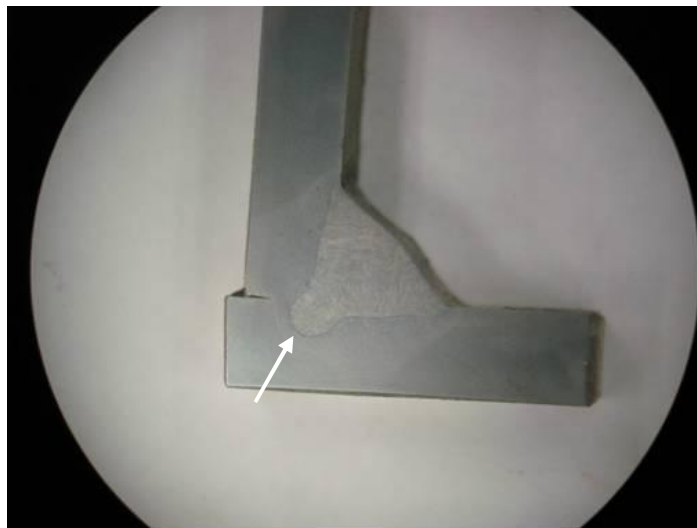


Figura 4.6 Perfil do cordão com excelentes características apresentando formação de finger, CP 29.

Região B: é compreendida como região fora do envelope operacional que esta localizada abaixo do limite inferior do envelope. Esta região não é recomendada para soldagem, conforme parâmetros **Tabela 3.12**, porque, causa muita instabilidade no arco elétrico, ocorrendo falta de fusão no material adjacente à linha da solda, altura do reforço 1,5 mm e bastante salpico conforme mostra **Figura 4.7**.

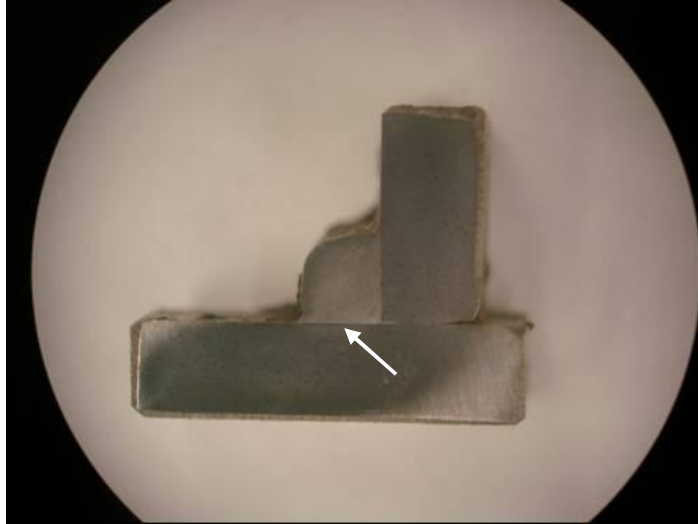


Figura 4.7 Cordão de solda com falta de fusão na flange e alma CP 25.1.

Região C: é compreendida como a região fora do envelope operacional que esta localizada acima do limite superior do envelope operacional. Esta região não é recomendada para soldagem, conforme parâmetros **Tabela 3.12**, porque causa muita instabilidade no arco elétrico, início de mordedura 0,4 mm e bastante salpico como mostra a **Figura 4.4**.

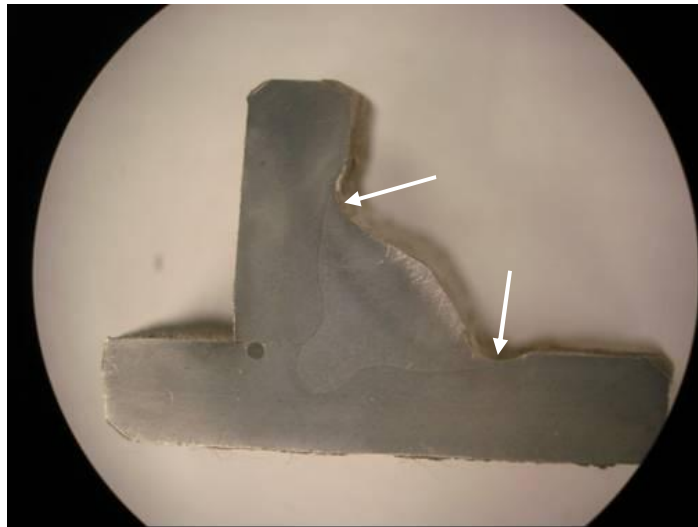


Figura 4.8 Cordão de solda com início de mordedura CP 48.1

Com base nos resultados da **Figura 4.5**, foi desenvolvido uma equação para correlacionar os quatro parâmetros de soldagem usados para formação do envelope.

Portanto, a tensão é determinada pela **Equação 4.4**:

$$U = a * I^2 + b * I + c \dots\dots\dots(4.4)$$

Onde I é corrente de soldagem e as constantes a é igual $5,130538 * 10^{-5}$, b igual $2,927178 * 10^{-2}$ e c igual $8,590748$, o coeficiente de ajuste R^2 igual a $0,944$.

A taxa de fusão do Arame é determinada pela **Equação 4.5**:

$$T_{fa} = a * V_a^2 + b * V_a + c \dots\dots\dots (4.5)$$

Onde V_a é velocidade de alimentação do arame e as constantes a é igual

$4,074563 * 10^{-5}$, b igual $0,531976$, e c igual $6,086010 * 10^{-3}$, o coeficiente de ajuste R^2 igual a $0,999$.

4.2.2 Envelope Operacional III

Para determinar este envelope operacional utilizou-se os parâmetros de soldagem especificados na **Tabela 3.6** para soldagem dos corpos de prova cuja sequência é 49 a 72, conforme mostra **Figura 4.9**.

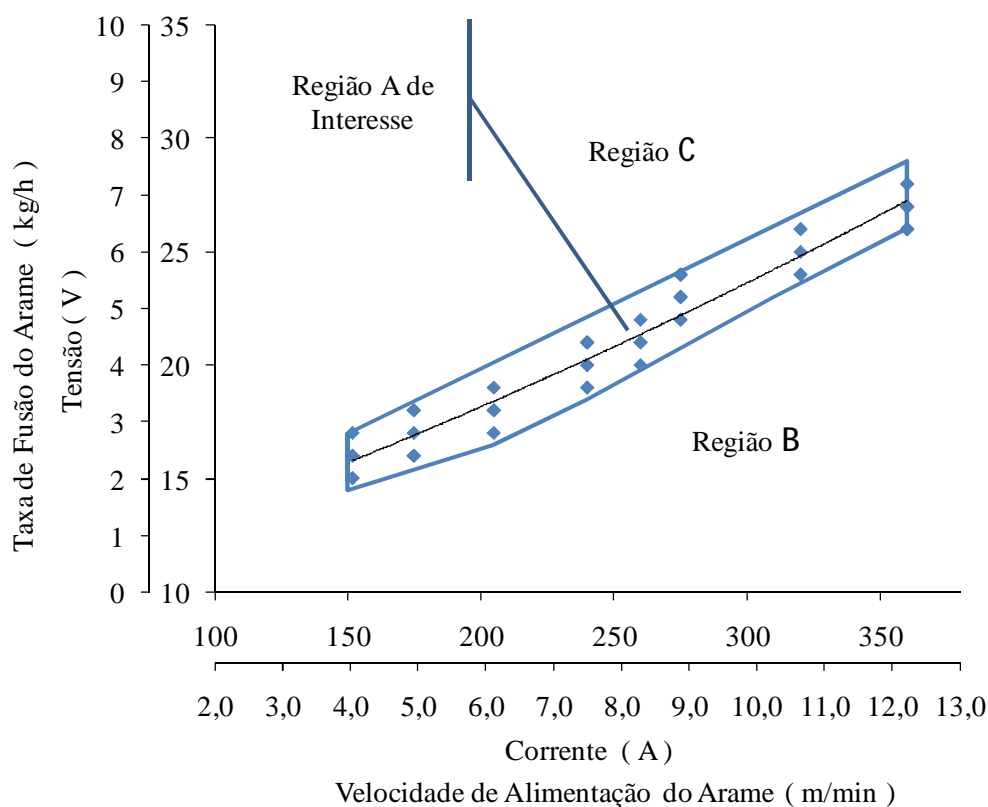


Figura 4.9 Envelope operacional para soldagem MAG robotizada (90% Ar + 8% C02 + 2% O2), arame de aço ao carbono, Ø 1,2 mm.

A **Figura 4.9** correlaciona tensão *versus* corrente e taxa de fusão *versus* velocidade de alimentação do arame. Apresentando as faixas de operações mínima, intermediária e máxima a linha central indica a tendência dos parâmetros para estas condições. Sendo que a tensão variou de 15 a 28 volts, a corrente de 152 a 360 ampères, velocidade de alimentação do arame de 3,8 a 12, 4 m/min e taxa de fusão do arame entre 2,02 a 6,6 kg/h.

Os resultados mostram que o aumento da tensão em função da corrente é praticamente linear, o mesmo acontece com a taxa de fusão em relação à velocidade de arame.

Região A de Interesse: é compreendida como a região dentro do envelope operacional onde se encontra os melhores parâmetros para soldagem nestas condições. Parâmetros ótimos para soldagem estão localizados próximos à linha dentro do envelope como mostra a **Figura 4.10**.

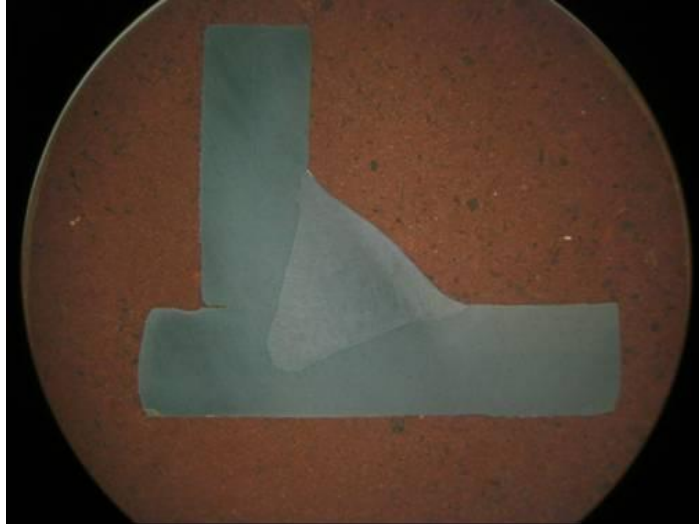


Figura 4.10 Perfil do cordão com excelentes características CP 62.

Região B: é compreendida como região fora do envelope operacional que está localizada abaixo do limite inferior do envelope. Esta região não é recomendada para soldagem, conforme parâmetros **Tabela 3.13**, porque causa muita instabilidade no arco elétrico, ocorrendo falta de fusão no material adjacente à linha da solda, altura do reforço 1,5 mm e gerando muito salpico como mostra a **Figura 4.7**.

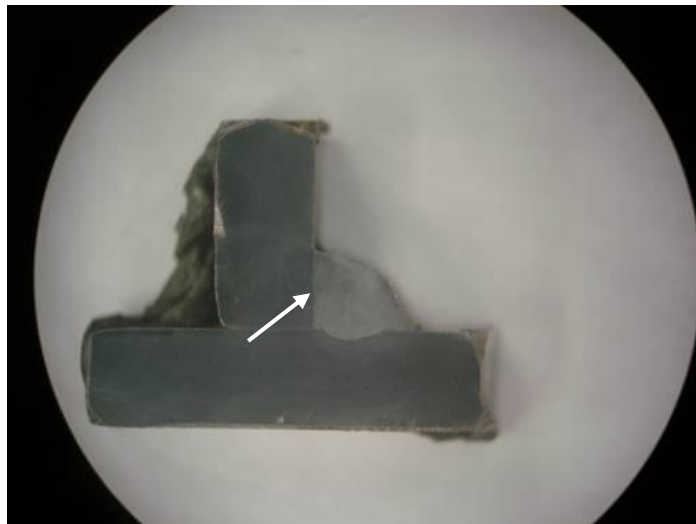


Figura 4.11 Cordão de solda com falta de fusão na alma CP 49.1.

Região C: é compreendida como, região fora do envelope operacional que esta localizada acima do limite superior do envelope operacional. Esta região não é recomendada para soldagem, conforme parâmetros **Tabela 3.13**, porque causa muita instabilidade no arco

elétrico, porosidade interna, provavelmente pela alta velocidade de soldagem 11,7 mm/s, ocorrendo a solidificação antes da liberação dos gases e gerando muito salpico como mostra a **Figura 4.12**.

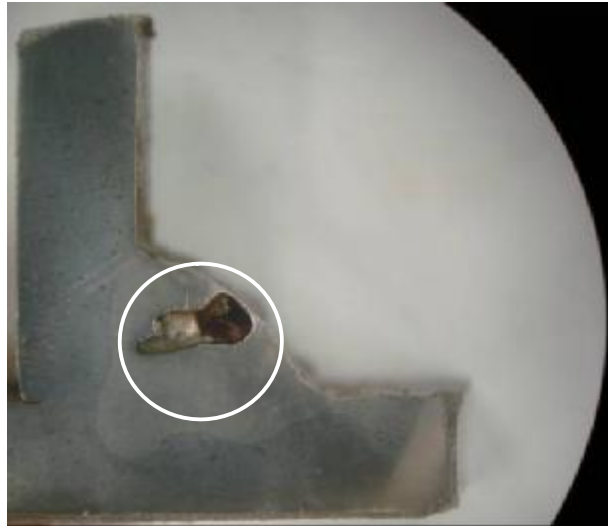


Figura 4.12 Cordão de solda apresentando porosidade interna CP 72.1.

Com base nos resultados da **Figura 4.9**, foi desenvolvido uma equação para correlacionar os quatro parâmetros de soldagem usados para formação do envelope.

Portanto, a tensão é determinada pela **Equação 4.6**:

$$U = a * I^2 + b * I + c \dots\dots\dots(4.6)$$

Onde I é corrente de soldagem e as constantes a é igual $3,574815 * 10^{-5}$, b igual $3,669057 * 10^{-2}$ e c igual $9,400011$, o coeficiente de ajuste R^2 igual a $0,936$.

A taxa de fusão do Arame é determinada pela **Equação 4.7**:

$$T_{fa} = a * V_a^2 + b * V_a + c \dots\dots\dots(4.7)$$

Onde V_a é velocidade de alimentação do arame e as constantes a é igual

$-1,244360 * 10^{-4}$, b igual $0,534837$, e c igual $-1,061187 * 10^{-2}$, o coeficiente de ajuste R^2 igual a $0,999$.

4.2.3 Envelope Operacional IV

Para este envelope operacional utilizou-se os parâmetros de soldagem especificados na **Tabela 3.7**, para soldagem dos corpos de prova cuja sequência é 73 a 96, conforme mostra **Figura 4.13**.

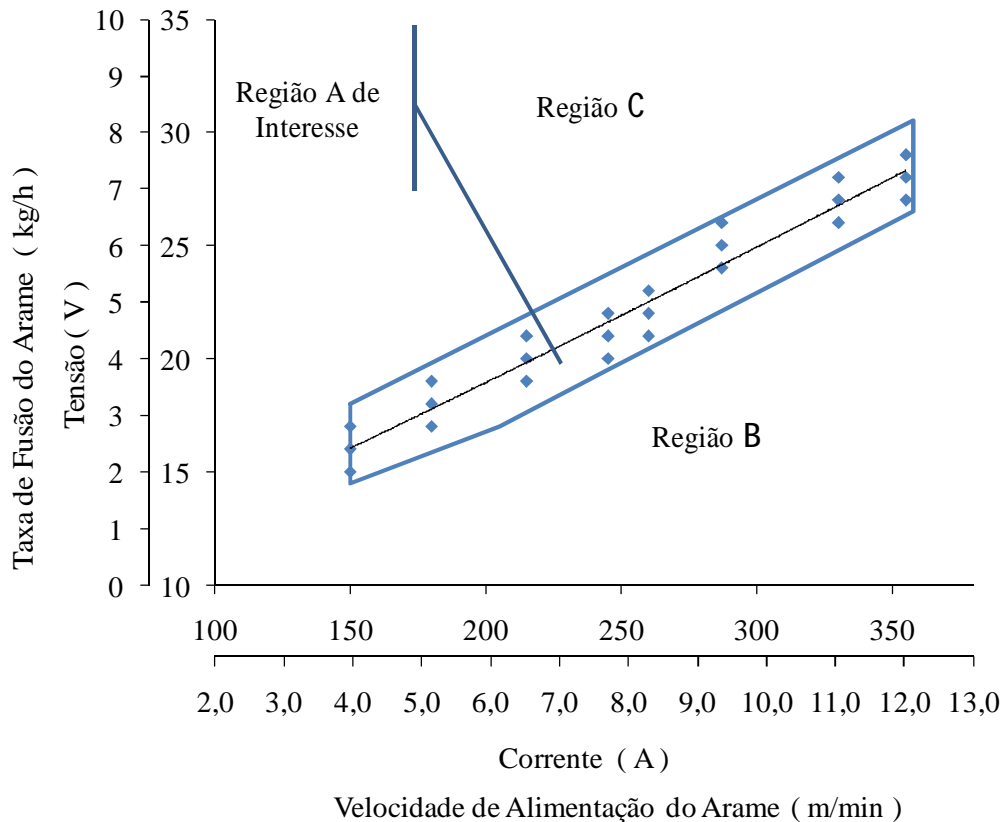


Figura 4.13 Envelope operacional para soldagem MAG robotizada(85% Ar + 15% CO₂), arame de aço ao carbono, Ø 1,2 mm.

A **Figura 4.13** correlaciona tensão *versus* corrente e taxa de fusão *versus* velocidade de alimentação do arame. Apresentando as faixas de operações mínima, intermediária e máxima a linha central indica a tendência dos parâmetros para estas condições.

Sendo que a tensão variou de 15 a 29 volts, a corrente de 150 a 355 ampères, velocidade de alimentação do arame de 3,8 a 12,4 m/min e taxa de fusão do arame entre 2,02 a 6,6 kg/h. Os resultados mostram que o aumento da tensão em função da corrente é praticamente linear, o mesmo acontece com a taxa de fusão em relação à velocidade de arame.

Região A de Interesse: é compreendida como, a região dentro do envelope operacional onde se encontra os melhores parâmetros para soldagem nestas condições. Parâmetros ótimos para soldagem estão localizados próximos a linha dentro do envelope conforme mostra **Figura 4.14**.

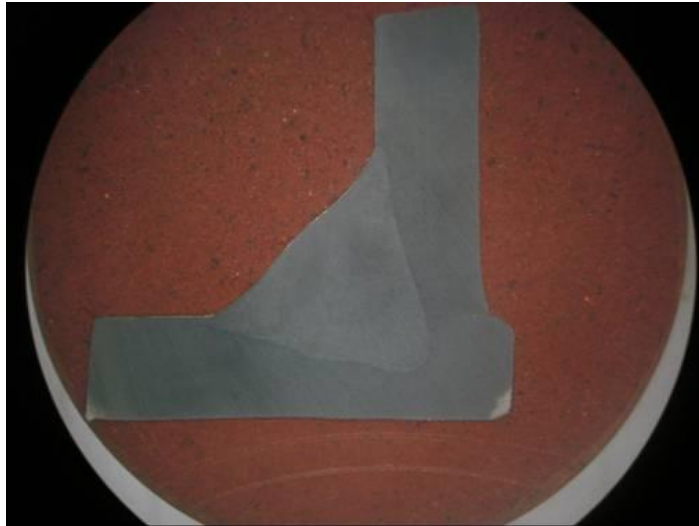


Figura 4.14 Perfil do cordão com excelentes características CP 94.

Região B: é compreendida como região fora do envelope operacional que está localizada abaixo do limite inferior do envelope. Esta região não é recomendada para soldagem, conforme parâmetros **Tabela 3.14**, porque causa muita instabilidade no arco elétrico, ocorrendo falta de fusão no material adjacente à linha da solda, altura do reforço 1,3 mm e gerando muito salpico como mostra a **Figura 4.15**.

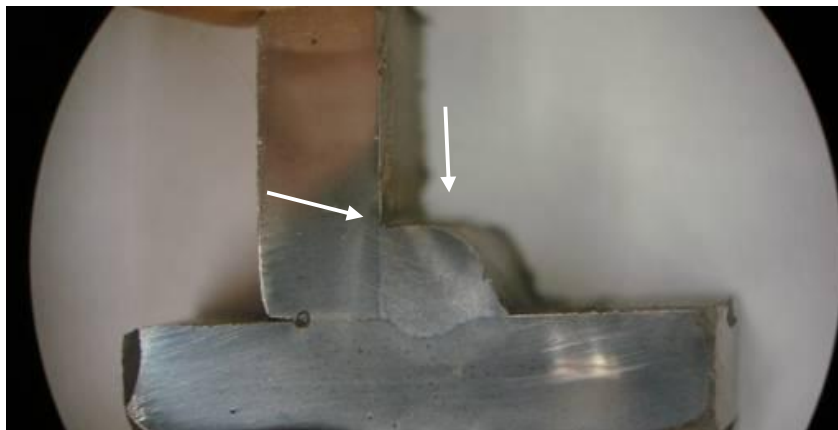


Figura 4.15 Cordão de solda com pouca fusão na flange CP 73.1.

Região C: é compreendida como região fora do envelope operacional que está localizada acima do limite superior do envelope operacional. Esta região não é recomendada para soldagem, conforme parâmetros **Tabela 3.14**, porque causa muita instabilidade no arco elétrico, porosidade pequenos poros superficiais e gerando muito salpico como mostra a **Figura 4.16**.



Figura 4.16 Cordão apresentando boa penetração CP 96.1.

Com base nos resultados da **Figura 4.13**, foi desenvolvido uma equação para correlacionar os quatro parâmetros de soldagem usados para formação do envelope.

Portanto, a tensão é determinada pela **Equação 4.8**:

$$U = a * I^2 + b * I + c \dots\dots\dots (4.8)$$

Onde I é corrente de soldagem e as constantes a é igual $1,117815 * 10^{-5}$, b igual $5,416993 * 10^{-2}$ e c igual $7,670578$, o coeficiente de ajuste R^2 igual a $0,942$.

A taxa de fusão do Arame é determinada pela **Equação 4.9**:

$$T_{fa} = a * V_a^2 + b * V_a + c \dots\dots\dots(4.9)$$

Onde V_a é velocidade de alimentação do arame e as constantes a é igual

$-1,367701 * 10^{-4}$, b igual $0,535371$, e c igual $-1,021500 * 10^{-2}$, o coeficiente de ajuste R^2 igual a $0,999$.

4.2.4 Envelope Operacional V

Para este envelope operacional utilizou-se os parâmetros de soldagem especificados na **Tabela 3.8**, para soldagem dos corpos de prova cuja sequência é 97 a 120, conforme mostra **Figura 4.17**.

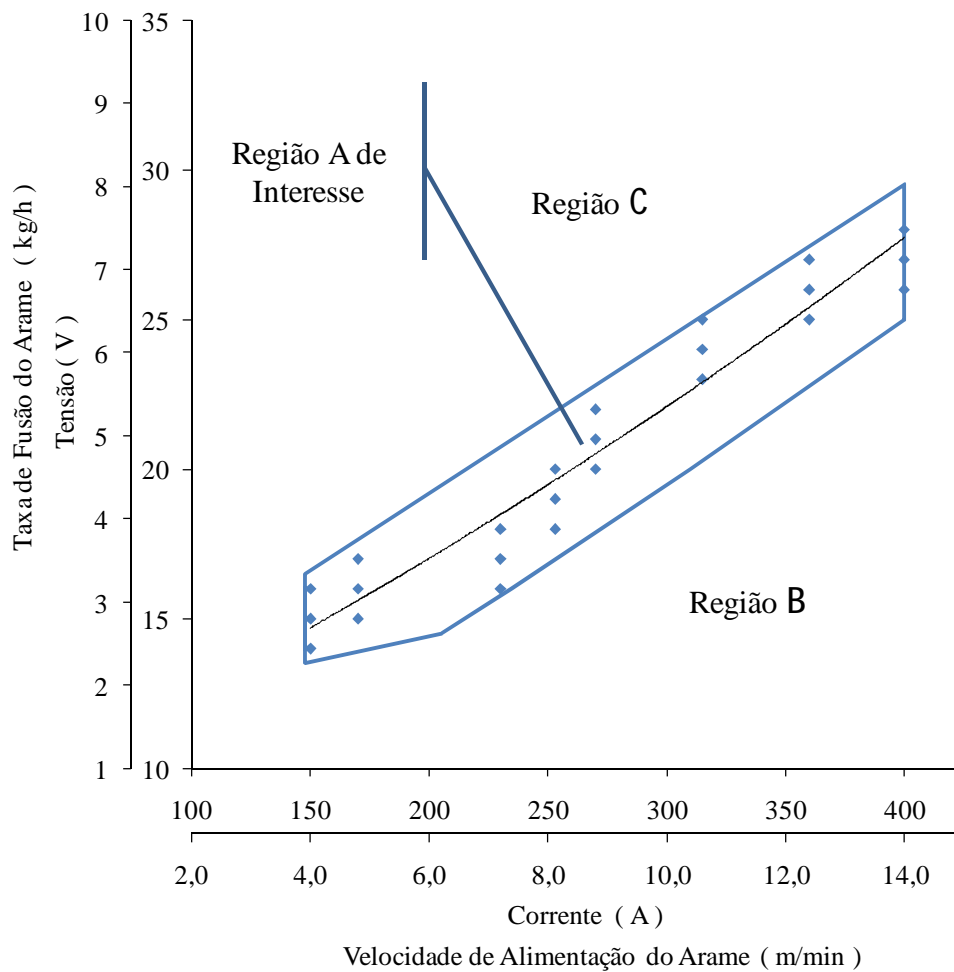


Figura 4.17 Envelope operacional para soldagem MAG robotizada(98% Ar + 2% O₂), arame de aço ao carbono, Ø 1,2 mm.

A **Figura 4.17** correlaciona tensão *versus* corrente e taxa de fusão *versus* velocidade de alimentação do arame. Apresentando as faixas de operações mínima, intermediária e máxima, a linha central indica a tendência dos parâmetros para estas condições. Sendo que a tensão variou de 14 a 28 volts, a corrente de 150 a 400 ampéres, velocidade de alimentação do arame

de 3,8 a 14 m/min e taxa de fusão do arame entre 2,02 a 7,46 kg/h. Os resultados mostram que o aumento da tensão em função da corrente é praticamente linear, o mesmo acontece com a taxa de fusão em relação à velocidade de arame.

Região A de Interesse: é compreendida como a região dentro do envelope operacional onde se encontra os melhores parâmetros para soldagem nestas condições. Parâmetros ótimos para soldagem estão localizados próximos à linha dentro do envelope conforme **Figura 4.18**.

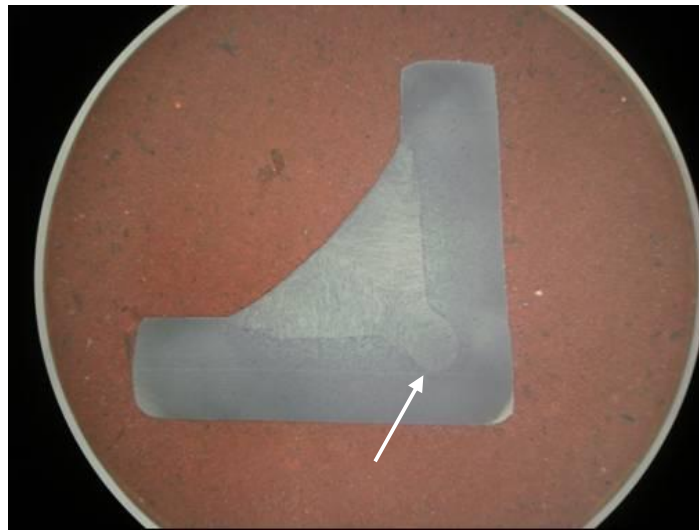


Figura 4.18 Perfil do cordão com excelentes características e formação de finger CP 10.

Região B: é compreendida como região fora do envelope operacional que está localizada abaixo do limite inferior do envelope. Esta região não é recomendada para soldagem, conforme parâmetros **Tabela 3.15**, porque causa muita instabilidade no arco elétrico, ocorrendo falta de fusão no material adjacente à linha da solda, penetração na raiz, altura do reforço 1,3 mm e gerando muito salpico como mostra a **Figura 4.19**.

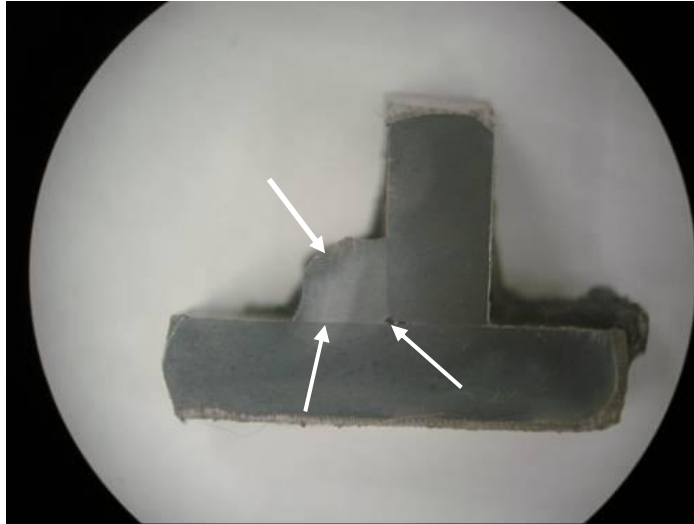


Figura 4.19 Cordão de solda com pouca fusão na flange e alma CP 97.1.

Região C: é compreendida como região fora do envelope operacional que está localizada acima do limite superior do envelope operacional. Esta região não é recomendada para soldagem, conforme parâmetros **Tabela 3.15**, porque causa muita instabilidade no arco elétrico, porosidade interna provavelmente pela alta velocidade de soldagem 14 mm/s, ocorrendo a solidificação antes da liberação dos gases e gerando muito salpico como mostra a **Figura 4.20**.

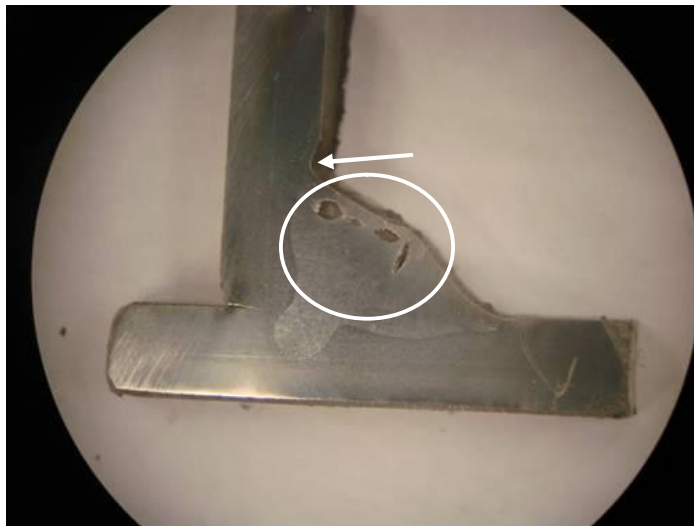


Figura 4.20 Cordão de solda apresentando porosidade interna e formação de finger CP 120.1.

Com base nos resultados da **Figura 4.17**, foi desenvolvido uma equação para correlacionar os quatro parâmetros de soldagem usados para formação do envelope.

Portanto, a tensão é determinada pela **Equação 4.10**:

$$U = a * I^2 + b * I + c \dots\dots\dots(4.10)$$

Onde I é corrente de soldagem e as constantes a é igual $2,906809 * 10^{-5}$, b igual $3,619782 * 10^{-2}$ e c igual $8,616648$, o coeficiente de ajuste R^2 igual a $0,925$.

A taxa de fusão do arame é determinada pela **Equação 4.11**:

$$T_{fa} = a * V_a^2 + b * V_a + c \dots\dots\dots(4.11)$$

Onde V_a é velocidade de alimentação do arame e as constantes a é igual $-7,584199 * 10^{-5}$, b igual $0,534532$, e c igual $-8,525909 * 10^{-3}$, o coeficiente de ajuste R^2 igual a $0,999$.

4.2.5 Envelope Operacional VI

Para este envelope operacional utilizou-se os parâmetros de soldagem especificados na **Tabela 3.9** para soldagem dos corpos de prova cuja sequência é 121 á 144, conforme mostra **Figura 4.21**.

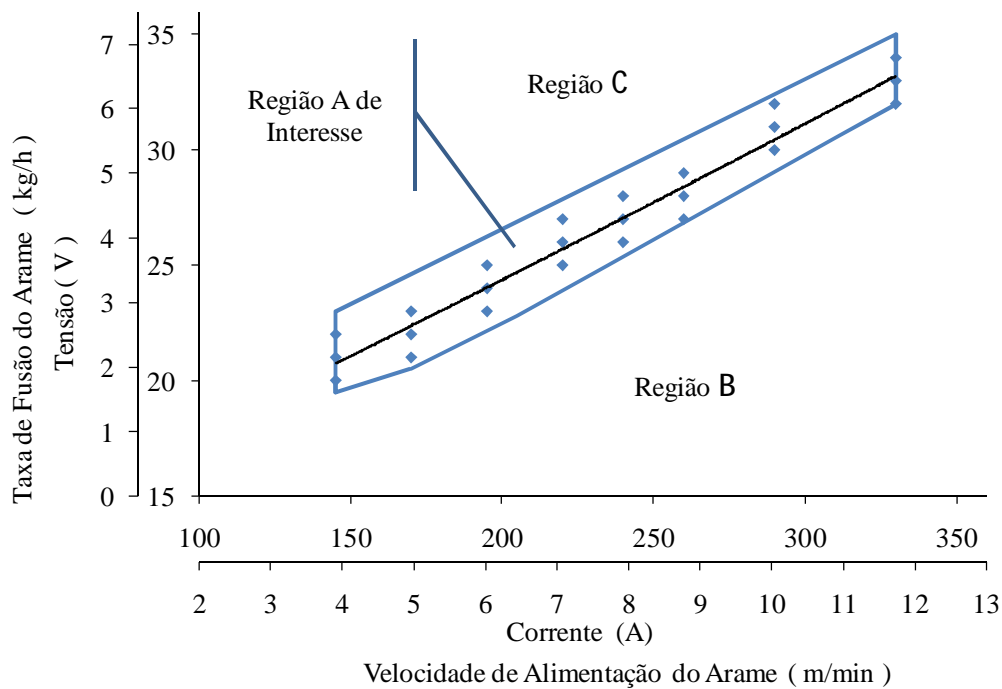


Figura 4.21 Envelope operacional para soldagem MAG robotizada(CO₂), arame de aço ao carbono, Ø 1,2 mm.

A **Figura 4.21** correlaciona tensão *versus* corrente e taxa de fusão *versus* velocidade de alimentação do arame. Apresentando as faixas de operações mínima, intermediária e máxima a linha central indica a tendência dos parâmetros para estas condições. Sendo que a tensão variou de 20 a 34 volts, a corrente de 145 a 330 ampéres, velocidade de alimentação do arame de 3,8 a 12,4 m/min e taxa de fusão do arame entre 2,02 a 6,6 kg/h. Os resultados mostram que o aumento da tensão em função da corrente é praticamente linear, o mesmo acontece com a taxa de fusão em relação à velocidade de arame.

Região A de Interesse: é compreendida como a região dentro do envelope operacional onde se encontra os melhores parâmetros para soldagem nestas condições. Parâmetros ótimos para soldagem estão localizados próximos à linha dentro do envelope conforme a **Figura 4.22**.

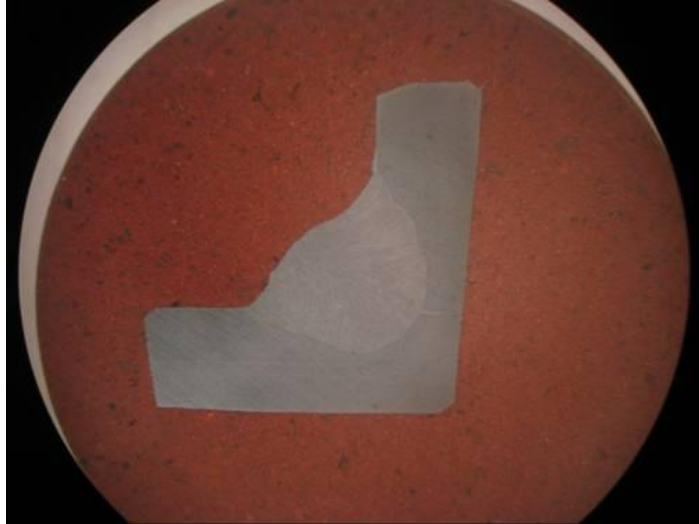


Figura 4.22 Perfil do cordão apresentando boas características CP 133.

Região B: é compreendida como região fora do envelope operacional que está localizada abaixo do limite inferior do envelope. Esta região não é recomendada para soldagem, conforme parâmetros **Tabela 3.16**, porque causa muita instabilidade no arco elétrico e gerando muito salpico como mostra a **Figura 4.23**.

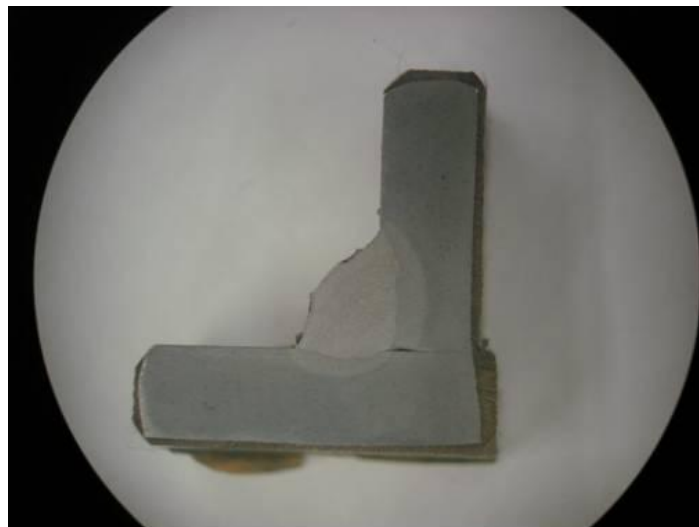


Figura 4.23 Perfil do cordão apresentando boas características CP 121.1.

Região C: é compreendida como região fora do envelope operacional que está localizada acima do limite superior do envelope operacional. Esta região não é recomendada para soldagem, conforme parâmetros **Tabela 3.15**, porque causa muita instabilidade no arco

elétrico, levemente convexo, início de mordedura na adjacente à linha da solda conforme e gerando muito salpico como mostra a **Figura 4.24**.

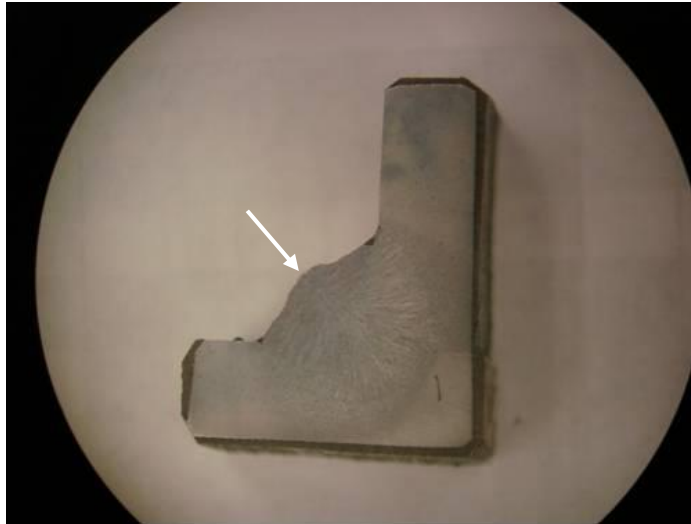


Figura 4.24 Perfil do cordão apresentado boas características com pequena convexidade central CP 144.1.

Com base nos resultados da **Figura 4.21**, foi desenvolvido uma equação para correlacionar os quatro parâmetros de soldagem usados para formação do envelope.

Portanto, a tensão é determinada pela **Equação 4.12**:

$$U = a * I^2 + b * I + c \dots\dots\dots (4.12)$$

Onde I é corrente de soldagem e as constantes a é igual $1,028261 * 10^{-5}$, b igual $6,246174 * 10^{-2}$ e c igual $11,471476$, o coeficiente de ajuste R^2 igual a $0,947$.

A taxa de fusão do Arame é determinada pela **Equação 4.13**:

$$T_{fa} = a * V_a^2 + b * V_a + c \dots\dots\dots (4.13)$$

Onde V_a é velocidade de alimentação do arame e as constantes a é igual

$-7,141592 * 10^{-5}$, b igual $0,534643$, e c igual $-9,047750 * 10^{-3}$, o coeficiente de ajuste R^2 igual a $0,999$.

A **Figura 4.25** apresenta todos os envelopes operacionais desenvolvidos correlacionando tensão *versus* corrente de soldagem com os parâmetros de soldagem especificados nas **Tabelas 3.4 à Tabela 3.10**.

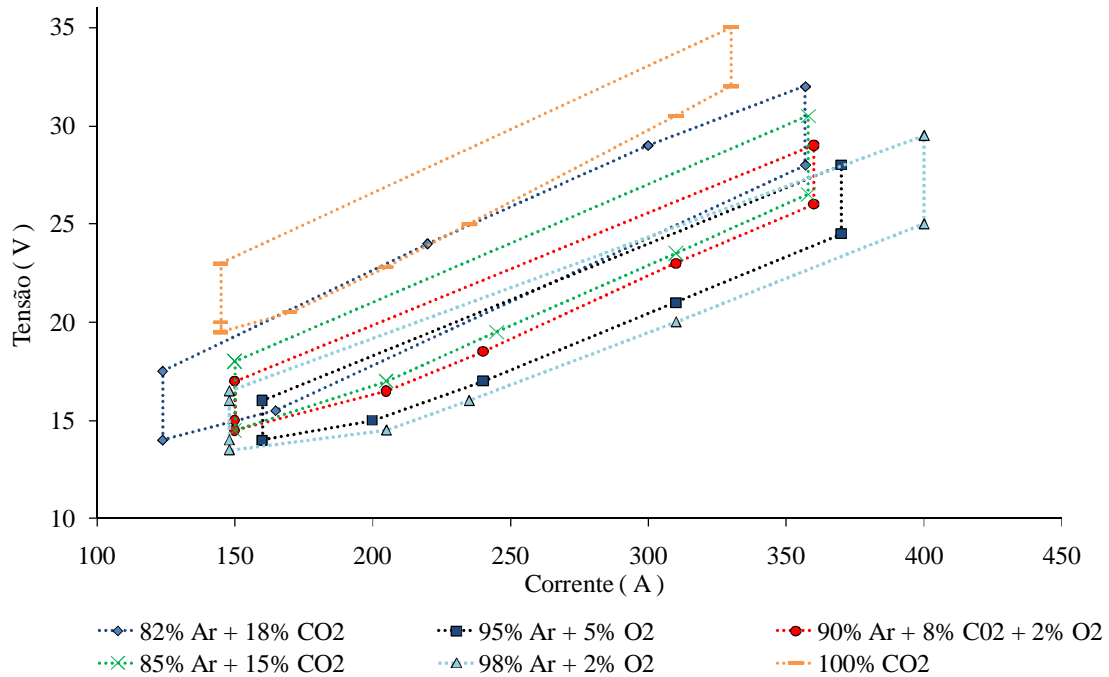


Figura 4.25 Envelope operacional para soldagem MAG robotizada com diferentes misturas de gás arame de aço ao carbono, Ø 1,2 mm.

As misturas binárias contendo de 2 a 5% de oxigênio apresentam envelopes com valores de tensão inferior aos demais e valores de corrente superior as outras misturas, portanto é possível obter maior corrente de soldagem com menor tensão, com isto obtém-se um menor aporte de calor na peça diminuindo a energia de soldagem imposta ao material. Mistura ternária com 2% de O₂ e 8 % CO₂ também apresentou valores de tensão similares aos das misturas de oxigênio, misturas com 15 % e 18 % CO₂ apresentam envelopes com valores de tensão intermediários, necessitando maior voltagem para uma mesma corrente e com CO₂ o envelope apresenta valores de tensão muito superior aos demais para atingir a estabilidade do arco elétrico, e com menor corrente de soldagem, aumentando a energia de soldagem imposta no material.

Nas **Tabelas 4.1 a 4.6** a seguir estão dispostos os resultados obtidos através dos

parâmetros utilizados para soldagem dos corpos de provas, identificados sequencialmente pelo número do corpo de prova e tipo de gás utilizado, para melhor entendimento e avaliação os resultados foram graficamente mostrados.

Tabela 4.1 Resultados obtidos dos parâmetros de soldagem com mistura 82% Ar + 18% CO₂.

CP	Faixa	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade Arame (m/min)	Velocidade Soldagem (mm/s)	Energia Soldagem (J/mm)	Taxa de Fusão (kg/h)	Taxa de Deposição (kg/h)	Eficiência do Arame (%)
1	Mínima	15	124	3,8	5,0	372	2,0	1,9	96
2		16	165	4,6	5,0	528	2,5	2,3	97
3		18	200	5,8	5,0	720	3,1	2,9	94
4		20	220	6,9	5,0	880	3,7	3,5	95
5		22	245	7,7	6,7	809	4,1	3,9	95
6		24	265	8,5	6,7	954	4,5	4,4	97
7		26	300	10,0	10,0	780	5,3	5,1	95
8		28	357	12,4	11,7	857	6,6	6,3	98
9	Intermediária	16	124	3,8	5,0	397	2,0	1,9	96
10		18	165	4,6	5,0	594	2,5	2,4	94
11		20	200	5,8	5,0	800	3,1	2,9	94
12		22	220	6,9	5,0	968	3,7	3,5	95
13		23	245	7,7	6,7	845	4,1	3,9	95
14		26	265	8,5	6,7	1.034	4,5	4,4	97
15		27	300	10,0	10,0	810	5,3	5,1	95
16		29	357	12,4	11,7	887	6,6	6,5	96
17	Máxima	17	124	3,8	5,0	422	2,0	2,0	100
18		19	165	4,6	5,0	627	2,5	2,3	94
19		21	200	5,8	5,0	840	3,1	3,0	97
20		23	220	6,9	5,0	1.012	3,7	3,5	95
21		24	245	7,7	6,7	882	4,1	3,9	95
22		27	275	8,5	6,7	1.114	4,5	4,3	95
23		28	300	10,0	10,0	840	5,3	5,2	98
24		30	357	12,4	11,7	918	6,6	6,5	98

Tabela 4.2 Resultados obtidos dos parâmetros de soldagem com mistura 95% Ar + 5%O₂.

CP	Faixa	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade Arame (m/min)	Velocidade Soldagem (mm/s)	Energia Soldagem (J/mm)	Taxa de Fusão (kg/h)	Taxa de Deposição (kg/h)	Eficiência do Arame (%)
25	Mínima	14	160	4,5	5,0	448	2,4	2,3	100
26		15	200	6,0	5,0	600	3,2	3,1	96
27		17	240	7,5	5,0	816	4,0	3,9	99
28		19	260	8,5	6,7	741	4,5	4,3	97
29		22	310	10,0	10,0	682	5,3	5,1	98
30		23	330	11,0	10,0	759	5,9	5,8	97
31		24	345	11,5	10,0	828	6,1	6,0	97
32		25	370	12,4	10,0	925	6,6	6,6	99
33	Intermediária	15	160	4,5	5,0	480	2,4	2,4	97
34		16	200	6,0	5,0	640	3,2	3,1	98
35		18	240	7,5	5,0	864	4,0	4,0	97
36		20	260	8,5	6,7	780	4,5	4,4	95
37		23	310	10,0	10,0	713	5,3	5,2	95
38		24	330	11,0	10,0	792	5,9	5,7	99
39		25	345	11,5	10,0	863	6,1	6,0	97
40		26	370	12,4	10,0	962	6,6	6,6	99
41	Máxima	16	160	4,5	5,0	512	2,4	2,4	100
42		17	200	6,0	5,0	680	3,2	3,1	98
43		19	240	7,5	5,0	912	4,0	3,9	97
44		21	260	8,5	6,7	819	4,5	4,4	97
45		24	310	10,0	10,0	744	5,3	5,1	95
46		25	330	11,0	10,0	825	5,9	5,8	99
47		26	345	11,5	10,0	897	6,1	5,8	95
48		27	370	12,4	10,0	999	6,6	6,6	99

Tabela 4.3 Resultados obtidos dos parâmetros de soldagem com mistura 90% Ar + 8% CO₂ + 2% O₂.

CP	Faixa	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade Arame (m/min)	Velocidade Soldagem (mm/s)	Energia Soldagem (J/mm)	Taxa de Fusão (kg/h)	Taxa de Deposição (kg/h)	Eficiência do Arame (%)
49	Mínima	15	152	3,80	5,00	456,0	2,0	2,0	99
50		16	175	4,60	5,00	560,0	2,5	2,5	100
51		17	205	6,00	5,00	697,0	3,2	3,1	97
52		19	240	7,50	5,00	912,0	4,0	3,7	93
53		20	260	8,50	6,67	780,0	4,5	4,2	94
54		22	275	9,50	6,67	907,5	5,1	4,7	91
55		24	320	11,00	10,00	768,0	5,9	5,3	93
56		26	360	12,40	11,67	802,3	6,6	6,2	93
57	Intermediária	16	152	3,8	5,0	486,4	2,0	2,0	99
58		17	175	4,6	5,0	595,0	2,5	2,5	100
59		18	205	6,0	5,0	738,0	3,2	3,1	97
60		20	240	7,5	5,0	960,0	4,0	3,7	93
61		21	260	8,5	6,7	819,0	4,5	4,2	94
62		23	275	9,5	6,7	948,8	5,1	4,6	93
63		25	320	11,0	10,0	800,0	5,9	5,5	90
64		27	360	12,4	11,7	833,1	6,6	6,2	93
65	Máxima	17	152	3,8	5,0	516,8	2,0	2,0	99
66		18	175	4,6	5,0	630,0	2,5	2,4	96
67		19	205	6,0	5,0	779,0	3,2	3,0	94
68		21	240	7,5	5,0	1008,0	4,0	3,8	96
69		22	260	8,5	6,7	858,0	4,5	4,2	94
70		24	275	9,5	6,7	990,0	5,1	4,8	96
71		26	320	11,0	10,0	832,0	5,9	5,5	93
72		28	360	12,4	11,7	864,0	6,6	6,2	93

Tabela 4.4 Resultados obtidos dos parâmetros de soldagem com mistura 85% Ar + 15% CO₂.

P	Faixa	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade Arame (m/min)	Velocidade Soldagem (mm/s)	Energia Soldagem (J/mm)	Taxa de Fusão (kg/h)	Taxa de Deposição (kg/h)	Eficiência do Arame (%)
73	Mínima	15	150	3,8	5,0	450	2,0	2,0	94
74		17	180	4,6	5,0	612	2,5	2,4	96
75		19	215	6,0	5,0	817	3,2	3,1	97
76		20	245	7,5	5,0	980	4,0	3,7	96
77		21	260	8,5	6,7	819	4,5	4,1	94
78		24	287	9,5	6,7	1033	5,1	4,7	93
79		26	330	11,0	10,0	858	5,9	5,5	93
80		27	355	12,4	11,7	822	6,6	6,4	87
81	Intermediária	16	150	3,8	5,0	480	2,0	1,9	99
82		18	180	4,6	5,0	648	2,5	2,4	96
83		20	215	6,0	5,0	860	3,2	3,1	97
84		21	245	7,5	5,0	1029	4,0	3,8	93
85		22	260	8,5	6,7	858	4,5	4,2	91
86		25	287	9,5	6,7	1076	5,1	4,7	93
87		27	330	11,0	10,0	891	5,9	5,5	93
88		28	355	12,4	11,7	852	6,6	5,7	96
89	Máxima	17	150	3,8	5,0	510	2,0	2,0	99
90		19	180	4,6	5,0	684	2,5	2,4	96
91		21	215	6,0	5,0	903	3,2	3,0	94
92		22	245	7,5	5,0	1078	4,0	3,7	93
93		23	260	8,5	6,7	897	4,5	4,2	94
94		26	287	9,5	6,7	1119	5,1	4,8	96
95		28	330	11,0	10,0	924	5,9	5,5	93
96		29	355	12,4	11,7	882	6,6	6,2	93

Tabela 4.5 Resultados obtidos dos parâmetros de soldagem com mistura 98% Ar + 2%O₂.

CP	Faixa	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade Arame (m/min)	Velocidade Soldagem (mm/s)	Energia Soldagem (J/mm)	Taxa de Fusão (kg/h)	Taxa de Deposição (kg/h)	Eficiência do Arame (%)
97	Mínima	14	150	3,8	5,0	420	2,0	2,0	99
98		16	170	4,6	5,0	544	2,5	2,4	100
99		17	230	7,0	5,0	782	3,7	3,6	95
100		19	253	7,5	5,0	961	4,0	3,9	98
101		21	270	9,0	6,7	851	4,8	4,5	94
102		24	315	10,0	6,7	1134	5,3	5,1	96
103		26	360	11,5	10,0	936	6,1	5,8	95
104		27	400	14,0	10,0	1080	7,5	7,1	95
105	Intermediária	15	150	3,8	5,0	450	2,0	2,0	99
106		15	170	4,6	5,0	510	2,5	2,5	96
107		16	230	7,0	5,0	736	3,7	3,5	98
108		18	253	7,5	5,0	911	4,0	3,9	98
109		20	270	9,0	6,7	810	4,8	4,5	94
110		23	315	10,0	6,7	1087	5,3	5,1	96
111		25	360	11,5	10,0	900	6,1	5,8	95
112		26	400	14,0	10,0	1040	7,5	7,1	95
113	Máxima	16	150	3,8	5,0	480	2,0	2,0	99
114		17	170	4,6	5,0	578	2,5	2,4	96
115		18	230	7,0	5,0	828	3,7	3,5	94
116		20	253	7,5	5,0	1012	4,0	3,8	96
117		22	270	9,0	6,7	891	4,8	4,5	94
118		25	315	10,0	6,7	1181	5,3	5,2	97
119		27	360	11,5	10,0	972	6,1	5,8	95
120		28	400	14,0	10,0	1120	7,5	7,2	96

Tabela 4.6 Resultados obtidos dos parâmetros de soldagem com mistura 100% CO₂.

CP	Faixa	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade Arame (m/min)	Velocidade Soldagem (mm/s)	Energia Soldagem (J/mm)	Taxa de Fusão (kg/h)	Taxa de Deposição (kg/h)	Eficiência do Arame (%)
121	Mínima	20	145	3,8	5,0	580	2,0	2,0	99
122		21	170	4,6	5,0	714	2,5	2,5	96
123		23	195	5,8	5,0	897	3,1	3,1	100
124		25	220	6,9	5,0	1100	3,7	3,6	99
125		26	240	7,7	6,7	936	4,1	4,0	95
126		27	260	8,5	6,7	1053	4,5	4,4	96
127		30	290	10,0	10,0	870	5,3	4,9	92
128		32	330	12,4	11,7	905	6,6	6,4	96
129	Intermediária	21	145	3,8	5,0	609	2,0	2,0	99
130		22	170	4,6	5,0	748	2,5	2,4	100
131		24	195	5,8	5,0	936	3,1	3,1	100
132		26	220	6,9	5,0	1144	3,7	3,6	99
133		27	240	7,7	6,7	972	4,1	3,9	98
134		28	260	8,5	6,7	1092	4,5	4,4	96
135		31	290	10,0	10,0	899	5,3	4,9	92
136		33	330	12,4	11,7	933	6,6	6,4	96
137	Máxima	22	145	3,8	5,0	638	2,0	2,0	99
138		23	170	4,6	5,0	782	2,5	2,4	96
139		25	195	5,8	5,0	975	3,1	3,0	97
140		27	220	6,9	5,0	1188	3,7	3,5	96
141		28	240	7,7	6,7	1008	4,1	4,0	98
142		29	260	8,5	6,7	1131	4,5	4,2	94
143		32	290	10,0	10,0	928	5,3	5,3	99
144		34	330	12,4	11,7	962	6,6	6,4	96

Para determinar da taxa de fusão do arame (kg/h) foi utilizada a **Equação 4.14** descrita abaixo:

$$T_{fa} = \frac{V_a * p * D}{4} * \frac{d * 60}{10^6} \dots\dots\dots(4.14)$$

Onde V_a é velocidade de alimentação do arame m/min, D diâmetro do eletrodo d densidade do arame igual a $7,85 * 10^3$ kg/m³.

A eficiência de deposição do arame (%) é o quociente da taxa de deposição (kg/h) pela taxa de fusão do arame (kg/h), ou seja:

$$E_{da} = \frac{T_{da}}{T_{fa}} * 100 \dots\dots\dots(4.15)$$

Segundo a (ASM, 1993) a eficiência de deposição para o processo MIG/MAG varia entre 90 a 95 %, taxa de deposição pode chegar 16 kg/h.

Figura 4.26, apresenta a correlação entre a taxa de fusão, o arame e a velocidade de alimentação do arame para cada tipo de gás empregado na soldagem dos corpos de prova, os resultados foram extraídos das **Tabelas 4.1 a 4.6**.

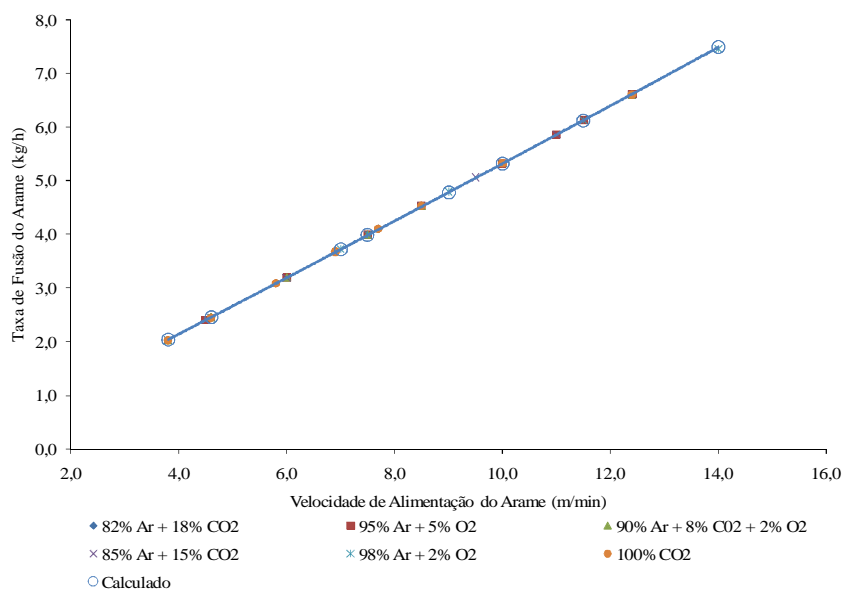


Figura 4.26 Correlação entre taxa de fusão e velocidade de alimentação do arame para diferentes misturas gasosas.

Como citado anteriormente para haver uma condição ideal de soldagem é preciso que haja um equilíbrio entre T_{fa} e V_a , como mostra a **4.26**. A taxa de fusão do arame variou entre 2 a 7,5 kg/h, velocidade de alimentação ficou entre 3,8 a 14 m/min, os resultados maiores foram atingindo utilizando gás de proteção 98 % Ar + 2 % O₂.

Com base nos resultados da **Figura 4.26**, foi determinada a equação que permite correlacionar os dois parâmetros de soldagem usados para estimar a T_{fa} para os gases utilizados acima:

$$T_{xf} = a * V_a^2 + b * V_a + c \dots\dots\dots (4.14)$$

Onde V_a é velocidade de alimentação do arame e as constantes a é igual 1, 329175 * 10⁻³, b igual 0, 510444, e c igual 0, 078990, o coeficiente de ajuste R^2 igual a 0, 999.

Os marcadores circulares e a linha de tendência indicam o resultado da **Equação 4.14**, para simular a T_{xf} , conforme o resultado a Equação é válida.

A **Figura 4.27** apresenta a correlação entre a taxa de deposição e corrente de soldagem para cada tipo de gás empregado na soldagem dos corpos de prova, os parâmetros foram extraídos das **Tabelas 4.1 a 4.6**.

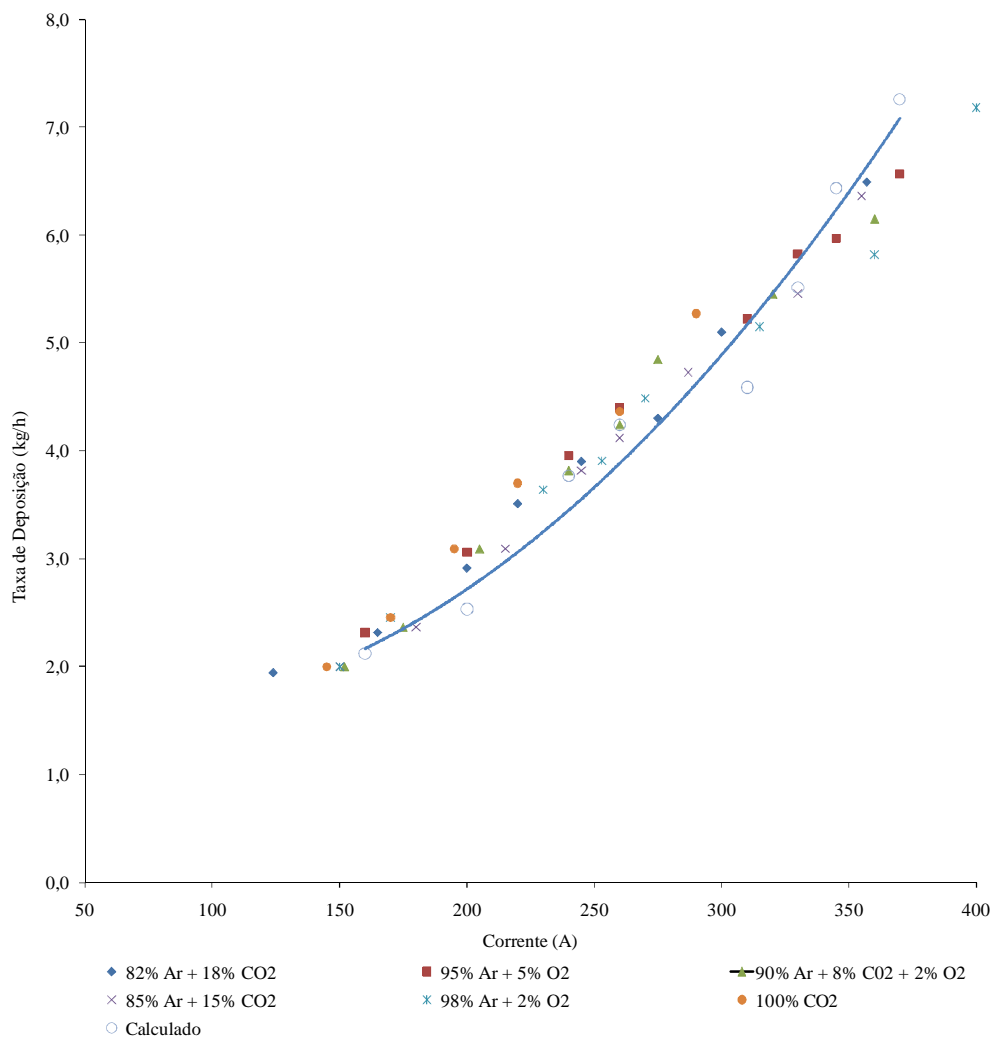


Figura 4.27 Correlação entre taxa de deposição e corrente de soldagem com diferentes misturas gasosas.

Os resultados mostram o efeito da corrente de soldagem sobre a taxa de deposição, que é expressa como a quantidade de material depositado num determinado tempo, que com aumento da corrente de soldagem também aumenta a T_{da} , **Figura 4.27**. A taxa de deposição variou entre 2 a 7, 2 kg/h, corrente de soldagem 124 a 400 A, os resultados maiores foram atingindo utilizando gás de proteção 98 % Ar + 2 % O₂.

Com base nos resultados da **Figura 4.27**, foi determinada a equação que permite correlacionar os dois parâmetros de soldagem usados para estimar a T_{da} para os gases utilizados acima:

$$T_{da} = a * I^2 + b * I + c \dots\dots\dots (4.15)$$

Onde I é corrente de soldagem e as constantes a é igual $- 8,952042 * 10^{-7}$, b igual $2,063162 * 10^{-2}$, e c igual $-0,964453$, o coeficiente de ajuste R^2 igual a $0,996$.

Os marcadores circulares e a linha de tendência indicam o resultado da **Equação 4.15**, para simular a T_{da} conforme o resultado a Equação é válida.

A **Figura 4.28**, apresenta a correlação entre a velocidade de alimentação do arame e corrente de soldagem para cada tipo de gás empregado na soldagem dos corpos de prova, os parâmetros foram extraídos das **Tabelas 4.1 a 4.6**.

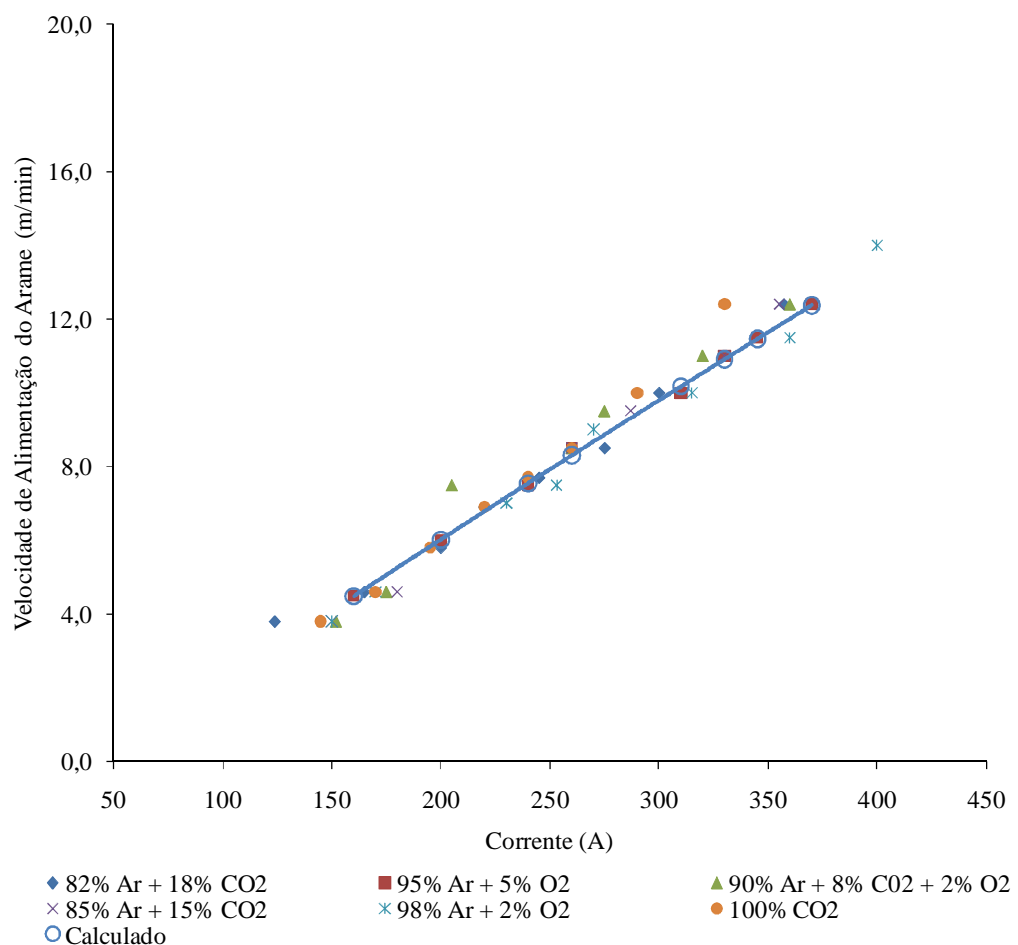


Figura 4.28 Velocidade de alimentação do arame e corrente de soldagem com diferentes misturas gasosas.

Os resultados mostram o efeito da velocidade de alimentação de arame na corrente de soldagem, conforme ocorre o incremento na velocidade de arame aumenta a corrente de soldagem, a qual aumenta a taxa de fusão arame, taxa de deposição **Figura 4.28**. A velocidade de alimentação de arame variou entre 3,8 a 14 m/min , corrente de soldagem 124 a

400 A, os resultados maiores foram atingindo utilizando gás de proteção 98 % Ar + 2 % O₂.

Com base nos resultados da **Figura 4.28**, foi determinada a equação que permite correlacionar os dois parâmetros de soldagem usados para estimar a V_a para os gases utilizados acima:

$$V_a = a * I^2 + b * I + c \dots\dots\dots(4.16)$$

Onde I é corrente de soldagem e as constantes a é igual - 5,678600 * 10⁻⁶, b igual 4,065359 * 10⁻², e c igual - 1,868353, o coeficiente de ajuste R^2 igual a 0,997.

Os marcadores circulares e a linha de tendência indicam o resultado da **Equação 4.16**, para simular a V_a conforme o resultado a equação é válida.

Um comparativo foi realizado para identificar qual o gás foi utilizado na soldagem dos corpos de prova onde apresentaram melhor eficiência na deposição de material, para chegar os resultados abaixo foi calculada a mediana dos 24 corpos soldados com cada tipo de gás, conforme mostra a **Figura 4.29**.

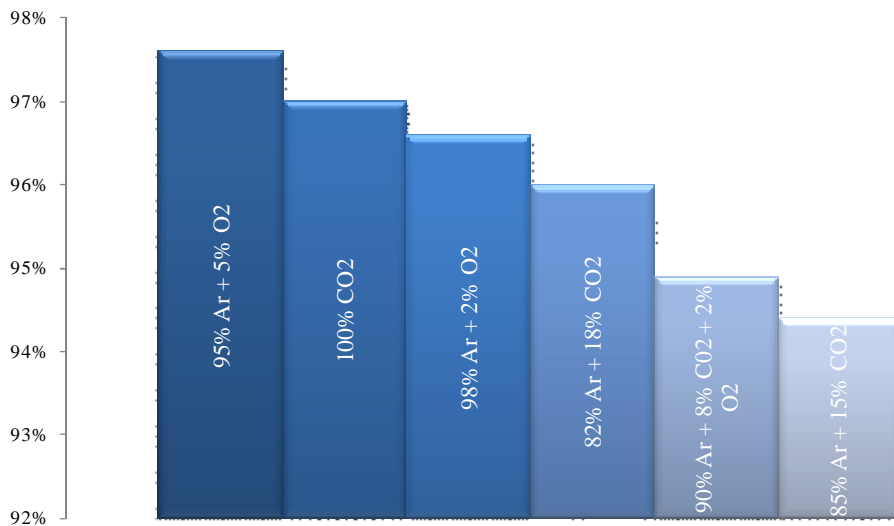


Figura 4.29 Comparativo entre os gases que apresentaram melhor eficiência na deposição de material na soldagem dos corpos de prova.

Com pode ser visto na **Figura 4.29**, os corpos de prova que apresentaram melhor eficiência foram soldados com a mistura de 95% Ar + 5% O₂, chegando a 97, 6% de eficiência na taxa de deposição, este resultado é extremamente importante tanto para

produtividade quanto para os custos na soldagem, a menor eficiência ficou com 94,4 % na soldagem com 85% Ar + 15% CO₂.

Um fato importante que ocorreu contrariando algumas teorias foi com o gás 100% CO₂, sendo o segundo gás que apresentou melhor eficiência na soldagem dos corpos de prova chegando a 97% de eficiência, muitas teorias pregam que com CO₂, devido sua baixa condutividade elétrica, produz uma instabilidade violenta no arco, gerando muitos salpicos (Dillenbeck, V. R. e Castangno, L., 1987).

4.3 Perfis dos Cordões

Utilizando-se os parâmetros definidos nas Tabelas 3.4 a Tabela 3.10 para os diferentes experimentos propostos, os perfis de alguns dos cordões obtidos estão apresentados na Figura 4.30.

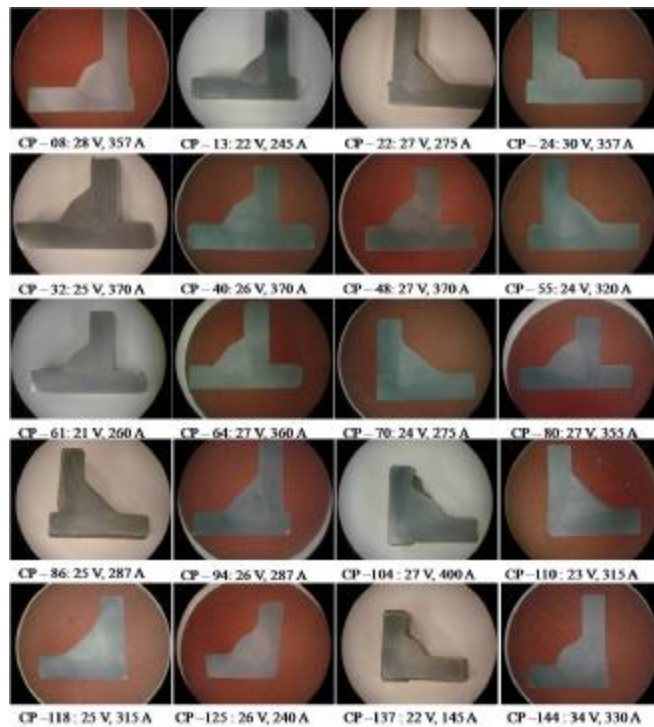


Figura 4.30 . Perfis dos cordões soldados com diferentes parâmetros de soldagem e tipos de gás de proteção.

Com o objetivo de realizar uma análise quantitativa dos resultados obtidos dos perfis

dos cordões apresentados na **Figura 3.6**, foram realizadas medições das dimensões do perfil do cordão como: penetração, largura da face, convexidade ou altura do reforço, tamanho do cordão, garganta, área fundida, área do metal fundido e diluição conforme apresenta as tabelas a seguir.

Todos os valores estão correlacionados com o número do corpo de prova e os parâmetros de soldagem utilizados. Estas informações foram graficamente plotadas para melhor avaliação dos resultados.

Tabela 4.7 Dimensão dos cordões das soldas mistura 82% Ar + 18% CO₂.

CP	S ₁ (mm)	S ₂ (mm)	Perna (mm)	Largura da Face (mm)	Garganta (mm)	Penetração (mm)	Convexidade (mm)
1	3,2	3,2	4,2	5,3	2,3	0,5	1,0
2	4,3	4,3	5,2	6,8	3,0	0,4	0,5
3	5,6	5,6	6,6	8,7	4,0	0,8	0,7
4	6,1	6,1	7,1	9,3	4,3	0,9	0,7
5	5,9	5,9	7,1	9,2	4,1	2,2	0,7
6	6,7	6,7		9,5	4,7	2,3	0,4
7	5,6	5,6	6,1	8,3	4,0	2,8	0,8
8	5,9	5,9	-	8,3	4,1	3,5	1,1
9	4,2	4,2	-	5,9	3,0	0,4	0,5
10	4,6	4,6	6,3	7,9	3,3	0,6	0,8
11	6,1	6,1	-	8,6	4,3	0,7	0,4
12	6,5	6,5	7,6	9,9	4,6	0,8	0,4
13	6,1	6,1	7,1	9,3	4,3	1,3	0,4
14	6,5	6,5	7,6	9,9	4,6	2,4	0,3
15	5,9	5,9	6,3	8,6	4,1	2,8	0,8
16	5,1	5,1	5,6	7,6	3,6	2,7	1,1
17	3,7	3,7	4,5	5,8	2,6	0,6	1,3
18	4,5	4,5	5,6	7,2	3,2	0,7	0,3
19	6,6	6,6	7,3	9,8	4,7	0,7	0,8
20	6,6	6,6	8,0	10,4	4,7	1,0	0,5
21	5,9	5,9	7,1	9,2	4,1	1,6	0,5
22	7,3	7,3	-	10,3	5,2	2,7	0,3
23	6,3	6,3	-	9,0	4,5	2,4	0,7
24	6,1	6,1	-	8,6	4,3	2,6	0,9

Tabela 4.8 Dimensão dos cordões das soldas mistura 95% Ar + 5% O₂.

CP	S ₁ (mm)	S ₂ (mm)	Perna (mm)	Largura da Face (mm)	Garganta (mm)	Penetração (mm)	Convexidade (mm)
25	4,5	4,5	-	6,4	3,2	0,3	-
26	5,4	5,4	6,1	8,1	3,8	0,4	1,2
27	6,3	6,3	7,6	9,9	4,5	0,9	0,9
28	5,9	5,9	7,0	9,1	4,1	1,0	0,9
29	5,5	5,5	6,8	8,8	3,9	2,8	0,7
30	5,6	5,6	6,6	8,7	4,0	3,2	-
31	6,0	6,0	-	8,5	4,2	3,5	0,2
32	6,0	6,0	6,7	9,0	4,2	3,5	0,3
33	4,5	4,5	5,1	6,8	3,2	0,5	0,9
34	5,9	5,9	6,5	8,7	4,1	0,7	0,8
35	7,1	7,1	-	10,0	5,0	0,7	0,8
36	6,7	6,7	7,3	9,9	4,7	2,0	1,2
37	6,5	6,5	-	9,1	4,6	2,6	0,3
38	6,8	6,8	-	9,7	4,8	3,2	0,3
39	6,6	6,6	-	9,3	4,7	2,7	0,4
40	7,0	7,0	-	9,8	4,9	2,8	0,7
41	4,0	4,0	5,9	7,1	2,8	0,6	0,6
42	5,5	5,5	6,7	8,7	3,9	0,8	1,0
43	6,4	6,4	7,5	9,9	4,5	0,7	0,7
44	6,7	6,7	7,7	10,2	4,7	1,9	0,3
45	5,0	5,0	6,7	8,4	3,5	2,6	0,6
46	5,8	5,8	6,7	8,9	4,1	3,0	0,6
47	5,6	5,6	6,6	8,7	4,0	2,6	0,8
48	5,8	5,8	6,4	8,6	4,1	2,9	0,7

Tabela 4.9 Dimensão dos cordões das soldas mistura 90% Ar + 8% CO₂ + 2% O₂.

CP	S₁ (mm)	S₂ (mm)	Perna (mm)	Largura da Face (mm)	Garganta (mm)	Penetração (mm)	Convexidade (mm)
49	4,2	4,2	-	5,9	3,0	0,5	1,0
50	4,4	4,4	5,2	6,8	3,1	0,8	0,9
51	6,2	6,2	-	8,8	4,4	0,7	0,6
52	6,2	6,2	-	8,8	4,4	1,0	0,5
53	6,3	6,3	-	8,9	4,5	1,5	0,5
54	6,8	6,8	-	9,6	4,8	1,0	0,4
55	6,0	6,0	6,4	8,8	4,2	2,6	0,3
56	5,6	5,6	-	7,9	4,0	2,7	0,4
57	4,6	4,6	-	6,5	3,3	0,5	0,5
58	4,8	4,8	-	6,8	3,4	0,5	0,7
59	5,3	5,3	5,9	7,9	3,7	0,7	0,7
60	7,6	7,6	-	10,8	5,4	0,8	0,5
61	6,9	6,9	-	9,7	4,9	1,5	0,2
62	7,3	7,3	8,1	10,9	5,1	2,1	0,2
63	5,8	5,8	7,4	9,4	4,1	1,8	0,5
64	5,4	5,4	6,8	8,7	3,8	2,2	0,7
65	4,6	4,6	-	6,5	3,3	0,5	0,5
66	5,0	5,0	-	7,1	3,5	0,4	0,6
67	5,7	5,7	-	8,1	4,0	0,4	0,3
68	7,6	7,6	-	10,7	5,4	1,2	0,4
69	6,1	6,1	7,8	9,9	4,3	1,0	0,2
70	7,5	7,5	-	10,6	5,3	1,6	0,0
71	5,5	5,5	6,7	8,7	3,9	1,8	0,5
72	5,5	5,5	7,0	8,9	3,9	1,6	0,4

Tabela 4.10 Dimensão dos cordões das soldas mistura 85% Ar + 15% CO₂.

CP	S₁ (mm)	S₂ (mm)	Perna (mm)	Largura da Face (mm)	Garganta (mm)	Penetração (mm)	Convexidade (mm)
73	4,0	4,0	-	5,7	2,8	0,4	0,7
74	4,8	4,8	-	6,8	3,4	0,6	0,5
75	6,0	6,0	-	8,5	4,2	0,6	0,4
76	7,1	7,1	-	10,0	5,0	0,9	0,2
77	5,5	5,5	6,5	8,5	3,9	1,2	0,5
78	7,2	7,2	8,0	10,8	5,1	2,0	0,2
79	6,0	6,0	7,0	9,2	4,2	2,5	0,4
80	5,2	5,2	-	7,4	3,7	2,6	0,3
81	4,2	4,2	-	5,9	3,0	0,3	0,5
82	5,0	5,0	6,0	7,8	3,5	0,5	0,3
83	6,0	6,0	-	8,5	4,2	0,7	0,5
84	7,3	7,3	-	10,3	5,2	1,2	0,4
85	6,0	6,0	-	8,5	4,2	0,8	0,2
86	7,3	7,3	-	10,3	5,2	2,8	0,2
87	5,5	5,5	6,5	8,5	3,9	2,6	0,4
88	5,0	5,0	-	7,1	3,5	2,9	0,6
89	4,1	4,1	-	5,8	2,9	0,3	0,4
90	5,5	5,5	-	7,8	3,9	0,4	0,5
91	6,5	6,5	-	9,2	4,6	0,4	0,2
92	6,6	6,6	7,3	9,8	4,7	1,2	0,3
93	6,5	6,5	-	9,2	4,6	2,6	0,3
94	7,6	7,6	-	10,7	5,4	2,0	0,2
95	6,0	6,0	7,0	9,2	4,2	2,4	0,6
96	5,2	5,2	-	7,4	3,7	2,1	0,7

Tabela 4.11 Dimensão dos cordões das soldas mistura 98% Ar + 2% O₂.

CP	S₁ (mm)	S₂ (mm)	Perna (mm)	Largura da Face (mm)	Garganta (mm)	Penetração (mm)	Convexidade (mm)
97	4,0	4,0	-	5,7	2,8	0,3	1,2
98	4,5	4,5	5,2	6,9	3,2	0,2	1,5
99	6,0	6,0	-	8,5	4,2	0,5	0,7
100	6,6	6,6	-	9,3	4,7	0,7	0,5
101	7,0	7,0	-	9,9	4,9	0,8	0,5
102	7,9	7,9	-	11,2	5,6	1,9	
103	6,7	6,7	7,1	9,8	4,7	2,8	0,2
104	8,0	8,0	-	11,3	5,7	3,3	0,3
105	3,5	3,5	4,7	5,9	2,5	0,1	1,8
106	4,2	4,2	5,2	6,7	3,0	0,4	1,2
107	5,8	5,8	7,2	9,2	4,1	0,6	0,8
108	6,5	6,5	7,3	9,8	4,6	1,0	0,8
109	7,2	7,2	-	10,2	5,1	1,0	-
110	7,6	7,6	-	10,7	5,4	2,,9	-
111	6,0	6,0	7,0	9,2	4,2	2,4	0,5
112	7,2	7,2	8,3	11,0	5,1	3,0	0,5
113	4,6	4,6	-	6,5	3,3	0,2	1,1
114	4,8	4,8	-	6,8	3,4	0,3	1,2
115	6,5	6,5	-	9,2	4,6	0,8	0,3
116	7,1	7,1	7,6	10,4	5,0	0,7	0,3
117	7,2	7,2	7,8	10,6	5,1	1,8	-
118	7,1	7,1	7,9	10,6	5,0	3,0	-
119	6,1	6,1	7,4	9,6	4,3	2,2	0,4
120	6,9	6,9	8,2	10,7	4,9	2,9	0,5

Tabela 4.12 Dimensão dos cordões das soldas mistura 100% CO₂.

CP	S₁ (mm)	S₂ (mm)	Perna (mm)	Largura da Face (mm)	Garganta (mm)	Penetração (mm)	Convexidade (mm)
121	4,8	4,8	-	6,8	3,4	0,6	0,4
122	5,3	5,3	-	7,5	3,7	1,0	0,6
123	6,0	6,0	-	8,5	4,2	1,2	0,8
124	6,3	6,3	-	8,9	4,5	1,4	0,5
125	6,0	6,0	-	8,5	4,2	2,1	0,6
126	6,6	6,6	-	9,3	4,7	2,2	0,4
127	6,0	6,0	-	8,5	4,2	2,2	0,7
128	5,5	5,5	6,4	8,4	3,9	1,9	0,8
129	5,0	5,0	-	7,1	3,5	0,9	0,3
130	5,3	5,3	-	7,5	3,7	1,3	0,3
131	5,9	5,9	-	8,3	4,2	1,1	0,2
132	6,6	6,6	-	9,3	4,7	1,4	-
133	6,2	6,2	-	8,8	4,4	1,1	0,6
134	7,0	7,0	-	9,9	4,9	1,8	0,3
135	5,6	5,6	6,4	8,5	4,0	1,7	0,3
136	5,4	5,4	6,4	8,4	3,8	2,3	0,7
137	5,4	5,4	-	7,6	3,8	0,3	0,4
138	6,5	6,5	-	9,2	4,6	0,8	0,6
139	7,0	7,0	-	9,9	4,9	0,8	0,2
140	6,5	6,5	7,2	9,7	4,6	1,2	0,5
141	6,0	6,0	6,5	8,8	4,2	1,4	0,5
142	6,6	6,6	7,6	10,1	4,7	2,1	0,6
143	6,0	6,0	7,4	9,5	4,2	1,5	0,7
144	6,0	6,0	-	8,5	4,2	2,8	0,9

Como na soldagem dos corpos de prova foram variados parâmetros como, tensão, corrente e velocidade soldagem, para correlacionar com as dimensões encontradas utilizou-se a energia de soldagem desconsiderando a eficiência do processo conforme a **Equação 2.3**,

Com base nas **Tabelas 4.7 a 4.12** de caracterização dos perfis dos cordões e os parâmetros de soldagem especificados nas **Tabelas 4.1 a 4.6** utilizando a energia de soldagem foram correlacionados os valores e plotado o gráfico conforme **Figura 4.31**.

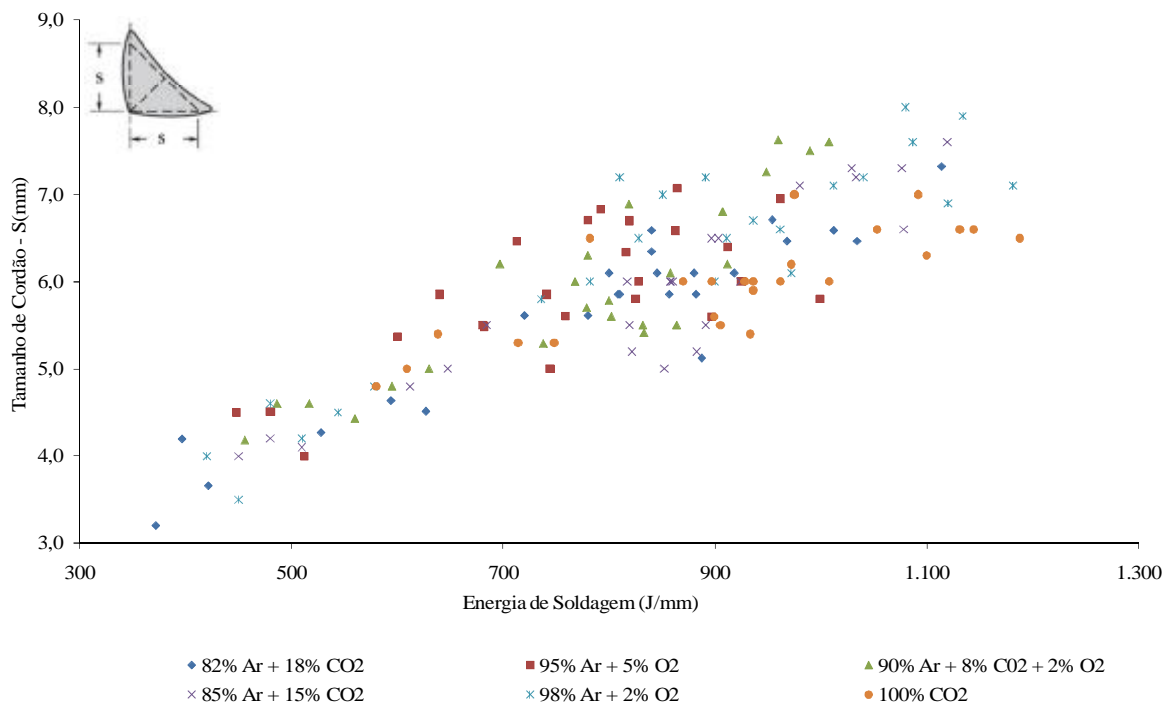


Figura 4.31 Correlação do tamanho do cordão com a energia de soldagem (J/mm).

Conforme os resultados o tamanho do cordão de solda aumenta conforme ocorre o incremento da energia de soldam, isto porque aumenta a tensão (U) e com esta ocorre o incremento da corrente (I) e redução da velocidade de soldagem (v). A mistura com 98 % Ar + 2% O_2 apresentou maior tamanho do cordão, as soldas tiveram excelentes depósitos, com bom acabamento pouca incidência de salpicos, observou-se que com energia de soldagem inferior os cordões tiveram um acréscimo no reforço comparando com outras misturas.

Para simular o tamanho do cordão em função da energia de soldagem foi desenvolvida uma Equação através de regressão usando uma curva não linear, então para Determinar do tamanho do cordão pode-se usar a **Equação 4.17**.

$$S = a * E^2 + b * E + c \dots\dots\dots (4.17)$$

Onde S é o tamanho do cordão E energia de soldagem e a , b e c são constantes conforme mostra a **Tabela 4.13**, para as diferentes misturas de gás de proteção.

Tabela 4.13 Valores empregados das constantes para determinar tamanho de cordão

Gás de Proteção	Constantes			Coeficiente de ajuste R ²
	a	b	c	
82% Ar + 18% CO ₂	-1,48E-06	6,99E-03	1,10E+00	8,79E-01
95% Ar + 5% O ₂	-9,99E-06	1,84E-02	-2,13E+00	6,18E-01
90% Ar + 8% CO ₂ + 2% O ₂	6,78E-06	-4,24E-03	4,93E+00	8,12E-01
85% Ar + 15% CO ₂	3,26E-06	2,65E-05	3,43E+00	8,53E-01
98% Ar + 2% O ₂	-4,75E-06	1,26E-02	-7,53E-01	8,79E-01
100% CO ₂	-7,13E-07	4,11E-03	2,83E+00	6,44E-01

Como pode ser observado existe um bom ajuste dos valores experimentais, com os resultados simulados, portanto a **Equação 4.17** pode ser usada para estimar tamanho de cordão através da energia de soldagem.

Na **Figura 4.32** pode-se observar que existe um aumento na largura da face do cordão em função da energia de soldagem.

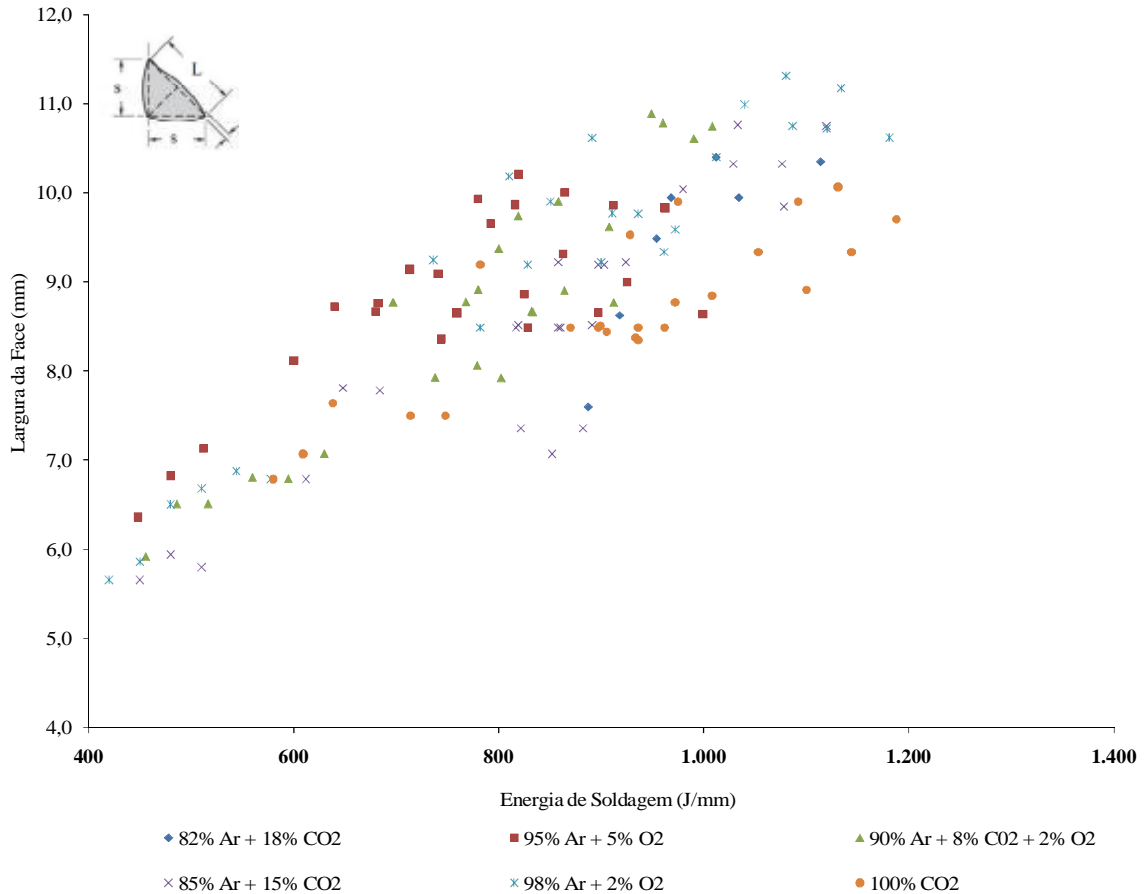


Figura 4.32 Largura da face do cordão em função da energia de soldagem com diferentes misturas.

Misturas com teores de oxigênio apresentaram largura da face dos cordões superiores das soldas com misturas com dióxido de carbono, isto porque mistura com oxigênio promovem um tamanho de arco maior, por sua vez diminui a faixa de transição atingindo transferência em aerossol com correntes mais baixa, melhor molhagem do cordão deixando mais largo e com perfil mais plano.

Para simular a largura da face do cordão em função da energia de soldagem foi desenvolvida uma Equação através de regressão usando uma curva não linear, portanto para determinar da largura da face do cordão pode-se usar a **Equação 4.18**.

$$L = a * E^2 + b * E + c \dots\dots\dots(4.18)$$

Onde L é largura da face do cordão E energia de soldagem e a , b e c são constantes conforme mostra a **Tabela 4.14**, para as diferentes misturas de gás de proteção.

Tabela 4.14 Valores empregados das constantes para determinar a largura da face

Gás de Proteção	Constantes			Coeficiente de ajuste
	a	b	c	R ²
82% Ar + 18% CO ₂	-3,24E-06	1,12E-02	1,82E+00	8,68E-01
95% Ar + 5% O ₂	-1,82E-05	3,13E-02	-4,06E+00	7,71E-01
90% Ar + 8% CO ₂ + 2% O ₂	3,63E-06	3,28E-03	3,82E+00	8,78E-01
85% Ar + 15% CO ₂	2,78E-06	3,09E-03	3,83E+00	8,53E-01
98% Ar + 2% O ₂	-6,17E-06	1,69E-02	-3,86E-01	9,29E-01
100% CO ₂	-2,12E-06	8,26E-03	2,91E+00	7,37E-01

Como pode ser observado existe um razoável ajuste dos valores experimentais com os resultados simulados, portanto a **Equação 4.18** pode ser usada para estimar a largura da face da solda através da energia de soldagem.

A **Figura 4.33** mostra o tamanho da garganta das soldas depositadas para diferentes misturas, como as misturas com oxigênio apresentaram tamanhos maiores de perna S e como o tamanho da garganta esta diretamente relacionada com o tamanho da perna também apresentou resultou maiores tamanhos de garganta nas misturas com oxigênio.

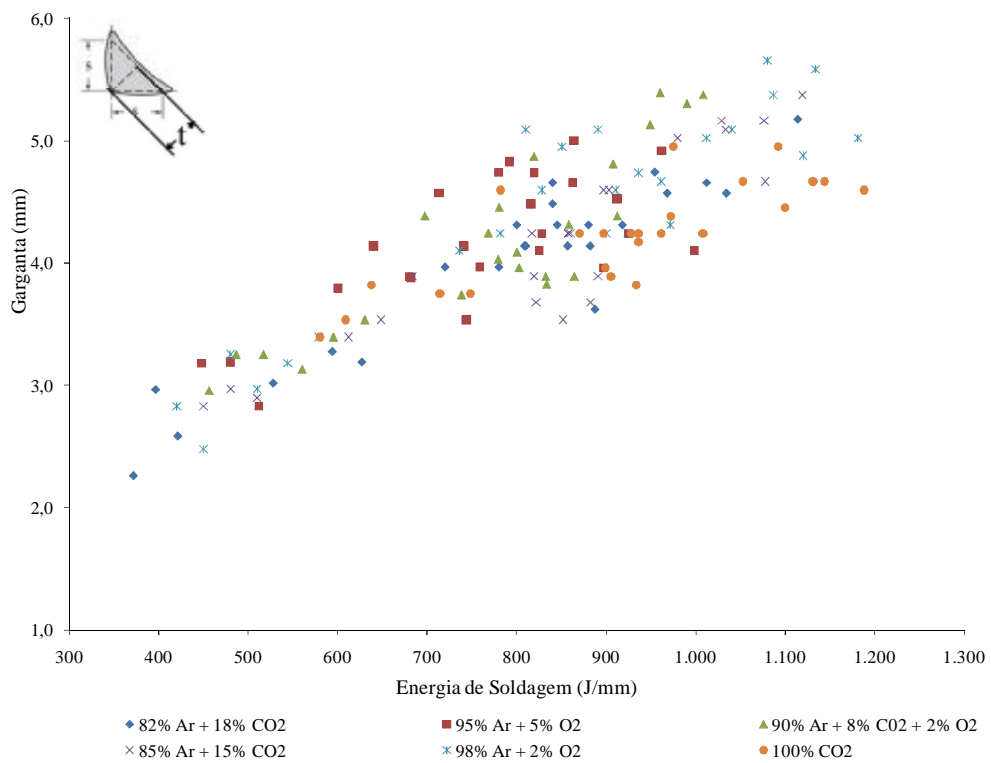


Figura 4.33 Tamanho da garganta em função da energia de soldagem com diferentes misturas.

A mesma situação ocorre nesta condição, conforme há um incremento na energia de soldagem consequentemente aumenta o tamanho da garganta t , também é percebido que a mistura de gás influencia no tamanho da garganta, isto porque para mesma energia de soldagem com CO_2 os corpos de prova apresentaram tamanhos menores de garganta.

Para simular o tamanho da garganta t do cordão em função da energia de soldagem foi desenvolvida uma Equação através de regressão usando uma curva não linear, portanto para determinar do tamanho da garganta pode-se usar a **Equação 4.19**.

$$t = a * E^2 + b * E + c \dots\dots\dots (4.19)$$

Onde t é tamanho da garganta do cordão E energia de soldagem e a , b e c são constantes conforme mostra a **Tabela 4.15**, para as diferentes misturas de gás de proteção.

Tabela 4.15 Valores empregados das constantes para determinar a garganta

Gás de Proteção	Constantes			Coefficiente de ajuste
	a	b	c	R ²
82% Ar + 18% CO ₂	-7,77E-07	4,54E-03	9,25E-01	8,80E-01
95% Ar + 5% O ₂	-6,94E-06	1,28E-02	-1,44E+00	6,19E-01
90% Ar + 8% CO ₂ + 2% O ₂	5,18E-06	-3,61E-03	3,72E+00	8,05E-01
85% Ar + 15% CO ₂	2,65E-06	-4,92E-04	2,59E+00	8,59E-01
98% Ar + 2% O ₂	-3,16E-06	8,56E-03	-4,10E-01	8,73E-01
100% CO ₂	-2,08E-07	2,46E-03	2,15E+00	6,66E-01

Como pode ser observado existe um razoável ajuste dos valores experimentais com os resultados simulados, portanto a **Equação 4.19** pode ser usada para estimar a garganta da solda através da energia de soldagem.

A **Figura 4.34** mostra os valores da penetração das soldas com os diferentes tipos de gás utilizados. Como se pode observar, a penetração aumenta conforme aumenta a energia de soldagem.

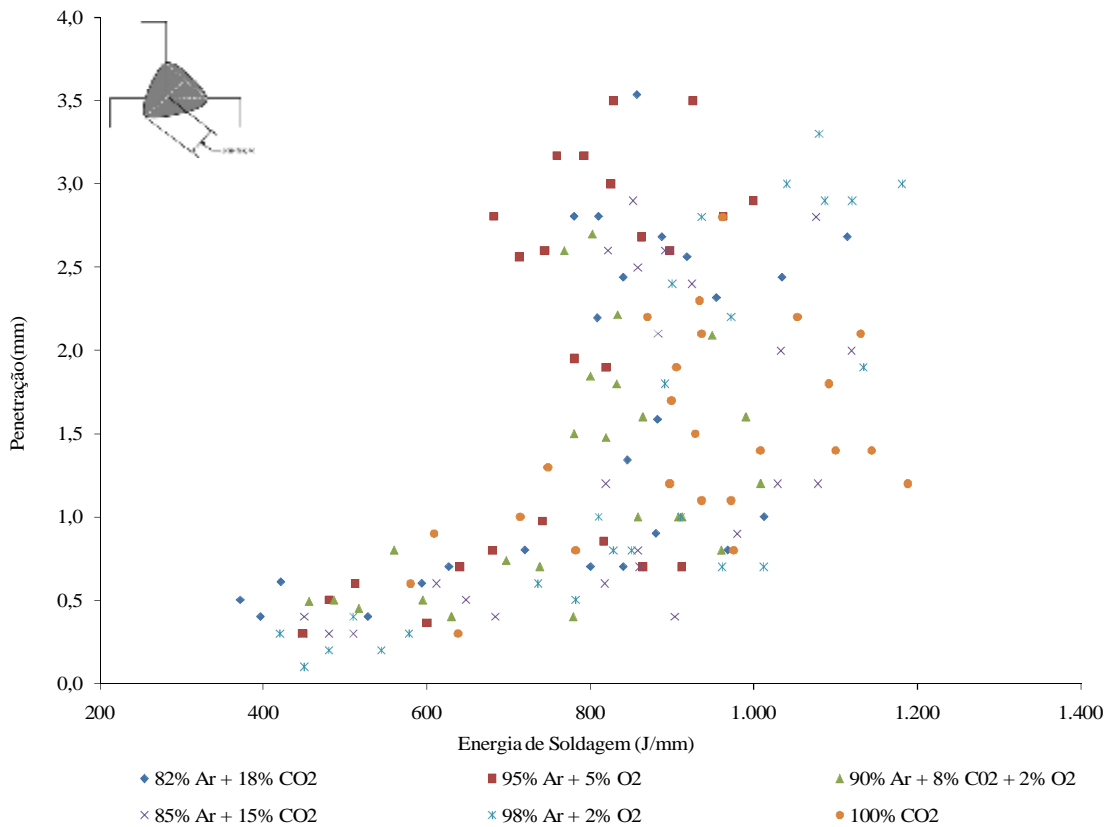


Figura 4.34 Penetração em função da energia de soldagem com diferentes misturas.

A penetração máxima atingida foi 3,5 mm com as misturas de 95% Ar + 5 % O₂ e 82% Ar + 18% CO₂, a penetração na soldagem com 95% Ar + 5 % O₂ apresenta uma geometria de profundidade mais centrada, formando um perfil tipo taça ou (*finger*) como também é conhecido, com 82% Ar + 18% CO₂ a profundidade apresenta uma geometria mais arredondada com aumento de penetração nas margens dos cordões. Outro aspecto é o acabamento superficial do cordão com 95% Ar + 5 % O₂, o cordão é mais uniforme. Também o gás influência na penetração do cordão, isto porque para mesmas energias com diferentes misturas de gás houve diferente profundidade de penetração.

Para simular a penetração do cordão em função da energia de soldagem foi desenvolvida uma Equação através de regressão usando uma curva não linear, portanto para Determinar da penetração do cordão pode-se usar a **Equação 4.20**.

$$P = a * E^2 + b * E + c \dots\dots\dots(4.20)$$

Onde P é a penetração do cordão E energia de soldagem e a , b e c são constantes conforme mostra a **Tabela 4.16**, para as diferentes misturas de gás de proteção.

Tabela 4.16 Valores empregados das constantes para determinar a penetração.

Gás de Proteção	Constantes			Coefficiente de ajuste
	a	b	c	R ²
82% Ar + 18% CO ₂	-1,70E-06	5,32E-03	-1,51E+00	3,48E-01
95% Ar + 5% O ₂	-6,92E-06	1,46E-02	-5,06E+00	3,76E-01
90% Ar + 8% CO ₂ + 2% O ₂	-7,33E-06	1,29E-02	-4,19E+00	3,14E-01
85% Ar + 15% CO ₂	-3,67E-06	8,59E-03	-3,08E+00	3,42E-01
98% Ar + 2% O ₂	4,71E-06	-3,57E-03	8,24E-01	6,96E-01
100% CO ₂	-7,20E-06	1,45E-02	-5,57E+00	3,78E-01

Como pode ser observado não existe um bom ajuste dos valores experimentais com os resultados simulados, portanto a **Equação 4.19** não seria um bom método para estimar a penetração da solda através da energia de soldagem.

Na **Figura 4.35**, verifica-se a convexidade ou reforço do cordão de solda onde ocorre uma diminuição da convexidade com um aumento da energia de soldagem.

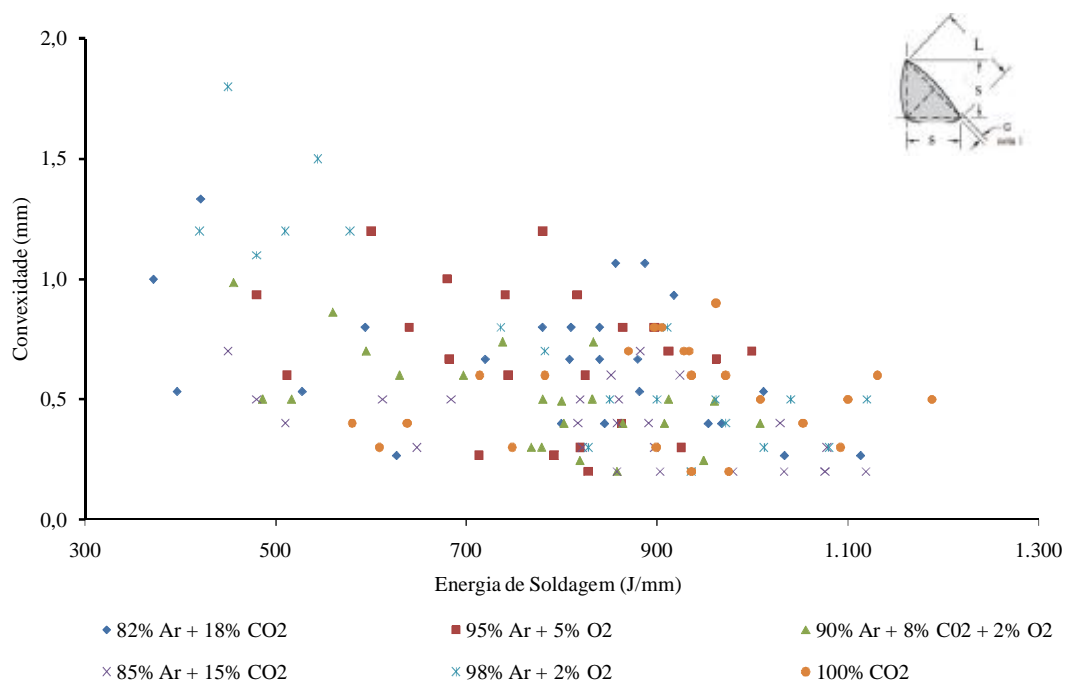


Figura 4.35 Convexidade em função da energia de soldagem com diferentes misturas.

Nesta condição também pode-se observar que para as mesmas energias de soldagem existem diferenças de altura do reforço, outro fator relaciona-se principalmente à mistura com 98% Ar + 2 %

O₂, com energia de soldagem mais baixa apresentaram maiores convexidades.

Para simular a convexidade do cordão em função da energia de soldagem foi desenvolvida uma Equação através de regressão usando uma curva não linear, portanto para determinar da convexidade do cordão pode-se usar a **Equação 4.21**.

$$C = a * E^2 + b * E + c \dots\dots\dots(4.21)$$

Onde *C* é a convexidade ou reforço do cordão *E* energia de soldagem e *a*, *b* e *c* são constantes conforme mostra a **Tabela 4.17**, para as diferentes misturas de gás de proteção.

Tabela 4.17 Valores empregados das constantes para determinar a convexidade.

Gás de Proteção	Constantes			Coeficiente de ajuste
	a	b	c	R ²
82% Ar + 18% CO ₂	-9,53E-07	8,44E-04	6,26E-01	1,62E-01
95% Ar + 5% O ₂	9,80E-07	-2,09E-03	1,69E+00	9,73E-02
90% Ar + 8% CO ₂ + 2% O ₂	1,11E-06	-2,42E-03	1,68E+00	3,97E-01
85% Ar + 15% CO ₂	-5,69E-07	4,50E-04	4,37E-01	2,82E-01
98% Ar + 2% O ₂	2,17E-06	-5,01E-03	3,26E+00	8,02E-01
100% CO ₂	-2,09E-06	3,80E-03	-1,15E+00	1,18E-01

Como pode ser observado não existe um bom ajuste dos valores experimentais com os resultados simulados, portanto a **Equação 4.20** não seria um bom método estimar a convexidade do de solda através da energia de soldagem.

A seção da solda foi dividida em três áreas distintas, sendo elas, reforço, área *A* que é compreendido como a área do metal fundido e área *B* que compreende a área fundida do metal base como, mostra **Figura 2.15**. Todas as áreas foram medida e encontram-se nas **Tabelas 4.18 a Tabela 4.23**, identificadas sequencialmente com seus respectivos corpos de prova. Com o valor dos resultados das áreas *A* e *B* foi calculado a diluição das soldas depositadas, utilizando a **Equação 2.2**.

Tabela 4.18 Área dos cordões das soldas mistura 82% Ar + 18% CO₂.

CP	Área do Reforço (mm²)	Área A (mm²)	Área B (mm²)	Área Total (mm²)	Diluição
1	4,1	10,5	2,4	12,9	19%
2	3,8	13,3	3,9	17,2	22%
3	2,7	18,4	7,1	25,5	28%
4	2,4	20,3	9,7	30,0	32%
5	2,2	18,1	10,9	29,1	38%
6	1,5	18,9	12,1	31,1	39%
7	1,5	16,1	16,3	32,4	50%
8	4,2	18,0	18,8	36,8	51%
9	2,7	10,9	3,1	14,0	22%
10	2,9	15,4	4,4	19,8	22%
11	2,5	18,8	6,5	25,3	26%
12	1,5	21,9	11,4	33,3	34%
13	1,1	18,3	11,8	30,1	39%
14	1,0	20,6	18,5	39,1	47%
15	2,6	15,3	17,2	32,5	53%
16	3,9	18,0	19,1	37,1	51%
17	3,4	10,0	2,1	12,1	18%
18	2,1	12,5	4,8	17,3	28%
19	2,5	18,8	14,0	32,8	43%
20	2,2	23,7	14,0	37,7	37%
21	1,6	17,3	13,7	31,0	44%
22	1,7	24,0	18,8	42,8	44%
23	4,4	18,9	19,2	38,1	50%
24	5,6	20,8	20,8	41,6	50%

Tabela 4.19 Área dos cordões das soldas mistura 95% Ar + 5% O₂.

CP	Área do Reforço (mm²)	Área A (mm²)	Área B (mm²)	Área Total (mm²)	Diluição
25	7,2	14,0	2,0	16,0	13%
26	6,1	20,3	1,9	22,2	9%
27	4,8	25,3	5,7	31,1	18%
28	2,5	20,3	7,1	27,3	26%
29	1,9	17,7	12,4	30,1	41%
30	1,3	18,0	14,0	32,0	44%
31	1,5	20,1	15,6	35,7	44%
32	3,6	23,5	16,3	39,8	41%
33	4,9	14,7	1,9	16,5	11%
34	4,6	19,7	2,8	22,5	12%
35	3,6	24,4	6,5	30,9	21%
36	4,1	22,8	8,9	31,7	28%
37	1,9	18,4	10,7	29,1	37%
38	2,6	20,8	16,1	36,9	44%
39	3,5	20,4	12,0	32,4	37%
40	3,1	24,5	16,3	40,8	40%
41	4,0	15,0	3,4	18,4	18%
42	2,7	20,2	5,7	25,9	22%
43	2,7	24,4	7,1	31,5	23%
44	1,1	22,8	11,1	33,9	33%
45	3,0	19,3	11,4	30,7	37%
46	1,5	20,0	13,7	33,7	41%
47	2,1	20,3	17,8	38,1	47%
48	2,7	21,2	17,0	38,2	45%

Tabela 4.20 Área dos cordões das soldas mistura 90% Ar + 8% CO₂ + 2% O₂.

CP	Área do Reforço (mm²)	Área A (mm²)	Área B (mm²)	Área Total (mm²)	Diluição
49	5,0	12,8	1,1	13,9	8%
50	5,1	15,6	2,3	17,9	13%
51	3,9	21,3	4,0	25,3	16%
52	3,7	24,6	7,5	32,1	23%
53	2,6	21,0	9,5	30,5	31%
54	1,2	27,1	12,0	39,1	31%
55	1,1	22,2	15,1	37,3	40%
56	3,8	19,8	18,4	38,2	48%
57	2,7	13,7	3,2	16,9	19%
58	3,6	15,4	3,3	18,7	18%
59	4,6	18,5	5,2	23,7	22%
60	2,9	26,4	9,4	35,7	26%
61	3,2	20,7	10,5	31,2	34%
62	1,5	25,0	14,4	39,3	36%
63	1,5	20,4	18,6	39,1	48%
64	3,1	18,6	18,6	37,3	50%
65	2,6	13,3	2,0	15,3	13%
66	2,0	15,8	2,7	18,5	15%
67	1,7	20,2	5,7	25,9	22%
68	1,4	26,4	12,1	38,5	31%
69	1,3	23,0	13,4	36,4	37%
70	0,0	26,3	16,8	43,1	39%
71	2,9	21,1	18,1	39,2	46%
72	3,3	21,2	18,8	40,0	47%

Tabela 4.21 Área dos cordões das soldas mistura 85% Ar + 15% CO₂.

CP	Área do Reforço (mm²)	Área A (mm²)	Área B (mm²)	Área Total (mm²)	Diluição
73	4,2	12,8	1,6	14,4	11%
74	3,4	16,4	2,6	19,0	14%
75	2,2	21,4	5,2	26,6	20%
76	1,4	26,2	9,6	35,8	27%
77	3,4	19,9	10,6	30,5	35%
78	0,9	28,2	17,1	45,3	38%
79	2,2	20,2	19,5	39,7	49%
80	2,6	19,0	20,0	39,0	51%
81	3,7	12,4	1,7	14,1	12%
82	2,5	16,8	4,0	20,8	19%
83	2,4	22,4	7,6	30,0	25%
84	4,1	28,3	12,1	40,4	30%
85	1,6	22,1	11,1	33,2	33%
86	1,3	26,0	20,4	46,4	44%
87	2,5	20,3	21,6	41,9	52%
88	3,4	18,4	22,1	40,5	55%
89	2,4	11,7	2,7	14,4	19%
90	2,8	18,0	3,2	21,2	15%
91	1,1	20,5	7,4	27,9	27%
92	2,8	27,4	14,4	41,8	34%
93	1,8	23,0	18,4	41,4	44%
94	1,0	27,4	23,4	50,8	46%
95	5,2	24,1	24,7	48,8	51%
96	3,8	20,3	20,9	41,2	51%

Tabela 4.22 Área dos cordões das soldas mistura 98% Ar + 2% O₂.

CP	Área do Reforço (mm²)	Área A (mm²)	Área B (mm²)	Área Total (mm²)	Diluição
97	5,1	12,8	1,8	14,6	12%
98	5,4	17,9	1,2	19,1	6%
99	4,0	22,3	3,7	26,0	14%
100	4,3	24,8	5,6	30,4	18%
101	2,2	25,5	7,3	32,8	22%
102	0,0	27,3	13,3	40,6	33%
103	2,5	22,0	13,2	35,2	38%
104	1,1	27,4	23,0	50,4	46%
105	5,7	13,5	1,3	14,8	9%
106	5,2	16,8	2,0	18,8	11%
107	3,2	23,7	7,5	31,2	24%
108	4,7	27,1	7,5	34,6	22%
109	0,0	23,6	8,0	31,6	25%
110	0,0	26,9	16,6	43,5	38%
111	3,3	22,3	13,1	35,4	37%
112	4,2	32,3	21,4	53,7	40%
113	2,5	14,4	1,7	16,1	11%
114	4,0	15,7	2,6	18,3	14%
115	3,5	22,9	4,5	27,4	16%
116	2,7	28,0	5,6	33,6	17%
117	0,0	26,4	12,5	38,9	32%
118	0,0	25,6	19,3	44,9	43%
119	2,5	22,9	15,5	38,4	40%
120	2,2	26,0	18,4	44,4	41%

Tabela 4.23 Área dos cordões das soldas mistura 100% CO₂.

CP	Área do Reforço (mm ²)	Área A (mm ²)	Área B (mm ²)	Área Total (mm ²)	Diluição
121	2,1	13,8	6,8	20,6	33%
122	3,8	16,5	8,0	24,5	33%
123	4,8	22,0	10,5	32,5	32%
124	2,4	23,2	18,1	41,3	44%
125	1,9	18,4	21,5	39,9	54%
126	1,7	21,5	22,8	44,3	51%
127	2,8	20,5	26,3	46,8	56%
128	3,0	19,9	26,5	46,4	57%
129	2,3	13,8	7,4	21,2	35%
130	1,7	15,6	9,4	25,0	38%
131	1,6	18,6	13,7	32,3	42%
132	0,0	20,6	18,9	39,5	48%
133	2,5	18,9	20,1	39,0	52%
134	2,4	24,0	24,8	48,8	51%
135	1,0	16,9	22,3	39,2	57%
136	2,1	19,1	30,4	49,5	61%
137	1,7	14,6	8,7	23,3	37%
138	1,7	18,9	13,2	32,1	41%
139	1,0	21,0	15,1	36,1	42%
140	1,9	22,3	23,5	45,8	51%
141	2,0	19,9	19,5	39,4	49%
142	1,3	25,1	27,7	52,8	52%
143	1,9	21,4	24,2	45,6	53%
144	4,2	21,3	30,5	51,8	59%

Para cada condição de soldagem ou tipo de gás os resultados das áreas foram graficamente plotados para melhor compreensão dos resultados das áreas analisadas.

Os resultados de cada área da seção foram plotados individualmente com o tipo de gás de proteção usado e correlacionado com a energia de soldagem. A **Figura 4.36** mostra os resultados obtidos da área A ou metal de adição fundido.

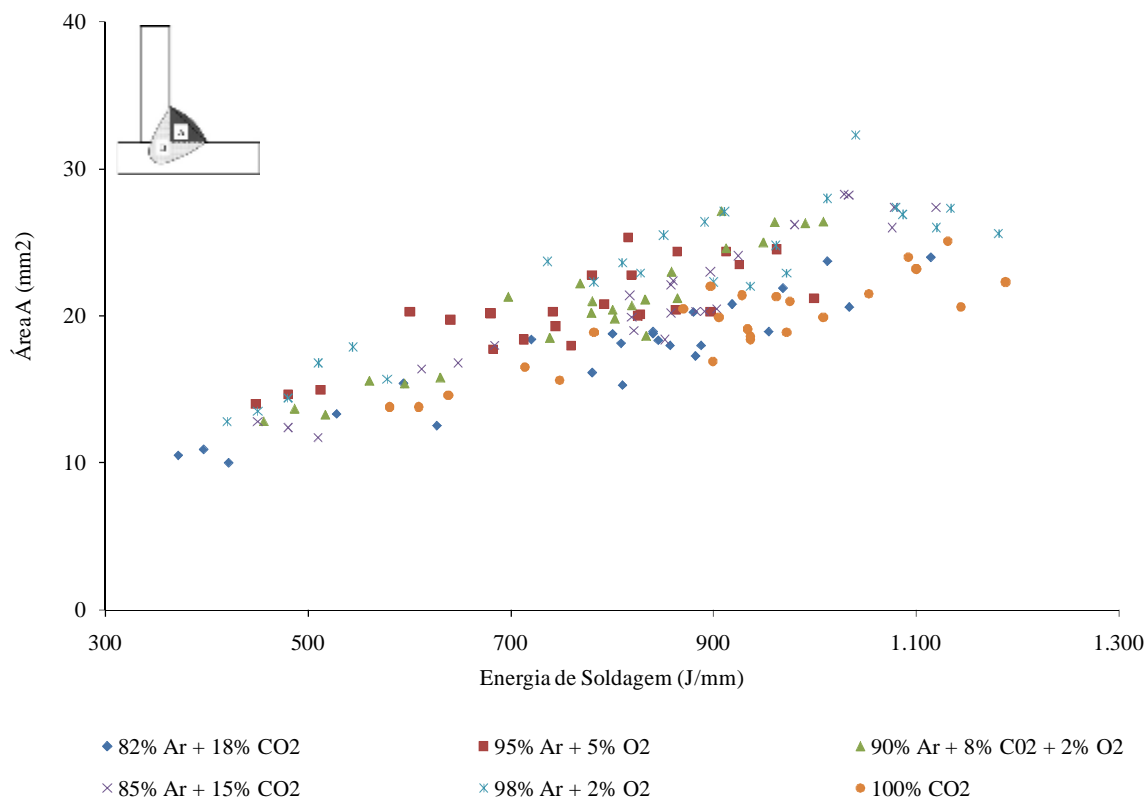


Figura 4.36 Área A da seção das soldas em função da energia de soldagem com diferentes misturas.

Como a área do metal de adição fundida esta relacionada com o tamanho da perna do cordão, largura da face e convexidade, nesta condição os resultados não foram diferentes, das **Figuras 4.31, 4.32 e 4.35**, onde as misturas que contém oxigênio apresentaram maiores valores, que são influenciados pelo tamanho do arco, tensão, e principalmente na velocidade de alimentação do arame, isto porque com as misturas que continham oxigênio as soldas foram realizadas com uma tensão menor, porém com a velocidade de alimentação superior a 10%.

Para determinar a seção da área A do cordão em função da energia de soldagem foi desenvolvida uma Equação através de regressão usando uma curva não linear, portanto para Determinar da área A do cordão pode-se usar a **Equação 4.22**.

$$A_{maf} = a * E^2 + b * E + c \dots\dots\dots(4.22)$$

Onde A_{maf} é área, do metal de adição fundido E energia de soldagem e a , b e c são

constantes conforme mostra a **Tabela 24**, para as diferentes misturas de gás de proteção.

Tabela 4.24 Valores empregados das constantes para determinar a área do metal de adição fundida.

Gás de Proteção	Constantes			Coeficiente de ajuste R^2
	a	b	c	
82% Ar + 18% CO ₂	4,10E-06	1,21E-02	5,26E+00	8,82E-01
95% Ar + 5% O ₂	-2,10E-05	4,70E-02	-2,85E+00	6,75E-01
90% Ar + 8% CO ₂ + 2% O ₂	1,11E-05	9,43E-03	6,23E+00	8,99E-01
85% Ar + 15% CO ₂	1,05E-05	8,41E-03	6,24E+00	9,15E-01
98% Ar + 2% O ₂	-2,37E-05	5,70E-02	-7,16E+00	8,54E-01
100% CO ₂	-9,24E-06	3,23E-02	-2,14E+00	7,79E-01

O resultado da equação que mostra que com o aumento da energia de soldagem a área do metal fundido aumenta, e também mostra que mistura com 15 % de CO₂ tem um incremento de área similar às soldas onde foram utilizadas misturas com oxigênio. Entretanto, existe um razoável ajuste dos valores experimentais, portanto a **Equação 4.22** é válida para a fim de estimar a área do metal de adição fundido.

A **Figura 4.37** mostra os resultados da área da seção *B* ou área do metal de base fundido, os mesmo foram correlacionados com a energia de soldagem utilizada.

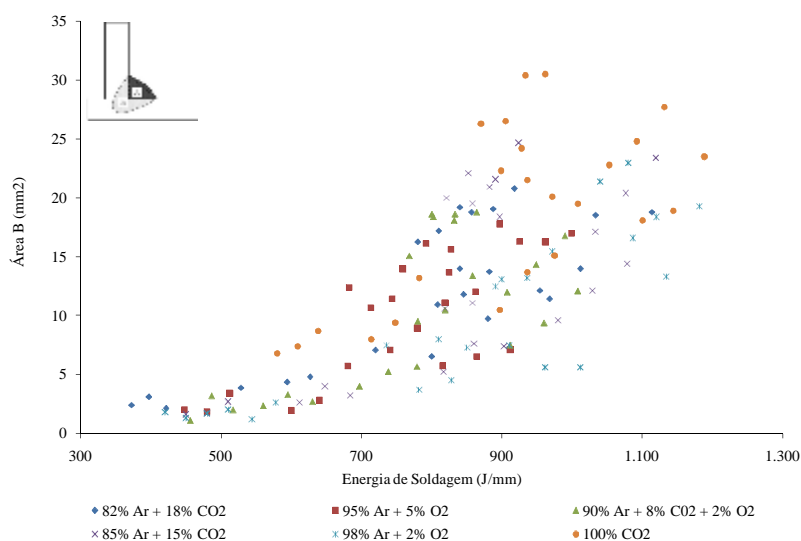


Figura 4.37 Área B da seção das soldas em função da energia de soldagem com diferentes misturas.

Nesta condição, as soldas realizadas com mistura ou totalmente CO₂ apresentaram a área do metal base fundido maior do que as soldas com mistura de oxigênio, isto pode-se dar em função do aumento na temperatura do arco e, conseqüentemente da possa de fusão causado pelo CO₂, esse fato indica que misturas ricas em CO₂ produzem soldas de alta qualidade.

Para determinar a seção da área *B* do cordão em função da energia de soldagem foi desenvolvida uma Equação através de regressão usando uma curva não linear, portanto para Determinar da área *B* do cordão pode-se usar a **Equação 4.23**.

$$A_{mbf} = a * E^2 + b * E + c \dots\dots\dots(4.23)$$

Onde *A_{mbf}*, é área, do metal base fundido *E* energia de soldagem e *a*, *b* e *c* são constantes conforme mostra a **Tabela 25**, para as diferentes misturas de gás de proteção.

Tabela 4.25 Valores empregados das constantes para determinar a área do metal fundido.

Gás de Proteção	Constantes			Coefficiente de ajuste
	a	b	c	R ²
82% Ar + 18% CO ₂	-8,18E-06	3,65E-02	-1,16E+01	6,56E-01
95% Ar + 5% O ₂	-4,48E-06	3,42E-02	-1,34E+01	5,81E-01
90% Ar + 8% CO ₂ + 2% O ₂	-4,94E-05	1,00E-01	-3,67E+01	5,49E-01
85% Ar + 15% CO ₂	-2,14E-05	6,38E-02	-2,51E+01	5,26E-01
98% Ar + 2% O ₂	2,68E-05	-1,75E-02	3,79E+00	7,35E-01
100% CO ₂	-9,24E-06	3,23E-02	-2,14E+00	7,79E-01

A **Figura 4.37** também representa uma relação de aumento da área do metal base fundida com aumento da energia de soldagem e com misturas de CO₂, onde soldas com misturas de CO₂ necessitam de uma energia de soldagem maior do que as outras nas mesmas condições. E que este aumento da área do metal base fundido é praticamente linear com aumento da energia de soldagem.

Portanto, para a fim de estimar a área o metal base fundido é válido usar a **Equação 4.23**.

A área do reforço **Figura 4.38** Esta diretamente relacionada com a taxa de fusão do arame, conforme aumenta a taxa de fusão aumenta o reforço e diminuem com o aumento da

velocidade que foi a condição das soldas realizadas com gás de proteção 95% Ar + 5% O₂, a velocidade máxima foi 10 mm/s.

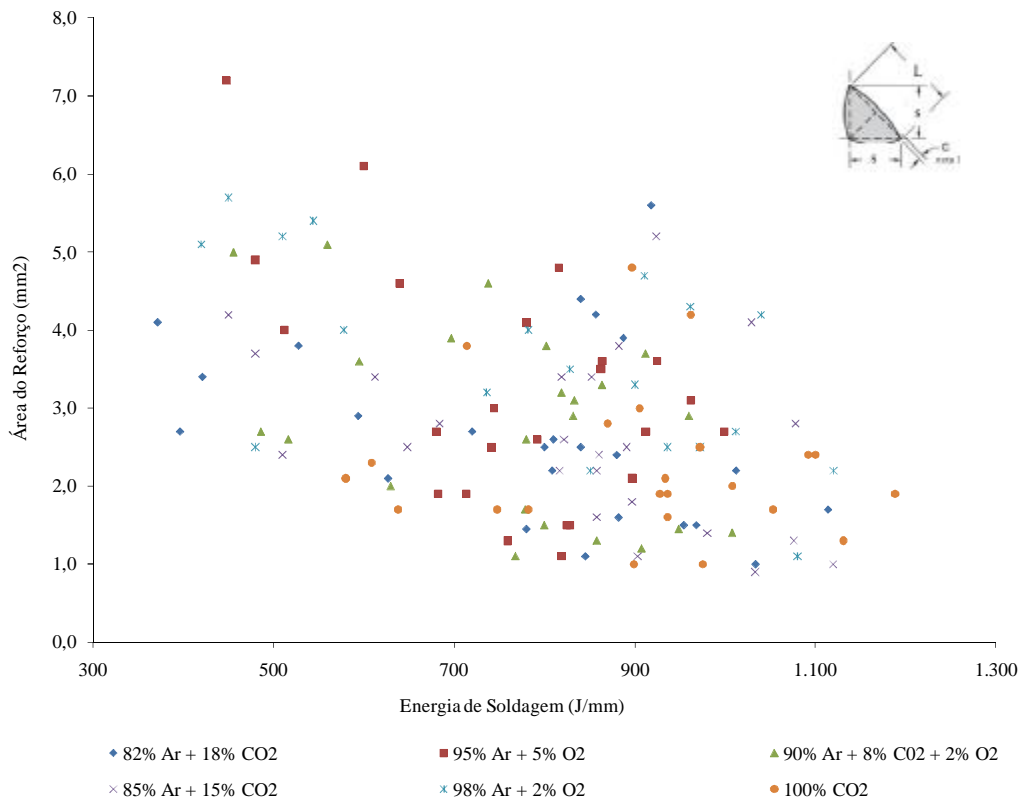


Figura 4.38 Área do reforço da seção das soldas em função da energia de soldagem com diferentes mistura.

Para determinar a seção da área do reforço A_r do cordão em função da energia de soldagem foi desenvolvida uma Equação através de regressão usando uma curva não linear, portanto para Determinar da área A_r do cordão pode-se usar a **Equação 4.24**.

$$A_r = a * E^2 + b * E + c \dots\dots\dots(4.24)$$

Onde A_r é área do reforço do cordão, E energia de soldagem e a , b e c são constantes conforme mostra a **Tabela 26**, para as diferentes misturas de gás de proteção.

Tabela 4.26 Valores empregados das constantes para determinar a área do reforço.

Gás de Proteção	Constantes			Coeficiente de ajuste
	a	b	c	R^2
82% Ar + 18% CO ₂	-2,14E-06	1,03E-03	3,26E+00	1,27E-01
95% Ar + 5% O ₂	2,62E-05	-4,34E-02	2,05E+01	4,73E-01
90% Ar + 8% CO ₂ + 2% O ₂	-8,58E-07	-2,41E-03	5,17E+00	2,19E-01
85% Ar + 15% CO ₂	-1,32E-06	-3,71E-04	3,89E+00	1,67E-01
98% Ar + 2% O ₂	-1,34E-06	-1,49E-03	5,69E+00	3,98E-01
100% CO ₂	-5,92E-06	9,71E-03	-1,54E+00	4,71E-02

Na **Figura 4.38**, que foi simulado a área do reforço mostra que com o aumento da energia de soldagem o reforço diminui, para uma diferente velocidade de soldagem.

O valor R^2 obteve valores baixo tendendo a 0, o que indica que não existe uma forte relação aos parâmetros nesta condição. Portanto, a **Equação 4.24** não é validada.

Na **Figura 4.39** é possível verificar que a área total da seção da solda aumenta em função da energia de soldagem, sendo que também existe uma influência no tipo de gás de proteção empregado.

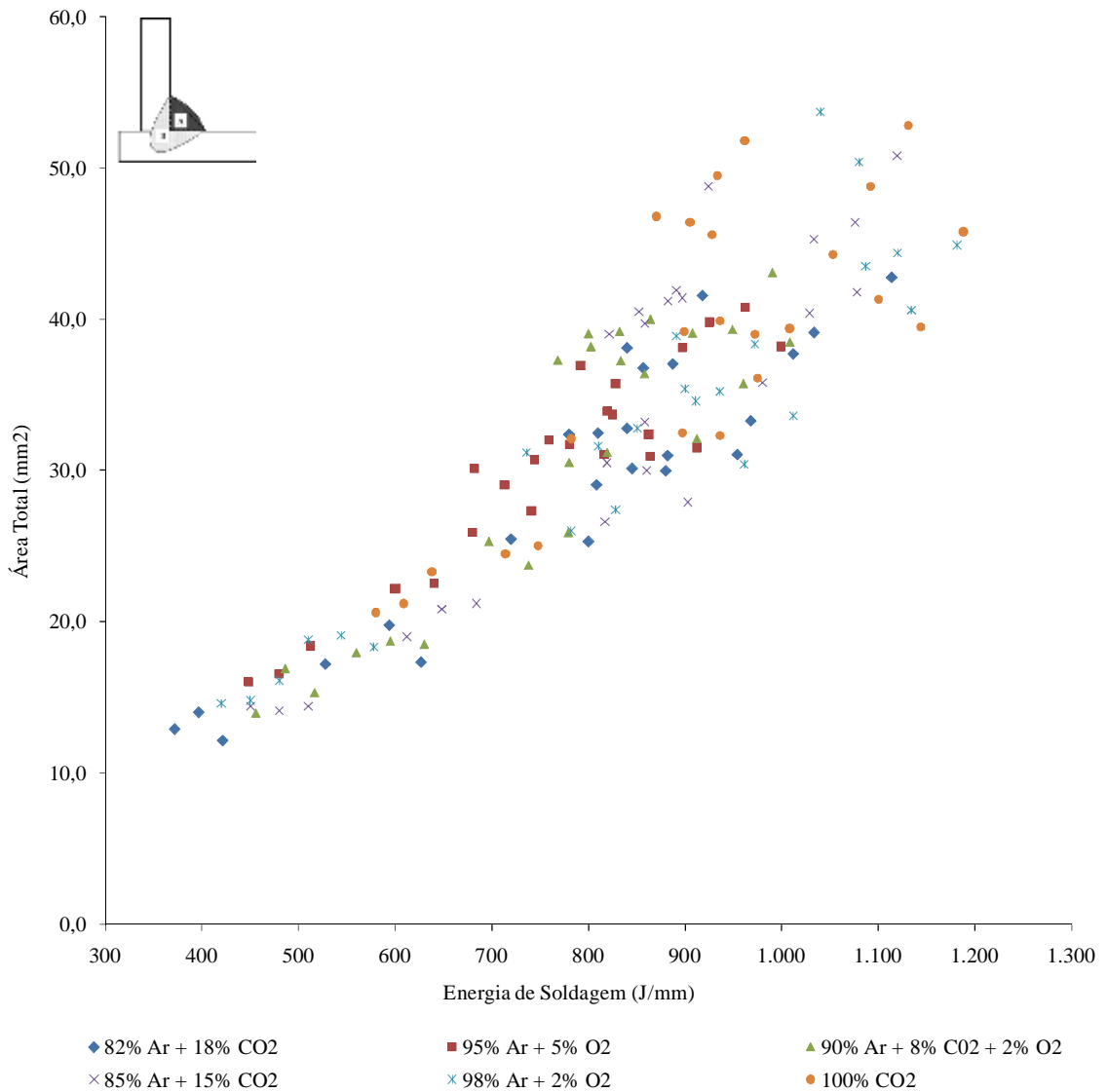


Figura 4.39 Área total da secção transversal do cordão em função da energia de soldagem com diferentes misturas.

Os gases que mostram maiores áreas foram os corpos de prova soldados com CO₂, Ar + 15 % CO₂, Ar + 18 % CO₂ e Ar + 2 % O₂ onde neste se utilizou-se uma velocidade de arame superior aos demais em 12 %, para mesma velocidade de soldagem.

Para determinar a área total da seção do cordão de solda A_s em função da energia de soldagem foi desenvolvida uma Equação através de regressão usando uma curva não linear, portanto para determinar da área A_s do cordão pode-se usar a **Equação 4.25**.

$$A_s = a * E^2 + b * E + c \dots\dots\dots(4.25)$$

Onde A_s , área total da seção do cordão de solda, E energia de soldagem e a , b e c são

constantes conforme mostra a **Tabela 27**, para as diferentes misturas de gás de proteção.

Tabela 4.27 Valores empregados das constantes para determinar a área total da seção da solda.

Gás de Proteção	Constantes			Coefficiente de ajuste
	a	b	c	R ²
82% Ar + 18% CO ₂	-4,14E-06	4,87E-02	-6,42E+00	8,68E-01
95% Ar + 5% O ₂	-2,57E-05	8,15E-02	-1,64E+01	8,86E-01
90% Ar + 8% CO ₂ + 2% O ₂	-3,88E-05	1,11E-01	-3,07E+01	8,31E-01
85% Ar + 15% CO ₂	-1,09E-05	7,22E-02	-1,89E+01	8,20E-01
98% Ar + 2% O ₂	3,11E-06	3,11E-06	-3,36E+00	8,59E-01
100% CO ₂	-7,65E-05	1,81E-01	-6,17E+01	6,91E-01

Na **Figura 4.39**, onde foi simulada área total da seção do cordão de solda mostra que com o aumento da energia de soldagem aumentam a área da seção do cordão conforme os resultados encontrados nos corpos de prova. Os valores de R^2 obtiveram valores altos, o que significa que existe uma correlação entre os resultados práticos e calculados. Portanto, a **Equação 4.25** pode ser utilizada para estimar a área da seção do cordão de solda para estas condições ou similares.

A diluição é um fator importante no processo de soldagem, é determinado pelo volume do metal base fundido A_{mbf} mais o volume do metal de adição fundido A_{maf} , da seção transversal do cordão dada em %.

Na **Figura 4.40** mostra os resultados obtidos com relação a diluição para as diferentes misturas de gás de proteção.

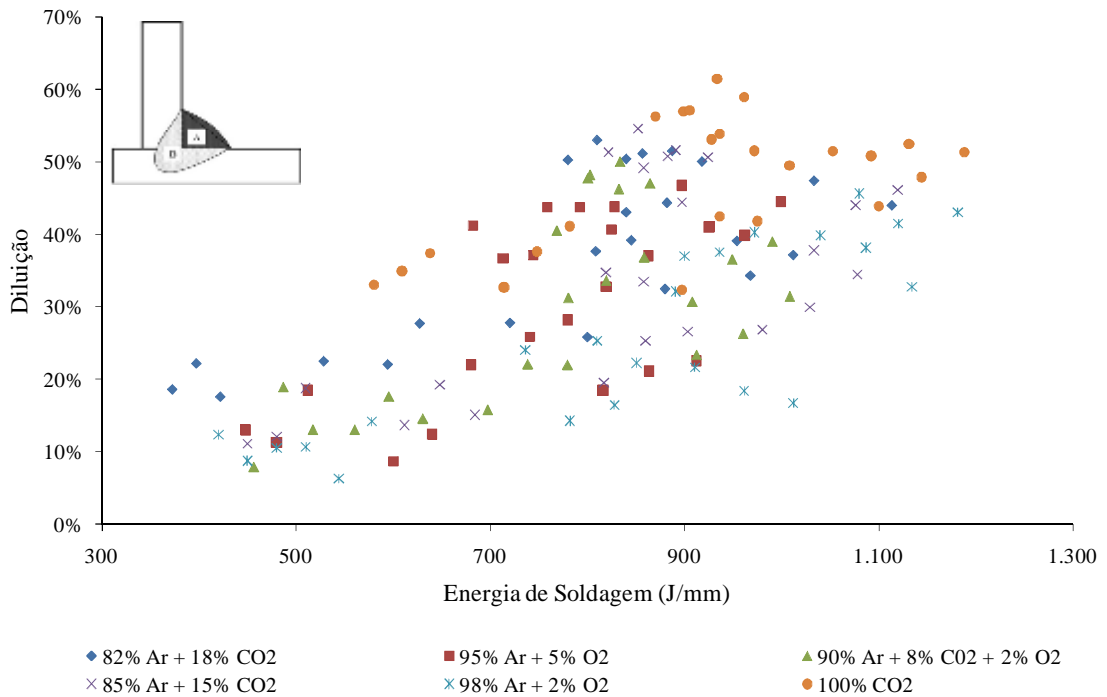


Figura 4.40 Diluição em função da energia de soldagem com diferentes misturas.

Os resultados com maior porcentagem de diluição foram encontrados nos corpos de prova soldados com misturas mais ricas em CO₂, sendo que nos corpos de prova soldados com CO₂ ocorreram as maiores taxas de diluição, portanto o gás de proteção tem influência importante na taxa de diluição. Isto é provocado pelos aumentos na temperatura do arco e, Conseqüentemente, na poça de fusão gerada pela quantidade de CO₂.

Para determinar diluição do cordão de solda D em função da energia de soldagem foi desenvolvida uma Equação através de regressão usando uma curva não linear, portanto para Determinar da área A_s do cordão pode-se usar a **Equação 4.26**.

$$D = a * E^2 + b * E + c \dots\dots\dots(4.26)$$

Onde D é diluição do cordão de solda, E energia de soldagem e a , b e c são constantes conforme mostra a **Tabela 28**, para as diferentes misturas de gás de proteção.

Tabela 4.28 Valores das constantes empregados para determinar a diluição da solda.

Gás de Proteção	Constantes			Coefficiente de ajuste
	a	b	c	R ²
82% Ar + 18% CO ₂	-5,55E-07	1,22E-03	-2,22E-01	5,79E-01
95% Ar + 5% O ₂	-6,03E-07	1,44E-03	-4,31E-01	4,65E-01
90% Ar + 8% CO ₂ + 2% O ₂	-1,56E-06	2,81E-03	-9,04E-01	5,18E-01
85% Ar + 15% CO ₂	-9,59E-07	2,00E-03	-6,35E-01	4,84E-01
98% Ar + 2% O ₂	2,91E-07	-9,25E-06	3,96E-02	7,04E-01
100% CO ₂	-9,97E-07	2,06E-03	-5,57E-01	4,57E-01

Os resultados plotados na **Figura 4.40**, apresentam os valores da diluição similares aos encontrados nos corpos de prova, da mesma forma as misturas com CO₂ foram as quais tiveram maiores taxas de diluição. Também podemos observa que existe um limite máximo de diluição, que a partir de 900 J/mm a diluição começa a diminuir, muito provavelmente pelo aumento da velocidade de soldagem.

Os valores de R² obtiveram valores médios, o que significa que existe uma correlação entre os resultados práticos e simulados. Portanto, a **Equação 4.26**, pode ser utilizada para estimar a diluição do cordão de solda para estas condições ou similares.

4.4 Avaliação das Distorções

As avaliações das distorções tiveram como objetivo identificar o grau de distorção causado pelos parâmetros de soldagem utilizados para o desenvolvimento dos envelopes operacionais e correlacionar com as variáveis de soldagem como: energia de soldagem área da seção transversal do cordão de solda e restrição da junta soldada, desenvolvendo equações através de regressão não linear para poder estimar possíveis distorções na soldagem e comparando com algumas equações encontradas em literaturas.

Portanto, foram realizadas as medições de acordo com as **Figura 3.7**, **Figura 3.8** e **Figura 3.9**, os valores foram registrados em tabelas, como a distorção esta relacionada com, a energia de soldagem e área da seção transversal optou-se em apresentar os valores encontrados nos corpos de prova soldados com as maiores energias de soldagem, ou seja, soldadas com os parâmetros do limite máximo do envelope operacional como mostram as tabelas a seguir.

Tabela 4.29 Resultados das distorções dos CPs soldados com mistura 82% Ar + 18% CO₂.

CP	Faixa	Energia de Soldagem (J/mm)	S ₁ (mm)	S ₂ (mm)	Área A (mm ²)	Área B (mm ²)	Área Total (mm ²)	Distorção Longitudinal (mm)	Distorção Angular (⊥)°
1	Mínima	372,0	3,2	3,2	10,5	2,4	12,9	0,3	0,8
2		528,0	4,3	4,3	13,3	3,9	17,2	0,2	0,5
3		720,0	5,6	5,6	18,4	7,1	25,5	0,4	0,7
4		880,0	6,1	6,1	20,3	9,7	30,0	0,4	0,8
5		808,5	5,9	5,9	18,1	10,9	29,1	0,3	0,7
6		954,0	6,7	6,7	18,9	12,1	31,1	0,4	0,8
7		780,0	5,6	5,6	16,1	16,3	32,4	0,5	0,7
8		856,8	5,9	5,9	18,0	18,8	36,8	0,3	0,6
9	Intermediária	396,8	4,2	4,2	10,9	3,1	14,0	0,2	0,8
10		594,0	4,6	4,6	15,4	4,4	19,8	0,4	0,5
11		800,0	6,1	6,1	18,8	6,5	25,3	0,6	0,5
12		968,0	6,5	6,5	21,9	11,4	33,3	0,5	0,7
13		845,3	6,1	6,1	18,3	11,8	30,1	0,3	0,5
14		1033,5	6,5	6,5	20,6	18,5	39,1	0,4	0,2
15		810,0	5,9	5,9	15,3	17,2	32,5	0,2	0,5
16		887,4	5,1	5,1	18,0	19,1	37,1	0,6	0,3
17	Máxima	421,6	3,7	3,7	10,0	2,1	12,1	0,4	0,5
18		627,0	4,5	4,5	12,5	4,8	17,3	0,4	0,8
19		840,0	6,6	6,6	18,8	14,0	32,8	0,2	0,7
20		1012,0	6,6	6,6	23,7	14,0	37,7	0,6	0,1
21		882,0	5,9	5,9	17,3	13,7	31,0	0,4	0,5
22		1113,8	7,3	7,3	24,0	18,8	42,8	0,5	0,1
23		840,0	6,3	6,3	18,9	19,2	38,1	0,2	0,8
24		918,0	6,1	6,1	20,8	20,8	41,6	0,3	0,7

Tabela 4.30 Resultados das distorções dos CPs soldados com mistura 95% Ar + 5% O₂.

CP	Faixa	Energia de Soldagem (J/mm)	S ₁ (mm)	S ₂ (mm)	Área A (mm ²)	Área B (mm ²)	Área Total (mm ²)	Distorção Longitudinal (mm)	Distorção Angular (⊥) ^o
25	Mínima	448	4,5	4,5	14,0	2,0	16,0	0,4	0,5
26		600	5,4	5,4	20,3	1,9	22,2	0,3	0,8
27		816	6,3	6,3	25,3	5,7	31,1	0,5	0,6
28		741	5,9	5,9	20,3	7,1	27,3	0,5	0,7
29		682	5,5	5,5	17,7	12,4	30,1	0,3	0,8
30		759	5,6	5,6	18,0	14,0	32,0	0,5	0,7
31		828	6,0	6,0	20,1	15,6	35,7	0,4	0,8
32		925	6,0	6,0	23,5	16,3	39,8	0,3	0,7
33	Intermediária	480	4,5	4,5	14,7	1,9	16,5	0,4	0,5
34		640	5,9	5,9	19,7	2,8	22,5	0,4	0,8
35		864	7,1	7,1	24,4	6,5	30,9	0,4	0,6
36		780	6,7	6,7	22,8	8,9	31,7	0,3	0,7
37		713	6,5	6,5	18,4	10,7	29,1	0,3	0,5
38		792	6,8	6,8	20,8	16,1	36,9	0,4	0,8
39		863	6,6	6,6	20,4	12,0	32,4	0,2	0,8
40		962	7,0	7,0	24,5	16,3	40,8	0,5	0,7
41	Máxima	512	4,0	4,0	15,0	3,4	18,4	0,3	0,6
42		680	5,5	5,5	20,2	5,7	25,9	0,3	0,6
43		912	6,4	6,4	24,4	7,1	31,5	0,5	0,6
44		819	6,7	6,7	22,8	11,1	33,9	0,4	0,7
45		744	5,0	5,0	19,3	11,4	30,7	0,5	0,5
46		825	5,8	5,8	20,0	13,7	33,7	0,4	0,8
47		897	5,6	5,6	20,3	17,8	38,1	0,2	0,8
48		999	5,8	5,8	21,2	17,0	38,2	0,2	0,5

Tabela 4.31 Resultados das distorções dos CPs soldados com mistura 90% Ar + 8% CO₂ + 2% O₂.

CP	Faixa	Energia de Soldagem (J/mm)	S ₁ (mm)	S ₂ (mm)	Área A (mm ²)	Área B (mm ²)	Área Total (mm ²)	Distorção Longitudinal (mm)	Distorção Angular (⊥)°
49	Mínima	456,0	4,2	4,2	12,8	1,1	13,9	0,2	0,8
50		560,0	4,4	4,4	15,6	2,3	17,9	0,2	0,7
51		697,0	6,2	6,2	21,3	4,0	25,3	0,3	0,6
52		912,0	6,2	6,2	24,6	7,5	32,1	0,4	0,6
53		780,0	6,3	6,3	21,0	9,5	30,5	0,4	0,7
54		907,5	6,8	6,8	27,1	12,0	39,1	0,4	0,6
55		768,0	6,0	6,0	22,2	15,1	37,3	0,4	0,8
56		802,3	5,6	5,6	19,8	18,4	38,2	0,4	0,7
57	Intermediária	486,4	4,6	4,6	13,7	3,2	16,9	0,4	0,7
58		595,0	4,8	4,8	15,4	3,3	18,7	0,4	0,6
59		738,0	5,3	5,3	18,5	5,2	23,7	0,4	0,7
60		960,0	7,6	7,6	26,4	9,4	35,7	0,5	0,1
61		819,0	6,9	6,9	20,7	10,5	31,2	0,4	0,7
62		948,8	7,3	7,3	25,0	14,4	39,3	0,5	0,7
63		800,0	5,8	5,8	20,4	18,6	39,1	0,2	0,6
64		833,1	5,4	5,4	18,6	18,6	37,3	0,2	0,7
65	Máxima	516,8	4,6	4,6	13,3	2,0	15,3	0,2	0,7
66		630,0	5,0	5,0	15,8	2,7	18,5	0,3	0,5
67		779,0	5,7	5,7	20,2	5,7	25,9	0,2	0,6
68		1008,0	7,6	7,6	26,4	12,1	38,5	0,3	0,5
69		858,0	6,1	6,1	23,0	13,4	36,4	0,3	0,6
70		990,0	7,5	7,5	26,3	16,8	43,1	0,4	0,8
71		832,0	5,5	5,5	21,1	18,1	39,2	0,2	0,5
72		864,0	5,5	5,5	21,2	18,8	40,0	0,3	0,6

Tabela 4.32 Resultados das distorções dos CPs soldados com mistura 85% Ar + 15% CO₂.

CP	Faixa	Energia de Soldagem (J/mm)	S ₁ (mm)	S ₂ (mm)	Área A (mm ²)	Área B (mm ²)	Área Total (mm ²)	Distorção Longitudinal (mm)	Distorção Angular (⊥)°
73	Mínima	450	4,0	4,0	12,8	1,6	14,4	0,2	0,7
74		612	4,8	4,8	16,4	2,6	19,0	0,1	0,6
75		817	6,0	6,0	21,4	5,2	26,6	0,1	0,5
76		980	7,1	7,1	26,2	9,6	35,8	0,2	0,5
77		819	5,5	5,5	19,9	10,6	30,5	0,2	0,5
78		1033	7,2	7,2	28,2	17,1	45,3	0,2	0,7
79		858	6,0	6,0	20,2	19,5	39,7	0,3	0,8
80		822	5,2	5,2	19,0	20,0	39,0	0,3	0,8
81	Intermediária	480	4,2	4,2	12,4	1,7	14,1	0,2	0,5
82		648	5,0	5,0	16,8	4,0	20,8	0,1	0,5
83		860	6,0	6,0	22,4	7,6	30,0	0,4	0,6
84		1029	7,3	7,3	28,3	12,1	40,4	0,5	0,2
85		858	6,0	6,0	22,1	11,1	33,2	0,4	0,5
86		1076	7,3	7,3	26,0	20,4	46,4	0,2	0,7
87		891	5,5	5,5	20,3	21,6	41,9	0,1	0,8
88		852	5,0	5,0	18,4	22,1	40,5	0,3	0,6
89	Máxima	510	4,1	4,1	11,7	2,7	14,4	0,3	0,8
90		684	5,5	5,5	18,0	3,2	21,2	0,3	0,7
91		903	6,5	6,5	20,5	7,4	27,9	0,3	0,1
92		1078	6,6	6,6	27,4	14,4	41,8	0,4	0,7
93		897	6,5	6,5	23,0	18,4	41,4	0,2	0,5
94		1119	7,6	7,6	27,4	23,4	50,8	0,5	0,6
95		924	6,0	6,0	24,1	24,7	48,8	0,2	0,7
96		882	5,2	5,2	20,3	20,9	41,2	0,4	0,5

Tabela 4.33 Resultados das distorções dos CPs soldados com mistura 98% Ar + 2% O₂.

CP	Faixa	Energia de Soldagem (J/mm)	S ₁ (mm)	S ₂ (mm)	Área A (mm ²)	Área B (mm ²)	Área Total (mm ²)	Distorção Longitudinal (mm)	Distorção Angular (⊥)°
97	Mínima	420	4,0	4,0	12,8	1,8	14,6	0,4	0,8
98		544	4,5	4,5	17,9	1,2	19,1	0,3	0,7
99		782	6,0	6,0	22,3	3,7	26,0	0,4	0,6
100		961	6,6	6,6	24,8	5,6	30,4	0,3	0,6
101		851	7,0	7,0	25,5	7,3	32,8	0,4	0,9
102		1134	7,9	7,9	27,3	13,3	40,6	0,3	0,9
103		936	6,7	6,7	22,0	13,2	35,2	0,1	0,8
104		1080	8,0	8,0	27,4	23,0	50,4	0,3	7,0
105	Intermediária	450	3,5	3,5	13,5	1,3	14,8	0,3	0,7
106		510	4,2	4,2	16,8	2,0	18,8	0,4	0,7
107		736	5,8	5,8	23,7	7,5	31,2	0,4	0,5
108		911	6,5	6,5	27,1	7,5	34,6	0,2	0,6
109		810	7,2	7,2	23,6	8,0	31,6	0,4	0,8
110		1087	7,6	7,6	26,9	16,6	43,5	0,4	0,7
111		900	6,0	6,0	22,3	13,1	35,4	0,3	0,7
112		1040	7,2	7,2	32,3	21,4	53,7	0,4	0,6
113	Máxima	480	4,6	4,6	14,4	1,7	16,1	0,2	0,8
114		578	4,8	4,8	15,7	2,6	18,3	0,4	0,6
115		828	6,5	6,5	22,9	4,5	27,4	0,4	0,5
116		1012	7,1	7,1	28,0	5,6	33,6	0,5	0,7
117		891	7,2	7,2	26,4	12,5	38,9	0,5	0,7
118		1181	7,1	7,1	25,6	19,3	44,9	0,3	0,5
119		972	6,1	6,1	22,9	15,5	38,4	0,3	0,7
120		1120	6,9	6,9	26,0	18,4	44,4	0,5	0,8

Tabela 4.34 Resultados das distorções dos CPs soldados com mistura 100% CO₂.

CP	Faixa	Energia de Soldagem (J/mm)	S ₁ (mm)	S ₂ (mm)	Área A (mm ²)	Área B (mm ²)	Área Total (mm ²)	Distorção Longitudinal (mm)	Distorção Angular (⊥)°
121	Mínima	580	4,8	4,8	13,8	6,8	20,6	0,1	0,8
122		714	5,3	5,3	16,5	8,0	24,5	0,2	0,7
123		897	6,0	6,0	22,0	10,5	32,5	0,4	0,8
124		1100	6,3	6,3	23,2	18,1	41,3	0,3	0,5
125		936	6,0	6,0	18,4	21,5	39,9	0,3	0,7
126		1053	6,6	6,6	21,5	22,8	44,3	0,2	0,8
127		870	6,0	6,0	20,5	26,3	46,8	0,3	0,8
128		905	5,5	5,5	19,9	26,5	46,4	0,2	0,8
129	Intermediária	609	5,0	5,0	13,8	7,4	21,2	0,3	0,8
130		748	5,3	5,3	15,6	9,4	25,0	0,2	0,7
131		936	5,9	5,9	18,6	13,7	32,3	0,4	0,8
132		1144	6,6	6,6	20,6	18,9	39,5	0,4	0,7
133		972	6,2	6,2	18,9	20,1	39,0	0,5	0,6
134		1092	7,0	7,0	24,0	24,8	48,8	0,2	0,6
135		899	5,6	5,6	16,9	22,3	39,2	0,4	0,5
136		933	5,4	5,4	19,1	30,4	49,5	0,4	0,6
137	Máxima	638	5,4	5,4	14,6	8,7	23,3	0,3	0,5
138		782	6,5	6,5	18,9	13,2	32,1	0,4	0,8
139		975	7,0	7,0	21,0	15,1	36,1	0,4	0,7
140		1188	6,5	6,5	22,3	23,5	45,8	0,4	0,5
141		1008	6,0	6,0	19,9	19,5	39,4	0,1	0,5
142		1131	6,6	6,6	25,1	27,7	52,8	0,4	0,5
143		928	6,0	6,0	21,4	24,2	45,6	0,1	0,8
144		962	6,0	6,0	21,3	30,5	51,8	0,4	0,8

Para um melhor entendimento a respeito da avaliação que foi feita sobre as distorções geradas pela soldagem, os resultados da medição da distorção angular e da distorção longitudinal de flexão são apresentados separadamente.

4.4.1 Distorção Longitudinal de Flexão

Assumindo que a força de contração F é proporcional a área total da secção da solda, conforme **Equação 2.9** e **Figura 2.20**, então, para comparar os resultados obtidos e registrados, nas **Tabelas 4.29** à **Tabela 4.34** com os resultados da **Equação 2.9** foram graficamente plotados os resultados das distorções para melhor compreensão.

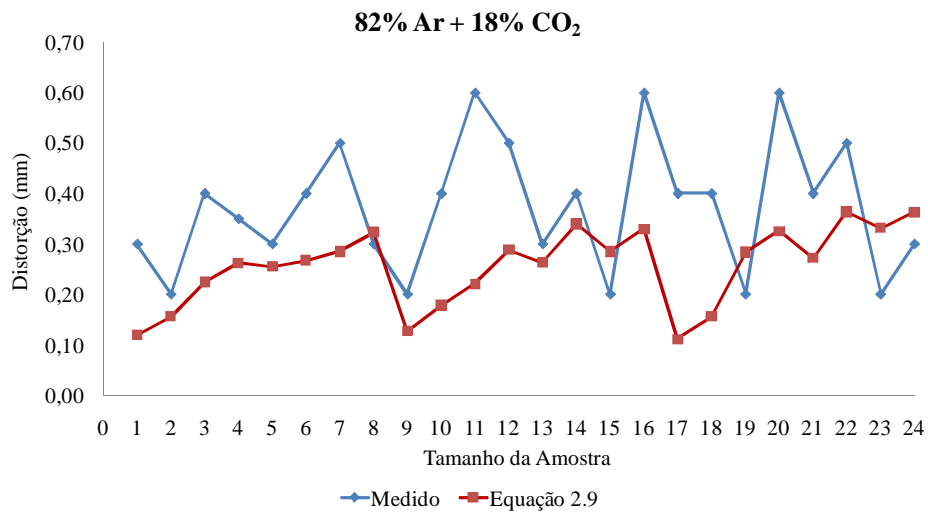


Figura 4.41 Análise comparativo da distorção entre calculado e medido para mistura 82% Ar + 18% CO₂.

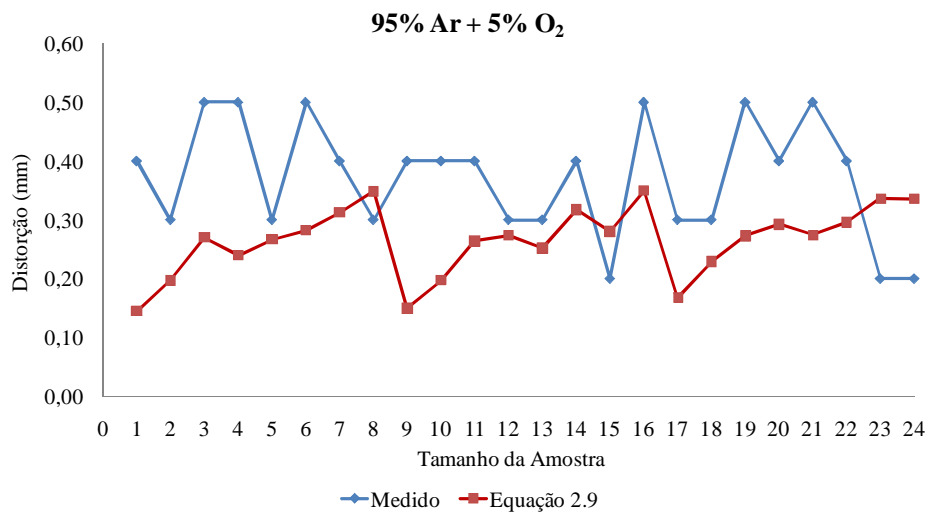


Figura 4.42 Análise comparativo da distorção entre calculado e medido para mistura 95% Ar + 5% O₂.

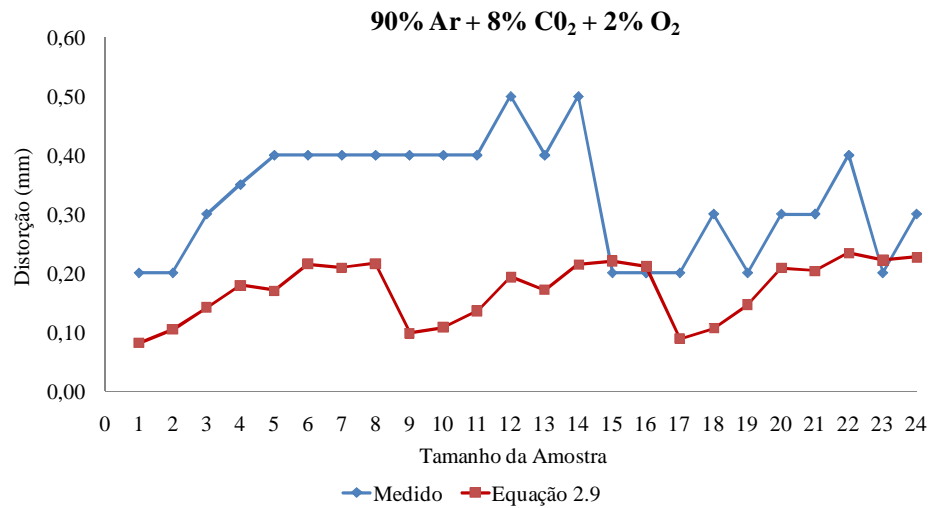


Figura 4.43 Análise comparativo da distorção entre calculado e medido para mistura 90% Ar + 8% CO₂ + 2% O₂.

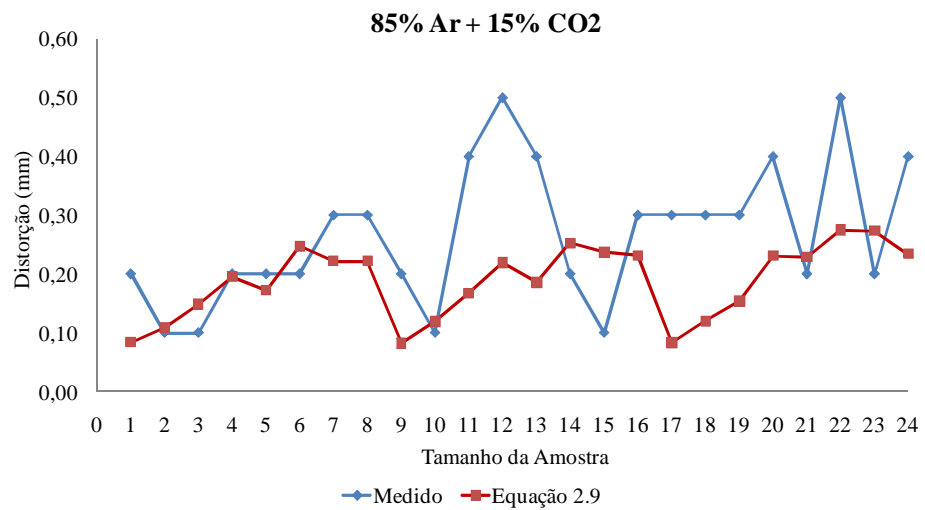


Figura 4.44 Análise comparativo da distorção entre calculado e medido para mistura 85% Ar + 15% CO₂.

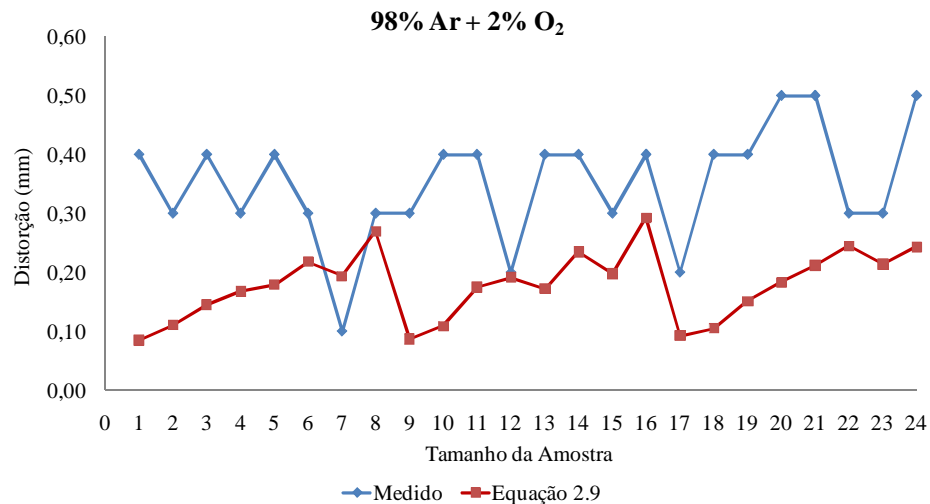


Figura 4.45 Análise comparativo da distorção entre calculado e medido para mistura 98% Ar + 2% O₂.

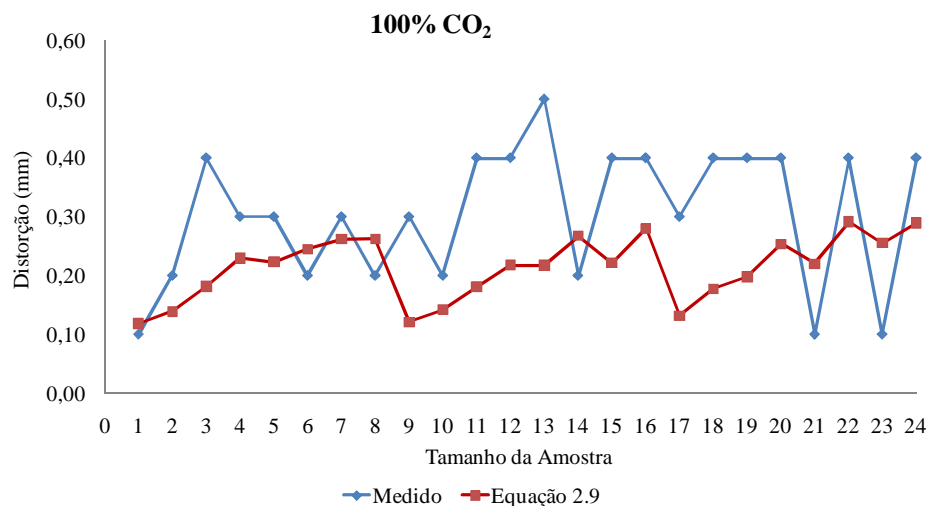


Figura 4.46 Análise comparativo da distorção entre calculado e medido para mistura 100% CO₂.

As figuras apenas mostram os resultados das medições realizadas nos corpos de prova após a soldagem, comparando com os resultados encontrados utilizando a **Equação 2.9**, que deriva das variáveis como, área total da seção transversal do cordão de solda, distância da linha neutra até o centro das soldas, comprimento da junta e momento de inércia da junta.

As maiorias dos resultados encontrados nas medições variaram entre 0,2 mm a 0,4 mm das distorções foram superiores dos resultados encontrados através do cálculo, porém existe uma relação em praticamente todas as condições onde os resultados tendem para a mesma direção.

Como as chapas somente foram endireitadas e não foram medidas antes da soldagem, pode ter ocorrido que algumas chapas não ficaram completamente retas, isto pode ter contribuído para aqueles resultados que apresentaram uma distorção longitudinal muito superior em relação aos outros.

Na **Figura 4.47** apresentam os resultados da distorção longitudinal *versus* energia de soldagem (J/mm) soldados com os parâmetros das **Tabelas 4.1 – 4.6** com diferentes misturas de gás.

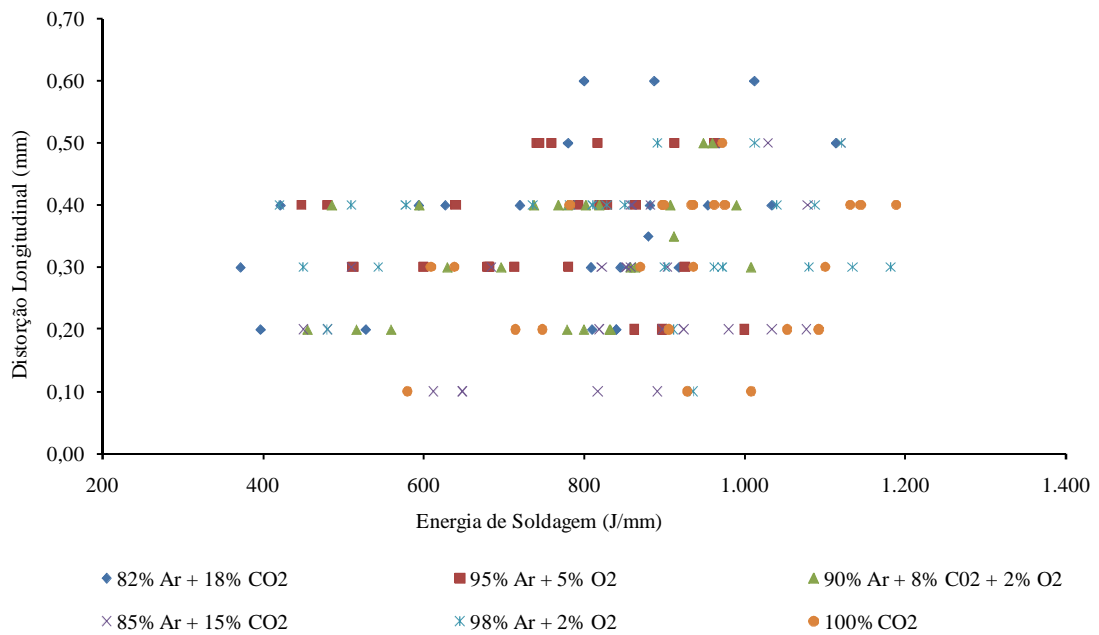


Figura 4.47 Distorção longitudinal em função da energia de soldagem.

A maioria dos resultados das distorções teve uma pequena variação entre 0,2 mm e 0,4 mm e não houve praticamente variação em função da energia de soldagem e em função do tipo de gás de proteção, isto provavelmente por causa da junta estar restringida em quatro pontos conforme **Figura 3.1**.

Para determinar distorção longitudinal de flexão em função da energia de soldagem foi desenvolvida uma equação através de regressão usando uma curva não linear, portanto para determinar Δl da junta pode utilizar a **Equação 4.27**.

$$\Delta l = a * E^2 + b * E + c \dots\dots\dots(4.27)$$

Onde Δl , é a distorção longitudinal de flexão, E energia de soldagem e as seguintes constantes $a = 5,26059 * 10^{-8}$ $b = - 5, 67159 * 10^{-5}$ e $c=0,33713$. A distorção longitudinal tende a aumentar com o aumento da energia de soldagem.

A **Figura 4.48** apresenta os resultados da distorção longitudinal *versus* área da seção transversal do cordão de solda com diferentes misturas de gás.

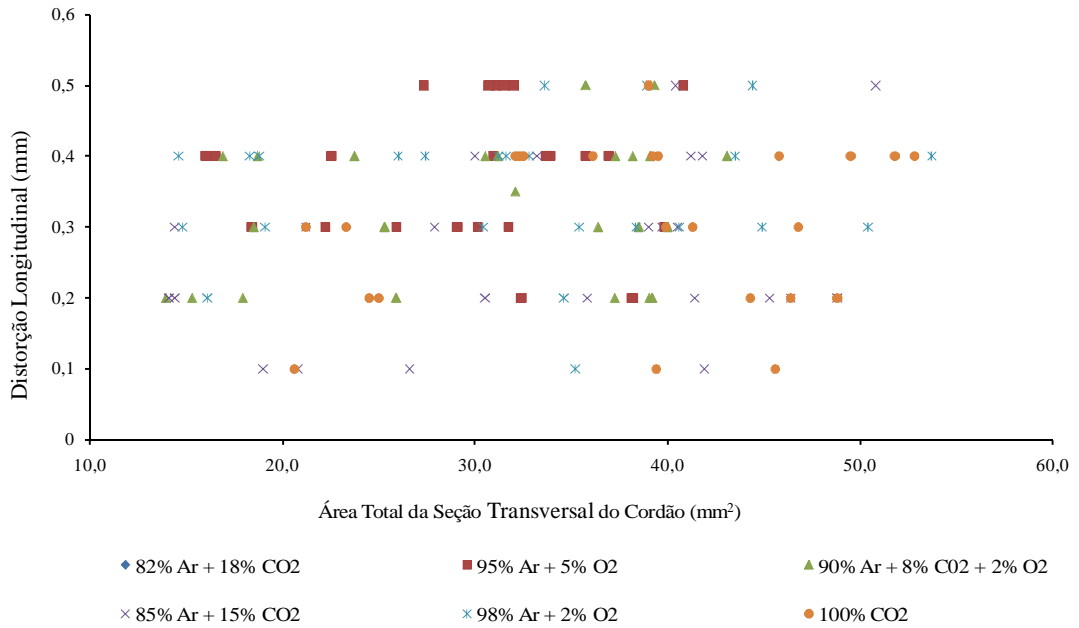


Figura 4.48 Distorção longitudinal em função da área seção transversal do cordão de solda.

A maioria dos resultados das distorções teve uma pequena variação entre 0,2 mm e 0,4 mm e não houve praticamente variação em função da área da seção transversal do cordão de solda e em função do tipo de gás de proteção, isto provavelmente pela mesma razão mencionada anteriormente da junta estar restringida em quatro pontos conforme **Figura 3.1**.

Para determinar distorção longitudinal de flexão em função da área da seção transversal do cordão de solda foi desenvolvida uma Equação através de regressão usando uma curva não linear, portanto para determinar a distorção Δl da junta pode utilizar a **Equação 4.28**.

$$\Delta l = a * A_s^2 + b * A_s + c \dots\dots\dots(4.28)$$

Onde Δl , é a distorção longitudinal de flexão, A_s área da seção transversal do cordão de solda e as seguintes constantes $a = -2,82468 * 10^{-5}$ $b = 1,748634 * 10^{-3}$ e $c=0,30337$.

A distorção longitudinal aumenta com o aumento da área da seção do cordão, porém existe um limite, quando a área da seção aproxima de 30 mm^2 , a distorção começa a decrescer.

4.4.2 Distorção Angular

Como a mudança angular depende principalmente do tamanho do filete de solda, espessura do flange e os procedimentos de soldagem, aqui serão aprestados os valores encontrados das distorções angulares nos corpos de provas soldados com os parâmetros das Tabelas 4.29 à Tabela 4.34, comparando com valores resultantes das equações 2.4 e 2.8, conforme mostram as figuras a seguir.

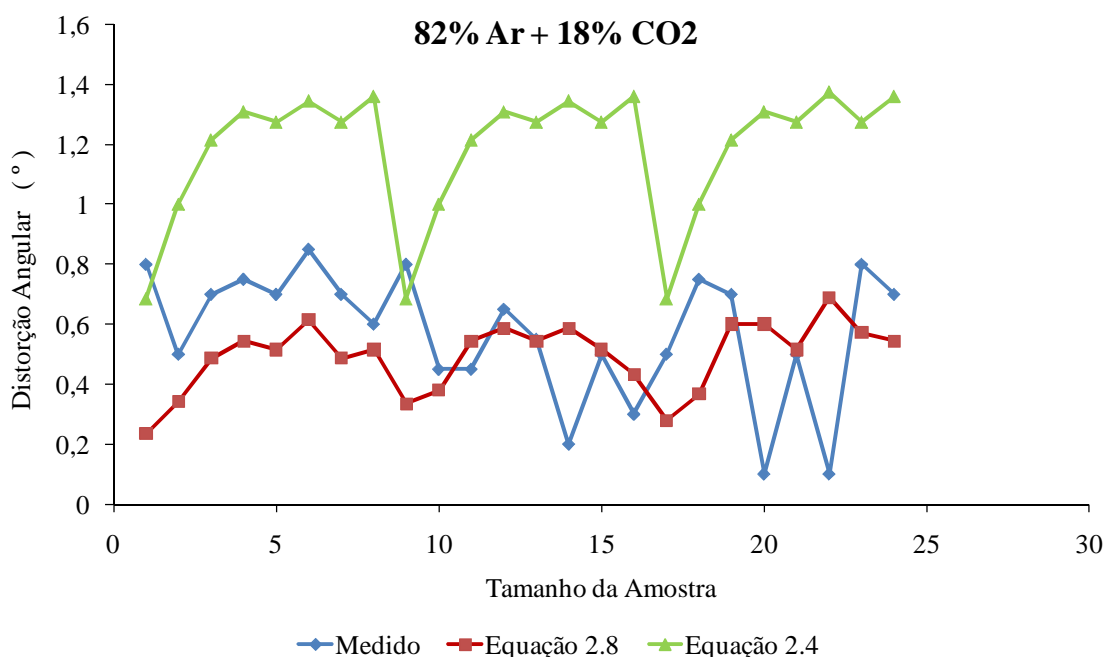


Figura 4.49 Análise comparativo da distorção angular entre calculado e medido para mistura 82% Ar + 18% CO₂.

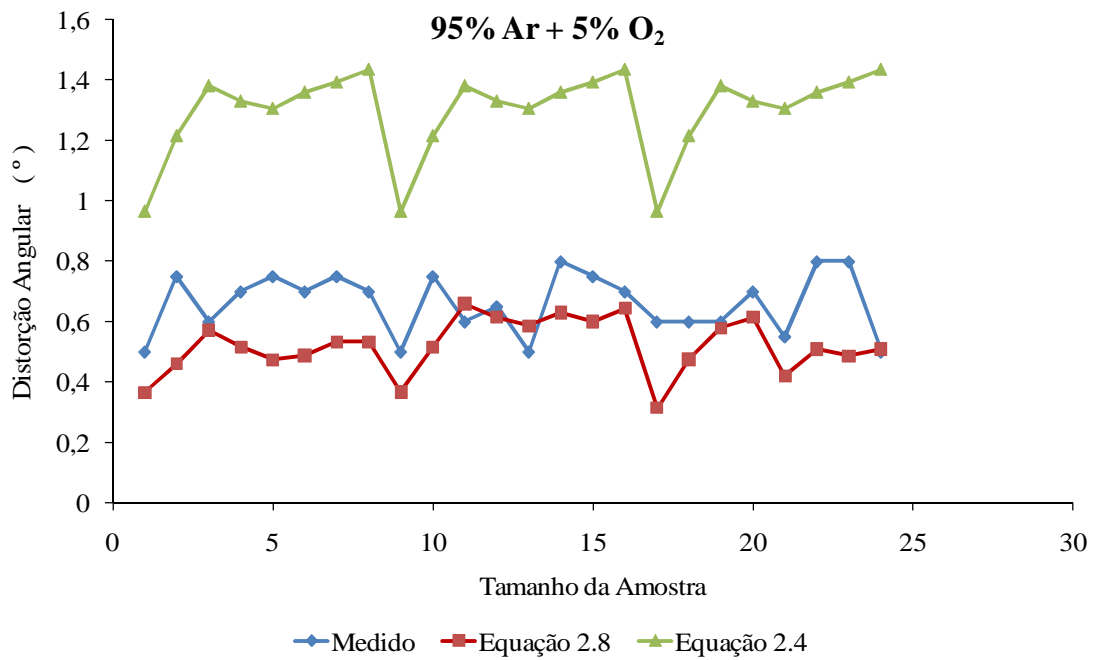


Figura 4.50 Análise comparativo da distorção angular entre calculado e medido para mistura 95% Ar + 5% O₂

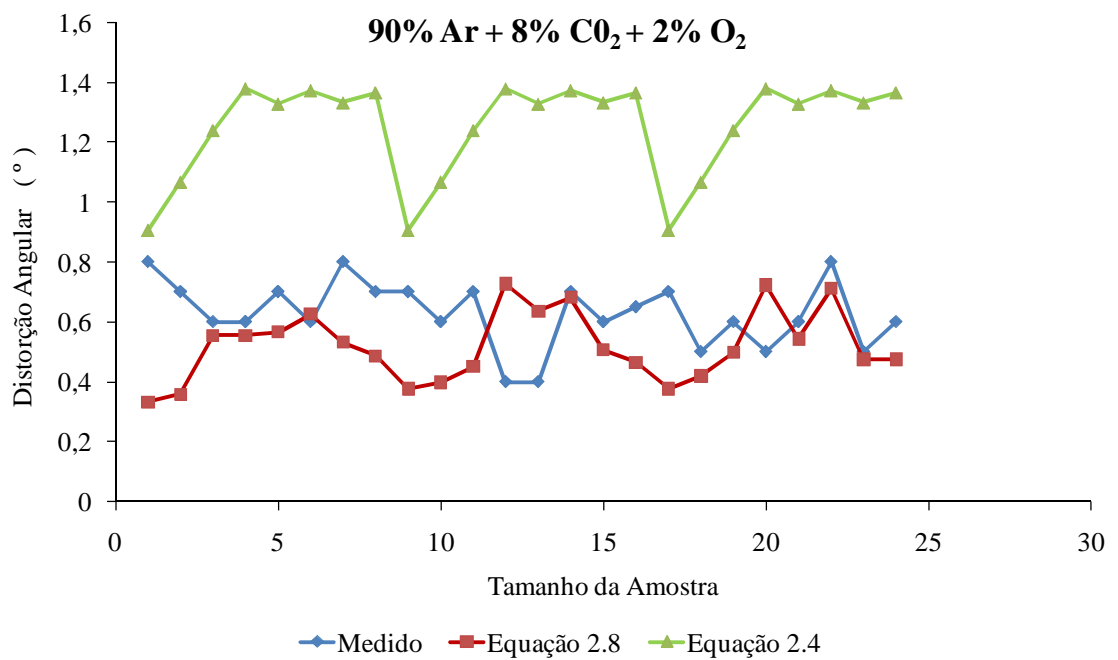


Figura 4.51 Análise comparativo da distorção angular entre calculado e medido para mistura 90% Ar + 8% CO₂ + 2% O₂

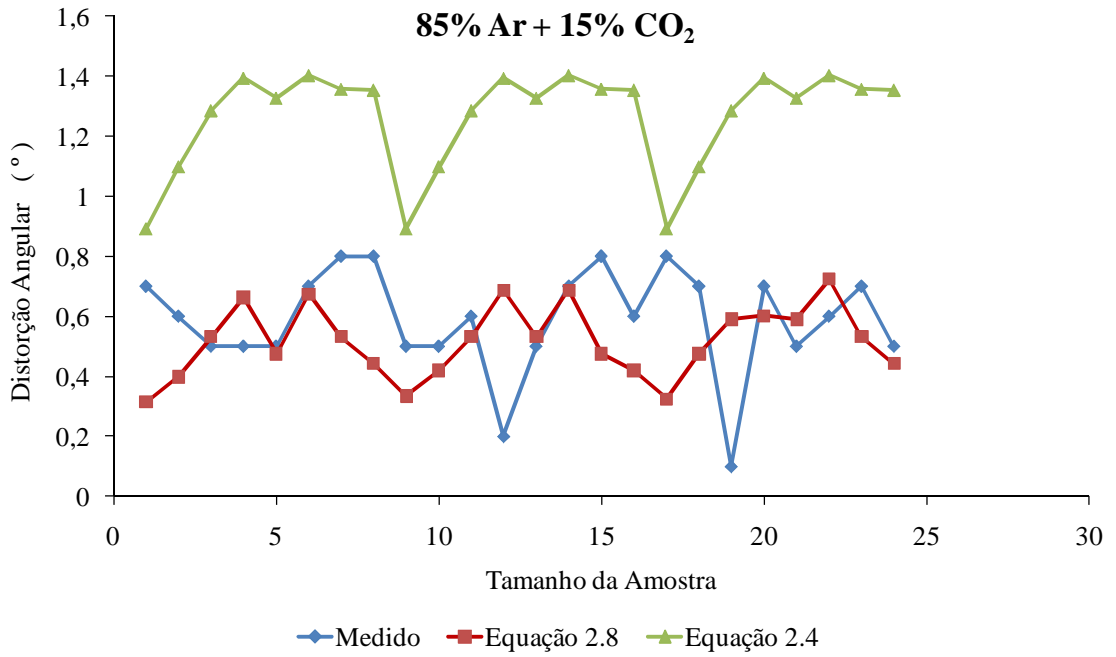


Figura 4.52 Análise comparativo da distorção angular entre calculado e medido para mistura 85% Ar + 15% CO₂

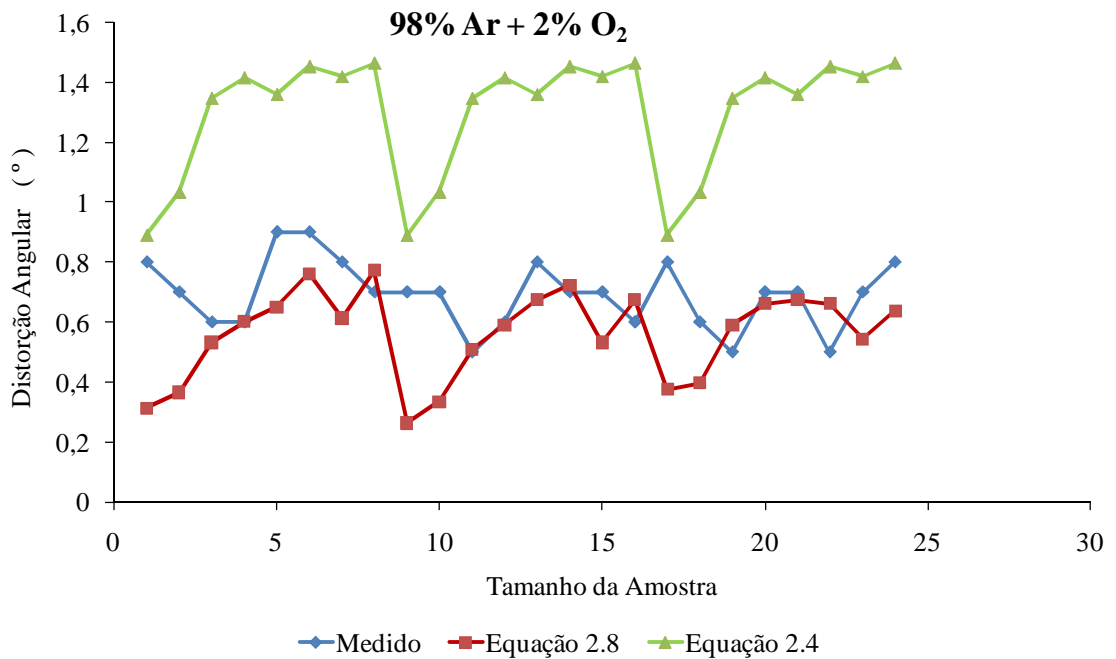


Figura 4.53 Análise comparativo da distorção angular entre calculado e medido para mistura 98% Ar + 2% O₂.

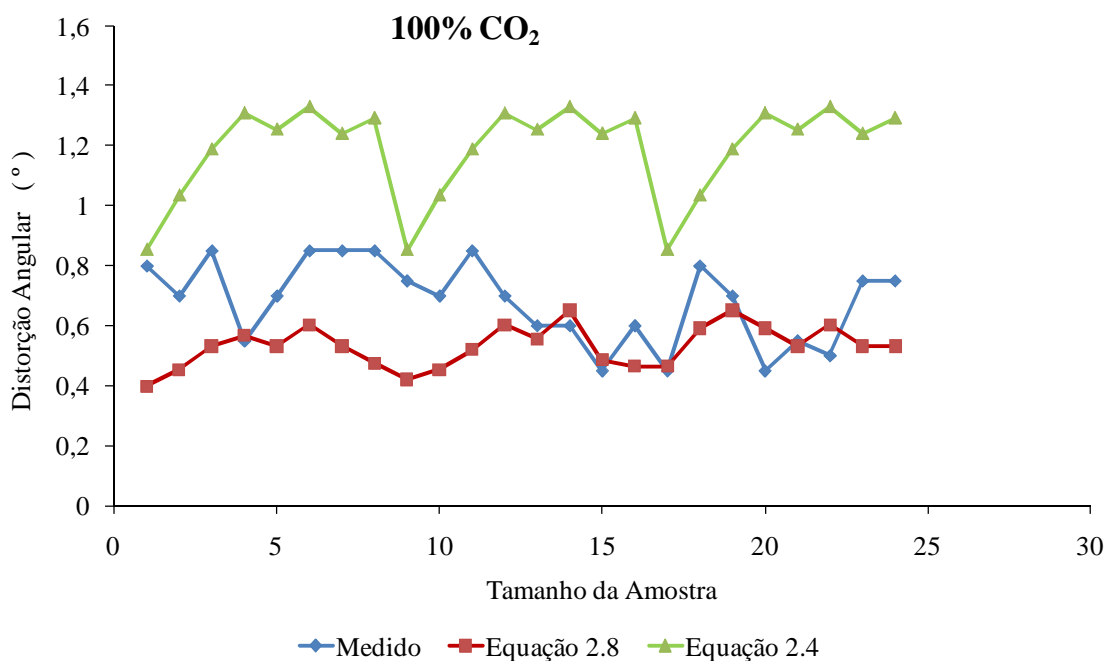


Figura 4.54 Análise comparativo da distorção angular entre calculado e medido para a mistura 100% CO₂.

As **Figuras 4.49 a 4.54** apresentam os resultados das medições realizadas nos corpos de prova após a soldagem, comparando com os resultados encontrados utilizados das **Equações 2.4 e 2.8**, que deriva das variáveis como: corrente de soldagem, tensão, velocidade de soldagem, espessura e largura do flange, sendo que a distorção angular varia diretamente com a largura flange e tamanho da solda e inversamente com a espessura do flange ([The Procedure Handbook o Arc Welding, 2000](#)).

A maioria dos resultados encontrados nas medições variou entre 0,4° a 0,8°, comparando os resultados a **Equação 2.8** foi que teve os resultados mais próximos dos experimentos. Já a **Equação 2.4** apresentou resultados muito superiores dos encontrados nos experimentos.

Como podemos ver nas **Figuras 4.49 a 4.54** a mistura de gás de proteção não teve influência considerável na distorção angular dos corpos de provas.

A **Figura 4.55** apresenta a variação da distorção angular em função da energia de soldagem, como pode ser visto não houve valores significativos de distorção angular em função da energia da soldagem, houve somente uma maior concentração de distorção entre 800 a 1000 (J/mm). Outro fator importante é que a mistura de gás de proteção também não teve influência na distorção angular.

O fator que pode ter influenciado para que os resultados das distorções tivessem valores e variação similar foi devido à junta estar restringida em quatro pontos conforme **Figura 3.1**.

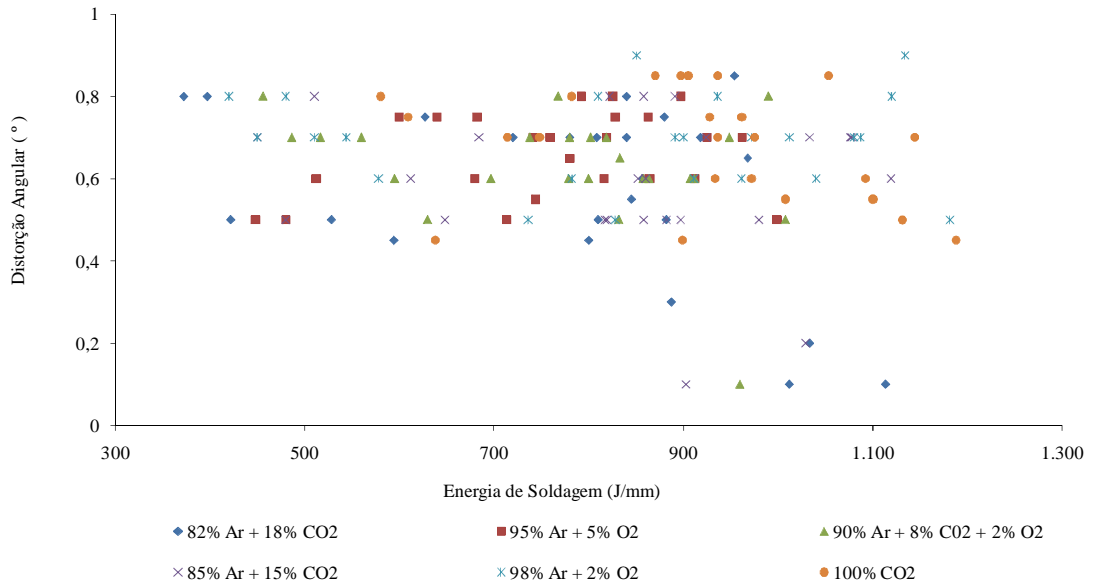


Figura 4.55 Distorção angular em função da energia de soldagem.

Para determinar distorção angular em função da energia de soldagem foi desenvolvida uma Equação através de regressão usando uma curva não linear, portanto para Determinar da distorção f da junta pode utilizar a **Equação 4.29**.

$$f = a * E^2 + b * E + c \dots\dots\dots(4.29)$$

Onde f , e a distorção angular, E energia de soldagem e as seguintes constantes $a = -2,21675 * 10^{-7}$ $b = 3,47028 * 10^{-4}$ e $c=0,49996$.

A distorção angular aumenta com o aumento da energia de soldagem, porém existe um limite, quando a energia de soldagem aproxima de 800 J/mm a distorção começa a decrescer.

A **Figura 4.56** mostra os resultados às variações das distorções em função da área da junta soldada. Como pode ser visto não houve valores significativos de distorção angular em função da seção transversal do cordão de solda, houve somente uma maior concentração de distorção entre as áreas 30 a 40 mm². Outro fator importante é que a mistura de gás de proteção também não teve influência na distorção angular.

O fator que pode ter influenciado para que os resultados das distorções tivessem valores e variação similar foi devido à junta estar restringida em quatro pontos conforme **Figura 3.1**.

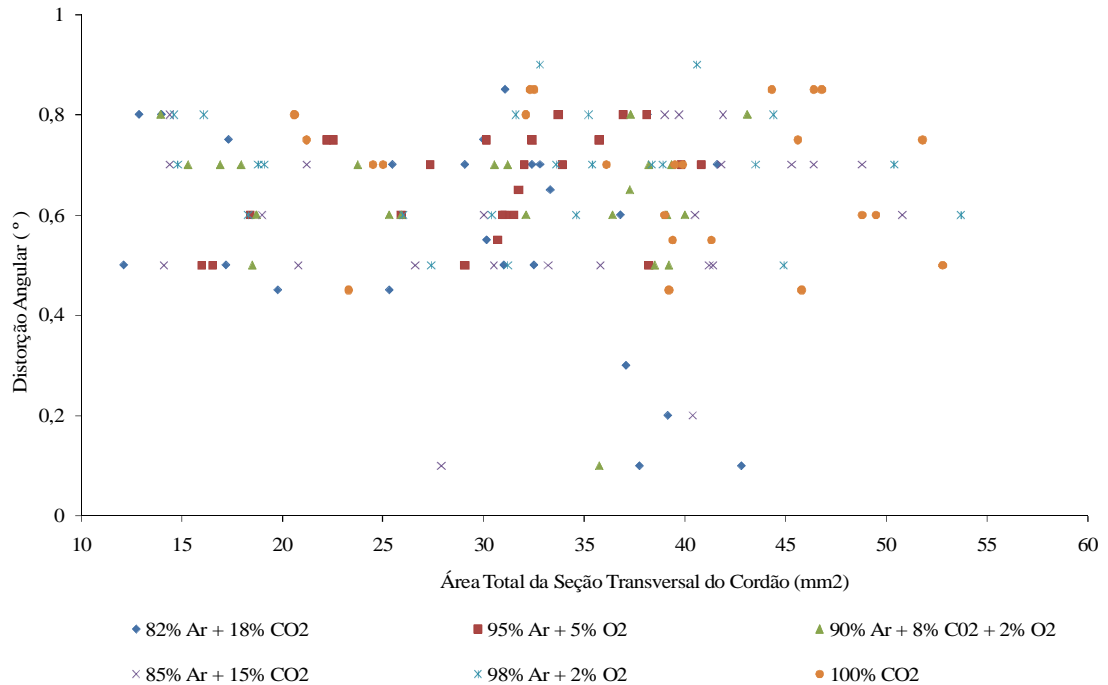


Figura 4.56 Distorção angular em função da área da seção transversal do cordão de solda.

Para determinar distorção angular em função da área da seção transversal do cordão de solda foi desenvolvida uma equação através de regressão usando uma curva não linear, portanto para Determinar da distorção f da junta pode utilizar a **Equação 4.30**.

$$f = a * A_s^2 + b * A_s + c \dots\dots\dots(4.30)$$

Onde f , e a distorção angular, A_s área da seção transversal do cordão de solda e as seguintes constantes $a = - 1, 90957 * 10^{-5}$ $b = 1, 535207 * 10^{-3}$ e $c=0,600686$.

A mudança angular praticamente não muda com aumento da seção da área do cordão de solda, a linha de tendência tende a ser plana.

4.4.3 Distorção Longitudinal e Distorção Angular em Juntas sem Restrição

Para analisar os efeitos da distorção em juntas sem restrição foi utilizado o método seguinte: Somente foi fixado um lado da junta a alma deixando o flange livre para execução das soldas.

Os parâmetros utilizados para soldagem dos CPs estão especificados na **Tabela 3.9**. Na **Figura 4.57** mostra os resultados da distorção longitudinal em função da energia de soldagem em uma junta livre sem restrição.

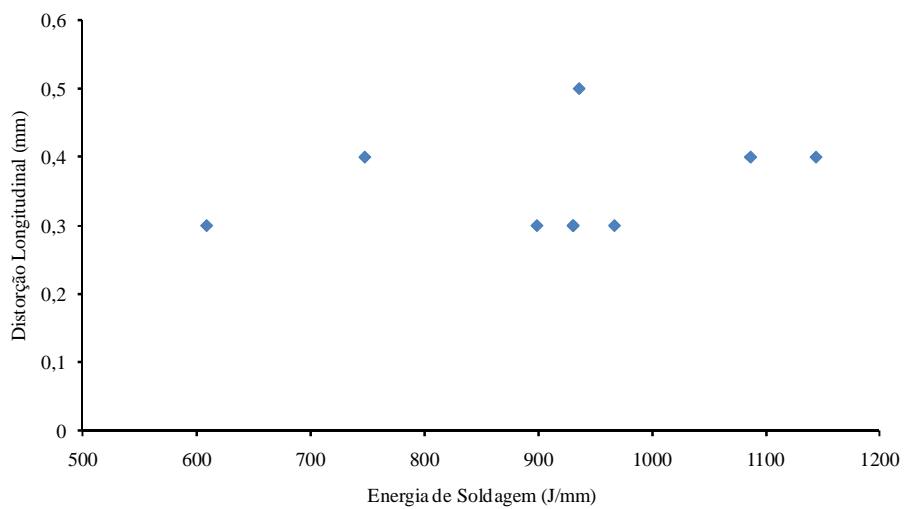


Figura 4.57 Distorção longitudinal versus energia de soldagem junta sem restrição.

Como pode-se observar a distorção longitudinal aumenta em função da energia de soldagem.

Para estimar a distorção longitudinal de flexão em juntas sem restrição em função da energia de soldagem pode ser usada a **Equação 4.31**.

$$d = a * E^2 + b * E + c \dots\dots\dots(4.31)$$

Onde δ é a distorção de flexão em juntas livres, E energia de soldagem as constantes $a = 4,034307 * 10^{-8}$, $b = 6,22160 * 10^{-5}$, $c = 0,27074$

Na **Figura 4.58** mostra a variação da distorção longitudinal em função da área da seção transversal do cordão de solda.

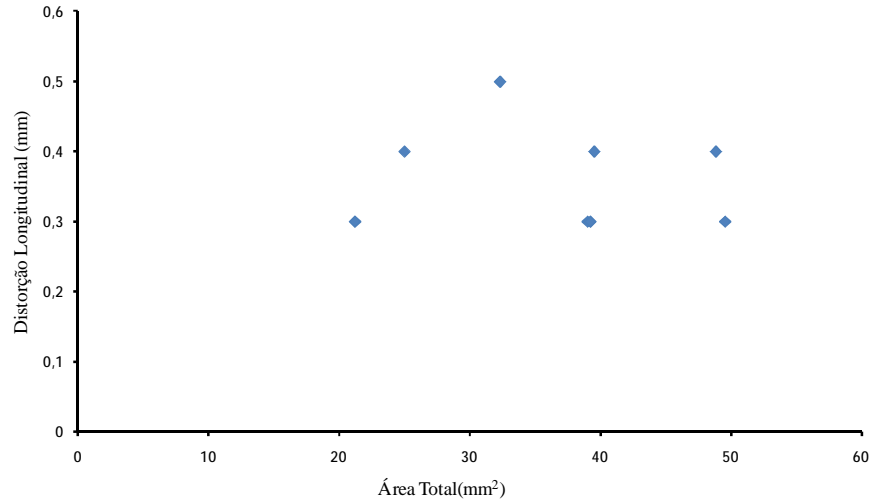


Figura 4.58 Distorção longitudinal *versus* área da seção transversal do cordão.

Conforme aumenta a área da seção do cordão de solda diminui a distorção longitudinal, isto muito provavelmente porque ocorre também um aumento na penetração da solda fazendo com que ocorra uma melhor distribuição da solda.

Para prever a variação da distorção angular em função da área do cordão de solda a **Equação 4.32** pode ser usada.

$$d = a * A_s^2 + b * A_s + c \dots\dots\dots(4.32)$$

Onde δ é a distorção de flexão em juntas livres, A_s , área da seção transversal do cordão de solda as constantes $a = -2,45576 * 10^{-4}$, $b = 0,01664$, $c = 0,10486$.

Na **Figura 4.59** mostra as variações das distorção angular em função da energia de soldagem.

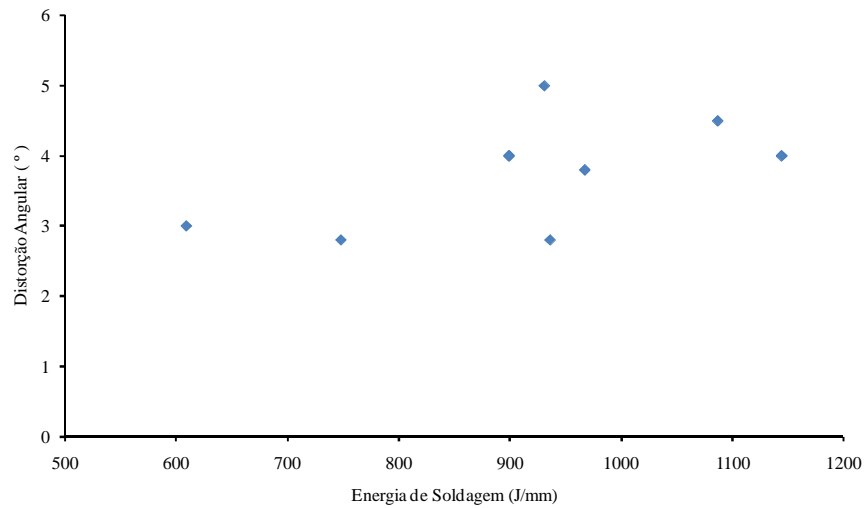


Figura 4.59 Distorção angular *versus* energia de soldagem.

A variação da distorção angular em função da energia de soldagem em juntas sem restrição consideravelmente.

Esta variação pode ser prevista estimada pela **Equação 4.33** descrita abaixo:

$$f = a * E^2 + b * E + c \dots\dots\dots(4.33)$$

Onde f é a distorção angular em juntas livres, E energia de soldagem as constantes $a = -2,18103 * 10^{-6}$, $b = 6,58626 * 10^{-3}$, $c = -0,40665$.

A **Figura 4.60** apresenta a variação da distorção angular em função da área da seção transversal do cordão de solda.

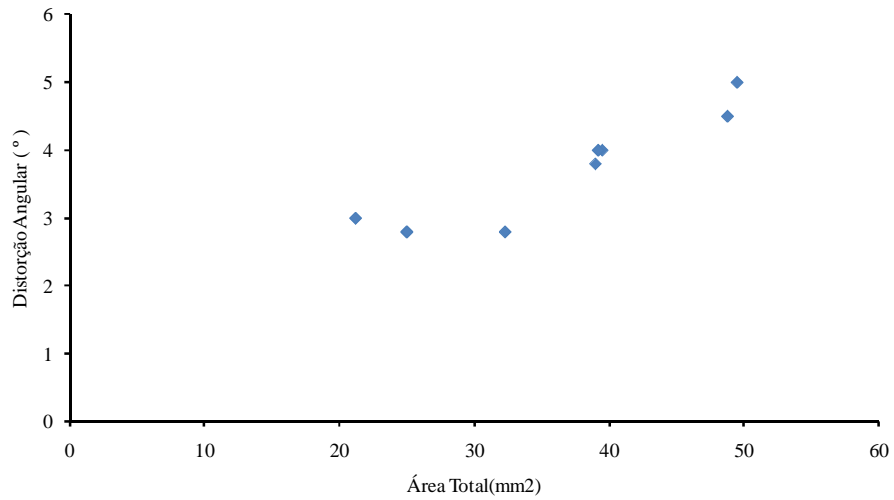


Figura 4.60 Distorção angular *versus* área da seção transversal do cordão.

Conforme ocorre o incremento da área da seção do cordão também aumenta a distorção angular em juntas sem restrição, esta variação é muito superior se comparado com a variação de uma junta restringida conforme já citado anteriormente.

Esta variação pode ser prevista estimada pela **Equação 4.34** descrita abaixo:

$$f = a * A_s^2 + b * A_s + c \dots\dots\dots(4.34)$$

Onde f é a distorção angular em juntas livres, A_s , área da seção transversal do cordão de solda as constantes $a = 2,05123 * 10^{-3}$, $b = -7,2499 * 10^{-2}$, $c = 3,44047$.

5 CONCLUSÃO

Conforme os resultados obtidos através dos experimentos e as análises realizadas, podem ser admitidas como válidas as seguintes conclusões, desde que sejam seguidos corretamente todos os parâmetros utilizados nos diversos experimentos.

1. Os parâmetros de soldagem (corrente, tensão e velocidade de soldagem) afetam diretamente a geometria do cordão de solda.
2. O tipo de mistura de gás de proteção tem efeito sobre a geometria do cordão de solda, diluição, produtividade e economia na soldagem.
3. O tipo de gás de proteção tem pouca influência sobre a taxa de fusão do eletrodo, porém a mistura 98 % argônio e 2 % O₂ apresentou a maior taxa de fusão.
4. O tipo de gás de proteção tem grande influência sobre a energia de soldagem; misturas de argônio com O₂ possibilitam fazer soldas com correntes muito superiores às aquelas com argônio e CO₂.
5. O tipo de gás de proteção tem grande influência sobre a tensão de soldagem para estabilização do arco, com as outras condições de soldagens iguais; misturas de argônio com O₂ necessitam menores tensões.
6. A mistura do gás de proteção argônio com 5 % O₂ apresentou melhor eficiência do eletrodo.
7. A distorção longitudinal de flexão e distorção angular depende da restrição da junta soldada, da seção da área do cordão de solda e da energia de soldagem.
8. As equações propostas nesse trabalho para determinação das variáveis do processo de soldagem, geometria do cordão de solda e quantificação de distorções apresentaram resultados satisfatórios em algumas condições.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões de trabalhos futuros, os seguintes assuntos podem ser estudados:

- Desenvolver envelopes operacionais para outros diâmetros de arame como (0,8 mm, 1,0 mm e 1,6 mm).
- Estudar para cada envelope operacional os modos de transferência do metal de solda desde o eletrodo para a peça e o intervalo da corrente de transição (para aerossol).
- Desenvolver envelopes operacionais com velocidades de soldagem acima de 11,7 mm/s.
- Estudar a influência da velocidade de soldagem sobre a macroestrutura de solidificação do metal de solda.
- Determinar os custos na soldagem MAG robotizada.
- Estudar os efeitos da restrição da junta sob o cordão de solda.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen, T. T., Richardson, R. W., Tagliabue, D. P., AND Maul, G. P., **Statistical Process Design for Robotic GMA Welding of Sheet Metal**. Welding Journal, vol. 85, nº.5, p. 69-S-77-S, May, 2002.

Altshuller, B. **A Guide to GMA Welding of Aluminum**. Welding Journal, vol. 77 nº 6, pp. 49, June, 1998.

Anderson, C., **Advances in Wire-Feeder Technology**. Welding Design & Fabrication v. 79, nº. 3 pp. 24-26, March, 2006.

ASM Handbook, Vol. 6. **Welding, Brazing and Soldering**. American Society for Metals, Vol. 6, 1993. Davies et al. eds., Materials Park, Ohio: ASM Internacional.

AWS A5.18, **Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding**. American Welding Society, Miami, USA.

AWS D1.1, **Structural Welding Code - Steel, Annex XI, 19th Ed.**, American Welding Society (AWS), Miami, USA, 2004.

AWS Welding Handbook, **Welding Processes – Arc and Gas Welding and Cutting, Brazing, and Soldering**. American Welding Society, 7^a ed., vol. 2, 1978

AWS Welding Process, **Fundamentals of Welding**. American Welding Society, 7^a ed. vol. 1, Miami, AWS, 1976.

AWS Welding Process, **Welding Technology**, American Welding Society, 8^a ed. vol. 1, Miami, AWS, 1991.

Backman, A. Gustavasson, B., Svensson, E., **Welding consumables for the 1990's**, Materials & Design, vol. 11, p. 291-300, Issue 6, December, 1990.

Barra, S. et al. **Avaliação dos Efeitos da Variação dos Parâmetros/Procedimentos de Soldagem e Automação, Sobre a Planicidade e Aspecto Superficial dos Revestimentos Empregados em Turbinas Hidráulicas.** In: XXIV ENTS, Fortaleza, Setembro, 1998.

Bhide, S. R., et. al., **Comparison of Buckling Distortion Propensity for SAW, GMAW, and FSW.** Welding Journal, v. 85, n°. 9, p. 189S-95S, September, 2006.

Bloch, S.C. **Excel for Engineers and Scientists, 2nd Edition.** University of South Florida, January, 2003, 304 p.

Blodgett, O. W., **Design of Weldments.** Imprensa Cleveland, James F. Lincoln Arc Welding Foundation, 1963.

Canto, M. A, A., **Influência dos Gases de Proteção Utilizados no Processo MIG/MAG sobre as Propriedades Mecânicas do Metal de Solda.** 1990. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais - PPGEM, UFRGS, Porto Alegre.

Chandel, R. S., Seow, H. P., Cheong, F. L., **Effect of Increasing Deposition Rate on the Bead Geometry of Submerged Arc Welds.** Journal of Materials Processing Technology, v. 72, Issue 1, p. 124-128, 1 December, 1997.

Chayoukhi, S., Zoubeir, Z., Bouaziz, Zghal, A., **Cost Estimation of Joints Preparation for GMAW Welding Process using Feature Model.** Journal of Materials Processing Technology, vol.199, Issue 1-3, p.402 -411, April, 2008.

Cortina, P., **Solid Wire vs. Metal Cored Wire: Which Should Be Used to Optimize the Robotic Process.** Welding Journal, vol. 84, n°. 5, p. 30-32, May, 2005.

Dillenbeck, V. R., Castangno, L., **The Effects of Various Shielding Gases and Associated Mixtures in GMA Welding of Mild Steel,** Welding Journal, vol. 66, p. 45-49, September, 1987.

Gonghyun, J., **Plasticity-Based Distortion Analysis for Fillet Welded Thin-Plate T-Joints.** 2003. Dissertation, (Degree Doctor) - Welding Engineering Graduate Program - School of The Ohio State University.

Hartwig, D. D., et. al., **Arc Behavior and Melting Rate in the VP-GMAW Process.** Welding Journal, v. 85, n°. 3, p. 52S-62S, March, 2006.

Hu, J. Tsai, H.L., **Heat and Mass Transfer in Gas Metal Arc Welding. Part I: The Arc.** International Journal of Heat and Mass Transfer. vol. 50, p. 833-846, October, 2006.

Iordachescu, D., Quintino, L., **Steps Toward a New Classification of Metal Arc Welding.** Journal of Materials Processing Technology, vol. 202, Issues 1-3, p. 391-397, June, 2008.

Jang, K. C., et al., **Welding and Environmental Test Condition Effect in Weldability and Strength of Al-Alloy,** Journal of Materials Processing Technology, vol. 164–165, p. 1038 – 1045, May, 2005.

Johnsen, M. R., et. al., **What's New in Production Welding Machines?** Welding Journal, v. 81 n°. 8, p. 29-29, August, 2002.

Johnsen, M. R., et. al., **What's Up with Wire Feeders?** Welding Journal v. 85 n°. 4, p. 34-36, April, 2006.

Kapustka, N., et. al., **Effect of GMAW Process and Material Conditions on DP 780 and TRIP 780 Welds.** Welding Journal, v. 87, n°. 6, p. 135S-48S, June, 2008.

Karadeniz, E., Ozsarac U. , Yildiz, C., **The Effect of Process Parameters on Penetration in Gas Metal Arc Welding Processes.** Materials and Design, vol. 28, p. 649–656, September, 2005.

Kim, I. S. **Sensitivity Analysis for Process Parameters Influencing Weld Quality in Robotic GMA Welding Process.** Journal of Materials Processing Technology, vol. 140, p. 676 – 681, September, 2003.

Kim, I.S., Son, J.S., et al., **A Study on Relationship between Process Variables and Bead Penetration for Robotic CO2 Arc Welding.** Journal of Materials Processing Technology, vol. 136, p. 139 – 145, May, 2003.

Kim, S. B. et al. **Development of Digital Gas Metal Arc Welding System.** Journal of Materials Processing Technology, vol. 189, p. 384-391, July. 2007.

Kou, S.. **Welding Metallurgy.** John Wiley & Sons, INC, Second Edition, 2002.

Liu, C., Zhang, J. X., **Numerical Simulation of Transient Welding Angular Distortion with External Restraints.** Science and Technology of Welding and Joining, v. 14, n°.1, p.26-31, January, 2009.

Machado, I. G. **Condução do Calor na Soldagem: Fundamentos & Aplicações**. Ed. pelo Autor e Distribuído pela Associação Brasileira de Soldagem (ABS). Porto Alegre, Brasil, 2000.

Machado, I. G., **Soldagem & Técnicas Conexas: Processos**. Editado pelo Autor e Distribuído pela Associação Brasileira de Soldagem (ABS). Porto Alegre, 1996. 477p. A edição impressa está esgotada, mas este livro pode ser obtido gratuitamente em mídia eletrônica (“formato”. “pdf”) em www.ct.ufrgs.br/lstc.

Mangold, V. L., **Robotic Arc Welding System Design**. Welding Journal v. 68, p. 25-31, November, 1989

Mashiri, F. R., Zhao, X. L., Grundy, P. GR, **Effects of Weld Profile and Undercut on Fatigue Crack Propagation Life of thin-walled Cruciform Joint Thin-Walled Structures**. v.39, Issue 3, p. 261-285, March, 2001.

Merrifield, T. **Guidelines for Implementing Robotic Arc Welding**. Welding Journal, 84, nº4, p. 34-37, Apr, 2005.

Modenesi, P.J. Reis, R.I., **A Model for Melting Rate Phenomena in GMA welding**, Journal of Materials Processing Technology, vol. 189, p. 199-205, January, 2007.

Modenesi, P.J., Avelar, R.C., **The Influence of Small Variations of Wire Characteristics on Gás Metal Arc Welding Process Stability**, Journal of Materials Processing Technology, vol. 86, p. 226–232, February, 1999.

Mohandas, T., Madhusudan, R. G, Satish , K. B, **Heat-Affected Zone Softening in High-Strength Low-Alloy Steels**, Journal of Materials Processing Technology, v. 88, p. 284-294, April, 1999.

Murray, P.E., **Selecting Parameters for GMAW Using Dimensional Analysis**, Welding Journal, vol. 81, nº.7, p. 125S-130S, July, 2002.

Murugan, N. Palani, P.K., **Selection of Parameters of Pulsed Current Gas Metal Arc Welding**, Journal of Materials Processing Technology, vol.172, p. 1-10, February, 2006.

Murugan, V. V., Gunaraj, V., **Effects of Process Parameters on Angular Distortion of Gas Metal Arc Welded Structural Steel Plates**, Welding Journal, v. 84, nº 11, p. 165S-171S, November, 2005.

Nguyen ,T. C., Weckman, D. C., Johnson, D. A. Kerr, H. W., **High speed fusion weld bead defects.** Science and Technology of Welding and Joining, vol. 11, n°. 06, p. 618-633, November, 2006.

Nguyen,T. C., Weckman, D. C., Johnson, D. A. Kerr, H. W., **The Humping Phenomenon During high Speed gas Metal Arc Welding.** Science and Technology of Welding and Joining, vol. 10, n°. 04, p. 447-459, July, 2005.

Nguyen.T. N., Wahab, M. A., **The Effect of Weld Geometry and Residual Stresses on the Fatigue of Welded Joints Under Combined Loading.** Journal of Materials Processing Technology, v. 77, Issues 1-3, 1, p. 201-208, 1 May, 1998.

Norrish, J., **A Review of Metal Transfer Classification in Arc Welding.** IIW Doc. XII-1769-03. Bucharest, 2003

Palani, P.K, Murugan, N., **Optimization of Weld Bead Geometry for Stainless Steel Claddings Deposited by FCAW.** Journal of Materials Processing Technology, v., 190, Issues 1-3, p. 291-299, 23 July, 2007.

Ponomarev, V., Scotti, A., Silvinskiy, A., Al-Erhayem, O., **Atlas of MIG/MAG Welding Metal Transfer Modes.** IIW Doc. XII-1771 to 1775-03. Bucharest, 2003.

Praveen, P. **et al.**, **Advancements in Pulse Gas Metal Arc Welding.** Journal of Materials Processing Technology, vol. 164–165, p. 1113–1119, May, 2005.

Puchaicela, J. **Control of Distortion of Welded Steel Structures.** Welding Journal, v. 77, n°8, p. 49-52, August, 1998.

Ramini, N. M., Rissone, H., SvobodA, G., Surian, E. S., Vedia, L. A., **Influence of Procedure Variables on C-Mn-NI-Mo Metal Cored Wire Ferritic All-Weld Metal.** Welding Journal, vol. 84, n°.9, p. 138S-148S, September, 2005.

Sadler, H. **A Look at the Fundamentals of Gas Metal Arc Welding.** Welding Journal, vol. p. 45-47, May, 1999.

Shahi, A. S., Pandey, S., **Welding Current Prediction in GMAW and UGMAW Processes using Response Surface Methodology.** Science and Technology of Welding and Joining, v.11, n°.2, 3, p. 341- 346, May, 2006.

Shahi, A.S., Pandey, S., **Modeling of the Effects of Welding Conditions on Dilution of Stainless Steel Claddings Produced by Gas Metal arc Welding Procedures**, Journal of Materials Processing Technology, v. 196, Issues 1-3, p.,339-344, 21 January, 2008,

Shi, Y., et. al., **Analysis of Metal Transfer and Correlated Influences in Dual-Bypass GMAW of Aluminum**. Welding Journal, v. 87, n°9, p. 229-S-236-S, September, 2008.

Soderstrom, J. Mendez, P.F., **Metal Transfer during GMAW with Thin Electrodes and Ar-C02 Shielding Gas Mixtures**. Welding Journal, vol. 87, n°.5, p. 124S-133S, May, 2008.

Standard Welding Terms and Definitions,” AWS A3.0:2001, The American Welding Society, Miami, Florida.

Stenbacka, N., Persson, K.A., **Shielding Gases For Gas Arc Welding**, Welding Journal, vol. 68(11), p. 41-47, November, 1989.

Street, J. A. **Pulsed Arc Welding**. Abington Publishing Special Report, Cambridge. 1990.

Suban, M. Tusek, J., **Dependence of Melting Rate in MIG/MAG Welding on the Type of Shielding Gas Used**, Journal of Materials Processing Technology, vol. 119, p. 185-192, Issues 1-3, December, 2001.

Sung, B.S. et. al., **Fuzzy Regression Model to Predict the Bead Geometry in the Robotic Welding Process**. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), v. 20, Issue 6 , p. 391-397, Volume 20, Issue 6, December, 2007.

The Procedure Handbook o Arc Welding. 14th Ed. The James F. Lincoln Arc Welding Foundation. USA, May, 2000.

Transfer in Gas Metal Arc Welding. Journal of Materials Processing Technology, v. 202, Issues 1-3, p. 391-397, 20 June, 2008.

Tung, P. -C. **An Image-Guided Mobile Robotic Welding System for SMAW Repair Processes**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol.44, p. 1223-1233, May, 2004.

Vaidya, V.V., **Shielding Gas Mixtures for Semiautomatic Welds**. Welding Journal, vol.81, n°09, p. 43-48, September, 2002.

Vandenberg, M. **Selecting the Right Type of Portable Wire Feeder**. Welding Journal. v. 84 n°. 5, p. 77-79, May, 2005.

Villafuerte, J. **Advances in Robotic Welding Technology**. Welding Journal, vol.84, n°1, p. 28-33, January, 2005.

Wahab, M., A., Painter, M.J., Davies, M.H., **The Prediction of the Temperature Distribution and Weld Pool Geometry in the Gas Metal Arc Welding Process**, Journal of Materials Processing Technology, v.77, Issues 1-3, p. 233-239, 1 May, 1998.

Wang, R., Zhang, J.X., et. al., **Welding Distortion Investigation in Fillet Welded Joint and Structure Based on Iterative Substructure Method**, Science and Technology of Welding and Joining, v. 14, n°. 5, p. 696-703, July, 2009

Watanabe, M. and Satoh, K. **Effect of Welding Conditions on the Shrinkage and Distortion in Welded Structures**. Welding Journal, 40(8): 377s-384s, 1961.

Wei, E., Farson, D., Richardson R., Ludewig, H., **Detection of Weld Surface Porosity by Statistical Analysis of Arc Current in Gas Metal Arc Welding**. Journal of Manufacturing Processes, v.3, Issue 1, p. 50-59, September, 2001

Welding Handbook, **Welding Science and Technology**. American Welding Society, 9^a ed. vol. 1, Miami, AWS, 2001.

Wu, C. S., Chen, M. A., Li, S. K., **Analysis of Excited Droplet Oscillation and Detachment in Active Control of Metal Transfer**, Computational Materials Science, v. 31, Issues 1-2, p. 147-154, September, 2004.

Wu, C. S., Zhang, M.X., Li, K.H., Zhang, Y.M., **Numerical Analysis of Double-Electrode Gas Metal Arc Welding Process**. Computational Materials Science, v., 39, Issue 2, p. 416-423, April, 2007.

Xu, G., Hu, J., Tsai, H.L., **Three-Dimensional Modeling of Arc Plasma and Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding**. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 52, Issues 7-8, p. 1709-1724, March, 2009.

Zhang, H., et. al., **Fundamental Studies on in-Process Controlling Angular Distortion in Asymmetrical Double-Sided Double Arc Welding**. Journal of Materials Processing Technology, v. 205, p. 214-223, August, 2008.

Zhang, Y. M., Li, P. J., **Modified Active Control of Metal Transfer and Pulsed GMAW of Titanium.** Welding Journal, vol. 80, n°.2, p. 54S-61S, February, 2006.

Zielińska, S., Valensi, F., Pellerin, N., **et. al., Microstructural Analysis of The Anode in Gas Metal Arc Welding (GMAW).** Journal of Materials Processing Technology, v. 209, Issue 7, p. 3581-3591, April, 2009.