



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA

RENATO BEZERRA EVANGELISTA DE LIMA

**INFLUÊNCIA DA MISTURA DE GASES DE PROTEÇÃO NO PERFIL
GEOMÉTRICO NA MICROESTRUTURA E NA CORRENTE DE TRANSIÇÃO
NA SOLDAGEM MIG/MAG.**

FORTALEZA

2019

RENATO BEZERRA EVANGELISTA DE LIMA

INFLUÊNCIA DA MISTURA DE GASES DE PROTEÇÃO NO PERFIL GEOMÉTRICO NA MICROESTRUTURA E NA CORRENTE DE TRANSIÇÃO NA SOLDAGEM MIG/MAG.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Hélio Cordeiro de Miranda.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação
na Publicação Universidade
Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)

E92i

Evangelista, Renato Bezerra Evangelista de Lima.

Influência da mistura de gases de proteção no perfil geométrico na microestrutura e na corrente de transição na soldagem Mig/Mag. / Renato Bezerra Evangelista de Lima Evangelista. – 2019.

107 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Hélio Cordeiro de Miranda.

1. Soldagem MIG/MAG. Transferência Metálica. Gás de Proteção. I. Título.

CDD 669

RENATO BEZERRA EVANGELISTA DE LIMA

INFLUÊNCIA DA MISTURA DE GASES DE PROTEÇÃO NO PERFIL GEOMÉTRICO NA MICROESTRUTURA E NA CORRENTE DE TRANSIÇÃO NA SOLDAGEM MIG/MAG.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Hélio Cordeiro de Miranda.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Hélio Cordeiro, de Miranda (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marcelo Ferreira Motta
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Willys Machado Aguiar
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

A Deus.

Aos meus pais, Vânia e Francisco,

Aos meus irmãos,

A minha esposa Girlene

A minha filha Giselle.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, à Deus, por me dar forças, saúde, sabedoria e fé e por iluminar a minha jornada com tranquilidade para seguir em frente e não desanimar com as dificuldades.

Aos meus pais, por todo amor que me deram, mesmo com poucas condições não mediram esforços para que eu completasse os meus estudos.

Aos meus irmãos que sempre me incentivaram e oraram por mim.

Minha esposa Girlene que sempre esteve ao meu lado abdicando de seu lazer e felicidade, no apoio financeiro e psicológico, pela sua paciência, pela sua compreensão na minha ausência, para que eu concluísse este trabalho.

Minha filha Giselle com suas cartinhas motivacionais e pensamentos positivos.

Aos meus familiares em especial tia Ivana e parentes.

Aos familiares da minha esposa principalmente tia Fatinha e Neuzinha.

Ao professor e orientador Dr. Hélio Cordeiro de Miranda, pela orientação, oportunidade e apoio para a realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Marcelo Mota, pela amizade, orientação e apoio para a realização deste trabalho.

Aos professores Dr. Willys Machado Aguiar, Dr. Cleiton Carvalho Silva pela contribuição técnica. Para a realização deste trabalho.

Aos professores do curso de graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará pelos ensinamentos.

Ao Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem (LPTS), por toda estrutura, oportunidade e contribuição para elaboração de todos os resultados.

Aos Engenheiros, Técnicos, doutorandos e funcionários do LPTS, Rafaela, Davi, Emerson Miná, Atila, Marília, David, Bruno, Marcela, Aglailton, Felipe Wendrio, Vitor Leão, Gilvânia, Karine, Gabriel, Nathalia, Vitor, Mario, Roger, Edileusa, Francisca e Edson pela amizade e apoio.

Ao secretário Antônio, toda ajuda durante minha graduação.

Aos meus amigos de graduação, Bruno Fontenelle, Luís, Rubson, Raylene, Rogerio, Davi, Isaac, Felipe, Andrey, Ângelo, Francisco, Gustavo, Paulo Vitor, Anasildo.

Aos meus amigos do NPC1 Polícia Militar, James, Rafael Damasceno, Adriano, Daniel, Esteves, Paulino, Militão, Maj Isaac, Domingos e todos os outros que de alguma forma contribuíram. Aos fiscais que sempre me ajudaram com os atrasos no trabalho.

Aos meus amigos da CIP Polícia Militar, Aribamar, Wagnenberg, Célia, Soares, Maj Contardo, Cel Adriano, Benedito, Elinor, Ten Matos, Paula.

“A humildade é o primeiro passo para se ter sucesso, com ela conseguimos amigos que nos ajudam a vencer obstáculos, mas seu sucesso é alcançado com determinação e persistência. ”

Renato Evangelista

RESUMO

Com o avanço da tecnologia para o desenvolvimento das diversas Indústrias de Base, Bens de Capital e de Serviços, a soldagem se tornou muito importante do ponto de vista industrial, sendo extensivamente utilizada na fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas. Este trabalho pretende avaliar a influência da mistura de gases de proteção utilizado na soldagem MIG/MAG. Cada tipo de gás ou mistura destes contribui para a obtenção de resultados particulares em relação ao comportamento do arco, transferência metálica, qualidade da solda, geometria do cordão e as propriedades metalúrgicas. Neste aspecto, destacam-se os efeitos da utilização das misturas de gás de proteção contendo Hélio e Argônio com pequenos percentuais de gases oxidantes (Oxigênio e Dióxido de Carbono). As misturas à base de argônio, variando os teores de He, CO₂ e O₂ foram adquiridas com uso de um misturador de gases e de um analisador ternário. As soldagens foram realizadas com misturas binárias (Ar+CO₂ e Ar+O₂) e misturas ternárias (Ar+He+CO₂ e Ar+He+O₂) com simples deposição sobre uma chapa de aço ASTM A36 como metal de base e uma liga de baixo carbono (AWS ER80S-B2) como metal de adição. Um estudo exploratório e definitivo com a fonte no modo de corrente constante foi realizado com o intuito de avaliar o melhor modo de soldagem, para a obtenção das melhores condições de estabilidade do arco e melhores propriedades metalúrgicas dos materiais soldados. A análise da estabilidade do arco, transferência metálica e corrente de transição foi realizada através do estudo dos sinais de corrente, com a fonte em modo de tensão constante, variando a velocidade de alimentação para identificar a transferência metálica goticular e a corrente de transição. Esses dados foram observados e investigados experimentalmente utilizando técnicas de filmagem, com uma câmera especial de alta velocidade. Além do aspecto visual do arco voltaico, também foi estudada a caracterização metalúrgica dos materiais metal de base e cordões de solda. Os resultados mostraram mudanças significativas com relação ao aspecto geométrico do cordão. Entretanto, o aumento do teor de oxigênio ou de gás carbônico no gás de proteção, gerou um aumento na quantidade de óxidos na superfície do cordão de solda e aumento na corrente de transição.

Palavras-chave: Soldagem MIG/MAG. Transferência Metálica. Gás de Proteção.

ABSTRACT

With the advancement of technology for the development of the various Base Industries, Capital Goods and Services, welding has become very important from an industrial point of view, being extensively used in the manufacture and recovery of parts, equipment and structures. This work aims to evaluate the influence of shielding gas mixture used in MIG / MAG welding. Each type of gas or mixture of these contributes to obtaining particular results regarding arc behavior, metal transfer, weld quality, bead geometry and metallurgical properties. In this regard, we highlight the effects of the use of shielding gas mixtures containing Helium and Argon with small percentages of oxidizing gases (Oxygen and Carbon Dioxide). Argon-based mixtures varying the He, CO₂ and O₂ contents were obtained using a gas mixer and a ternary analyzer. Welding was performed with binary mixtures (Ar + CO₂ and Ar + O₂) and ternary mixtures (Ar + He + CO₂ and Ar + He + O₂) with simple deposition on an ASTM A36 steel plate as base metal and an alloy of low carbon (AWS ER80S-B2) as the filler metal. A definitive exploratory study with the source in constant current mode was carried out in order to evaluate the best welding mode, to obtain the best conditions of arc stability and better metallurgical properties of welded materials. The analysis of arc stability, metal transfer and transition current was performed by studying the current signals, with the source in constant voltage mode, varying the feed speed to identify the droplet metal transfer and the transition current. These data were observed and investigated experimentally using filming techniques with a special high speed camera. In addition to the visual aspect of the arc flash, the metallurgical characterization of the base metal materials and weld beads was also studied. The results showed significant changes regarding the geometric aspect of the cord. However, the increase in oxygen or carbon dioxide content in the shielding gas generated an increase in the amount of oxide on the weld bead surface and an increase in the transition current.

Keywords: MIG / MAG welding. Metallic transfer. Shielding gas.

LISTA DE FIGURAS

Figura -1 Soldagem esquemática MIG/MAG.....	21
Figura -2 Equipamento para a soldagem GMAW.....	22
Figura 3- Representação esquemática do arco e suas regiões com analogia de resistores em série.	24
Figura 4- Representação esquemática do jato de plasma	25
Figura 5- Efeito dos diferentes tipos de gases sobre o formato do cordão	26
Figura 6- Forças atuantes da transferência metálica no processo de soldagem MIG/MAG	28
Figura 7- Fenômeno da geração das Forças eletromagnéticas radiais.....	30
Figura 8- Efeito da força eletromagnética.	31
Figura 9- Força de arraste pelo fluxo do gás ao longo da gota	32
Figura 10- Desvio da gota devido a arco	33
Figura 11- Condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência metálica.	34
Figura 12- Transferência por curto circuito, variação de corrente e tensão.....	35
Figura 13- Transferência Globular, variação de corrente e tensão.	36
Figura 14- Transferência Goticular, variação de corrente e tensão.	37
Figura 15- Ilustração da identificação da corrente de transição.	38
Figura 16- Curvas C.C.T. para o aço de 0,08% de C.....	39
Figura 17- Ferrita de contorno de grão	40
Figura 18- Ferrita primaria intragranular.....	40
Figura 19- Ferrita segunda fase alinhada.....	41
Figura 20- Ferrita de Segunda fase não alinhada.....	41
Figura 21- Ferrita de Widmanstatten	42
Figura 22- Morfologia Bainíticas	42
Figura 23- Ferrita Acicular	43
Figura 24- Agregado de ferrita carboneto- Perlita.....	43
Figura 25- Morfologia da Martensita	44
Figura 26- Esquema da Mistura dos Gases.....	46
Figura 27- Microscópico Óptico.....	47
Figura 28- Bancada de Soldagem.....	47
Figura 29- Equipamento de aquisição de dados	48

Figura 30- Laser Óptico	48
Figura 31- Câmera de filmagem em alta velocidade	49
Figura 32- Bancada de Soldagem	49
Figura 33- Fluxograma do trabalho	50
Figura 34- Barra chata ASTM A36 esmerilhada	52
Figura 35- Esquemático da soldagem utilizando a filmagem de alta velocidade.	53
Figura 36- Corpo de prova para análise Microestrutural e Macroestrutural	53
Figura 37- Perfil da Microestrutura	54
Figura 38- Geometria do Cordão de Solda	55
Figura 39- Regiões para Cálculo da diluição	55
Figura 40- Influência no aspecto superficial do cordão com mistura de Ar + O ₂	57
Figura 41- Influência no aspecto superficial do cordão com mistura de Ar + He + O ₂ . 58	
Figura 42- Influência no aspecto superficial do cordão com mistura de Ar + CO ₂	59
Figura 43- Macrografia da seção transversal do cordão de solda.....	60
Figura 44- Influência da mistura do gás Ar+O ₂ na Largura do Cordão.....	62
Figura 45- Influência da mistura do gás Ar+O ₂ na Penetração do Cordão.....	62
Figura 46- Influência da mistura do gás Ar+O ₂ no reforço do Cordão	63
Figura 47- Influência da mistura do gás Ar + CO ₂ na Largura do Cordão	63
Figura 48- Influência da mistura do gás Ar + CO ₂ na Penetração do Cordão	64
Figura 49- Influência da mistura do gás Ar + CO ₂ no reforço do Cordão	64
Figura 50- Influência da mistura do gás Ar + He + O ₂ na Largura do Cordão.....	65
Figura 51- Influência da mistura do gás Ar + He + O ₂ na Penetração do Cordão.....	65
Figura 52- Influência da mistura do gás Ar + He + O ₂ no Reforço do Cordão	66
Figura 53- Influência da mistura do gás Ar+O ₂ na relação Reforço/Largura	66
Figura 54- Influência da mistura do gás Ar+CO ₂ na relação Reforço/Largura	67
Figura 55- Influência da mistura do gás Ar+He+O ₂ na relação Reforço/Largura.....	67
Figura 56- Influência da mistura do gás Ar+O ₂ na energia de soldagem	69
Figura 57- Influência da mistura do gás Ar+CO ₂ na energia de soldagem.....	69
Figura 58- Influência da mistura do gás Ar+He+CO ₂ na energia de soldagem.....	70
Figura 59- Microestrutura do metal de base	71
Figura 60- Microestrutura do metal de adição.....	72
Figura 61- Microestruturas da ZF para misturas de Ar+2%O ₂ . 500x.....	73
Figura 62- Microestruturas da ZF para misturas de Ar+3%O ₂ . 500x.....	73
Figura 63- Microestruturas da ZF para misturas de Ar+4%O ₂ . 500x.....	74

Figura 64- Microestruturas da ZF para misturas de Ar+8%O ₂ . 500x.....	74
Figura 65- Microestruturas da ZF para misturas de Ar+4%CO ₂ . 500x.....	75
Figura 66- Microestruturas da ZF para misturas de Ar+8%CO ₂ . 500x.....	75
Figura 67- Microestruturas da ZF para misturas de Ar+10%CO ₂ . 500x.....	76
Figura 68- Microestruturas da ZF para misturas de Ar+20%CO ₂ . 500x.....	76
Figura 69- Microestruturas da ZF para misturas de Ar+32%He+8%O ₂ . 500x	77
Figura 70- Microestruturas da ZF para misturas de Ar+36%He+4%O ₂ . 500x	77
Figura 71- Microestruturas da ZF para misturas de Ar+38%He+2%O ₂ . 500x	78
Figura 72 - Microestruturas da ZAC-GG para misturas de Ar+2%O ₂ . 500x	79
Figura 73 - Microestruturas da ZAC-GG para misturas de Ar + 3%O ₂ . 500x	79
Figura 74- Microestruturas da ZAC-GG para misturas de Ar+4%O ₂ . 500x	80
Figura 75 - Microestruturas da ZAC-GG para misturas de Ar+8%O ₂ . 500x	80
Figura 76- Microestruturas da ZAC-GG para misturas de Ar+4%CO ₂ . 500x.....	81
Figura 77- Microestruturas da ZAC-GG para misturas de Ar+8%CO ₂ . 500x.....	81
Figura 78- Microestruturas da ZAC-GG para misturas de Ar+10%CO ₂ . 500x.....	82
Figura 79- Microestruturas da ZAC-GG para misturas de Ar+20%CO ₂ . 500x.....	82
Figura 80- Microestruturas da ZAC-GG para misturas de Ar+32%He+8%O ₂ . 500x	83
Figura 81- Microestruturas da ZAC-GG para misturas de Ar+36%He+4%O ₂ . 500x	83
Figura 82- Microestruturas da ZAC-GG para misturas de Ar+38%He+2%O ₂ . 500x	84
Figura 83- Microestruturas da ZAC-GF para misturas de Ar+2% O ₂ . 500x.....	84
Figura 84- Microestruturas da ZAC-GF para misturas de Ar+3%O ₂ . 500x.....	85
Figura 85- Microestruturas da ZAC-GF para misturas de Ar+4%O ₂ . 500x.....	85
Figura 86- Microestruturas da ZAC-GF para misturas de Ar+8%O ₂ . 500x.....	86
Figura 87- Microestruturas da ZAC-GF para misturas de Ar+4%CO ₂ . 500x.....	86
Figura 88- Microestruturas da ZAC-GF para misturas de Ar+8%CO ₂ . 500x.....	87
Figura 89- Microestruturas da ZAC-GF para misturas de Ar+10%CO ₂ . 500x.....	87
Figura 90- Microestruturas da ZAC-GF para misturas de Ar+20%CO ₂ . 500x.....	88
Figura 91- Microestruturas da ZAC-GF para misturas de Ar+32%He+8%O ₂ . 500x.....	88
Figura 92- Microestruturas da ZAC-GF para misturas de Ar+36%He+4%O ₂ . 500x.....	89
Figura 93- Microestruturas da ZAC-GF para misturas de Ar+38%He+2%O ₂ . 500x.....	89
Figura 94- Microestruturas da ZAC-IC para misturas de Ar+2%O ₂ . 500x.....	90
Figura 95- Microestruturas da ZAC-IC para misturas de Ar+3%O ₂ . 500x.....	90
Figura 96- Microestruturas da ZAC-IC para misturas de Ar+4%O ₂ . 500x.....	91
Figura 97- Microestruturas da ZAC-IC para misturas de Ar+8%O ₂ . 500x.....	91

Figura 98- Microestruturas da ZAC-IC para misturas de Ar + 4%CO ₂ . 500x	92
Figura 99- Microestruturas da ZAC-IC para misturas de Ar + 8%CO ₂ . 500x	92
Figura 100- Microestruturas da ZAC-IC para misturas de Ar+10%CO ₂ . 500x	93
Figura 101- Microestruturas da ZAC-IC para misturas de Ar+20%CO ₂ . 500x	93
Figura 102- Microestruturas da ZAC-IC para misturas de Ar+38%He+2%O ₂ . 500x....	94
Figura 103- Microestruturas da ZAC-IC para misturas de Ar+36%He+4%O ₂ . 500x....	94
Figura 104- Microestruturas da ZAC-IC para misturas de Ar+32%He+8%O ₂ . 500x....	95
Figura 105- Gás de proteção: Ar+38%He+2%CO ₂	96
Figura 106- Gás de proteção: Ar+18%He+2%CO ₂	96
Figura 107- Gás de proteção: Ar+8%He+2%CO ₂	97
Figura 108- Influência na corrente de transição com mistura de Ar +He+ CO ₂	97
Figura 109- Gás de proteção: Ar+4%CO ₂	98
Figura 110- Gás de proteção: Ar+8%CO ₂	99
Figura 111- Gás de proteção: Ar+10%CO ₂	99
Figura 112- Gás de proteção: Ar+20%CO ₂	100
Figura 113- Influência na corrente de transição com mistura de Ar + CO ₂	100
Figura 114- Gás de proteção: Ar+2%O ₂	101
Figura 115- Gás de proteção: Ar+4%O ₂	101
Figura 116- Gás de proteção: Ar+8%O ₂	102
Figura 117- Influência na corrente de transição com mistura de Ar + O ₂	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Vantagens, limitações e aplicações principais do processo GMAW	22
Tabela 2- Composição Aço ASTM A36.	45
Tabela 3 - Composição química do metal de adição	45
Tabela 4 - Composição da Mistura de Gases	45
Tabela 5- Parâmetros adquiridos para a soldagem definitiva	56
Tabela 6- Resultados das medidas do cordão soldado	61
Tabela 7- Fatores de controle e seus níveis ajustados para os experimentos.....	68
Tabela 8- Parâmetros adquiridos para diversas energias de soldagem, na corrente de transição	68
Tabela 9- Composição química Metal Base	70
Tabela 10- Composição química do metal de adição	71
Tabela 11- Ensaio para a Média da Largura	105
Tabela 12- Ensaio para a Média da Penetração	106
Tabela 13- Ensaio para a Média do Reforço	106
Tabela 14- Ensaio para cálculo da Diluição	106
Tabela 15- Ensaio para cálculo da Diluição	107
Tabela 16- Ensaio para a área Fundida.....	107
Tabela 17- Ensaio para a Relação Reforço/Largura	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ar	Argônio
CO ₂	Dióxido de carbono
O ₂	Oxigênio
DBCP	Distância bico de contato/peça
GMAW	Gas Metal Arc Welding
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
He	Hélio
LPTS	Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem
MAG	Metal Active Gas
MB	Metal de base
MIG	Metal Inert Gas
UFC	Universidade Federal do Ceará
ZAC	Zona afetada pelo calor
ZAC-GF	Zona afetada pelo calor de grãos finos
ZAC-GG	Zona afetada pelo calor de grãos grosseiros
ZAC-IC	Zona afetada pelo calor intercrítica
ZF	Zona fundida

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	18
2 - OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS.....	20
2.1 – Objetivo Geral	20
2.2-Objetivos Específicos	20
3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1 Soldagem a arco com proteção gasosa (MIG/MAG)	21
3.2 – Arco Voltaico	23
3.3 - Gases de Proteção	25
3.4 – Fundamentos da Transferência Metálica	27
3.4.1 - Forças atuantes sobre a Gota Metálica	28
3.4.1.1 – Força Gravitacional	29
3.4.1.2 – Força associada à tensão superficial	29
3.4.1.3 – Força Eletromagnética	30
3.4.1.4 – Forças de Arraste	32
3.4.1.5- Força de Reação	33
3.4.2 – Tipos de Transferência Metálica	34
3.4.3 - Microestruturas e classificação metalográfica	39
PORTER; EASTERLING; SHERIF, 2009	42
PORTER; EASTERLING; SHERIF, 2009	43
4-MATERIAIS E MÉTODOS	45
4.1 Materiais	45
• Metal de Base	45
• Metal de Adição.....	45
4.2 – Gases de Proteção	45
4.3 – Equipamentos	46
4.4 – Metodologia.....	50

4.4.1 - Etapa 1 – Revisão Bibliográfica	51
4.4.2 - Etapa 2 - Estudo Exploratório para Soldagem	51
4.4.3 - Etapa 3 – Soldagens Definitivas.....	52
4.4.4 - Etapa 4 – Efeito na Corrente de Transição	52
4.4.5 - Etapa 5 – Análise Macroestrutural e Microestrutural.....	53
4.4.5.1 - Caracterização Microestrutural	54
4.4.5.2 - <i>Análise do Perfil Geométrico</i>	54
4.4.5.3 - <i>Análise de Diluição</i>	55
Etapa 6 – Elaboração de Relatórios e Divulgação de Resultados	55
5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1 – Aspecto Superficial dos Cordões	56
5.2 – Análise geométrica macroestrutural	60
5.3- Análise Microestrutural	70
5.3.1- <i>Caracterização do metal de base e metal de adição</i>	70
5.3.2- Zona Fundida (ZF)	72
5.3.3- Zona Afetada pelo Calor Grão Grosso	78
5.3.4 - Zona Afetada pelo Calor Grão Fino	84
5.3.5- Zona Afetada pelo Calor Intercrítica	89
5.4 – Corrente de transição associada a transferência metálica.	95
6 – CONCLUSÃO	103
7- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	104
8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
9 – APÊNDICE 1	105

1 - INTRODUÇÃO

A soldagem é o processo de união ou revestimento, fabricação ou manutenção de materiais sólidos (particularmente os metais) conseguido pela aproximação dos átomos e moléculas das partes serem unidas a um material intermediário, até uma distância suficiente para a formação de ligações metálicas. A definição pela AWS diz que é o processo de coalescência localizada produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada através da aplicação de calor assistida ou não por pressão, assegurando a junta soldada do metal de base a continuidade das propriedades físicas, químicas e metalúrgicas. (MARQUES, MODENESI e BACARENSE, 2016).

A soldagem a arco com proteção gasosa, com ênfase no processo MIG/MAG, é atualmente utilizada em várias aplicações industriais. A facilidade de automação e os diversos tipos de materiais que podem ser soldados por este método aumentam ainda mais as suas aplicações. São grandes usuários deste processo de fabricação a indústria automotiva e de autopeças, alimentícia, construção civil, fabricação de bens de consumo, estaleiros, caldeirarias, implementos agrícolas, botijões de gás, entre outras.

Arco voltaico é a fonte de calor mais comumente utilizado na soldagem por fusão de materiais metálicos, que consiste em uma descarga elétrica através de um plasma condutor de alta temperatura produzindo energia térmica suficiente para possibilitar a fusão de metais. Para ser efetivo na soldagem, o arco deve ser condutor e possuir baixa resistência para evitar perda de calor. Para auxiliar a manutenção e a proteção do arco e condução da corrente utiliza um gás de proteção por serem ionizados facilmente. Com o aumento da temperatura o gás perde elétrons e facilita o transporte de carga pelo arco.

O gás de proteção como uma variável importante na soldagem a arco, serve para três funções principais: a primeira fornece um plasma para o consumo de corrente; a segunda protege a poça e não reage com o ambiente e efeitos nocivos do H_2 , N_2 e do O_2 contido no ar atmosférico e a terceira interage na solubilização metal base-metal de adição.

Por isso a seleção da composição e dos respectivos percentuais de uma mistura gasosa constituem uma das etapas relevantes no processo de soldagem MIG/MAG, que associado às características da fonte de energia, aos metais de adição e a misturas desses gases, pode ajudar na melhoria da qualidade, do funcionamento, da produtividade na soldagem de aços bem como em aços inoxidáveis, ligas de alumínio, entre outros materiais.

Segundo a sua natureza e composição estes gases influenciarão nas características do arco e no tipo de transferência metálica, na velocidade de soldagem, na perda por respingos, na penetração e no formato do cordão de solda, e, ainda, na microestrutura e no custo final da operação de soldagem. São atribuídas também ao tipo de gás empregado as perdas de elementos químicos, a temperatura da poça de fusão, a sensibilidade à fissuração e porosidade, bem como a facilidade na execução da soldagem em diversas posições.

Neste aspecto, destacam-se os efeitos da utilização de misturas de gases inertes contendo Hélio ou Argônio e pequenos percentuais de gases oxidantes ativos com CO_2 e O_2 na soldagem de metais. A escolha do tipo de gás protetor para soldagem depende de fatores como custo referente as perdas de elementos de liga na transferência do metal entre o arame e a poça de fusão. A solubilidade do gás na poça de fusão que se quer proteger durante a soldagem, também deve ser observada, pois se uma quantidade substancial do gás entra no metal fundido pode causar liberação do gás durante a solidificação causando descontinuidades e até mesmo defeitos na solda, como por exemplo, porosidade. Os gases de proteção utilizados amplamente nas últimas décadas em soldagem do aço carbono são o argônio (Ar), o dióxido de carbono (CO_2) e o hélio (He), que são usados puros ou misturados entre si. Em alguns casos, pequenas quantidades de oxigênio (O_2) são misturadas aos anteriores.

Na indústria, embora sejam disponíveis misturas binárias, ternárias e até quaternárias, as mais populares são ainda à base de Ar e CO_2 . As utilizações do gás de proteção com misturas adequadas garantem a eficiência da deposição da solda e o custo, sendo o hélio (He) o gás mais caro, o Ar de preço intermediário e o CO_2 que é mais barato.

Desta forma, é de fundamental importância entender os conceitos para o comportamento dos gases nas altas temperaturas experimentadas pelo arco, para que parâmetros como tensão, corrente, velocidade de alimentação e velocidade de soldagem sejam especificados da maneira correta.

O objetivo do presente trabalho é estudar o comportamento da soldagem MIG/MAG considerando diferentes misturas de gases a base de Argônio, Hélio, CO_2 e O_2 . Dada a importância dos gases de proteção, além da análise de dados, pretende-se contribuir acrescentando filmagens.

2 - OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS

2.1 – Objetivo Geral

Estudar a influência das misturas dos gases de proteção na soldagem MIG/MAG, contendo (Argônio, Hélio, CO₂ e O₂) no perfil geométrico e na microestrutura, identificando as melhores condições de estabilidade do arco elétrico através de filmagens, bem como à análise de transferência metálica e corrente de transição.

2.2-Objetivos Específicos

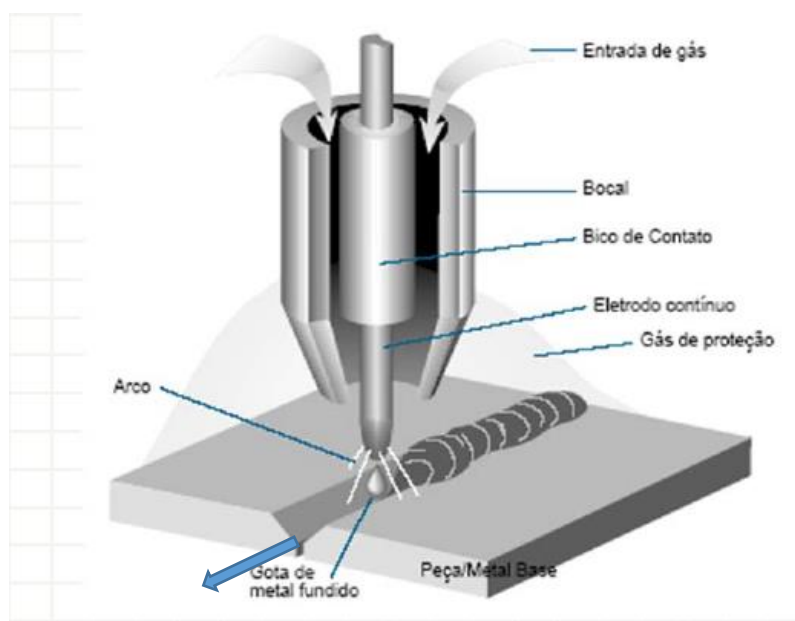
- Avaliar a influência da mistura dos gases de proteção na geometria do cordão, verificando o perfil geométrico (penetração, largura, reforço, área fundida e diluição).
- Avaliar o efeito dos gases de proteção e suas alterações na microestrutura.
- Analisar o efeito dos gases de proteção no comportamento da transferência metálica e na alteração da corrente de transição.

3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Soldagem a arco com proteção gasosa (MIG/MAG)

A Soldagem a Arco Gás-Metal (**GMAW**) é um processo de soldagem a arco que produz a união dos metais pelo seu aquecimento com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico contínuo (e consumível) e a peça, ilustrado na Figura 1. A proteção do arco e a poça de fusão é obtida por um gás ou mistura de gases. Se este gás é inerte (Ar/He), o processo é também chamado **MIG**. Por outro lado, se o gás for ativo (CO_2 ou misturas Ar/ O_2 / CO_2), o processo é chamado **MAG**. Gases inertes puros são, em geral, usados na soldagem de metais e ligas não ferrosas, misturas de gases inertes com pequenas quantidades de gases ativos são usadas, em geral, com aços ligados, enquanto que misturas mais ricas em gases ativos ou CO_2 puro são usados na soldagem de aços carbono. (MODENESI; MARQUES,2006).

Figura -1 Soldagem esquemática MIG/MAG



Fonte: MODENESI; MARQUES,2011

O processo é normalmente operado de forma semiautomática, podendo ser, também, mecanizado ou automatizado. É o processo de soldagem a arco mais usado com robôs industriais. Como trabalha com um (ou mais) arame (s) contínuo (s), o que permite um alto fator de ocupação, com elevadas densidades de corrente no eletrodo (elevada taxa de deposição) e, assim, tende a apresentar uma elevada produtividade.

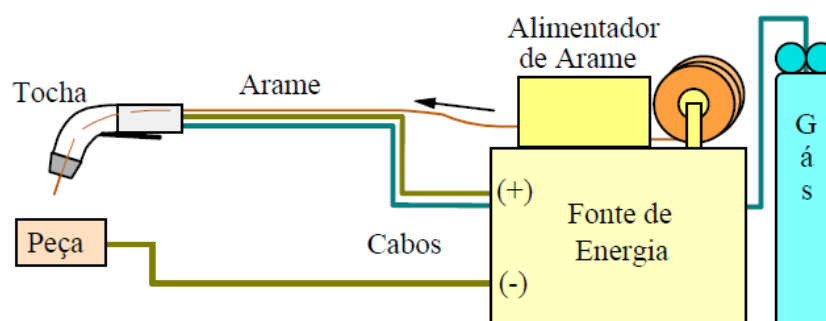
A Tabela 1 apresenta as principais vantagens, limitações e aplicações do processo GMAW.

Tabela 1-Vantagens, limitações e aplicações principais do processo GMAW

Vantagens e limitações	Aplicações
<ul style="list-style-type: none"> • Processo com eletrodo contínuo. • Permite soldagem em qualquer posição. • Elevada taxa de deposição de metal. • Elevada penetração. • Pode soldar diferentes ligas metálicas. • Exige pouca limpeza após soldagem. • Equipamento relativamente caro e complexo. • Pode apresentar dificuldade para soldar juntas de acesso restrito. • Proteção do arco é sensível a correntes de ar. • Pode gerar elevada quantidade de respingos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Soldagem de ligas ferrosas e não ferrosas. • Soldagem de carrocerias e estruturas de veículos. • Soldagem de tubulações, etc.

O equipamento básico para a soldagem GMAW consiste de fonte de energia, tocha de soldagem, fonte de gás e alimentador de arame ilustrado na Figura 2. A fonte de energia em geral, é capaz de fornecer tensões e correntes reguláveis entre 15 e 50 V e de 10 e 1200 A, respectivamente e que é usada em conjunto com um alimentador de arame de velocidade regulável entre cerca de 1 m/min e 20 m/min. O sistema ajusta automaticamente o comprimento do arco através de variações da corrente, sendo mais simples do que sistemas alternativos. Na soldagem GMAW, utiliza-se, em praticamente todas as aplicações, corrente contínua com o eletrodo ligado ao polo positivo (CC+) raramente no modo (CC-). Recentemente, o processo tem sido utilizado com corrente alternada (CA) para a soldagem de juntas de pequena espessura principalmente de alumínio. (MODENESI; MARQUES,2006).

Figura -2 Equipamento para a soldagem GMAW.



Fonte: MODENESI; MARQUES,2006

O gás de proteção é injetado através da tocha de soldagem e tem como finalidade a proteção das gotas de metal fundido e da poça de fusão da atmosfera.

Esse isolamento evita que ocorram reações de oxidação, que podem gerar defeitos na solda, como porosidade e fragilização. Além disso, o gás tem função ionizante e, portanto, interfere nas características do arco e na transferência metálica e consequentemente na solubilização dos metais soldados. (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

3.2 – Arco Voltaico

Podemos definir o arco voltaico como sendo a descarga elétrica através de um plasma condutor de alta temperatura, produzindo energia térmica suficiente para a fusão de metais. Para ser efetivo na soldagem, o arco deve ser condutor e possuir baixa resistência para evitar a perda de calor pelo efeito Joule. Dependendo do processo de soldagem, a utilização do gás de proteção auxilia a manutenção do arco induzindo a corrente através do aquecimento do eletrodo, aumentando a temperatura e aquecendo o gás de proteção, o qual se torna um bom condutor a altas temperaturas e baixas pressões.

Quando se quer analisar o arco voltaico, é necessário observar o que ocorre utilizando a equação da resistência que consiste em:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

R = resistência elétrica do condutor

l = comprimento do arco

A = área de contato da coluna do arco

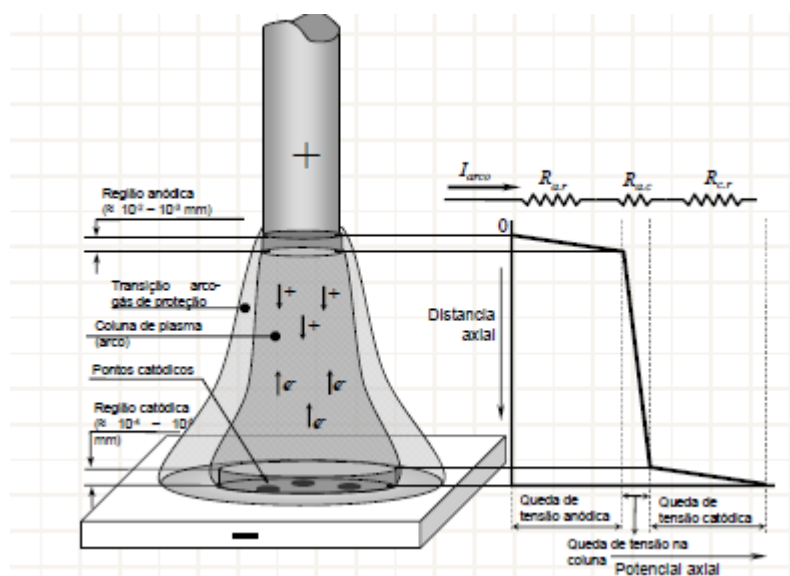
ρ = resistência específica do material

Ao aumentar o comprimento do arco (l), tem-se um aumento na resistência e uma maior área de contato da coluna de plasma com o meio externo, o que gera perda de calor e, portanto, a estabilidade diminui.

Com o aumento da temperatura, decorrente do aquecimento do eletrodo, o gás de proteção aquece podendo atingir de 5000 K a 30000 K de temperatura ocorrendo a dissociação da molécula e liberando elétrons em grandes velocidades.

Universalmente o arco voltaico aplicado na soldagem é composto por regiões anódicas e catódicas e são de extrema relevância para a existência do arco, sendo que nessas regiões que passa corrente, haverá uma queda de tensão em ambas regiões.

Figura 3- Representação esquemática do arco e suas regiões com analogia de resistores em série.



Fonte:(SCOTTI e PONOMAREV, 2008)

Região Catódica - responsável pelo fornecimento da maioria dos elétrons e condução de corrente no arco.

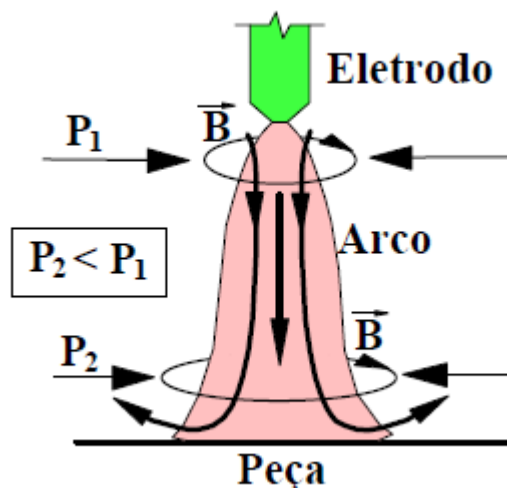
Região Anódica – regiões onde há uma maior concentração de elétrons, o que causa a queda da tensão nessa área.

De qualquer forma existindo as regiões anódicas e catódicas, elétrons viajam do catodo (-) para o anodo (+). Lembrar que a corrente convencional é na direção positivo para o negativo, mas o fluxo de elétrons vai do polo positivo. Nas soldagens com eletrodo consumível os elétrons são emitidos devido a um fenômeno denominado emissão catódica ou emissão de campo. Esse fenômeno é facilitado por camadas de óxidos que normalmente tem ligações elétron-átomo fracas. Então a necessidade de óxidos para haver emissão catódica é que justifica a maior estabilidade das soldagens com eletrodos consumíveis com proteção gasosa com pequenas adições de gases ativos como O_2 e CO_2 . (SCOTTI e PONOMAREV, 2008)

Outro fenômeno físico importante é o jato de plasma de origem eletromagnética, que devido seu próprio campo magnético, surgem forças radiais no sentido da coluna de plasma exercendo uma pressão em cada elemento de área.

Uma diferença de pressão eletromagnética que ocorre, provoca o deslocamento do gás ionizado na direção de menor pressão na região mais larga da coluna de plasma ilustrado na Figura 4. Este fenômeno é de extrema importância, pois o jato de plasma age no sentido de arrastar as gotas em transferência metálica.

Figura 4- Representação esquemática do jato de plasma



Fonte:(SCOTTI e PONOMAREV, 2008)

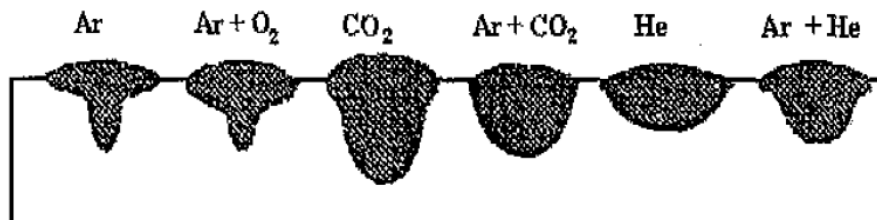
3.3 - Gases de Proteção

O processo de soldagem MIG/MAG requer um fluxo de gás em torno do conjunto metal base/arame-eletrodo produzindo soldas com qualidade e protegendo a poça de fusão e as gotas na transferência. Uma importante característica dos gases de proteção é que eles devem ter um baixo potencial de ionização. A razão mais relevante para usar um gás de proteção é evitar que o metal fundido sofra o efeito nocivo do ar. Mesmo pequenas quantidades de oxigênio no ar oxidarão os elementos de liga e criarão inclusões de escória. O nitrogênio é dissolvido no material derretido a quente, mas quando se solidifica, a solubilidade diminui e o gás evaporador formará os poros. O nitrogênio também pode ser uma causa de fragilidade.

O gás de proteção também influencia nas propriedades de soldagem e tem grande importância para a geometria do cordão de solda particularmente na penetração. (WEMAN, HANDBOOK,2003).

A Figura 5 mostra alguns formatos de cordão de solda influenciados pelo gás de proteção ou misturas.

Figura 5- Efeito dos diferentes tipos de gases sobre o formato do cordão



Fonte : (VICTOR ÁQUILA, APOSTILA L&A SOLDAGEM, 2012)

Os gases mais utilizados no processo GMAW são:

Argônio (Ar)

O argônio é um dos gases de proteção mais populares graças às suas propriedades adequadas. Como gás inerte, não tem interação química com outros materiais. Por isso, é adequado para materiais sensíveis, como alumínio e aço inoxidável. O argônio possui baixo potencial de ionização e densidade maior que o ar atmosférico facilitando a soldagem na posição plana. Na soldagem MIG de aço doce, uma adição de CO₂ ou uma pequena quantidade de oxigênio aumentará as propriedades de soldagem, especialmente para a soldagem de arco curto. O conteúdo de até 20% de CO₂ melhora a penetração (limita o risco de falta de fusão), enquanto que 5-8% produz respingos reduzidos. (WEMAN, HANDBOOK, 2003).

Hélio (He)

Hélio como o argônio é um gás inerte e apresenta uma densidade mais baixa que o ar e alto potencial de ionização e alta capacidade de troca de calor. Misturado com argônio, aumenta a velocidade de soldagem e é vantajoso para a penetração em alumínio de paredes espessas ou cobre, compensando a alta condução de calor. Inconvenientes com o Hélio é um alto custo econômico. (WEMAN, HANDBOOK, 2003).

Devido seu alto custo o Hélio normalmente é utilizado com misturas de Ar como base. Geralmente o perfil da solda apresenta baixos níveis de reforço com perfil arredondado do cordão e baixa razão penetração-largura características importantes para soldagem em curto circuito. Puro ou em grande percentual não permite transferência goticular e provoca muitos respingos. (SCOTTI e PONOMAREV, 2008).

Dióxido de Carbono (CO₂)

O dióxido de carbono puro (CO₂) pode ser usado para soldagem de arco curto. É um gás de baixo custo, possui boas propriedades para soldagem de aço galvanizado e oferece maior segurança contra a falta de fusão do que os gases à base de argônio. Sua alta capacidade de troca de calor e sua energia liberada faz transferir mais calor para metal base comparando com Argônio puro. Outro fato é que esse gás não pode ser usado puro para o arco de spray e não recomendável para aços de baixo carbono, pois ao ocorrer a dissociação do gás ele pode passar carbono para a solda. Sua alta capacidade de transferir calor para o metal base favorece a uma boa estabilidade da raiz do arco com geometria similar ao do gás Hélio.(SCOTTI e PONOMAREV, 2008).

Oxigênio (O₂)

O gás oxigênio serve como constituinte importante da mistura do gás a ser empregada na soldagem de aço, apesar de não ser utilizado diretamente para proteção. Esse gás atua diminuindo a tensão superficial da gota e da poça de fusão, melhorando a molhabilidade e promovendo a transferência axial goticular e ajuda na redução de respingos. O oxigênio também é usado como uma pequena adição para estabilizar o arco na soldagem MIG. (WEMAN, HANDBOOK,2003)

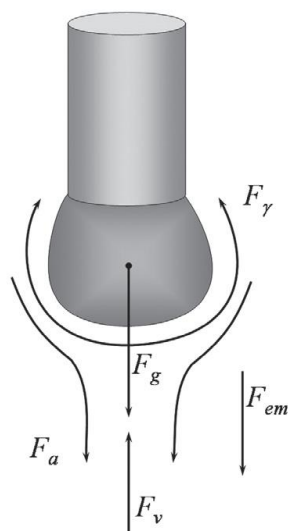
3.4 – Fundamentos da Transferência Metálica

O processo de soldagem MIG/MAG, por ser um processo que utiliza eletrodo consumível, é caracterizado pela transferência de metal para a poça de fusão através do arco. Esta transferência ocorre por meio de gotas de metal fundido geradas na ponta do arame-eletrodo (com diferentes tempos de crescimento, dimensões e frequências de destacamento) e é influenciada pelo material, diâmetro do eletrodo, pelo gás de proteção, pela intensidade e polaridade da corrente de soldagem, pelo comprimento do arco e pela pressão ambiente. O modo pelo qual o material é transferido no arco tem grande influência sobre a estabilidade do processo e afeta fortemente a quantidade de respingos gerada tendo a possibilidade de soldagem em várias posições, a qualidade/geometria da solda e a aparência superficial do cordão de solda. (SCOTTI; PONOMAREV, 2008). Para que essa transferência ocorra existe forças que atuam sobre a gota que é formada na ponta do eletrodo.

3.4.1 - Forças atuantes sobre a Gota Metálica

A gota, desde o início de seu crescimento na ponta do arame-eletrodo, fica submetida à ação de uma série de forças que podem atuar favoravelmente ou não ao seu destacamento. A gota é transferida quando o somatório das forças de destacamento supera o somatório das forças de retenção (modelo conhecido como Equilíbrio de Forças Estáticas). Numa gota pode-se ter diferentes forças atuantes associadas. No caso, as principais forças que agem sobre a gota são: força gravitacional (F_g); força eletromagnética (F_{em}); força devido à tensão superficial do metal fundido (F_γ); força de arraste dos gases (F_a); e força de vaporização (F_v). Estas forças estão ilustradas esquematicamente na Figura 6. (SCOTTI e PONOMAREV, 2008)

Figura 6- Forças atuantes da transferência metálica no processo de soldagem MIG/MAG



Fonte: SCOTTI; PONOMAREV, 2008

O mecanismo de destacamento se altera quando a corrente de soldagem supera um certo valor, denominado de corrente de transição. A transferência metálica ocorre quando o material na ponta do eletrodo vai se fundindo e gerando uma gota metálica que chegara a poça de fusão através do arco. As forças principais no processo de destacamento são as eletromagnéticas e da tensão superficial. As forças gravitacionais e de reação são importantes em certas condições. Já a força de arrasto dos gases tende a não ser tão importante no destacamento da gota devido ao tamanho reduzido da mesma.

3.4.1.1 – Força Gravitacional

É a força originada pela ação da gravidade, que, por depender da massa, é governada pela dimensão e densidade do material da gota. Quanto maior a massa da gota (seu diâmetro relação ao diâmetro do eletrodo), mais relevante será a atuação da força.

Assim, a intensidade de sua atuação é condicionada ao volume da gota que é crescente até que se rompa o equilíbrio para haver seu destacamento. Outro fator que atua na relevância da força é a posição do eletrodo, podendo ou não ter componentes vetoriais a força da gravidade estará sempre agindo no sentido de destacar a gota. (SCOTTI e PONOMAREV, 2008).

3.4.1.2 – Força associada à tensão superficial

A tensão superficial é uma das forças mais importantes durante a formação da gota, está força tende a manter a gota presa na ponta do arame onde a fase líquida sobrepõem-se a transferência metálica. As moléculas que se encontram na superfície de um líquido são objeto das intensas forças de atração das moléculas e esse balanço de forças é diferente para as moléculas que estão no interior desse líquido. Uma força resultante, tangente à superfície, atua para fazer com que a superfície do líquido seja a menor possível. A magnitude dessa força é a tensão superficial, γ . A superfície, ou interface, onde existe a tensão, encontra-se entre o líquido e o seu vapor saturado no ar. (SCOTTI e PONOMAREV, 2008)

Um material líquido, por natureza, sempre tende a ter a menor relação entre a área superficial e o seu volume, o que acontece quando se toma a forma esférica e seu volume é cada vez maior estas condições são de menor energia livre). Por isto, a gota na ponta do eletrodo tende a tornar-se mais volumosa à medida que o eletrodo se funde, devido à tensão superficial, ser crescente. Esta força retém a gota na ponta do eletrodo, dificultando a sua transferência. Se não houvesse outras forças em sentido contrário, como a força da gravidade, o volume de uma gota cresceria infinitamente. Mas como a força de tensão superficial cresce retendo a gota proporcionalmente com o diâmetro, a força gravitacional que facilita o destacamento da gota, aumenta em proporção do diâmetro ao cubo, assim vai ocorrer um momento em que a gota se destaca. O diâmetro em que este fenômeno acontece se denomina de diâmetro crítico.(SCOTTI e PONOMAREV, 2008).

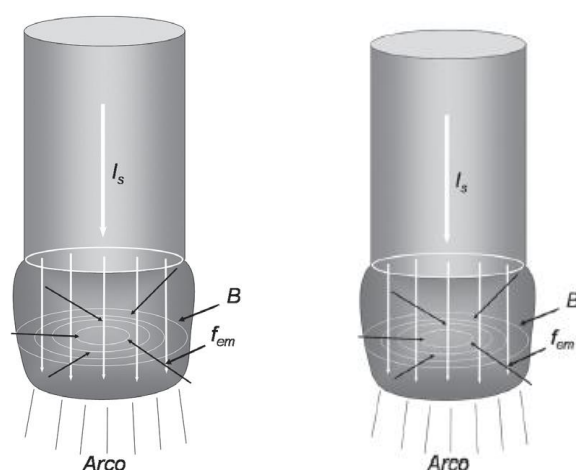
No entanto, há situações em que a força de tensão superficial, passa a facilitar a transferência. A energia livre de superfície tornando-se menor na poça de fusão, o contato de uma gota com a poça faz com que a força, devido à tensão, superficial puxe-a para dentro da poça. Assim, enquanto não houver contato gota/poça, a força, devido à tensão superficial, é contrária à transferência, mas passa a favorecê-la quando há o contato.(SCOTTI e PONOMAREV, 2008)

3.4.1.3 – Força Eletromagnética

Quando se passa uma corrente por um condutor elétrico, essa corrente gera um campo magnético que gera uma força magnética que por sua vez, induz forças radiais. Essa força está associada a permeabilidade magnética do meio, a densidade de corrente e a intensidade do campo, são forças perpendiculares as linhas de condução de corrente. Como mostra a Figura 7, um condutor elétrico gera ao seu redor um campo magnético (cuja intensidade de fluxo é representada pelo vetor B), que por sua vez, induz forças radiais (f_{em}) no sentido do centro do condutor.

Quanto maior a corrente, maiores são estas forças ($f_{em} = \mu (J \times B)$, onde μ é permeabilidade magnética do material do condutor e J a densidade de corrente). A intensidade da força eletromagnética é maior quanto maior for a corrente e menor o raio do condutor.(SCOTTI e PONOMAREV, 2008).

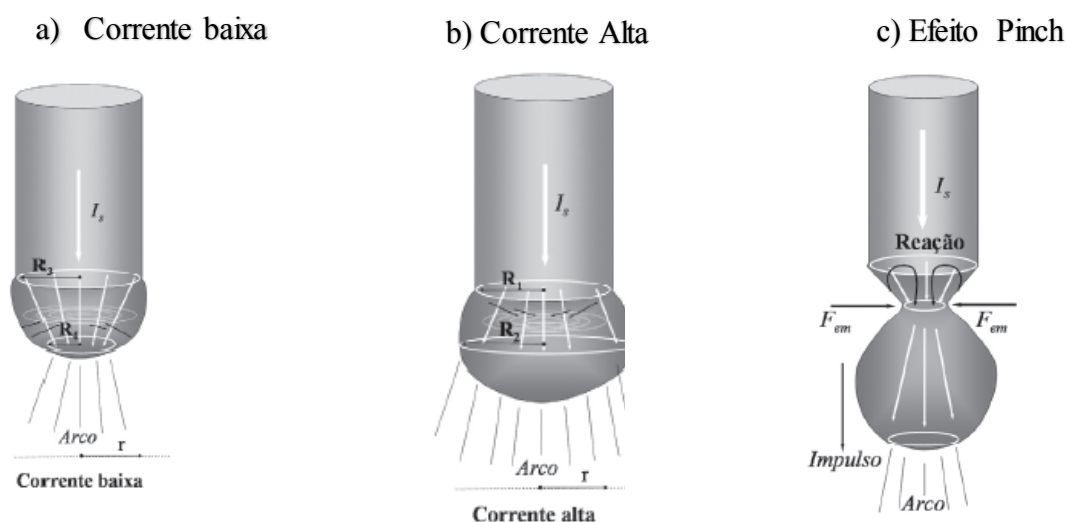
Figura 7- Fenômeno da geração das Forças eletromagnéticas radiais



Fonte: SCOTTI; PONOMAREV, 2008

Em um condutor no estado líquido, a força eletromagnética pode contribuir para o empescoamento e o estrangulamento desse condutor líquido, como é o caso da gota de metal fundido, cada unidade de volume é submetida à força eletromagnética, que tenta deslocar o material no sentido da superfície para o centro do condutor, na forma de compressão. Na Figura 8 está representado o efeito da força eletromagnética sobre a gota de acordo com a intensidade da corrente de soldagem e do tamanho da gota.

Figura 8- Efeito da força eletromagnética.



Fonte: SCOTTI; PONOMAREV, 2008(adaptada)

Quando as linhas de correntes são convergentes, a força eletromagnética terá sua componente vertical apontada para cima, ou seja, contrária ao destacamento da gota e sua componente horizontal apontada para o centro da gota estrangulando a mesma. Embaixo da gota é a região onde a força é maior devido a menor área e conseqüente maior densidade de corrente, então dificilmente haverá o estrangulamento em cima da gota, já que as forças eletromagnéticas do arco empurram a gota para cima e fecha o circuito embaixo dela, não havendo o destacamento da gota. Ilustrado na Figura 8 no item a).

Como o arco continua aberto, tem-se uma grande energia, o eletrodo vai continuar se fundindo e a gota crescendo gerando uma corrente divergente. Em um determinado instante a força gravitacional se torna mais forte que o somatório da força tensão superficial e a força eletromagnética, causando o destacamento da gota.

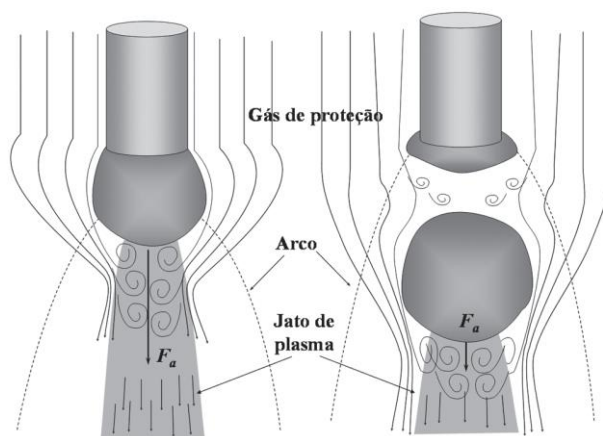
Acima de um certo valor de corrente e com uma maior geração de calor, a ponta fundida no eletrodo torna-se cilíndrica a gota alcança um diâmetro próximo ao seu diâmetro crítico e não mais em formação progressiva de uma gota (Gota-gota).

O rompimento desse cilindro em gotas sequenciais decorre da instabilidade da coluna de líquido gerando um fenômeno semelhante à estrição da gota na interface arame-gota. Há uma redução da seção transversal próximo ao arame-eletrodo e um crescimento da densidade de corrente de forma abrupta, gerando uma grande pressão nesta seção. A gota é impulsionada para frente favorecendo ao seu destacamento, fenômeno este denominado de efeito Pinch. Por um lado, a tensão superficial, que tende a reconstruir a superfície cilíndrica (ou seja, anular a constrição inicial), procurando uma menor área por volume. Quando o efeito Pinch supera o efeito da tensão superficial, a coluna se rompe e uma pequena gota residual se forma. Ilustrado na Figura 8 no item c). (SCOTTI e PONOMAREV, 2008) Adaptado.

3.4.1.4 – Forças de Arraste

A força de arraste ilustrado na Figura 9 é originada pelo jato de plasma em contato com a gota e contribui para o seu destacamento devido depressões que são geradas sobre a gota, na forma de vórtices, fazendo com que esta seja sugada e arrastada pelo fluxo. Essa força de arraste do gás normalmente é pequena, mas pode ter uma pressão de ar que é exercida em baixo da gota e esta pressão pode gerar um jato de plasma e segurar a gota, principalmente quando se trabalha com bicos de diâmetros pequenos, arcos de altas resistências, gases de altos potenciais de ionização e fluxo de elementos de fácil ionização levando a repulsão das gotas típico de soldagem com CO₂. A força de arraste, assim como a da gravidade, continua agindo mesmo depois do destacamento da gota e é crescente à medida que se aproxima da chapa. (SCOTTI e PONOMAREV, 2008)

Figura 9- Força de arraste pelo fluxo do gás ao longo da gota



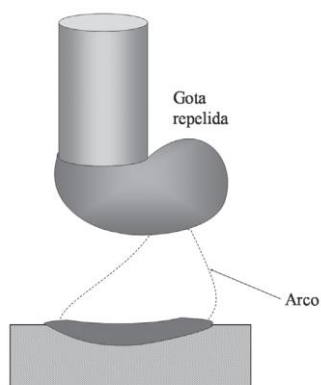
Fonte: SCOTTI; PONOMAREV, 2008

3.4.1.5- Força de Reação

A força de reação é originada pela vaporização dos componentes do metal de adição na região do acoplamento do arco com a gota e com isso há geração de jatos de vapores metálicos. A ação dessa força é de quatro a cinco vezes menor na polaridade positiva do que na polaridade negativa. Caso o acoplamento do arco se dê somente na calota inferior da gota, esses jatos exercem uma força de reação sobre a gota, tendendo a mantê-la mais tempo retida (maior diâmetro crítico). Valores mais altos de corrente e presença de elementos de elevada pressão de vapor no arame-eletrodo aumentam essa força. Mas correntes muito elevadas ou o uso de gases com baixa capacidade de troca de calor podem fazer com que o arco envolva toda a gota, o que dificulta a análise do efeito da vaporização sobre o destacamento da mesma. (SCOTTI e PONOMAREV, 2008)

Por outro lado, o acoplamento do arco pode ficar restrito a uma pequena área sobre a gota, causado, por exemplo, pela alta capacidade de troca de calor dos gases de proteção (por exemplo, He e CO₂), fazendo com que o núcleo de condução do arco fique reduzido. Este fato pode localizar demasiadamente a força de reação e, se ela ocorrer fora da linha de centro da gota, pode desviá-la de sua trajetória normal (braço de alavanca), repulsando-a e facilitando gerar respingos. Após a gota ter sido desviada, os jatos do plasma repelidos da peça podem mantê-la fora de posição por longos períodos, conforme ilustrado na Figura 10, caso típico de soldagens MAG com CO₂ puro como gás de proteção. Pelas mesmas razões apresentadas para o efeito da força eletromagnética, não se deve esperar ação do efeito da força de reação quando a gota já estiver destacada. (SCOTTI e PONOMAREV, 2008)

Figura 10- Desvio da gota devido a arco

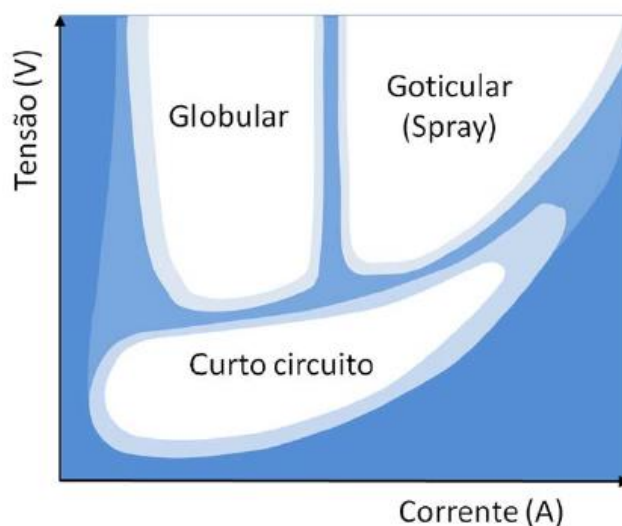


Fonte: SCOTTI; PONOMAREV, 2008

3.4.2 – Tipos de Transferência Metálica

Existem três formas principais de transferência de metal no processo GMAW: (a) Transferência por Curto-Circuito, (b) Transferência Globular e (c) Transferência por "Spray", Aerossol ou Goticular. Além dessas, usando-se equipamentos capazes de fornecer corrente com pulsos de valor elevado, é possível se soldar com uma transferência do tipo spray com valores relativamente baixos de corrente (transferência pulsada). A Figura 11, mostra esquematicamente os tipos de transferência em função do ajuste de tensão e de corrente de soldagem para as três formas básicas de transferência metálica na soldagem GMAW com um gás de proteção rico em argônio.

Figura 11- Condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência metálica.



Fonte: MODENESI; MARQUES,2006

O modo de transferência influencia fortemente nas características operacionais do processo GMAW como na sua estabilidade, no nível de respingos, no formato do cordão e sua regularidade e na capacidade de fundir o metal de base. Como a forma de transferência obtida no processo GMAW depende dos parâmetros de soldagem e é muito sensível ao seu ajuste, a seleção adequada destes é de fundamental importância para uma soldagem adequada.

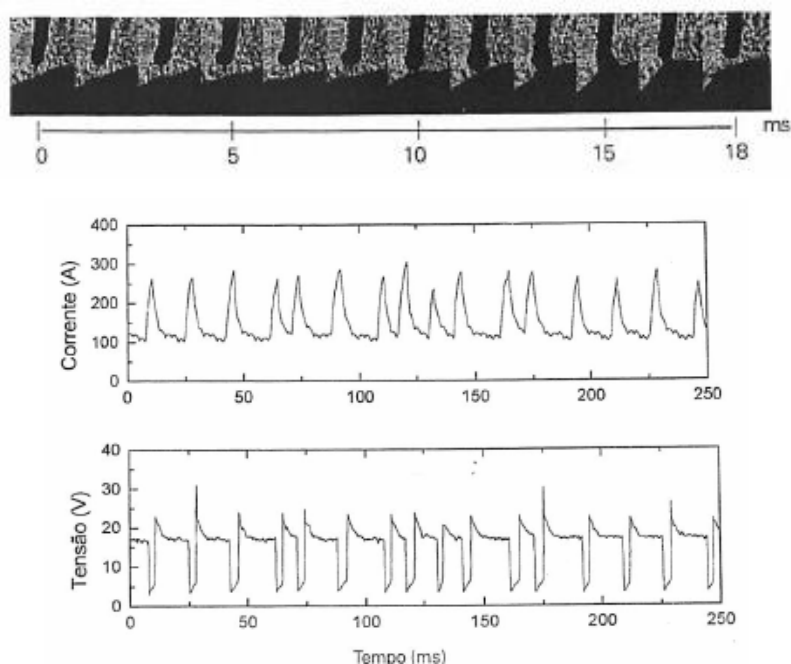
As principais variáveis que determinam o modo de transferência são a corrente de soldagem, o comprimento do arco, a composição do gás de proteção e a composição, o diâmetro e o comprimento do eletrodo.

Existem, além dessas, diversos outros fatores que podem afetar o modo de transferência de metal de adição. Em particular, a presença de contaminações tanto no metal de base como no eletrodo ou no gás de proteção pode perturbar fortemente a transferência.

A **transferência por curto-circuito** é típica da soldagem com um pequeno comprimento de arco (menores valores de tensão de soldagem). Nesta, o eletrodo toca periodicamente (entre cerca de 20 a 200 vezes por segundo) a peça, ocorrendo um curto-circuito. Durante este, a corrente de soldagem se eleva rapidamente causando um aquecimento forte do eletrodo por efeito Joule, a sua fusão e a transferência de metal para a poça de fusão com a ruptura de uma parte do eletrodo e a reabertura do arco elétrico. Esta forma de operação é muito usada industrialmente para a soldagem de aços carbono com arames de menor diâmetro (0,6 a 1,2 mm), com proteção de CO₂ e correntes relativamente baixas, para a soldagem de juntas de pequena espessura e, frequentemente, fora da posição plana e soldagem em chapas finas.

A transferência por curto-circuito é relativamente instável, com a geração de uma elevada quantidade de respingos, particularmente ao final de cada curto-circuito. Existe, contudo, em geral, uma condição de menor instabilidade que ocorre quando a frequência de transferência (ou de curtos-circuitos) é máxima. Esta condição pode ser obtida, com base no ruído emitido pelo processo, variando, em geral, a tensão de soldagem.

Figura 12- Transferência por curto circuito, variação de corrente e tensão.

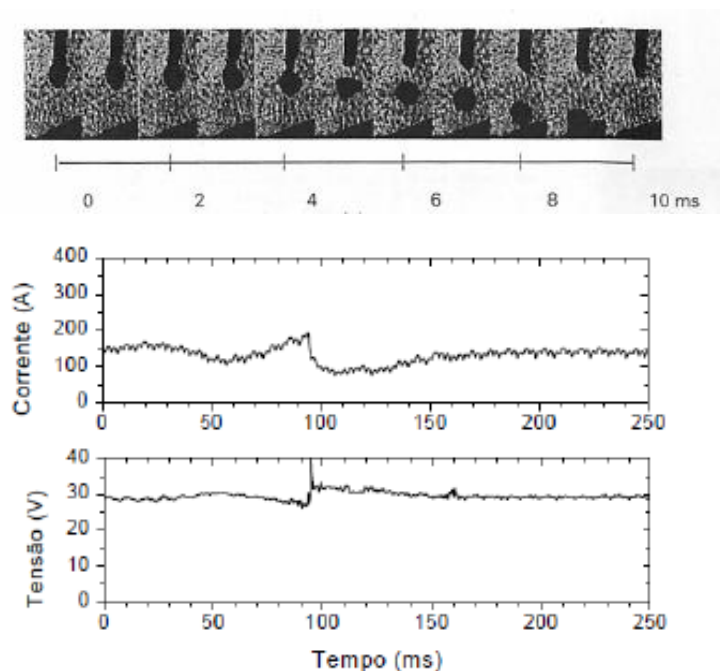


Fonte: (MARQUES, MODENESI e BACARENSE, 2005)

Um outro fator importante para a estabilidade do processo na transferência por curto-circuito é a taxa de crescimento (A/s) da corrente durante um curto-circuito. Se a corrente se eleva de uma forma excessivamente rápida, o rompimento do arame ao final de um curto tende a ser explosivo e forma uma elevada quantidade de respingos. Quando a gota toca a poça de fusão, a intensidade de corrente aumenta o suficiente para aquecer o eletrodo e ocorrer a transferência metálica. A força relevante é a tensão superficial durante a transferência por curto. Se a corrente aumentar muito lentamente, o rompimento do arame pode não ocorrer e o processo de soldagem se interrompe. Este fator é ajustado, em máquinas para a soldagem GMAW, através de um controle denominado **indutância**.

Na **transferência globular**, as gotas de metal líquido, cujo diâmetro tende a ser maior que o do próprio eletrodo se destacam do eletrodo, pela ação direta da gravidade, de uma forma similar a uma torneira gotejando, sem a ocorrência de curto-circuito. Esta forma de transferência é característica da soldagem com corrente baixa (força magnética pequena) e elevada tensão (grande comprimento de arco). Na soldagem de aços, com proteção de CO₂ devido ser um gás ativo essa transferência perde muita energia, ocorrendo o fenômeno de repulsão, motivo esse que o arco fica por baixo da gota e as forças eletromagnéticas não agem, prevalecendo a força gravitacional. Em que não existem condições para a transferência spray, a transferência globular ocorre também com correntes elevadas.

Figura 13- Transferência Globular, variação de corrente e tensão.

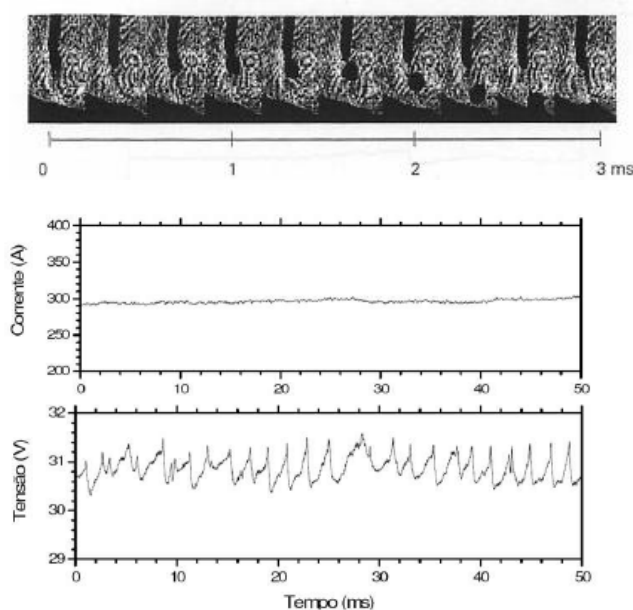


Fonte: (MARQUES, MODENESI e BACARENSE, 2005)

A soldagem com esta forma de transferência tende a ser muito instável devido às perturbações causadas ao arco pelo destacamento de grandes gotas e a ocorrência de respingos. Como a tensão é mais alta que a do curto circuito, a corrente também aumenta consequentemente aumentando a energia com isso a dificuldade de soldagem em chapas finas ou posições planas que podem escorrer o líquido.

A **transferência spray ou Goticular** ocorre na soldagem com mistura de proteção rica em argônio e com correntes suficientemente elevadas para que a força de origem magnética passe a controlar o processo de transferência. A gota apresenta dimensões inferiores às do eletrodo, de modo que a transferência ocorre com velocidades altas. Esta forma de transferência tende a ser extremamente estável (desde que o arco seja suficientemente longo para prevenir a ocorrência de curto-circuito) e não depende da força da gravidade. A necessidade de uma corrente elevada, contudo, restringe o seu uso para a soldagem de juntas de maior espessura e para a soldagem na posição plana (a poça de fusão tende a ter um volume e fluidez que dificultam o seu controle fora da posição plana).

Figura 14- Transferência Goticular, variação de corrente e tensão.



Fonte: (MARQUES, MODENESI e BACARENSE, 2005)

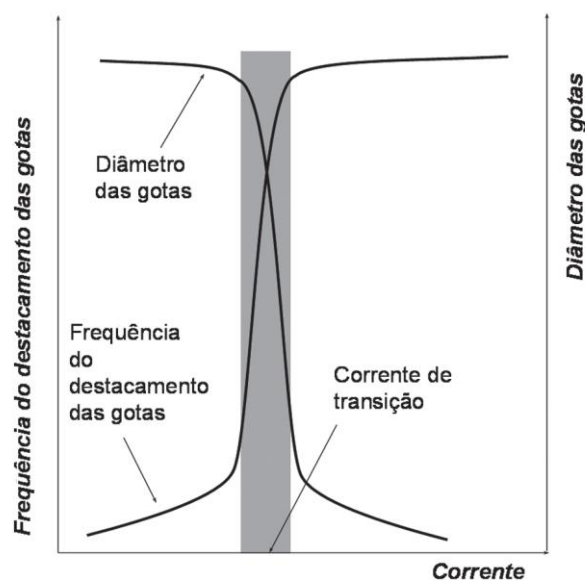
Atualmente, com o desenvolvimento de máquinas de soldagem com controle eletrônico, a soldagem com corrente pulsada tem se tornado comum. Nesta forma de soldagem GMAW, a corrente varia periodicamente entre um nível elevado (corrente de pico) e um baixo (corrente de base).

O valor e a duração da corrente de pico são selecionados de forma a causar a transferência spray, enquanto que a passagem pela corrente de base permite a obtenção de um valor médio de corrente relativamente baixo. Desta forma, com a utilização de um equipamento mais sofisticado (e mais caro) pode-se soldar com a transferência spray (e com as suas vantagens) com um valor de corrente que permite a soldagem de juntas menos espessas e, também, fora da posição plana.

Além disto, estes equipamentos, que possuem um tempo de resposta muito mais rápido do que os convencionais, permitem a mudança controlada da corrente de soldagem durante o ciclo do curto-circuito. Isto permitiu o desenvolvimento de equipamentos de soldagem que operam com transferência por curto-circuito com uma maior estabilidade e uma menor formação de respingos.

Para mudar o modo de transferência de curto circuito para globular é necessário aumentar a tensão, porém para mudar de globular para Goticular é necessário aumentar a corrente de soldagem para que ultrapasse um valor crítico, denominado de corrente de transição. Até a corrente de soldagem alcançar o nível de transição, que na verdade é uma faixa e não um valor único, o tamanho das gotas se reduz lentamente com aumento da frequência da transferência mostrado na Figura 15. Quando a corrente de soldagem excede o nível da corrente de transição, ocorre uma redução significativa e abrupta do tempo da formação da gota até o destacamento, acarretando também um aumento súbito da frequência da transferência das gotas.

Figura 15- Ilustração da identificação da corrente de transição.



Fonte: MIRANDA, 2002

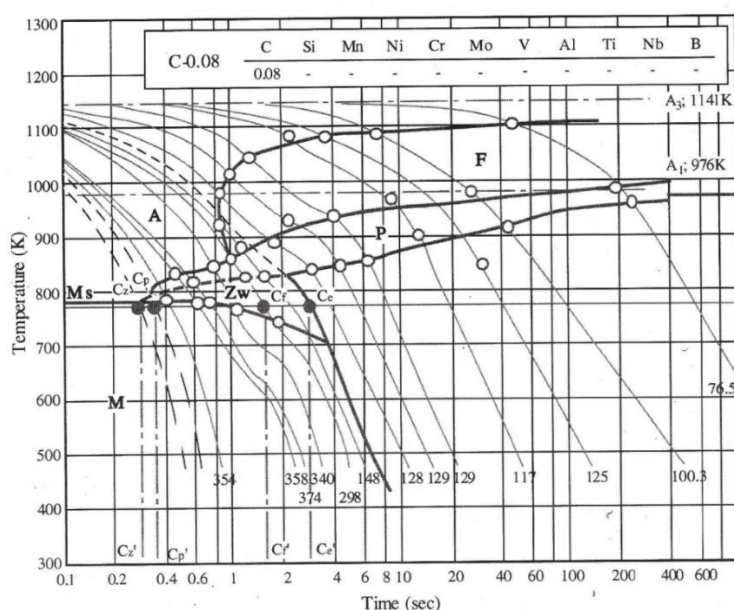
3.4.3 - Microestruturas e classificação metalográfica

Para os aços com baixo teor de carbono e de liga, a poça de fusão solidifica-se inicialmente como ferrita, podendo sofrer uma reação peritética com a formação de austenita. Durante o resfriamento, a ferrita remanescente transforma-se em austenita. Esta, em função das elevadas temperaturas, sofre um grande crescimento de grão, tendendo a apresentar uma estrutura de grãos colunares e grosseiros, similar à estrutura original de fusão da ZF. (CHIAVERINI, 2008).

Em temperaturas mais baixas, inferiores a 900°C, a austenita se decompõe, resultando em diferentes produtos ou constituintes. Estes produtos aparecem em diferentes proporções, tanto em função do estado inicial da austenita (composição, tamanho de grão, microsegregações e estado de deformações) como das condições de resfriamento e das solicitações mecânicas resultantes da soldagem. A microestrutura final da ZF, em uma solda em um só passe, será formada por ferritas, perlitas e pelos elementos da estrutura primária que não sofreram transformações (por exemplo, as inclusões de óxidos). (CHIAVERINI, 2008).

Os materiais em estudo são aços de baixo carbono. A Figura 49 mostra as Curvas C.C.T. para aço com 0,08% de carbono, mostrando a velocidade de resfriamento contínuo dessa liga, o qual fornece microestruturas normalmente ferríticas e perlíticas. Para casos de tratamentos térmicos poderá encontrar estruturas bainíticas.

Figura 16- Curvas C.C.T. para o aço de 0,08% de C



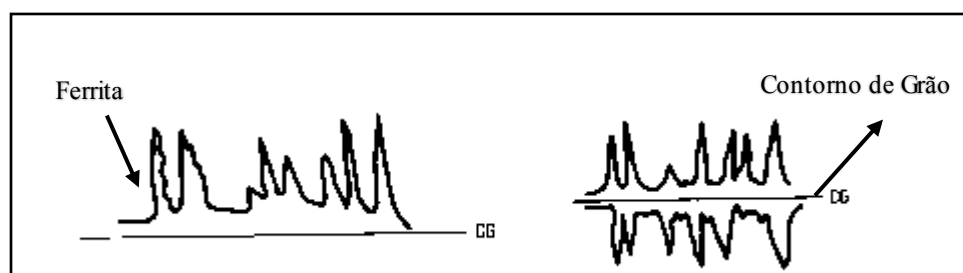
Fonte: KAZUGAI, FUGITA, 1999

As fases resultantes da decomposição da austenita são basicamente: ferrita, cementita e martensita. Além destas, pequenas quantidades de austenita podem permanecer inalteradas (austenita retida) e diferentes precipitados (outros carbonetos, nitretos, etc.) e inclusões podem existir. Há cerca de 20 anos o Instituto de Internacional de soldagem (IIW) desenvolveu um sistema de classificação para os constituintes para o metal de solda, baseado na sua observação utilizando o microscópico óptico, que se tornou aceito usualmente. Segundo este sistema os constituintes mais comuns na zona fundida, podem ser classificados. MODENESI; MARQUES,2004

- **Ferrita primária FP**

- **Ferrita de contorno de grão – FP (G):** É o primeiro constituinte que se forma pela decomposição da austenita de cristais de ferrita que nuclearam nos contornos de grão austeníticos, em elevadas temperaturas de transformação (800-850°C).

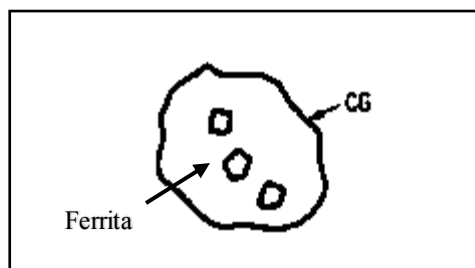
Figura 17- Ferrita de contorno de grão



Fonte: COLPAERT, 2008

- **Ferrita poligonal intragranular – FP (I):** Se a austenita tiver um tamanho de grão muito maior que a ferrita que está sendo formada nos seus contornos e houver sítios para nucleação intragranular, grãos de ferrita podem ser formados no interior da austenita.

Figura 18- Ferrita primária intragranular

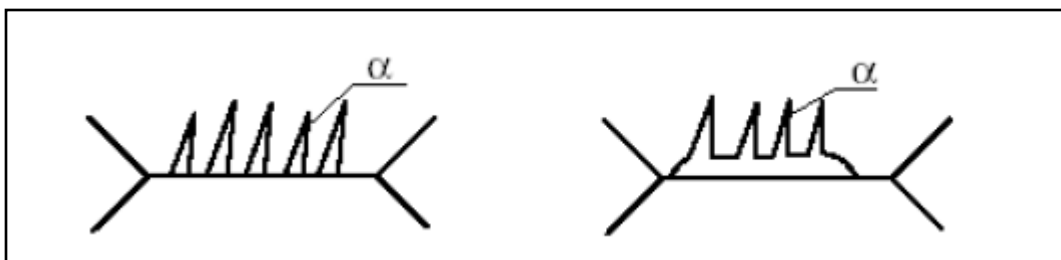


Fonte: COLPAERT, 2008

- **Ferrita com segunda fase FS**

- **Ferrita com segunda fase alinhada – FS (A):** Esta engloba constituintes que tendem a apresentar uma aparência muito similar quando são observados por microscopia óptica. Destacam-se uma forma de ferrita pró-eutetóide que se forma a temperaturas mais baixas.

Figura 19- Ferrita segunda fase alinhada



Fonte: COLPAERT, 2008

Constitui de placas que nucleiam nos contornos de grão da austenita e crescem ao longo de planos bem definidos dentro destes grãos. Este constituinte pode iniciar o seu crescimento diretamente do contorno de grão da austenita ou a partir de grãos de ferrita de contorno de grão formados anteriormente.

- **Ferrita de segunda fase não alinhada – FS (NA):** Segundo o IIW, a FS (NA) é formada por ferrita envolvendo completamente as “microfases” (carbonetos ou o constituinte AM – austenita-martensita) aproximadamente equiaxiais e distribuídas aleatoriamente ou grãos de ferrita acicular.

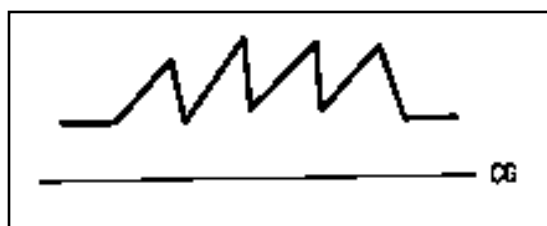
Figura 20- Ferrita de Segunda fase não alinhada



Fonte: COLPAERT, 2008

- **Placas laterais de ferrita ou ferrita de widmanstatten FS (SP):** Nas seções transversais apresentam-se alongadas e são chamadas de estruturas aciculares. Estas placas podem nuclear diretamente nos contornos de grão austeníticos. Uma das mais interessantes é o fato de placas de ferrita tem extensão maior na direção paralela ao contorno de grão do que em direção ao interior do grão.

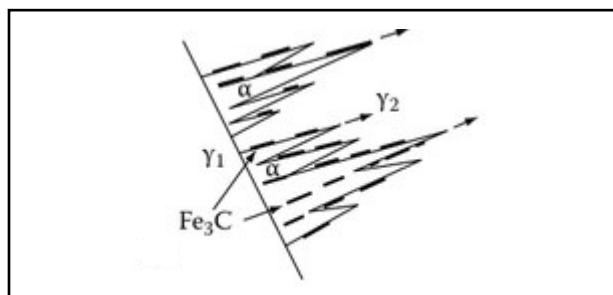
Figura 21- Ferrita de Widmanstatten



Fonte: COLPAERT, 2008

- **Bainita FS (B):** Para temperaturas entre 300°C e 540°C, a bainita se forma como uma série de agulhas de ferrita separadas por partículas alongadas de cementita (bainita superior). Para temperaturas entre 200°C e 300°C, a ferrita encontra-se em placas e partículas finas de cementita se formam no interior dessas placas (bainita inferior).

Figura 22- Morfologia Bainíticas



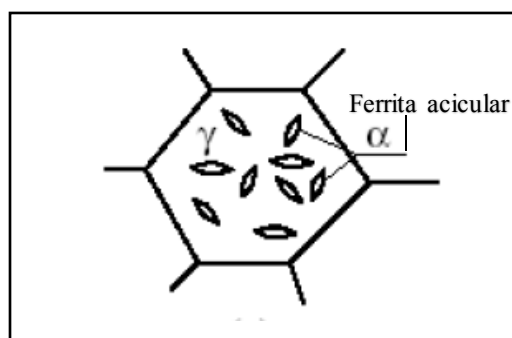
PORTER; EASTERLING; SHERIF, 2009

- **Ferrita acicular FA**

- **Ferrita acicular – (FA):** Corresponde ao tipo mais frequente de ferrita nucleada no interior dos grãos austeníticos, sendo formada a temperaturas tão baixas quanto aquelas de formação da bainita em aços baixo carbono e baixa liga resfriados continuamente. A ferrita acicular forma-se intragranularmente, nucleando-se de forma heterogênea em sítios como inclusões (ou próxima a estas), precipitados e outras irregularidades nos grãos austeníticos.

Na zona fundida, a formação da ferrita acicular é favorecida pela presença de precipitados e, particularmente, de numerosas inclusões resultantes da presença de oxigênio, em geral, em teores superiores aos do metal de base. Esta forma de ferrita possui granulação muito fina e maior densidade de discordâncias que as formas anteriores. A Figura 23 mostra as ferritas acicular no interior do grão austenico.

Figura 23- Ferrita Acicular



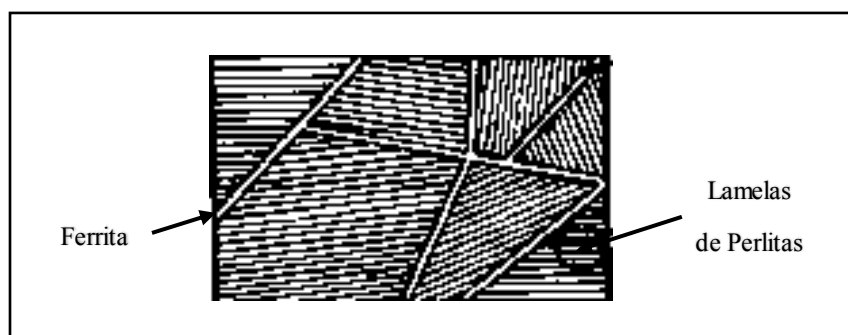
Fonte: COLPAERT, 2008

- **Agregado ferrita carboneto FC**

- **Agregados ferrita-carboneto – FC:** Incluem a perlita, a bainita inferior e o constituinte AM, que se formam durante a decomposição da austenita rica em carbono rejeitado pela ferrita transformada em elevadas temperaturas.

- **Perlita FC (P):** Lamelas de ferrita e cementita presentes nos grãos austeníticos pode estar presente como microfases e não pode ser resolvida no microscópio óptico.

Figura 24- Agregado de ferrita carboneto- Perlita

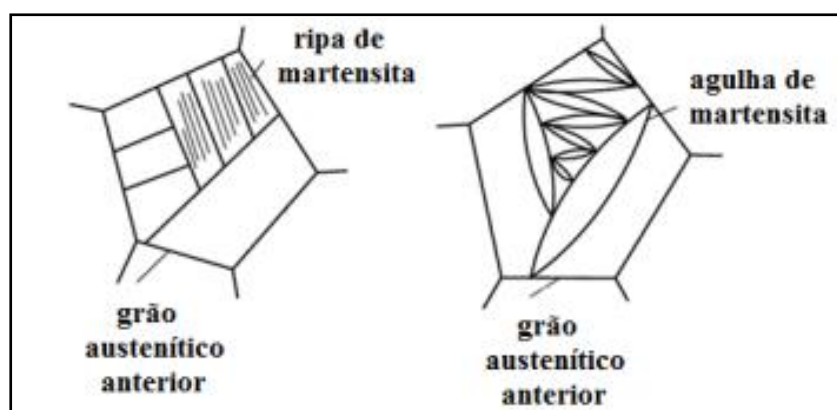


PORTER; EASTERLING; SHERIF, 2009

- **Martensita M**

- **Martensita – M**: em aços com maior teor de carbono ou de outros elementos de liga e em soldagens com maior velocidade de resfriamento, a formação de ferrita pode ser parcial ou completamente suprimida, havendo a formação de uma estrutura predominantemente martensítica na zona fundida. Esta estrutura apresenta geralmente alta resistência mecânica e baixa tenacidade, particularmente em aços com teor de carbono mais alto. Além dos constituintes mais conhecidos, citados acima, podemos citar outro de tamanha importância, neste caso, o microconstituente A-M. (MODENESI, 2004).

Figura 25- Morfologia da Martensita



Fonte: Handbook,2004

4-MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

- Metal de Base

Na soldagem deste trabalho foram utilizados chapas de aço ASTM A36 cuja composição química está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2-Composição Aço ASTM A36.

Elemento	C	Si	Mn	P	S
Máximo (%w)	0,25	0,4	1,35	0,03	0,03

Fonte: ASTM.

- Metal de Adição

O metal de adição utilizado neste trabalho foi o eletrodo classe AWS ER80S-B2 com 1,2 mm de diâmetro e sua composição química está apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química do metal de adição

Elemento	C	Mn	Si	P	S
AWS ER80S-B2 Ø=1,2 mm	0,07-0,12	0,40-0,70	0,40-0,70	0,025 máx	0,025 máx
	Ni	Cr	Mo	Cu	
	0,20 máx	1,20-1,50	0,40-0,65	0,35 máx	

Fonte: AWS.

4.2 – Gases de Proteção

Foram utilizados nesse trabalho misturas dos seguintes gases de proteção mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Composição da Mistura de Gases

Etapa 01	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4
Ar + O ₂	2% O ₂	3% O ₂	4% O ₂	8% O ₂
Ar + He + O ₂	38%He+2%O ₂	36%He+4%O ₂	32%He+8%O ₂	xxxx
Ar + CO ₂	4% CO ₂	8 % CO ₂	10 % CO ₂	20 % CO ₂
Etapa 2	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4
Ar + CO ₂	4 % CO ₂	8 % CO ₂	10 % CO ₂	20 % CO ₂
Ar + He + CO ₂	38%He+2%CO ₂	18%He+2%CO ₂	8%He+2%CO ₂	xxxx
Ar + O ₂	2% O ₂	4% O ₂	8% O ₂	xxxx

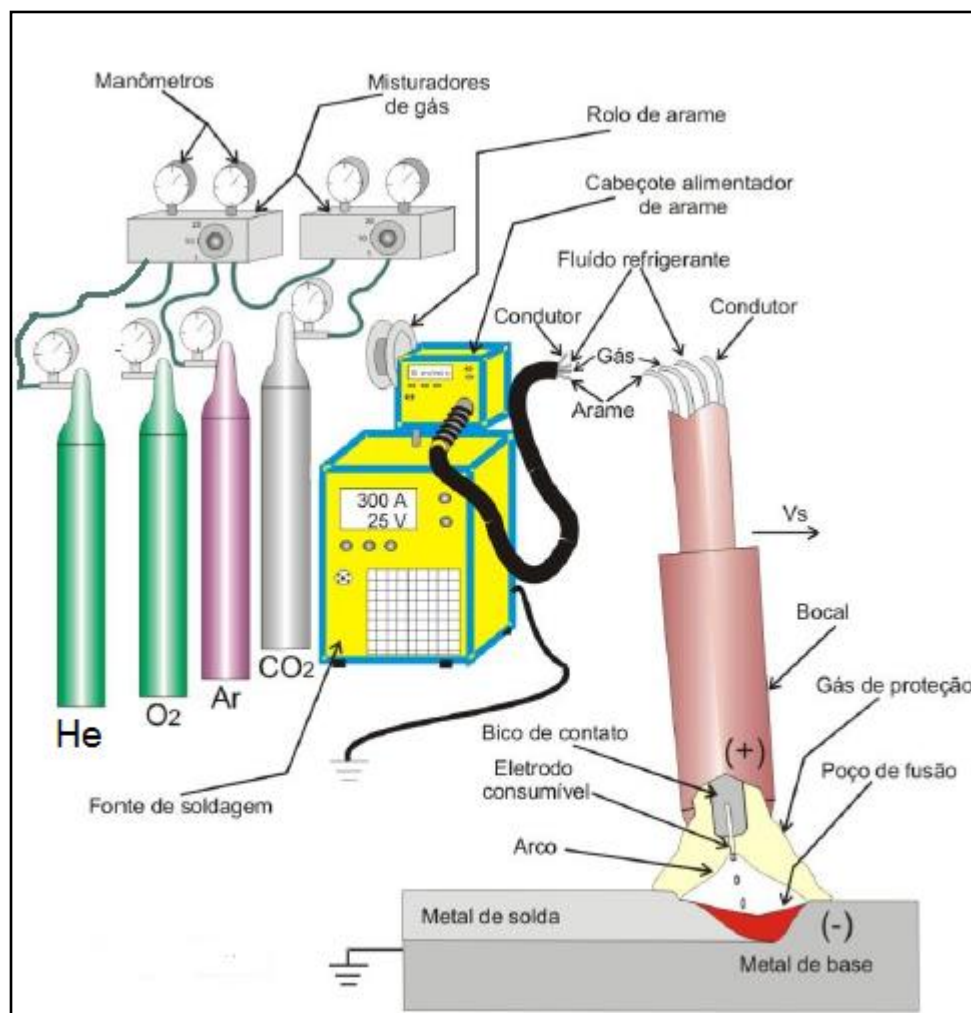
Fonte: Autor

Etapa 1 Efeito na Microestrutura e Geometria

Etapa 2 Análise de Transferência Metálica

A Figura 16 indica esquematicamente como se procedeu a mistura de gases, juntamente com o sistema de soldagem.

Figura 26- Esquema da Mistura dos Gases



Fonte: BARRA,2003.

4.3 – Equipamentos

Os equipamentos utilizados para a Caracterização Microestrutural e análise das amostras foram:

- Equipamentos para corte como: serra de fita.
- Equipamentos para preparação metalográfica: Lixadeira Rotativa
- Câmera fotográfica digital para se obter as imagens de macroestrutura.
- Microscópio Óptico

Figura 27- Microscópio Óptico.



Fonte: Autor

O trabalho foi realizado em uma bancada utilizando um processo de soldagem MIG/MAG, um sistema automatizado composto por um robô industrial (KUKA), uma fonte de soldagem eletrônica com multiprocessos (IMC), com um sistema de alimentação e uma tocha, exaustor, um Misturador de Gás do tipo KM60-3/2016 e um analisador ternário de gases mostrado na Figura 18.

Figura 28- Bancada de Soldagem



Fonte: Autor

Os equipamentos utilizados para obter dados da corrente de transição e análise da transferência metálica são:

- a) Um sistema de aquisição de dados QuantumX MX840B-HBM foi utilizado para obter oscilógramas de Tensão, Corrente e frequência da filmagem é mostrado na Figura 19.

Figura 29- Equipamento de aquisição de dados



Fonte: HBM Company

- b) Laser Óptico uma fonte de luz adicional para fins de diminuir a iluminação do arco para câmeras de alta velocidade com comprimento de onda de 632,8 nm, mostrado na Figura 20,

Figura 30- Laser Óptico



Fonte: Cavitar LTD

- c) Filmadora de alta velocidade para soldagens com captura de imagens até 2000 frames/segundo (PHANTOM CAMERA CONTROL) mostrado na Figura 21.

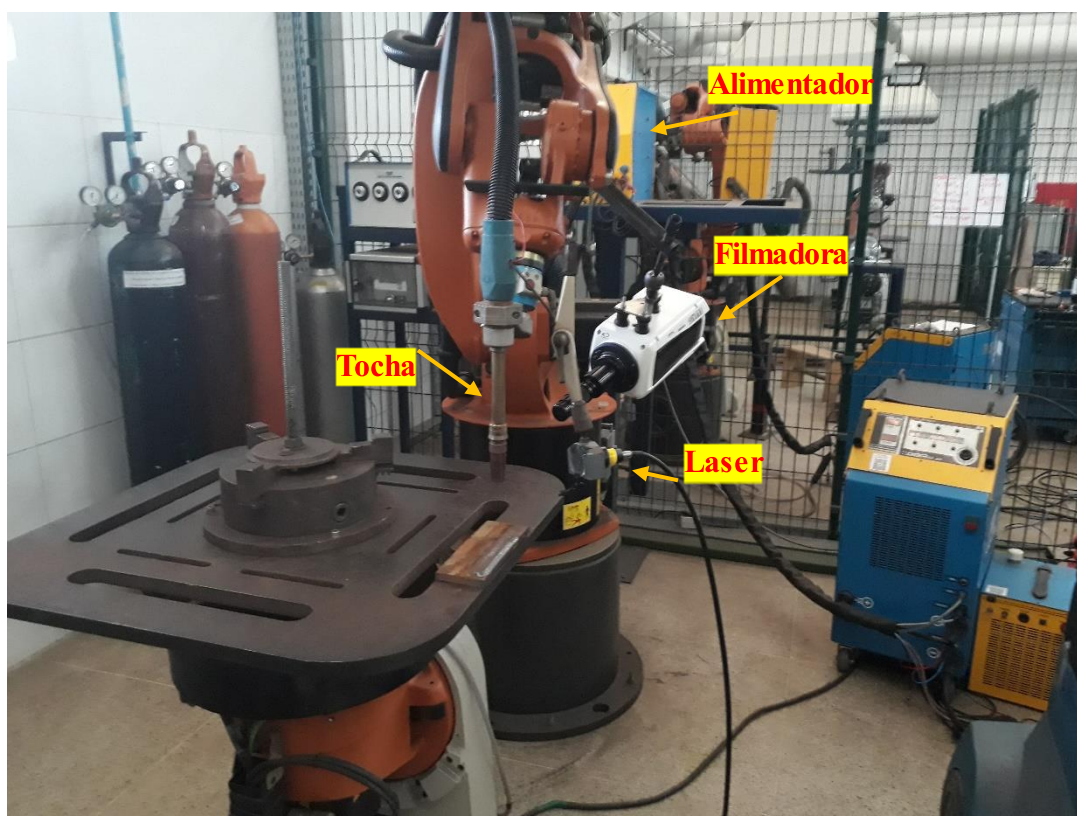
Figura 31-Câmera de filmagem em alta velocidade



Fonte: Phantom Ametek

A Figura 22, mostra como foi a preparação da bancada para o adaptar o sistema de filmagem e do laser.

Figura 32- Bancada de Soldagem



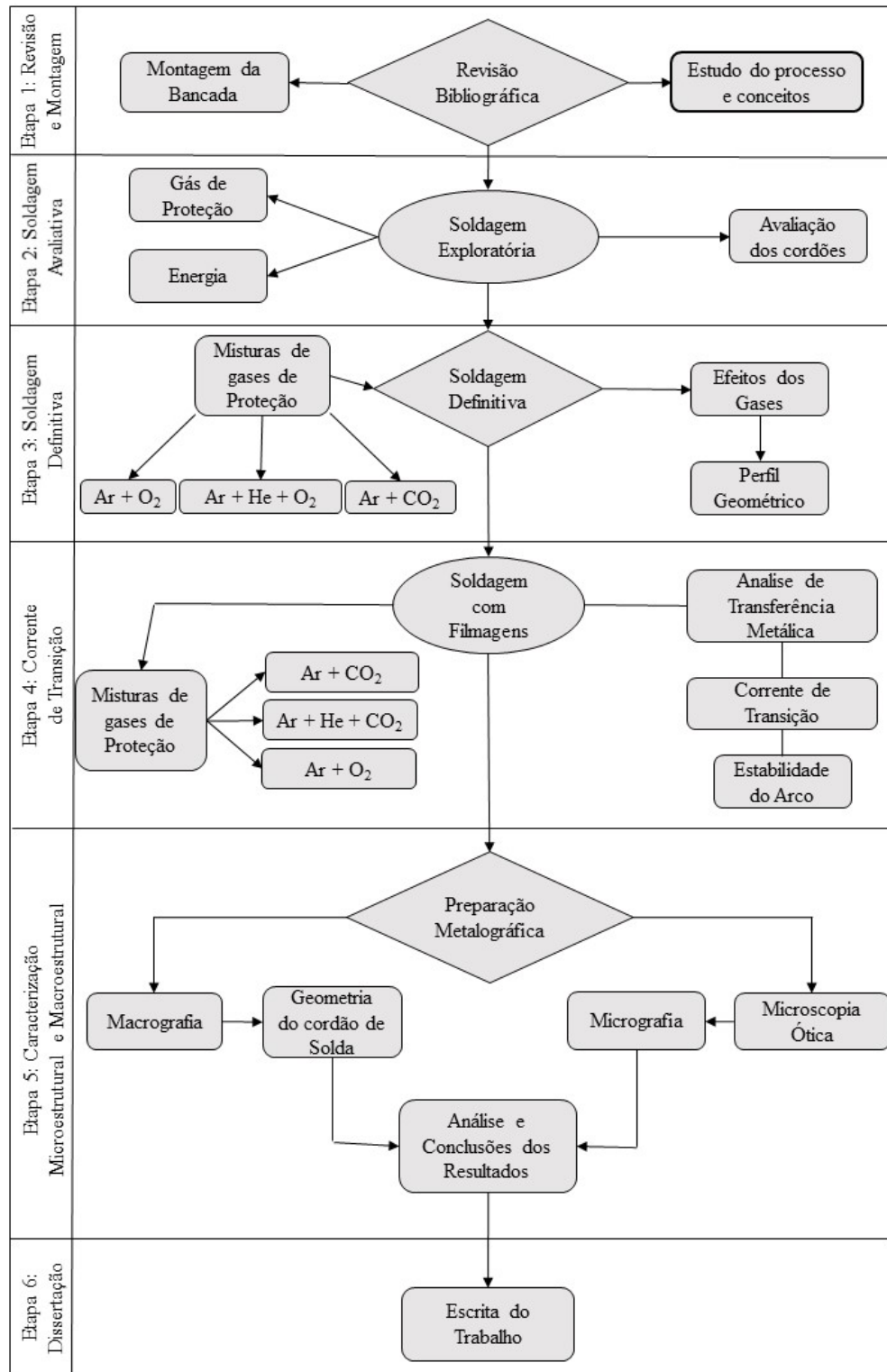
Fonte: Autor

4.4 – Metodologia

A metodologia para este trabalho foi dividida em 6 etapas, mostrada no fluxograma na Figura 23.

Figura 33- Fluxograma do trabalho

Fluxograma da Metodologia do Trabalho



Fonte: Autor

4.4.1 - Etapa 1 – Revisão Bibliográfica

Nesta etapa será feito um estudo na literatura para o embasamento teórico referente ao trabalho proposto, de modo a criar subsídios para discussões. Parte da revisão foi embasada na disciplina de Tecnologia da Soldagem (TJ0038), Professor Dr. Hélio Cordeiro de Miranda e a outra parte será realizada durante todo período de realização deste trabalho, juntamente com a montagem da bancada.

4.4.2 - Etapa 2 - Estudo Exploratório para Soldagem

Nesta etapa será feito um estudo exploratório, através da soldagem MIG/MAG, utilizando misturas de gases contendo Argônio, Hélio, Oxigênio e Dióxido de Carbono. Esta exploração inicial será realizada em barras chapas de aço carbono 1020 com deposição simples, de modo a identificar os seguintes parâmetros de soldagem: corrente, energia de soldagem, velocidade de alimentação do arame e velocidade de soldagem. Serão avaliados primeiramente os seguintes aspectos: quantidade de respingos e o aspecto superficial dos cordões. Posteriormente serão avaliados a geometria (reforço, largura, penetração) e a diluição dos cordões obtidos após a soldagem.

Os experimentos das soldagens foram realizados mantendo a DBCP 20 mm e a velocidade de soldagem 60 cm/min com intuito de manter a energia de soldagem aproximadamente de 0,8 KJ/mm. Uma fonte de soldagem multiprocessos foi utilizada no modo corrente constante com a corrente de 240 A corrente essa fornecida pelo fabricante do metal de adição. O arame eletrodo utilizado como metal de adição foi o AWS ER80S-B2, com diâmetro de 1,2 mm. As Soldagens foram exploradas alterando a Valim e observando o ruído durante a soldagem, um sistema de aquisição foi usado, para observar através dos sinais de tensão e de corrente a melhor estabilidade da solda no modo de transferência goticular. Um uma bancada robotizada e um sistema misturador de gases com Ar+4%CO₂ como referência foram usados. Os resultados permitiram identificar os seguintes parâmetros de soldagem com melhor estabilidade do arco e perfil geométrico.

- Corrente: 240 A;
- Velocidade de soldagem: 60 cm/min;
- Valim: 6,2 m/min;
- Vazão: 17 L/min.

Estes parâmetros serão utilizados para realização das soldagens definitivas utilizando chapas de aço carbono ASTM A36.

4.4.3 - Etapa 3 – Soldagens Definitivas

As soldagens definitivas serão realizadas em barras chapas de aço carbono ASTM A36 com dimensões de 160 mm x 75 mm x 12,7 mm, as mesmas foram cortadas e esmerilhadas para remoção de óxidos e sujeira mostrado na Figura 24.

Figura 34- Barra chata ASTM A36 esmerilhada



Fonte: Autor

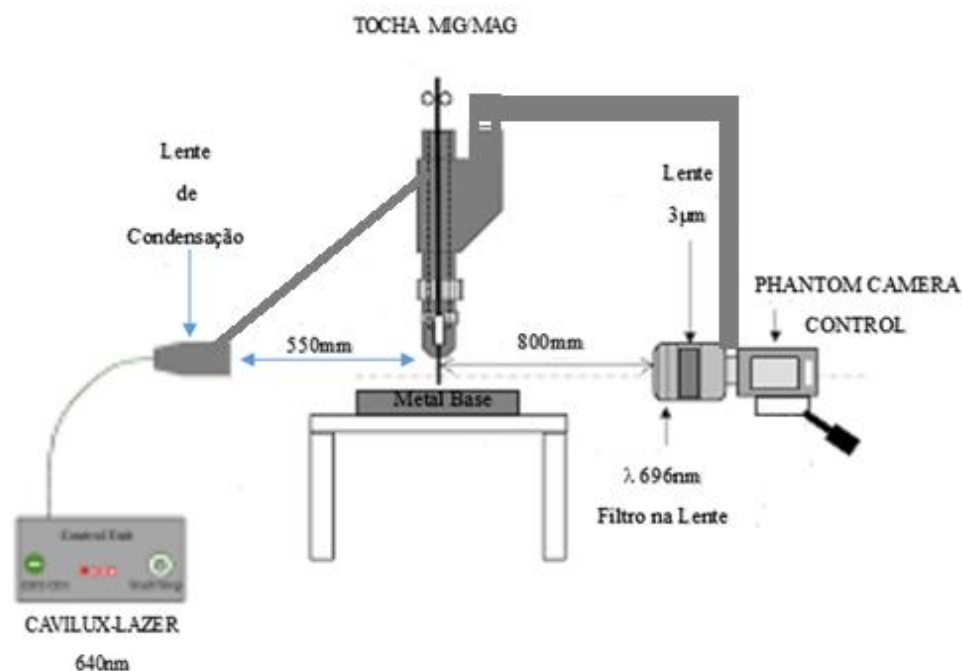
Serão feitas análises do aspecto visual dos cordões de solda de modo a identificar os efeitos das misturas de gases de proteção, no metal de base que permitiram a menor quantidade de defeitos superficiais, como mordeduras, respingos e falta de fusão. Além disso será feita a medida da geometria do cordão. Os resultados desta etapa darão subsídios para realização da próxima etapa.

4.4.4 - Etapa 4 – Efeito na Corrente de Transição

Nesta etapa serão realizadas soldagens com processo MIG/MAG, utilizando o modo tensão constante avaliando a corrente de transição, transferência metálica e uma análise do arco voltaico, através de um sistema de aquisições sincronizado com filmagens de uma câmera de alta velocidade e alterando a composição dos gases de proteção. Para visualização da transferência metálica e dos fenômenos ocorridos, foi utilizada a técnica com filmagem digital a alta velocidade com uma taxa de aquisição de 1000 frames por segundo e como luz de fundo, laser He-Ne com comprimento de onda de 632,2 μm . A técnica consiste em incidir sobre a região do arco de soldagem, um feixe laser e posicionar na um conjunto de filtros para eliminar parcialmente a luz produzida pelo arco.

Também foi utilizado uma câmera para filmagem em alta velocidade. O esquema do sistema utilizado está esquematizado na Figura 23.

Figura 35- Esquemático da soldagem utilizando a filmagem de alta velocidade.

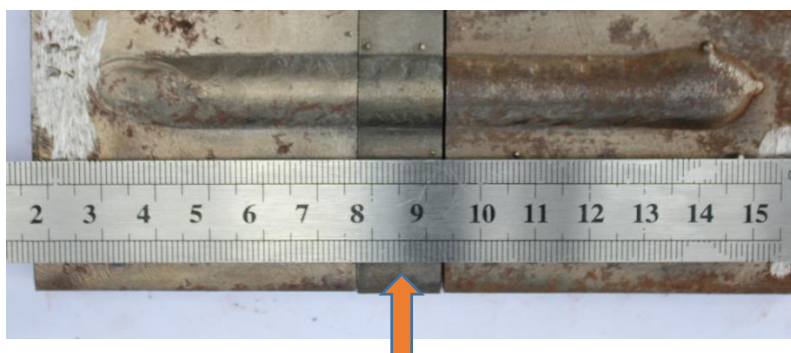


Fonte: Desconhecida

4.4.5 - Etapa 5 – Análise Macroestrutural e Microestrutural

Foi realizado dois cortes transversais no centro de cada cordão de solda definitivo, para retirada de uma amostra de 15 mm e posteriormente preparação metalográfica, identificando o perfil geométrico (largura, penetração, reforço) conforme a Figura 24.

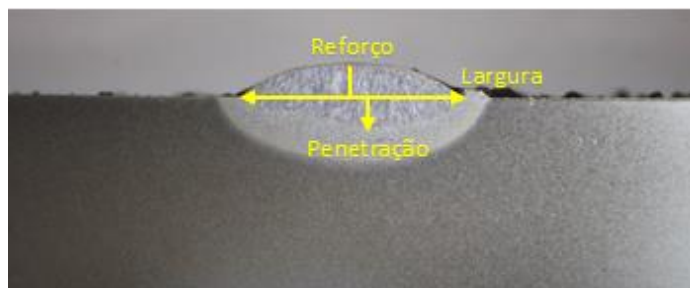
Figura 36- Corpo de prova para análise Microestrutural e Macroestrutural



Fonte: Autor

A Figura 28 indica como foi obtido os resultados para os parâmetros geométricos do cordão de solda.

Figura 38- Geometria do Cordão de Solda

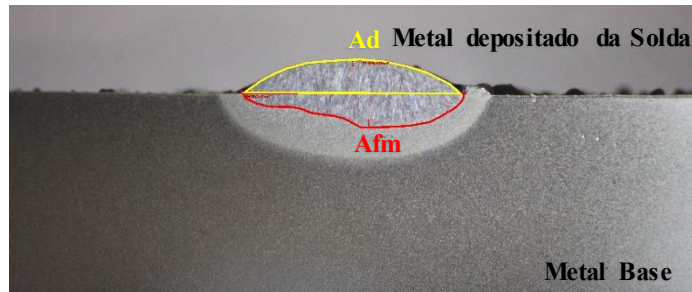


Fonte Autor

4.4.5.3 - Análise de Diluição

Para análise de diluição foi utilizado também o programa (Axio Vision). Na Figura 29 é observado as regiões consideradas para o cálculo da diluição segundo a equação 1.

Figura 39- Regiões para Cálculo da diluição



Fonte:Autor

Equação 1

$$\text{Diluição} = \frac{\text{Afm}}{(\text{Ad} + \text{Afm})} \times 100(\%)$$

Afm - área fundida do Metal Base
Ad - área depositada do cordão

Etapa 6 – Elaboração de Relatórios e Divulgação de Resultados

Nesta etapa está prevista a realização de relatórios e a divulgação dos resultados, de modo a difundir os resultados para motivar outras pesquisas nesta área. Artigos deverão ser produzidos para contribuir para o aumento das discussões e aumentar o conhecimento.

5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo, serão apresentados resultados qualitativos das análises dos cordões de solda, morfologia estrutural das zonas fundidas e ZAC e da transferência metálica, bem como resultados quantitativos da geometria do cordão e corrente de transição. A avaliação quantitativa dos resultados, foi baseada nos cálculos de diluição e geometria.

A soldagem com simples deposição para avaliação do aspecto superficial, perfil geométrico e posteriormente caracterização microestrutural. Os valores de tensão e corrente foram obtidos através de aquisição de dados, com a fonte no modo corrente constante buscando a melhor estabilidade da soldagem em função da mistura de gás de proteção. A Tabela 5 mostra os parâmetros adquiridos para a soldagem definitiva com o eletrodo AWS ER 80S-B2 sobre a chapa de aço carbono AWS A36.

Tabela 5- Parâmetros adquiridos para a soldagem definitiva

Ensaio	Gás de Proteção %	DBCP	Valim [m/min]	V sold cm/min	Um (V)	Im (A)
01	Ar+38%He+2%CO ₂	20	6,2	60	35	233
02	Ar+36%He+4%CO ₂	20	6,2	60	34	234
03	Ar+32%He+8%CO ₂	20	6,2	60	33	235
04	Ar+04%CO ₂	20	6,2	60	32	236
05	Ar+08%CO ₂	20	6,2	60	32	235
06	Ar+10%CO ₂	20	6,2	60	33	234
07	Ar+20%CO ₂	20	6,2	60	34	234
08	Ar+2%O ₂	20	6,2	60	31	236
09	Ar+4%O ₂	20	6,2	60	32	235
10	Ar+8%O ₂	20	6,2	60	32	235

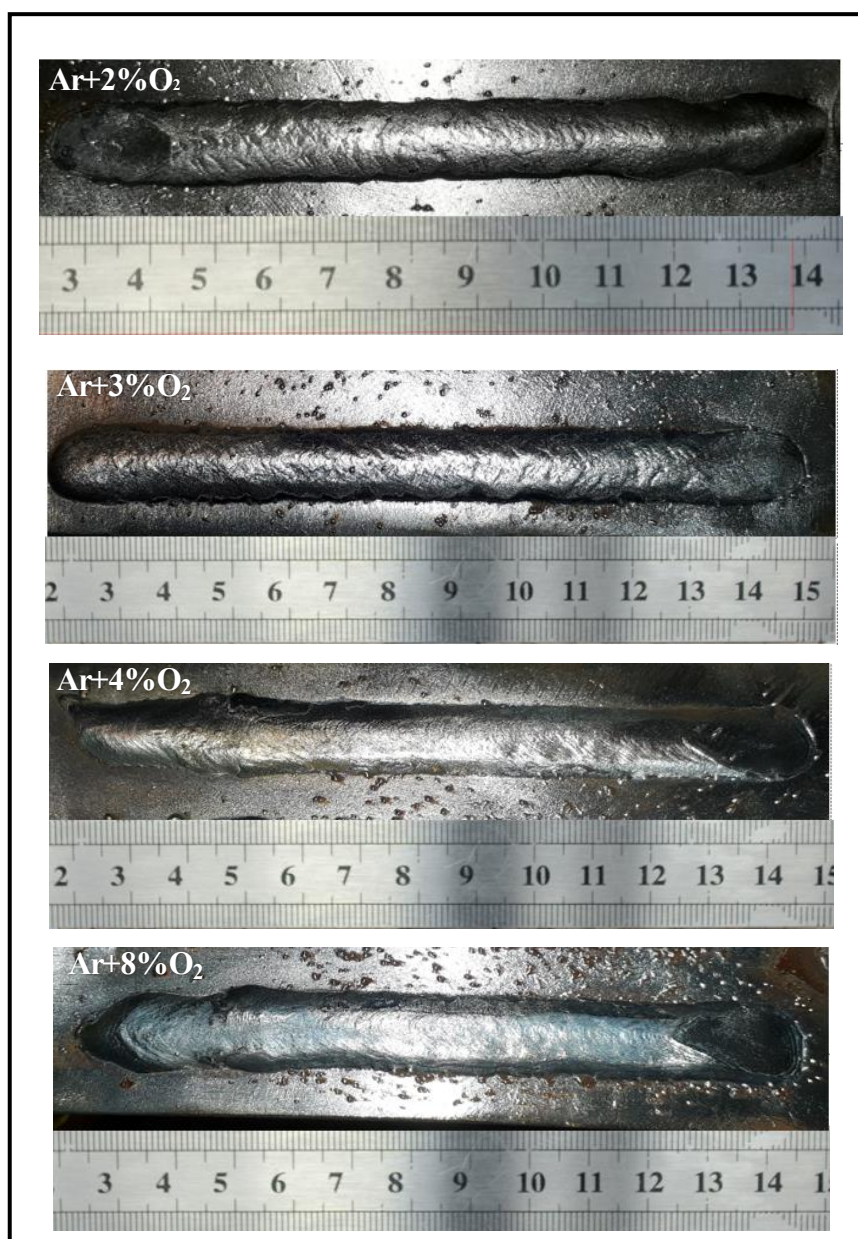
Fonte: Autor

5.1 – Aspecto Superficial dos Cordões

O aspecto superficial dos cordões de solda foi considerado bom, pois foram mantidas a transferência metálica goticular. Na Figura 30 estão mostrados alguns aspectos superficiais dos cordões soldados para aplicação da mistura utilizando Argônio e Oxigênio. Pode-se observar que teores de 4% de O₂ o cordão possui o melhor acabamento superficial com poucos respingos e melhor molhabilidade influenciada por uma melhor estabilidade do arco.

Diferente do cordão de teor com 8% de O_2 , condição essa influenciada pela instabilidade do arco, aumenta da energia e gotas explosivas causando uma oxidação excessiva na superfície do cordão com perdas de elementos de liga que pode causar irregularidades na superfície do cordão como porosidades e aumento de respingos. Altos teores de O_2 provoca confinamento das manchas catódicas criando microjatos de plasma contrário repelindo a gota, ocorrendo também para auto teores de CO_2 .

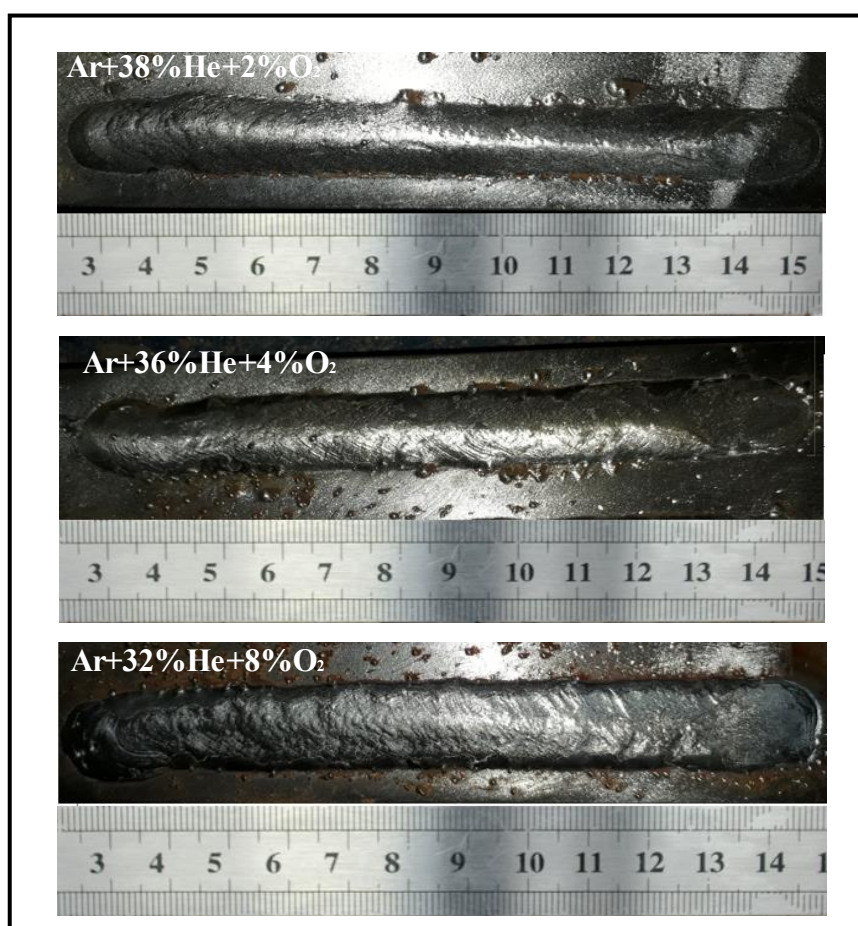
Figura 40- Influência no aspecto superficial do cordão com mistura de Ar + O_2



Fonte: Autor

A Figura 31 mostra os perfis geométricos com misturas de gases de proteção Argônio, Hélio e oxigênio. Pode se ver que valores maiores de oxigênio o cordão não possui aspecto superficial bom devido alto teor de oxidação. Já com teores menores de oxigênio e aumento do teor de Hélio e menor teor de oxigênio, apresentou melhor acabamento superficial e menos respingos. Com 32% de He e 8% e O₂ ocorre maior largura do cordão, em consequência o grau de temperatura térmica afeta a forma do cordão de solda e a ligação do metal ao lado da solda.

Figura 41- Influência no aspecto superficial do cordão com mistura de Ar + He + O₂

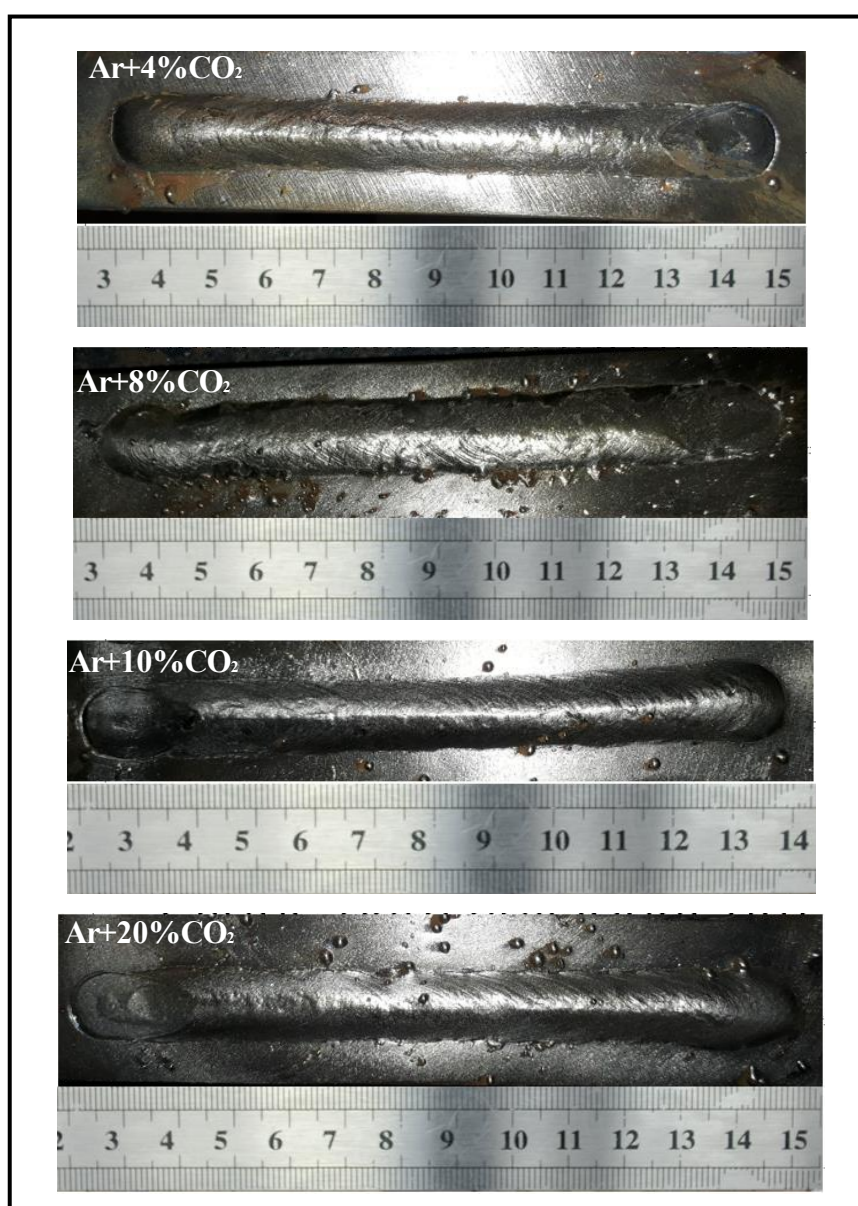


Fonte: Autor

Outros perfis superficiais foram analisados com misturas de Argônio e CO₂ com teores a partir de 4% de CO₂ até 20%. O aumento do teor de CO₂ pode ter influenciado a estabilidade do arco, visto que se encontrou um bom aspecto superficial e menos respingos com a mistura de Ar + 10% de CO₂.

O potencial de ionização da mistura do gás de proteção se eleva o que torna o arco mais instável e, conseqüentemente, apresentam cordões de solda irregulares prejudicando a deposição da gota e repelindo. A Figura 32 mostra esses perfis com teores de Ar + 20%CO₂. Analisando os aspectos dos cordões na Figura 30 é possível observar que as condições com teor a partir de 4% de CO₂ tem pouca presença de respingos em torno do cordão. Pode observar que os teores mais elevados de CO₂ na mistura (e conseqüentemente mais baixos teores de Ar) tenham comprometido a estabilidade do arco que teve conseqüências na quantidade de respingos no entorno dos cordões das amostras.

Figura 42- Influência no aspecto superficial do cordão com mistura de Ar + CO₂

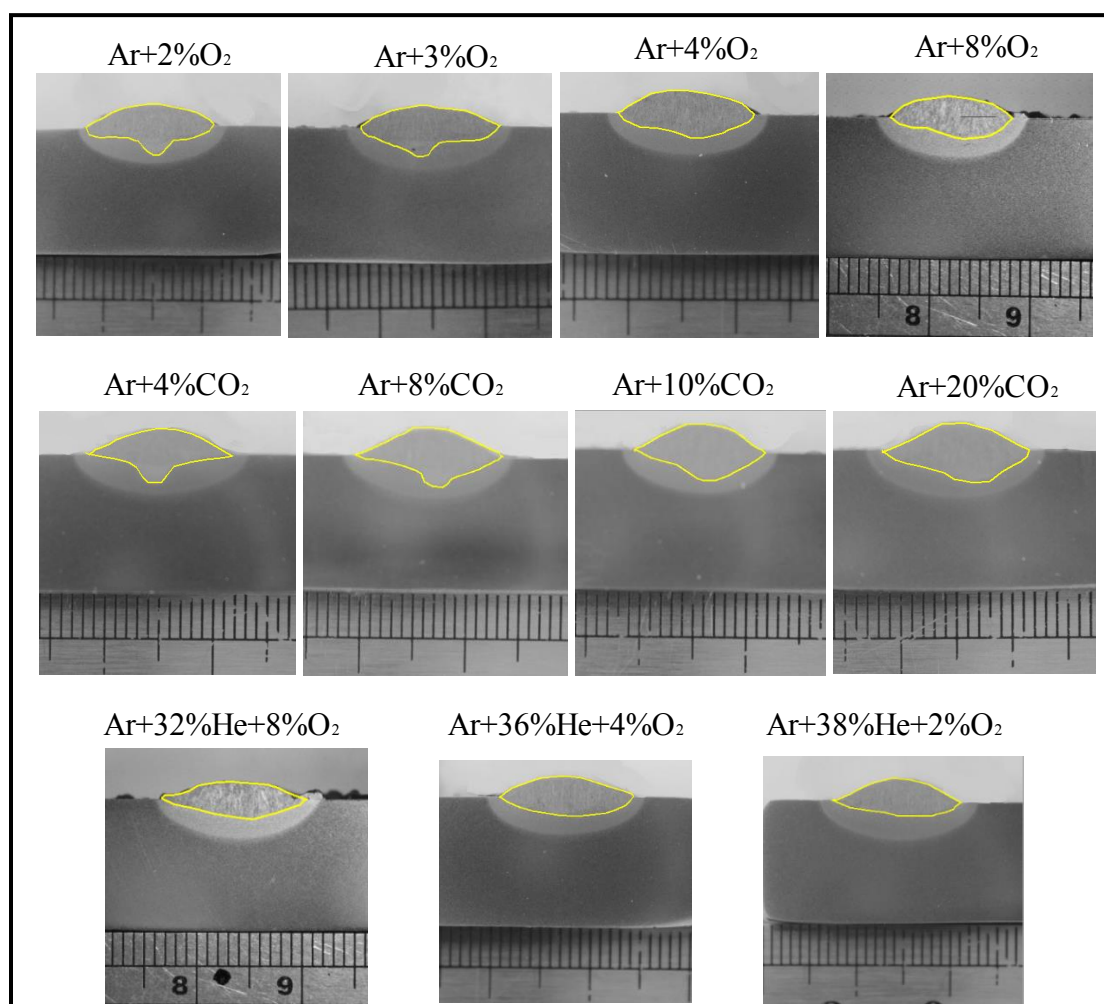


Fonte: Autor

5.2 – Análise geométrica macroestrutural

As macrografias das seções transversais dos cordões soldados estão expostas na Figura 33. Pode-se notar que o gás de proteção com teores de Ar+2%O₂ até 3% teve um perfil da seção transversal do cordão de solda do tipo “taça” mais acentuado, enquanto que os gases Ar+4%O₂ e Ar+8%O₂ tiveram perfis mais arredondados. O mesmo acontece para os níveis de Ar+ CO₂. Observou quanto menor o teor de gases ativos e mais presença de Argônio o perfil é do tipo taça. Já para misturas com Hélio e Oxigênio os perfis se mantiveram arredondados com menor penetração, mas com larguras maiores comparado com as amostras contendo CO₂ e O₂.

Figura 43- Macrografia da seção transversal do cordão de solda



Fonte: Autor

A partir dessas imagens de macrografias obteve as medidas de reforço, penetração, largura e diluição.

Os resultados foram obtidos pela média de 3 medidas onde essas tabelas estão em anexo no apêndice 1 no final deste trabalho. A Tabela 6 mostra os valores das médias.

Tabela 6- Resultados das medidas do cordão soldado

Misturas	Largura (mm)	Penetração (mm)	Reforço (mm)	Diluição (%)
Ar+32%He+8%O ₂	13,38	1,73	1,78	49,58
Ar+36%He+4%O ₂	13,44	1,75	2,12	49,99
Ar+38%He+2%O ₂	14,05	1,48	2,50	43,04
Ar+04%CO ₂	13,48	2,70	2,39	36,41
Ar+08%CO ₂	13,68	2,94	2,52	44,16
Ar+10%CO ₂	12,30	2,83	2,46	49,33
Ar+20%CO ₂	13,11	2,87	2,52	53,30
Ar+2%O ₂	12,76	2,74	2,28	36,94
Ar+3%O ₂	13,11	2,65	1,96	49,37
Ar+4%O ₂	12,70	2,11	2,15	50,43
Ar+8%O ₂	12,39	1,79	1,85	58,74

Fonte: Autor

A análise da geométrica foi avaliada quantitativamente, sobre os cordões e a diluição. Para avaliação dos resultados e suas variações são realmente influenciadas pelos fatores de controle e não são oriundos de erros de medição, foram realizados testes hipotéticos, onde o valor de probabilidade (valor-p) encontrado, foi comparado com um nível de significância α adotado. Os valores obtidos do valor "p" foram inferiores a α . Com os resultados das análises de variância foram gerados gráficos de intervalo para largura, penetração e reforço. Para as análises estatísticas realizadas nesse trabalho, o nível de significância adotado foi de $\alpha = 0,05$. Os valores a seguir foram determinados pela média de três medidas e desvio padrão utilizando o programa de estatística MiniTab.

A seguir o modelo como foram gerados os gráficos de todos os níveis de misturas de gases de proteção em relação a geometria do cordão de solda. Exemplos:

Médias				
Ar + O2 (%)	N	Média	DesvPad	IC de 95%
2	3	12,7600	0,0700	(12,5319; 12,9881)
3	3	13,110	0,293	(12,882; 13,338)
4	3	12,7000	0,1562	(12,4719; 12,9281)
8	3	12,1211	0,0473	(11,8930; 12,3492)

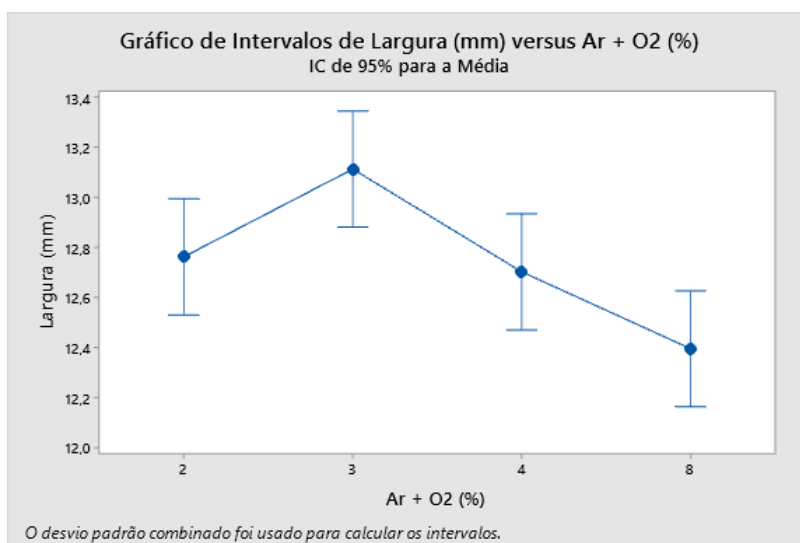
DesvPad Combinado = 0,171345

Método	
Hipótese nula	Todas as médias são iguais
Hipótese alternativa	Nem todas as médias são iguais
Nível de significância	$\alpha = 0,05$
<i>Assumiu-se igualdade de variâncias para a análise</i>	

Análise de Variância					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Ar + O2 (%)	3	1,5115	0,50385	17,16	0,001
Erro	8	0,2349	0,02936		
Total	11	1,7464			

As Figuras 44 a 46 relacionam a largura, penetração e reforço respectivamente com o efeito do gás O_2 , nota-se que a largura e penetração diminuem com o aumento do teor de O_2 para misturas a partir de 3% de O_2 . Para a mistura binária $Ar+O_2$, o aumento do teor de O_2 reduz o nível da corrente de transição diminuindo a estabilidade do arco e a tensão superficial gota-metal base. Valores menores de O_2 , a corrente de transição volta a subir aumentando a energia e capacidade térmica de fusão.

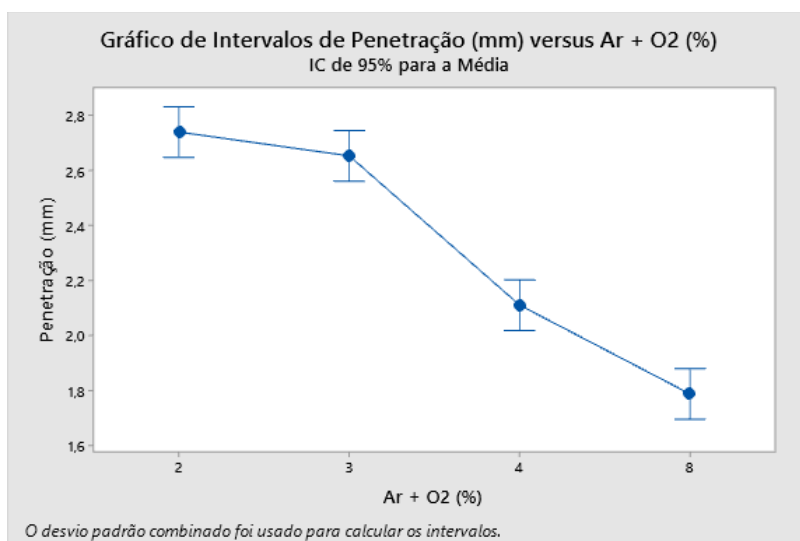
Figura 44- Influência da mistura do gás $Ar+O_2$ na Largura do Cordão



Fonte: Autor

Valor - p = 0,007

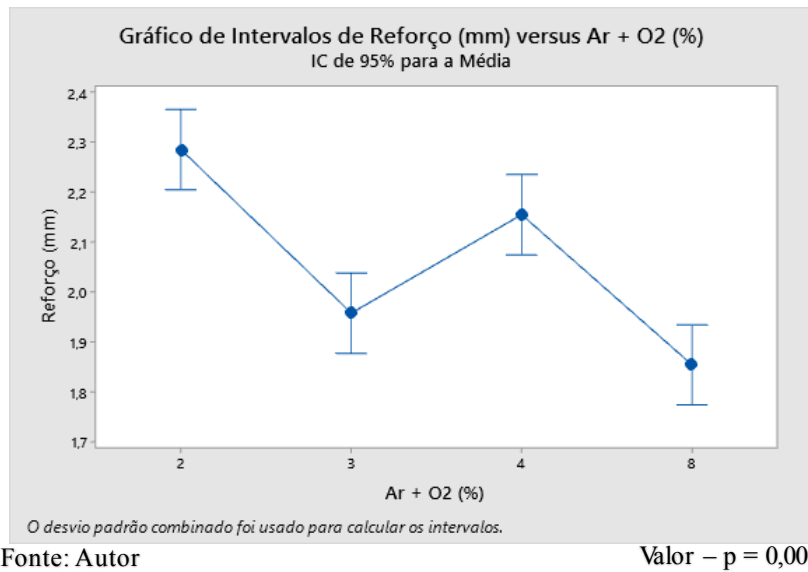
Figura 45- Influência da mistura do gás $Ar+O_2$ na Penetração do Cordão



Fonte: Autor

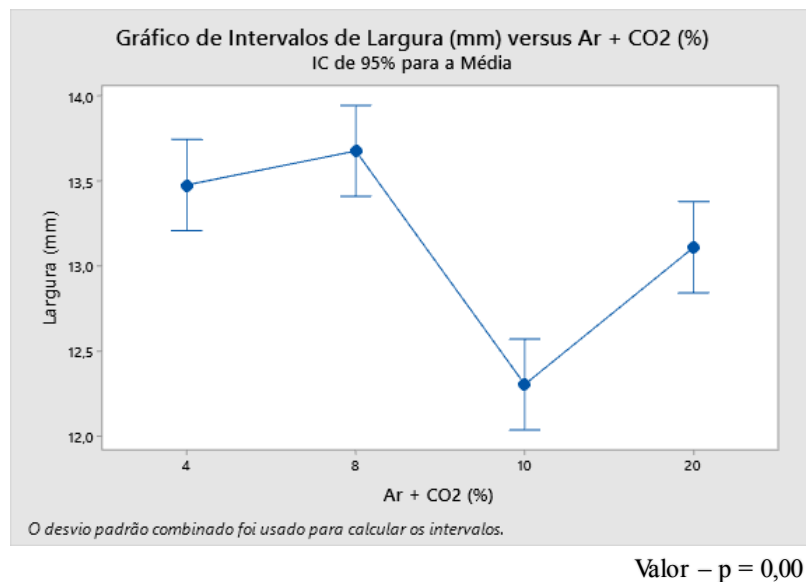
Valor - p = 0,00

Figura 46- Influência da mistura do gás Ar+O₂ no reforço do Cordão



As Figuras 47 a 49 estão relacionados com o aumento do CO₂. Com o aumento do teor de CO₂ era esperado o aumento da penetração já que a alta capacidade de troca de calor do CO₂ e sua energia liberada faz transferir mais calor para a metal base. Contudo a partir de 8% de CO₂ a largura diminui, depois tende a voltar para o estado inicial.

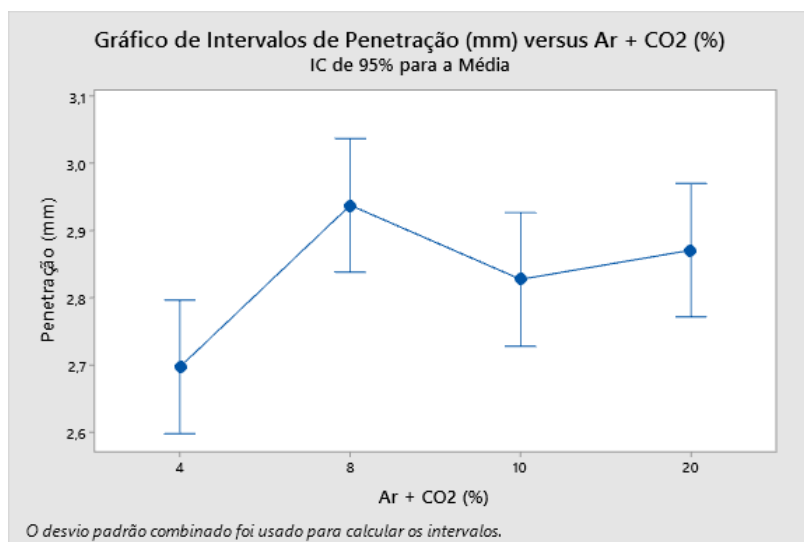
Figura 47- Influência da mistura do gás Ar + CO₂ na Largura do Cordão



Isso ocorre devido instabilidade do arco na qual as forças que governam na transferência metálica agem de forma que geram uma pressão abaixo da gota e um arco curto, causando o fenômeno de repulsão da gota.

A penetração aumenta com níveis maiores de CO₂ e se mantém a partir de 8%. O reforço não se observa aumento nem diminuição se mantém na mesma faixa. Teores a partir de 20% de CO₂ é normalmente é utilizado o modo de transferência curto-circuito.

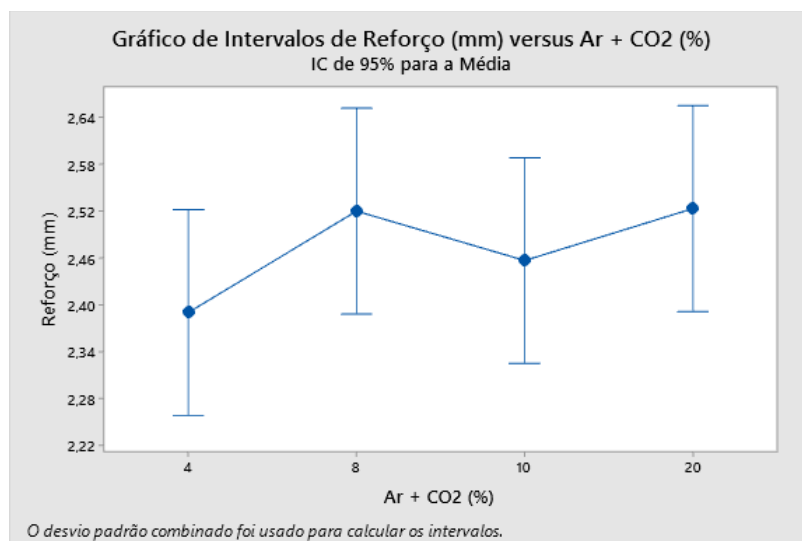
Figura 48- Influência da mistura do gás Ar + CO₂ na Penetração do Cordão



Fonte: Autor

Valor - p = 0,024

Figura 49- Influência da mistura do gás Ar + CO₂ no reforço do Cordão

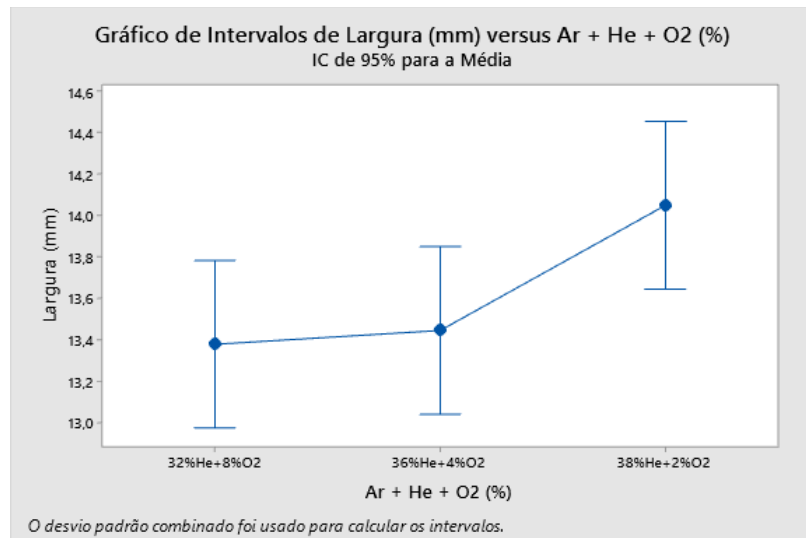


Fonte: Autor

Valor - p = 0,366

Na Figura 50 observa-se que a largura da solda aumenta à medida que o conteúdo de Hélio aumenta, mas quando o gás Hélio diminui a largura da solda cai devido à diminuição do comprimento do arco. Observou-se uma queda na penetração com teores mais altos de Hélio, em decorrência do aumento da largura, mas o aumento do O₂ na mistura possibilitou uma melhor penetração.

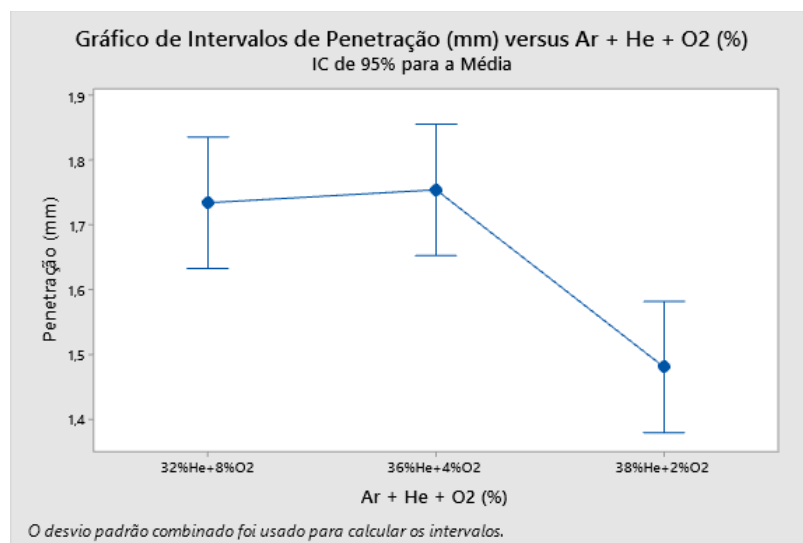
Figura 50- Influência da mistura do gás Ar + He + O₂ na Largura do Cordão



Fonte: Autor

Valor - p = 0,053

Figura 51- Influência da mistura do gás Ar + He + O₂ na Penetração do Cordão

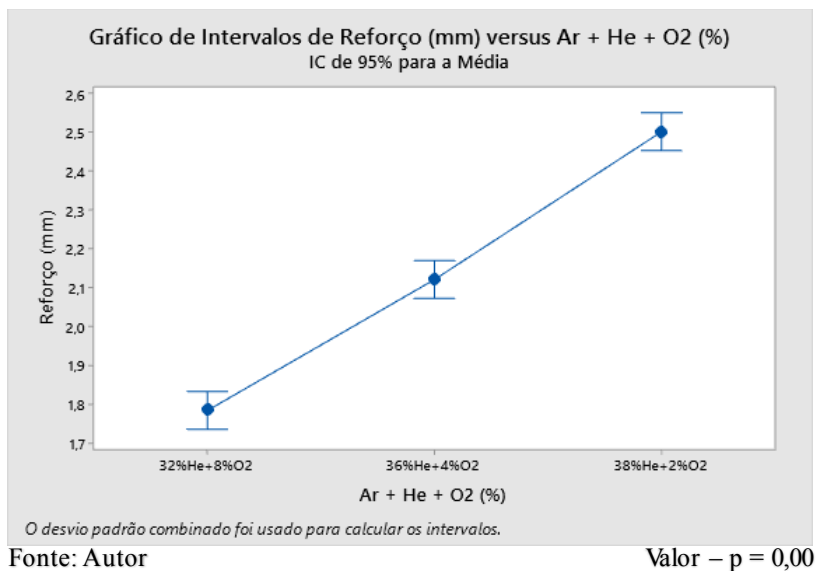


Fonte: Autor

Valor - p = 0,006

Pode observar na Figura 52 o reforço aumenta com aumento do gás Hélio, pois diminui a molhabilidade e aumenta a tensão superficial na mistura. O gás Hélio por ser um gás de alto potencial de ionização contribuiu para esses resultados.

Figura 52- Influência da mistura do gás Ar + He + O₂ no Reforço do Cordão



Foi analisado também a relação Reforço / Largura, devido a medida das zonas fundidas serem imprecisas. A seguir as Figuras 53, 54 e 55 mostram essa relação para cada teor de misturas de gases de proteção. Observa-se que com níveis até 3% de O₂ a relação diminui causado por uma melhor molhabilidade. Para as misturas de argônio e CO₂ essa molhabilidade diminui até níveis com 10% de CO₂, depois volta a aumentar com aumento do teor de dióxido de carbono. Em comparação com a mistura do gás de proteção contendo Hélio a molhabilidade diminui à medida que aumenta o gás Hélio.

Figura 53- Influência da mistura do gás Ar+O₂ na relação Reforço/Largura

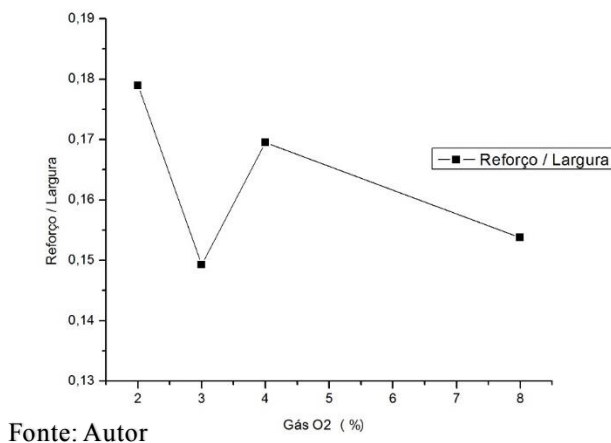
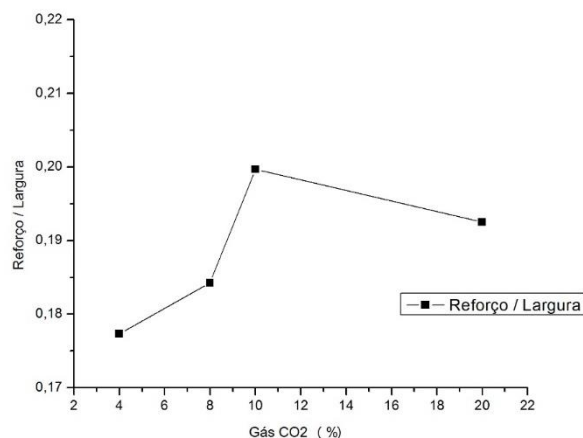
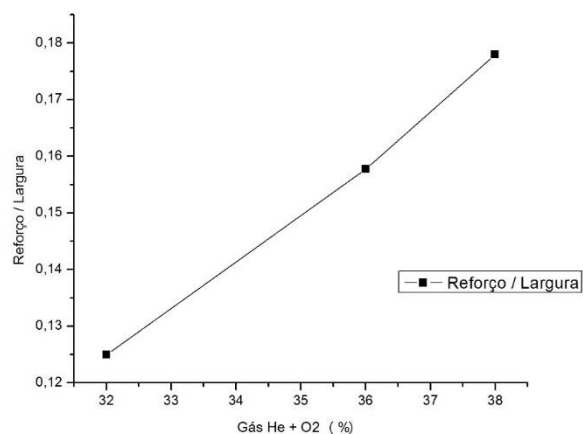


Figura 54- Influência da mistura do gás Ar+CO₂ na relação Reforço/Largura



Fonte: Autor

Figura 55- Influência da mistura do gás Ar+He+O₂ na relação Reforço/Largura



Fonte: Autor

Na Tabela 8 estão os valores das energias alcançados durante a soldagem, que foram calculados através dos valores de corrente de transição e tensão média, indicados pelo sistema de aquisição em sincronização de cada frame obtido pelo sistema de filmagem, frames esses que foram analisados juntamente com os sinais de corrente e tensão pelo sistema HBM. Isso deve-se ao fato de que foram ajustadas as velocidades de alimentação durante as soldagens para alcançar a transição de globular para goticular com a fonte operando em modo tensão constante, mostrado na Tabela 7.

Pode-se verificar que os fatores de controle estudados e obtidos através da aquisição dos ensaios de filmagem, mostraram ter importante influência sobre as o efeito do gás na energia de soldagem e sobre as variáveis correntes e tensão.

Tabela 7- Fatores de controle e seus níveis ajustados para os experimentos

Ensaio	Gás de Proteção %	DBCP	Velim [m/min]	Um [V]
01	Ar+38%He+2%CO ₂	20	4, 5,6,7,8	33
02	Ar+18%He+2%CO ₂	20	4, 5,6,7,8	33
03	Ar+08%He+2%CO ₂	20	4, 5,6,7,8	33
04	Ar+04%CO ₂	20	5,6,7,8	38
05	Ar+08%CO ₂	20	5,6,7,8,9	36
06	Ar+10%CO ₂	20	6,7,8,9	36
07	Ar+20%CO ₂	20	7,8,9,10	40
08	Ar+2%O ₂	20	3,4,5,6,7	31
09	Ar+4%O ₂	20	3,4,5,6,7	31
10	Ar+8%O ₂	20	4,5,6,7,8	33

Fonte: Autor

Tabela 8- Parâmetros adquiridos para diversas energias de soldagem, na corrente de transição

Ensaio	Gás de Proteção	V Sold [m/min]	Itr [A]	Um [V]	E Sold [KJ/mm]
01	Ar+38%He+2%CO ₂	0,60	220	34	0,73
02	Ar+18%He+2%CO ₂	0,60	232	35	0,77
03	Ar+08%He+2%CO ₂	0,60	245	35	0,81
04	Ar+04%CO ₂	0,60	243	37	0,90
05	Ar+08%CO ₂	0,60	248	38	0,94
06	Ar+10%CO ₂	0,60	265	40	1,06
07	Ar+20%CO ₂	0,60	284	43	1,22
08	Ar+2%O ₂	0,60	240	33	0,79
09	Ar+4%O ₂	0,60	230	35	0,81
10	Ar+8%O ₂	0,60	249	37	0,92

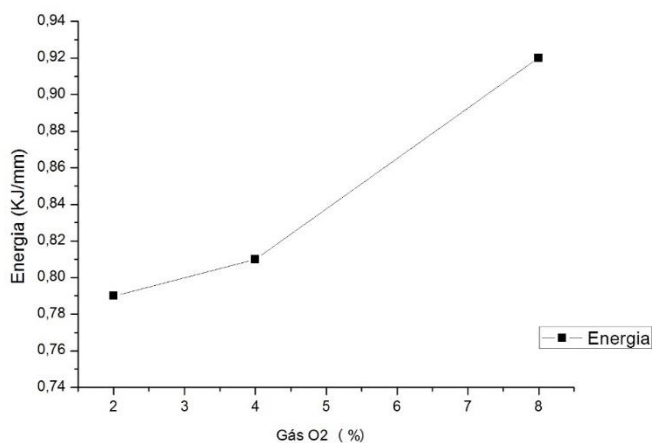
Fonte: Autor

Na coluna das energias, pode-se notar que os valores aumentam nas soldagens de modo, quando aumentam o teor das porcentagens de CO₂, O₂ isso ocorre devido ao aumento da corrente de transição em consequência aumenta a energia de soldagem.

Já com o gás Hélio, devido ser um gás de baixa densidade requer energias maiores para uma melhor transferência metálica. Teores maiores com misturas desse gás não se consegue transferência goticular, normalmente são utilizados no modo curto circuito.

Observa-se que com aumento de O_2 na mistura de $Ar+O_2$ a energia de soldagem aumenta. A Figura 56 avalia os teores das misturas com a energia de soldagem.

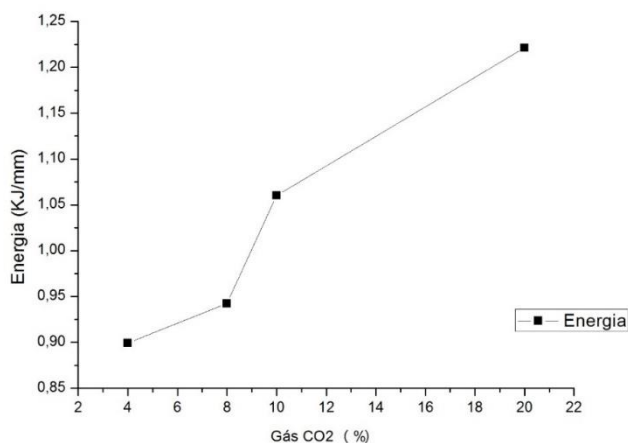
Figura 56- Influência da mistura do gás $Ar+O_2$ na energia de soldagem



Fonte: Autor

O mesmo ocorre quando aumenta o teor de CO_2 , a energia de soldagem aumenta.

Figura 57- Influência da mistura do gás $Ar+CO_2$ na energia de soldagem

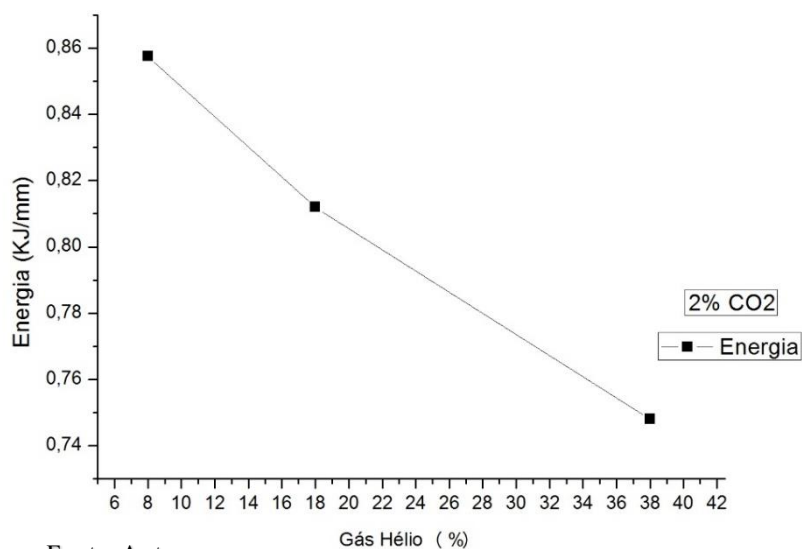


Fonte: Autor

Observa-se que ao aumentar o teor de Hélio a energia diminui, devido a maior energia de ionização ou potencial de ionização desse gás a corrente de transição diminui ocasionando uma baixa energia de soldagem. Sua alta capacidade de troca de calor resulta maior calor imposto possibilitando velocidades mais altas de soldagens a medida que aumenta o teor de Hélio, uma menor demanda de energia de soldagem será utilizada com isso aumenta a tensão do arco e diminui a corrente.

Os resultados da Figura 58 foram obtidos somente para o Hélio, pois manteve 2% de CO₂.

Figura 58- Influência da mistura do gás Ar+He+CO₂ na energia de soldagem



5.3- Análise Microestrutural

5.3.1- Caracterização do metal de base e metal de adição

A soldagem de amanteigamento foi realizada em 4 camadas obedecendo à altura da norma AWS A5.28/A5.28m:2005 (R2015) e garantindo a diluição zero. A Tabela 9 e a Tabela 10 apresentam as análises de composição químicas realizadas por espectroscopia para ambas as ligas, teores de elementos dentro do especificado do metal de base ASTM A36 e do metal de adição AWS ER80S-B2.

Tabela 9- Composição química Metal Base

Elemento	C	Si	Mn	P	S
(%w)	0,10	0,19	0,35	0,029	0,029

Fonte: Autor

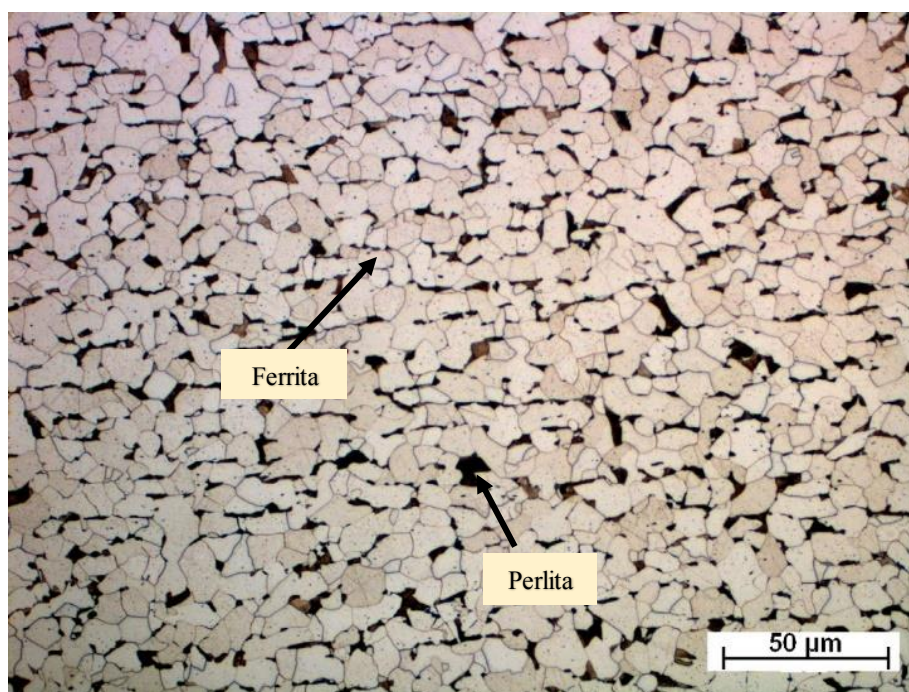
Tabela 10- Composição química do metal de adição

Elemento	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)
AWS ER80S-B2 Ø=1,2 mm	0,08	0,42	0,47	0,006	0,01
	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)	Cu (%)	
	0,13	1,29	0,48	0,2	

Fonte: Autor

Foi feita a preparação metalográfica no metal de base e em seguida a caracterização microestrutural na condição recebida. A imagem foi obtida por microscopia óptica com aumento de 200X com ataque Nital 2% e está mostrada na Figura 59.

Figura 59- Microestrutura do metal de base



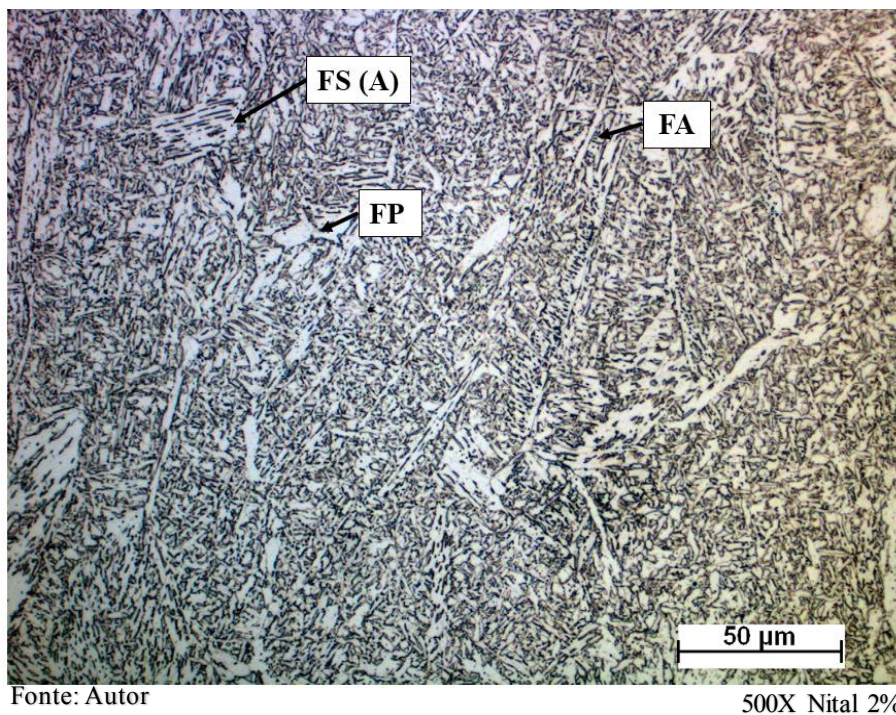
Fonte: Autor

200X Nital 2%

Para as zonas fundidas as imagens foram obtidas por microscopia óptica com aumento de 500X Nital 2%, mantendo essa magnificação em todas as imagens com os diferentes teores de misturas de gases de proteção, para observar somente os efeitos dos gases de proteção nas microestruturas. Com fase de ferritas primarias e secundarias bem distribuídas ao longo da zona da fundida.

A Figura 60 mostra uma imagem como ilustração da zona fundida de umas das amostras soldadas.

Figura 60- Microestrutura do metal de adição



5.3.2- Zona Fundida (ZF)

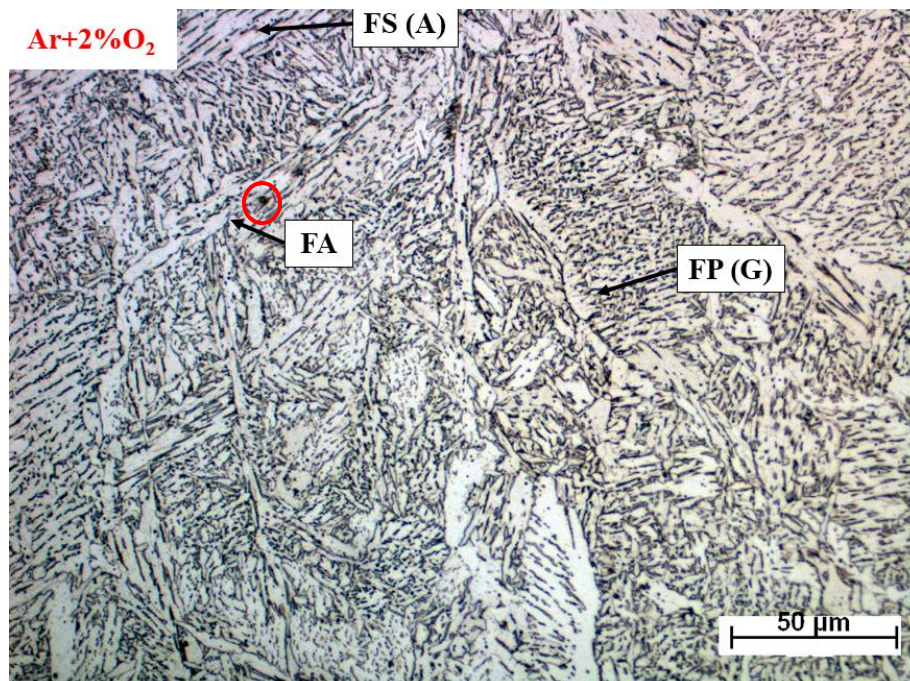
A influência do oxigênio na microestrutura da zona fundida ocorre, basicamente, através da quantidade e do tamanho das inclusões de óxidos. As Figuras 61 até 64 mostra as inclusões destacadas com círculo vermelho. Pode observar que com baixos teores de oxigênio de 2% de O_2 a mistura proporciona a formação de inclusões de pequeno diâmetro e menor variância em relação ao diâmetro médio. Para teores de 3% oxigênio, as inclusões atingem maior diâmetro e maior variância. Desta forma, menores teores de oxigênio oferecem maior quantidade de núcleos intragranulares para transformação da austenita.

As inclusões finamente dispersas na austenita favorecem a formação da ferrita acicular, cuja nucleação se dá apenas intragranularmente.

De fato, existe uma distribuição ótima de inclusões para favorecer a formação de ferrita acicular de 3% até 4% de O_2 . Teores muito baixos ou muitos altos de oxigênio inibem a formação desta microestrutura.

Foi observado na Figura 61 que com aumento de até 3%O₂ as ferritas voltam a crescer e ao continuar aumentando o nível de oxigênio as ferritas tendem a voltar se degenerar, fato esse devido ao alto poder de oxidação na zona fundida.

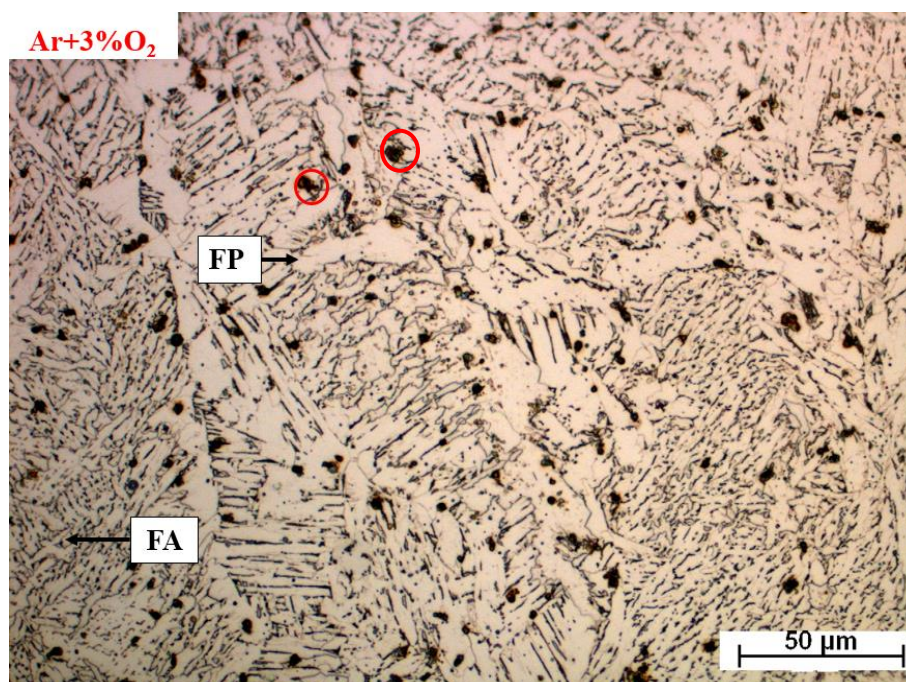
Figura 61- Microestruturas da ZF para misturas de Ar+2%O₂. 500x



Fonte: Autor

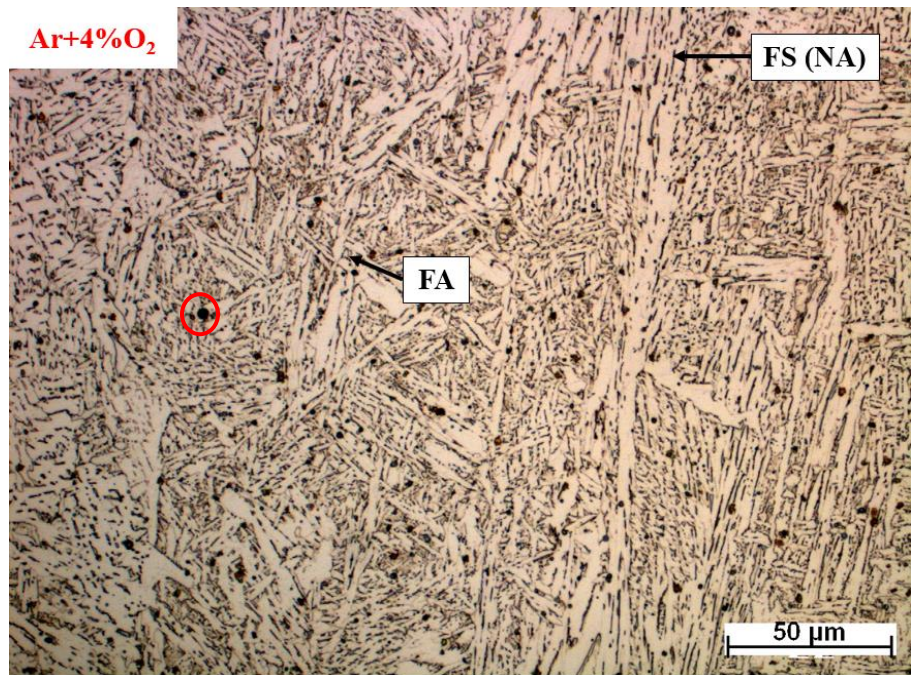
500X Nital 2%

Figura 62- Microestruturas da ZF para misturas de Ar+3%O₂. 500x



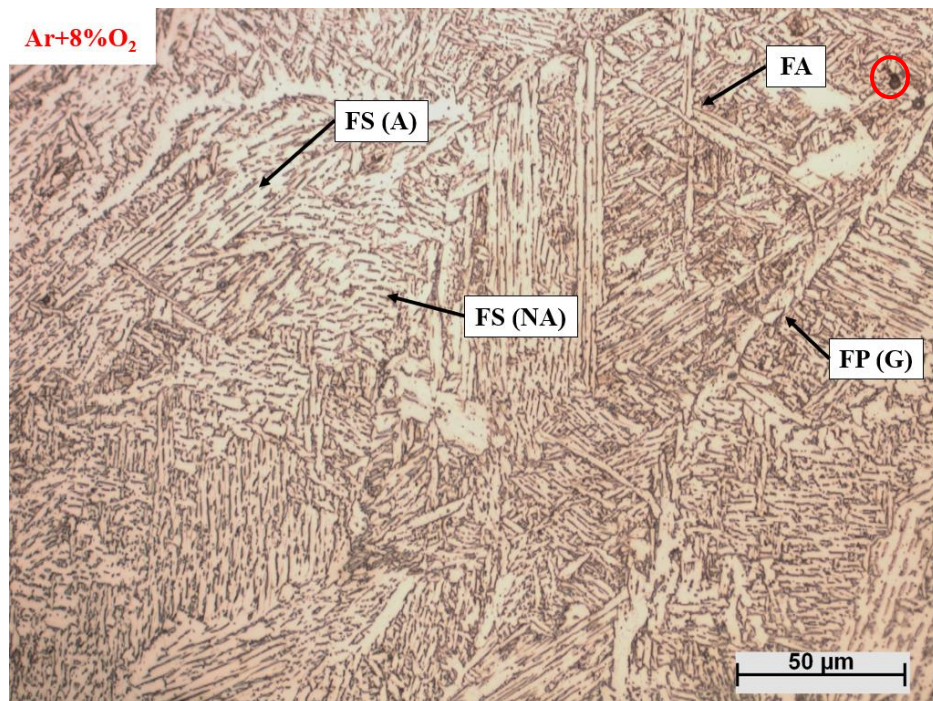
Fonte: Autor

500X Nital 2%

Figura 63- Microestruturas da ZF para misturas de Ar+4%O₂. 500x

Fonte: Autor

500X Nital 2%

Figura 64- Microestruturas da ZF para misturas de Ar+8%O₂. 500x

Fonte: Autor

500X Nital 2%

Ao aumentar a quantidade de CO_2 no gás de proteção pode aumentar a quantidade de inclusão após a dissociação do gás e a porosidade na solda, com isso também aumenta a formação de ferrita acicular, o que melhora a tenacidade da solda e diminui a dureza.

Figura 65- Microestruturas da ZF para misturas de $\text{Ar}+4\%\text{CO}_2$. 500x

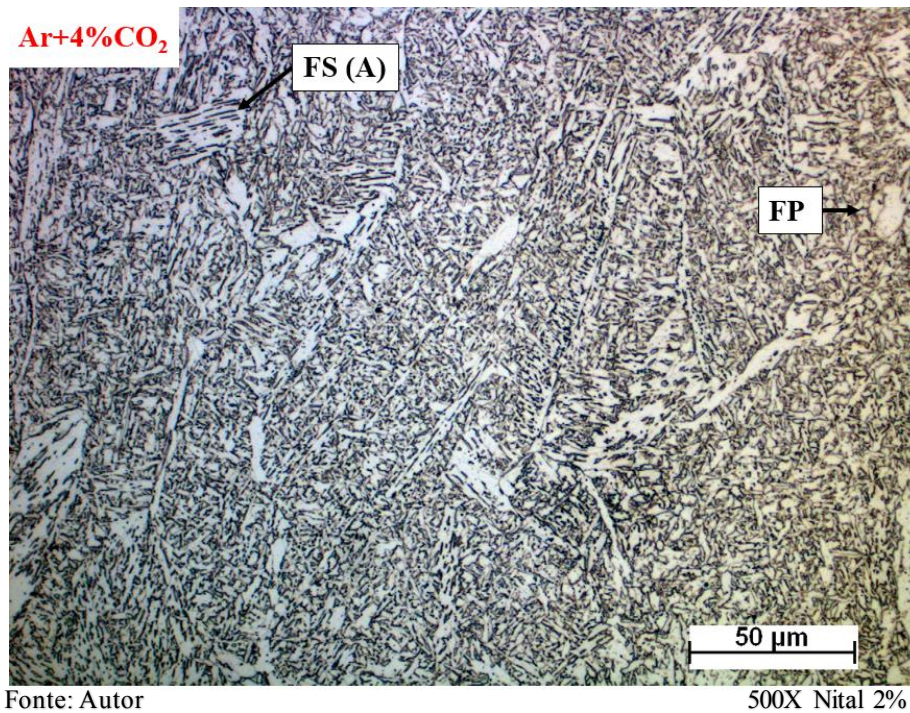


Figura 66- Microestruturas da ZF para misturas de $\text{Ar}+8\%\text{CO}_2$. 500x

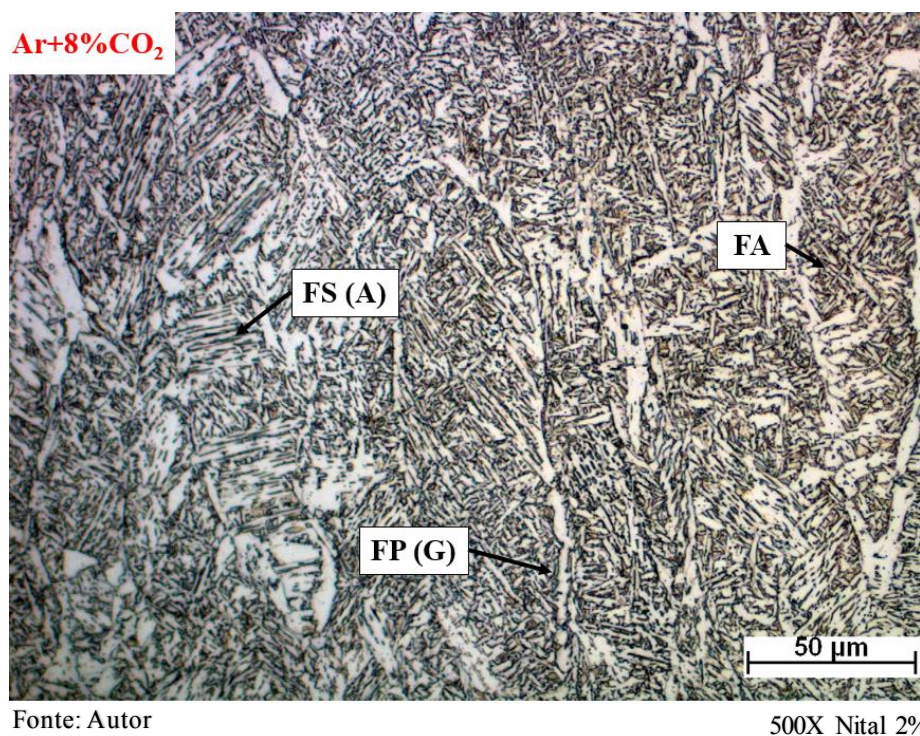
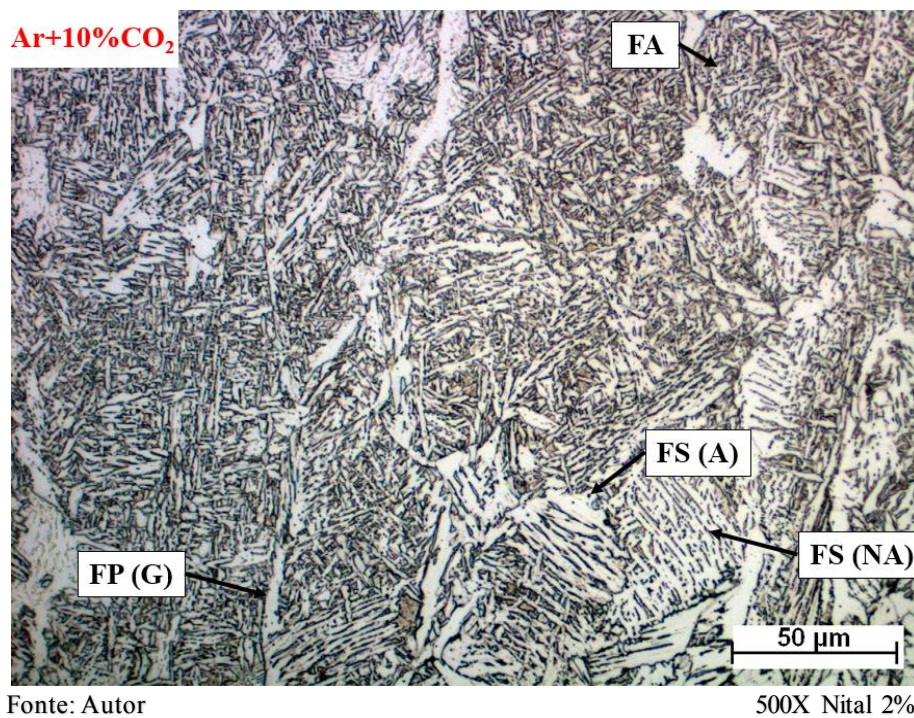
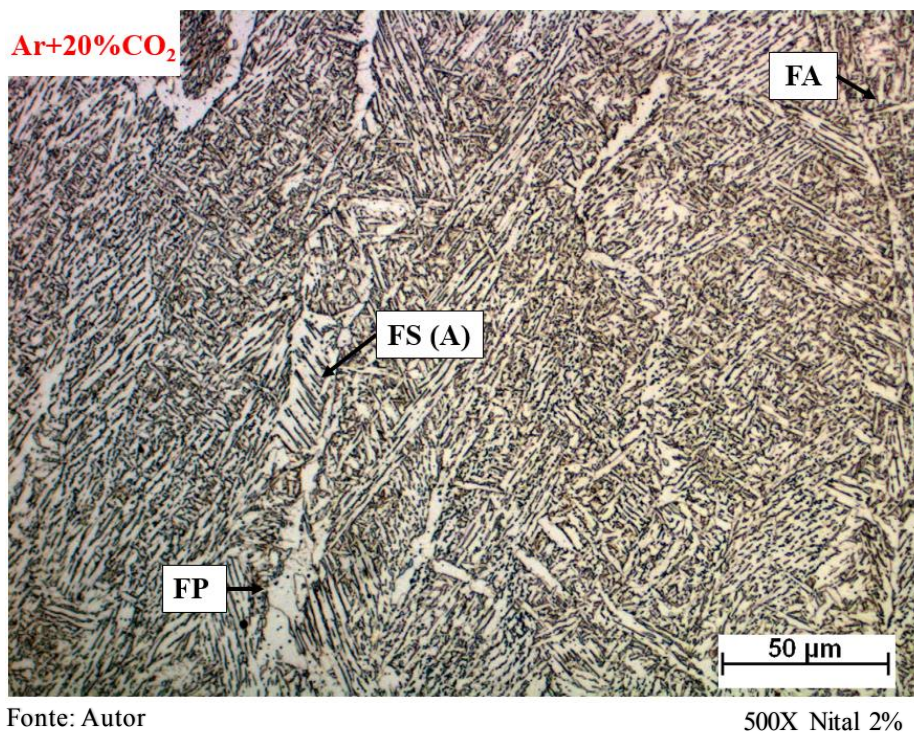


Figura 67- Microestruturas da ZF para misturas de Ar+10%CO₂. 500x



Foi observado nos teores de 8% e 10% de CO₂ uma quantidade significativa de Ferrita Acicular bem distribuídas de tamanhos menores, estruturas essas que aumentam a tenacidade e diminuem a dureza do material soldado.

Figura 68- Microestruturas da ZF para misturas de Ar+20%CO₂. 500x



A Figura 69 mostra que ao adicionar 8% de oxigênio, observa-se a presença de inclusões de óxidos que são microfases que favorecem a formação de ferrita acicular. Contudo com aumento do gás Hélio, com alta condutividade térmica não foi possível a qualificação da presença de ferritas acicular bem definidas.

Figura 69- Microestruturas da ZF para misturas de Ar+32%He+8%O₂. 500x

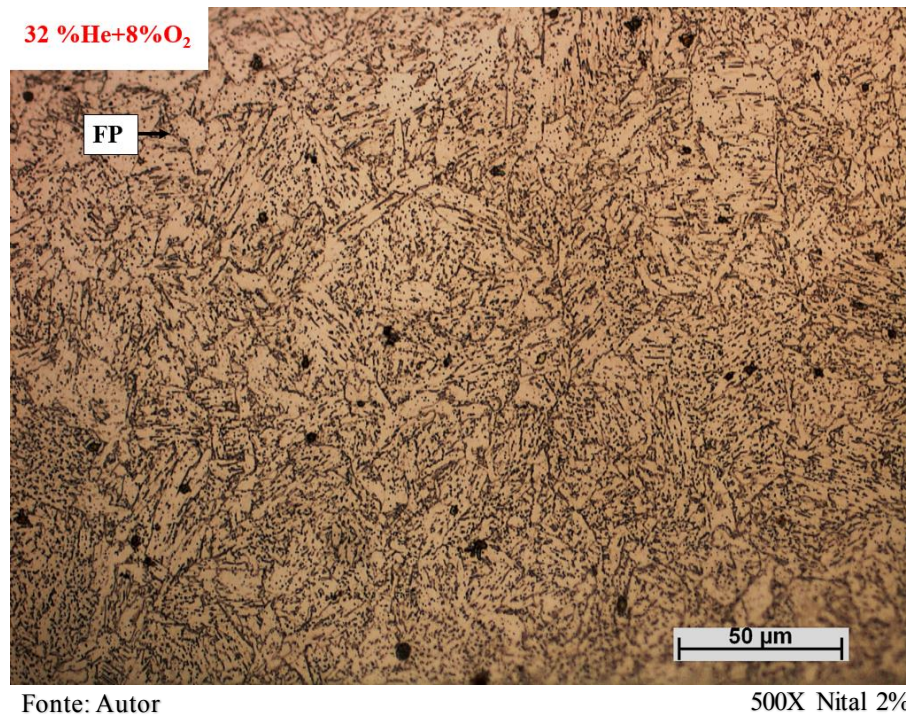
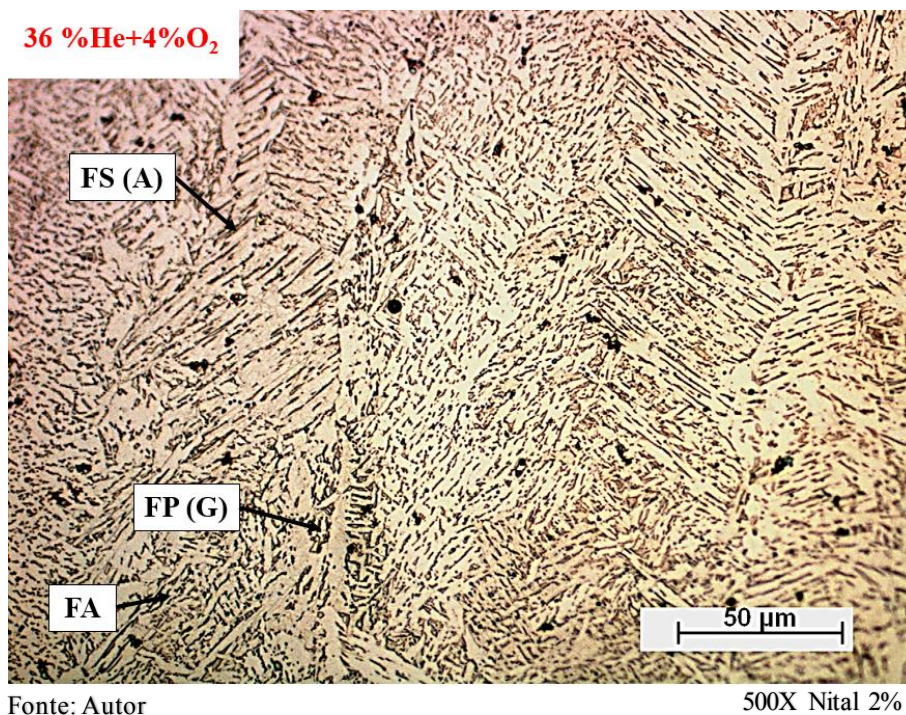
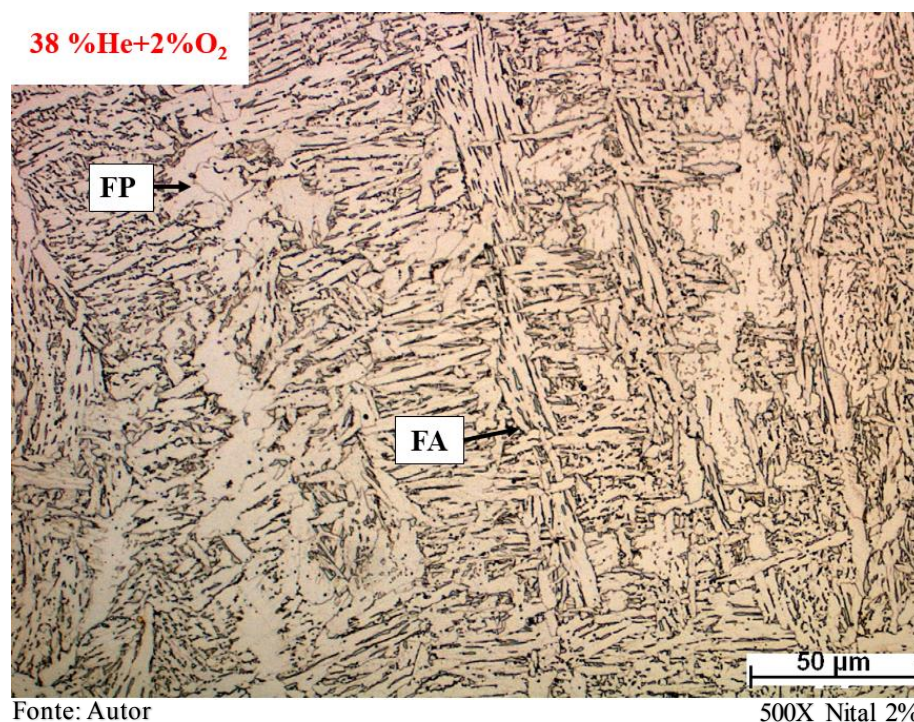


Figura 70- Microestruturas da ZF para misturas de Ar+36%He+4%O₂. 500x



A Figura 71, mostra menor presença de inclusões de óxidos, mas um aumento nas formações de ferritas aciculares, mesmo com tamanhos maiores. Geralmente é utilizado mistura de gases de proteção com Hélio e baixos teores de oxigênio, o qual essa mistura favorece a formação de ferritas aciculares menores, que aumentam a tenacidade na região da solda. Utilizados mais em passes de raízes.

Figura 71- Microestruturas da ZF para misturas de Ar+38%He+2%O₂. 500x



A Figura 71 mostrou que com teores mais baixo de oxigênio na mistura Ar+He+O₂, favoreceu a formação de ferrita acicular mais definidas.

5.3.3- Zona Afetada pelo Calor Grão Grosso

As microestruturas da ZAC são influenciadas pela mudança de níveis da mistura dos gases de proteção.

Foi observado nas Figuras a seguir que a medida que aumenta o teor de oxigênio favorece a degeneração das ferritas primárias e conseqüentemente a formação de mais perlitas e outras estruturas de ferritas como ferritas de contorno de grão.

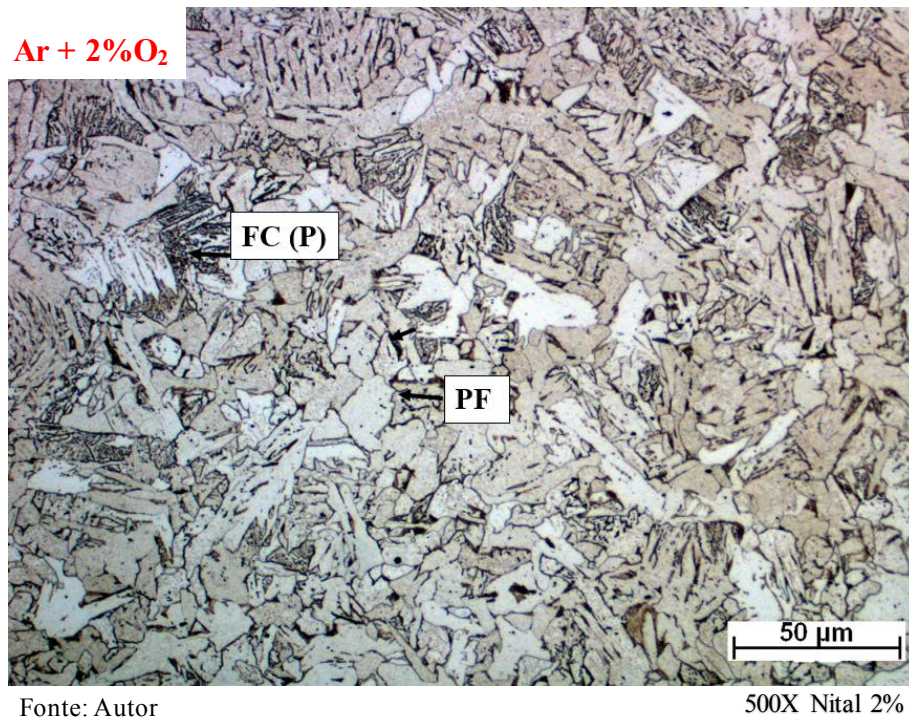
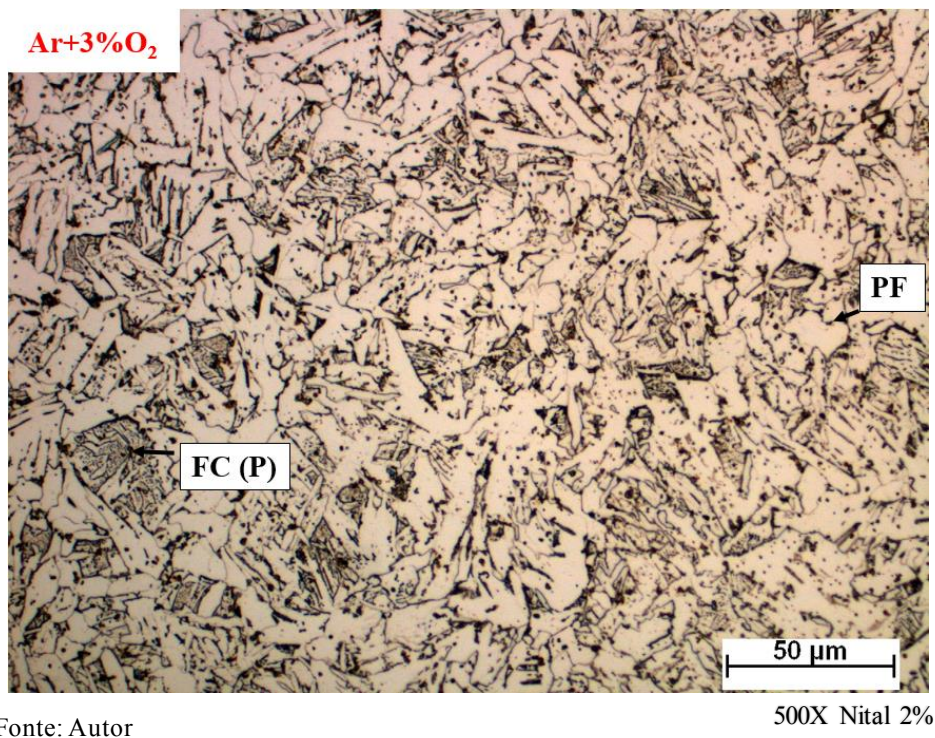
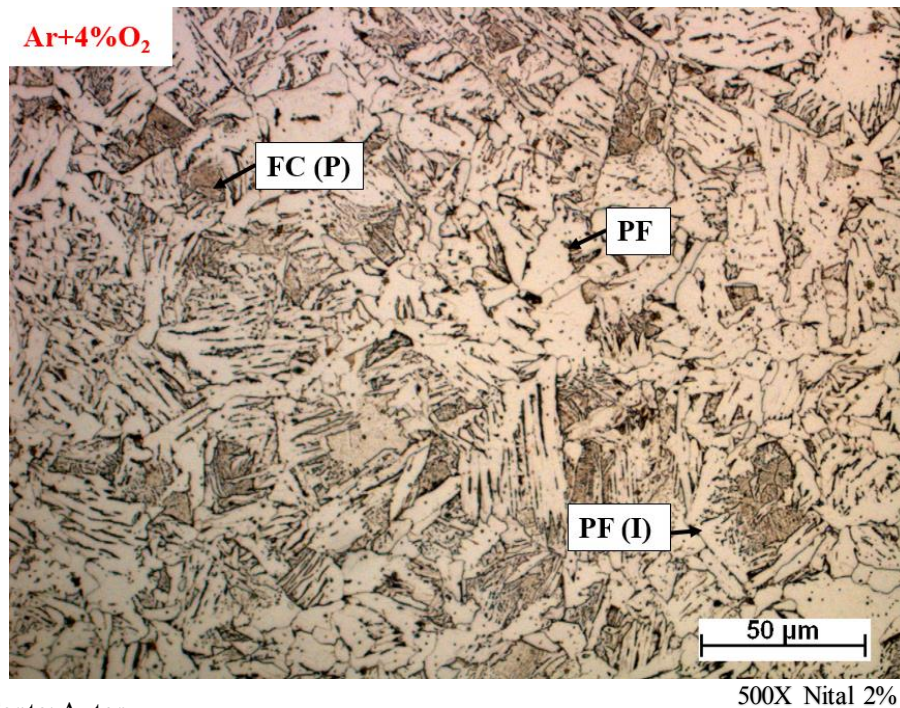
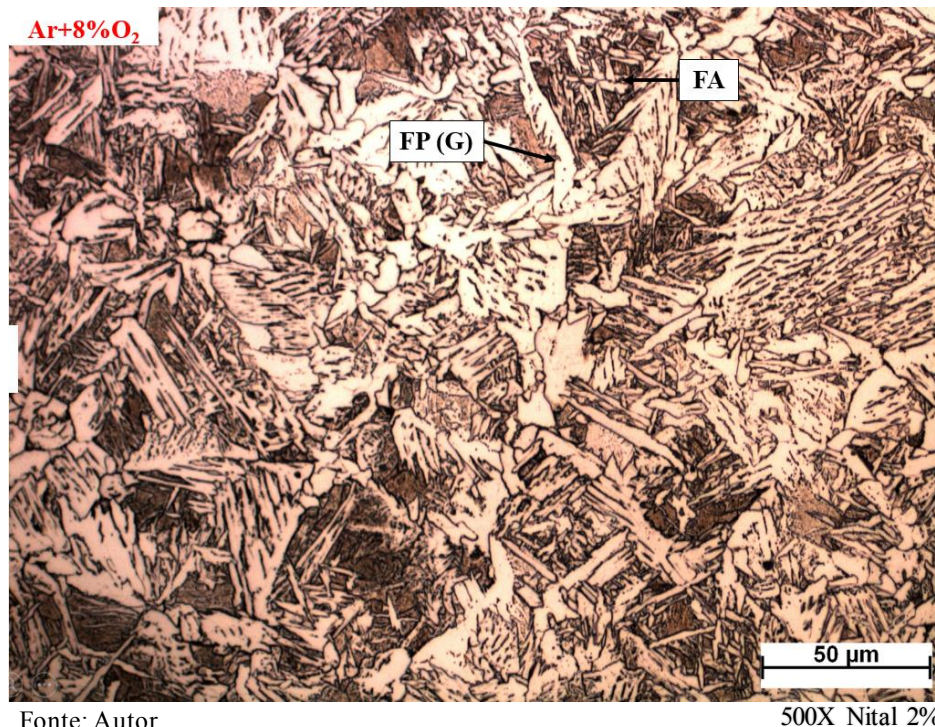
Figura 72 - Microestruturas da ZAC-GG para misturas de Ar+2%O₂. 500xFigura 73 - Microestruturas da ZAC-GG para misturas de Ar + 3%O₂. 500x

Figura 74- Microestruturas da ZAC-GG para misturas de Ar+4%O₂. 500x



Fonte: Autor

Figura 75 - Microestruturas da ZAC-GG para misturas de Ar+8%O₂. 500x

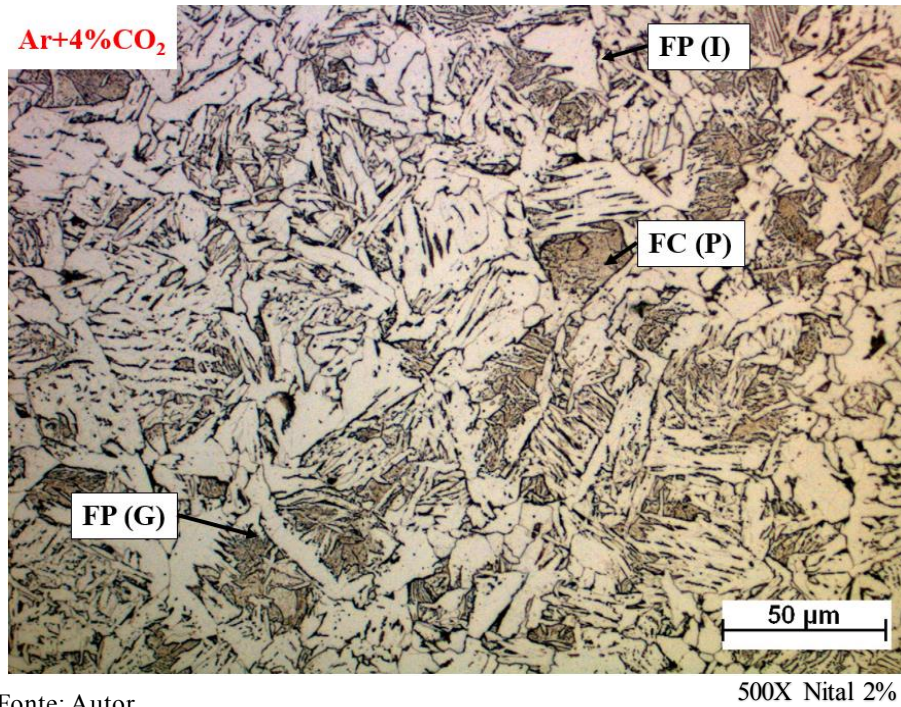


Fonte: Autor

Na Figura 75, foi observado a formação de ferrita acicular, fato esse devido alta energia e aumento de inclusões que favorecem a formação dessa estrutura.

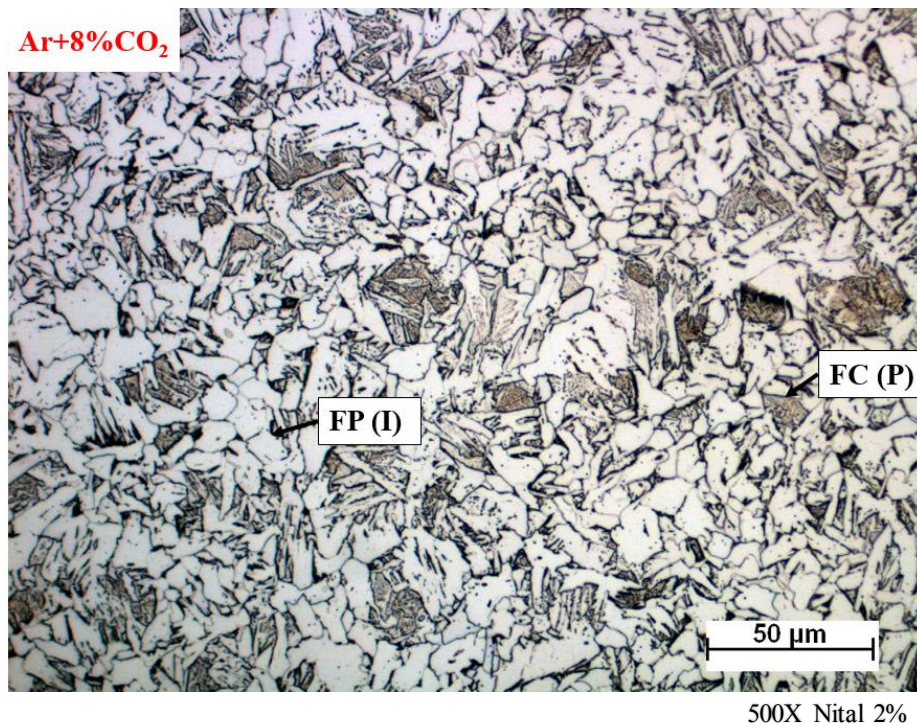
As Figuras a seguir mostram as zonas afetadas pelo calor, grão grosso, com misturas de gases de proteção contendo dióxido de carbono. Pode observar as ferritas mais degeneradas com maior formação de perlitas na mistura com 4% e 10% de CO_2 .

Figura 76- Microestruturas da ZAC-GG para misturas de $\text{Ar}+4\%\text{CO}_2$. 500x

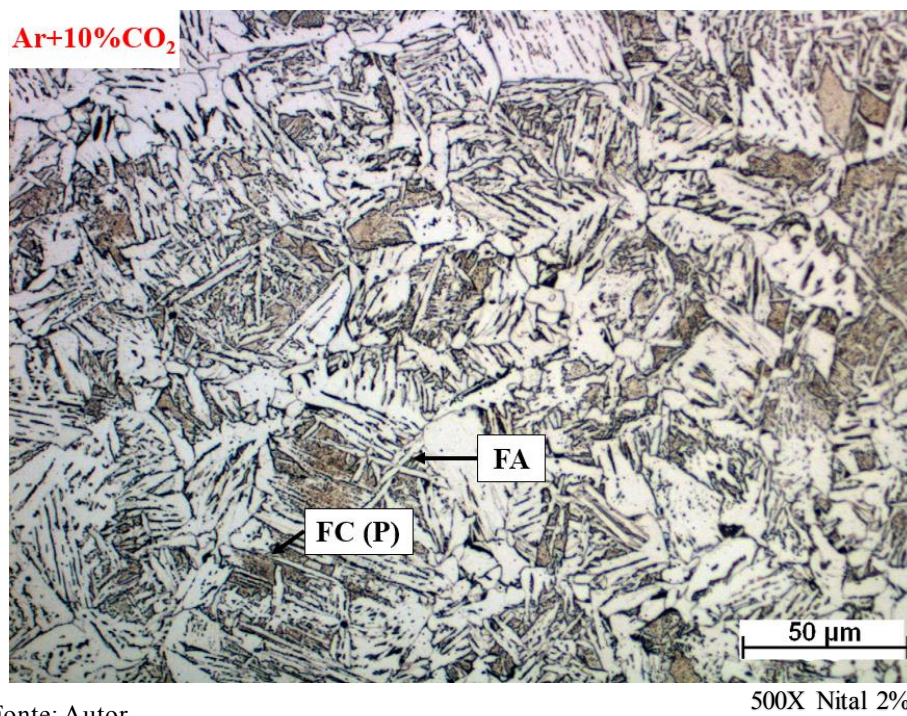


Fonte: Autor

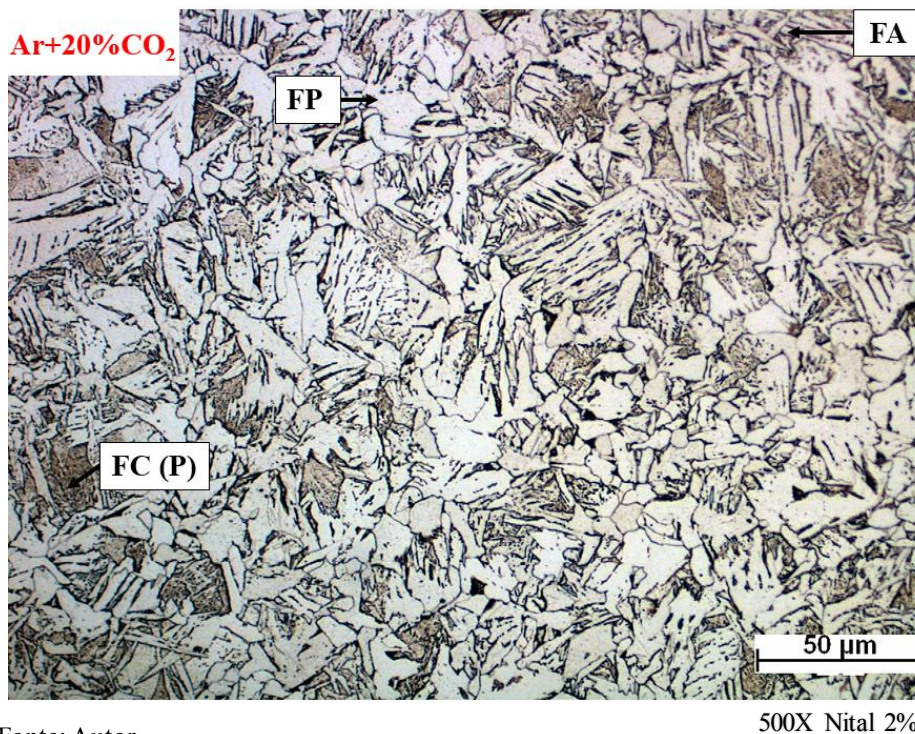
Figura 77- Microestruturas da ZAC-GG para misturas de $\text{Ar}+8\%\text{CO}_2$. 500x



Fonte: Autor

Figura 78- Microestruturas da ZAC-GG para misturas de Ar+10%CO₂. 500x

Fonte: Autor

Figura 79- Microestruturas da ZAC-GG para misturas de Ar+20%CO₂. 500x

Fonte: Autor

As Figuras a seguir são microestruturas da ZAC com grãos grossos utilizando as misturas de gases de proteção contendo Hélio e Oxigênio. Observa-se ferritas mais degeneradas com teores menor de Hélio.

Figura 80- Microestruturas da ZAC-GG para misturas de Ar+32%He+8%O₂. 500x

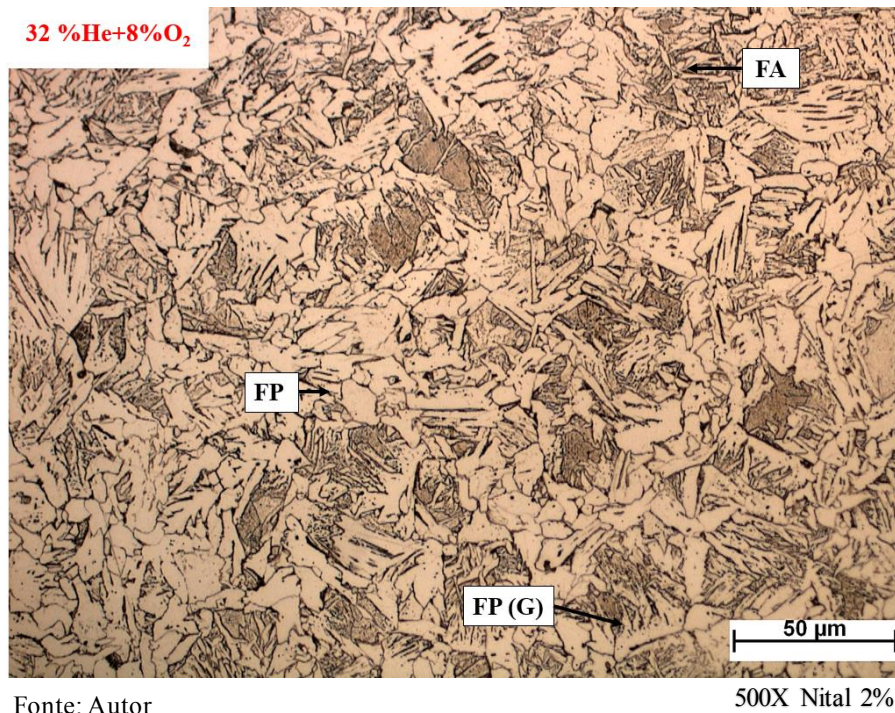


Figura 81- Microestruturas da ZAC-GG para misturas de Ar+36%He+4%O₂. 500x

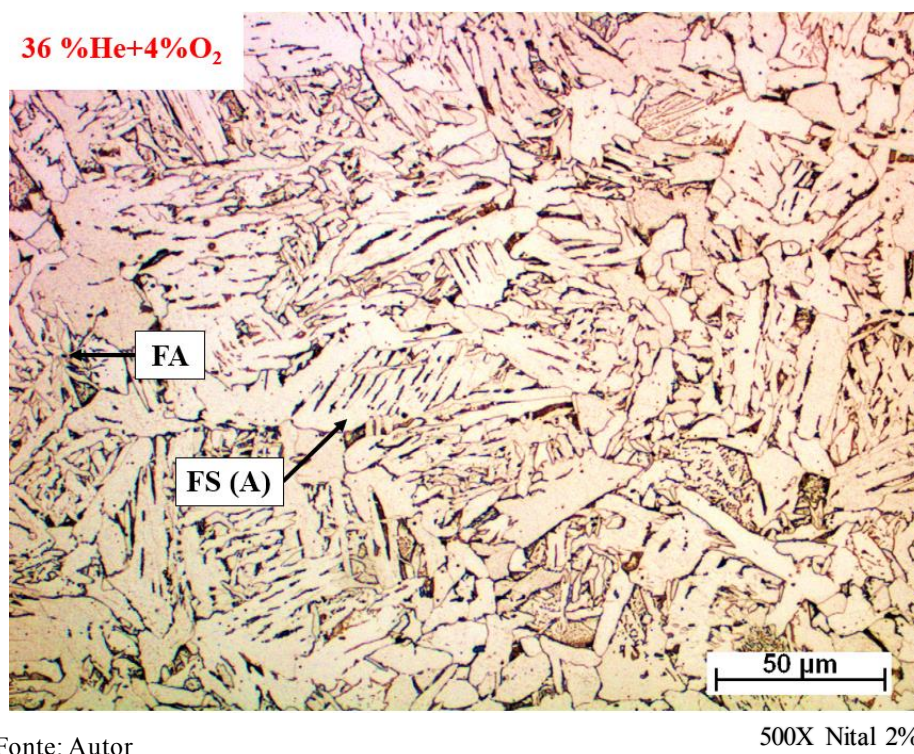
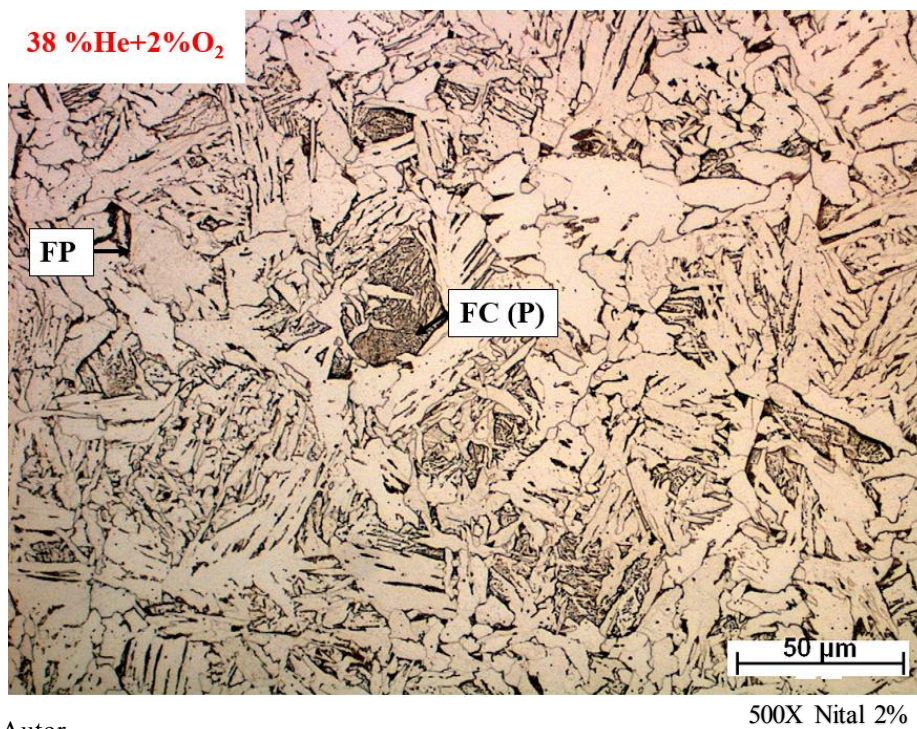


Figura 82- Microestruturas da ZAC-GG para misturas de Ar+38%He+2%O₂. 500x

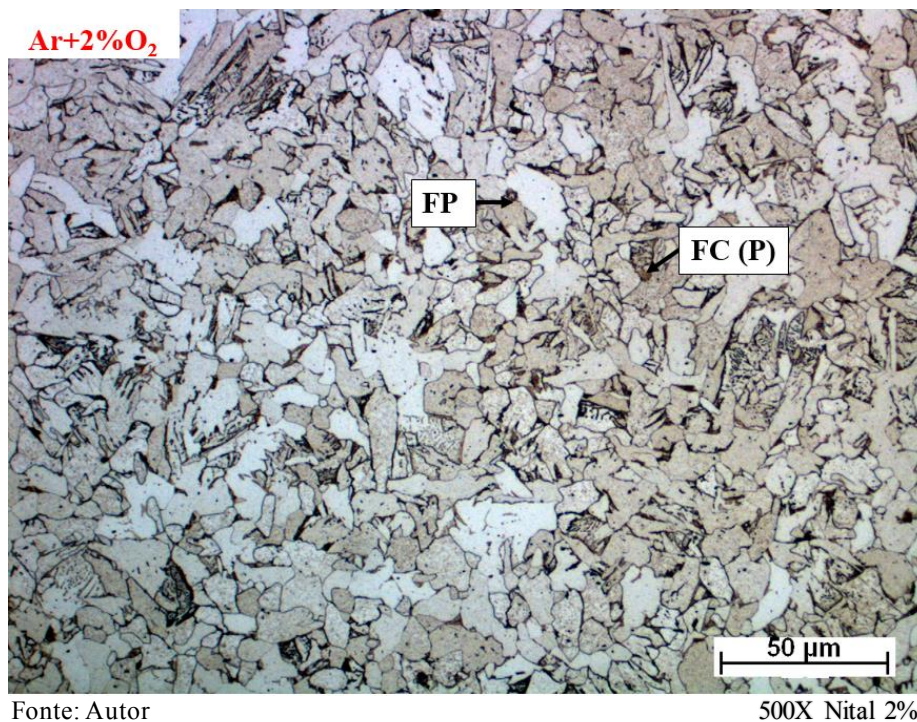


Fonte: Autor

5.3.4 - Zona Afetada pelo Calor Grão Fino

Foi observado a diminuição de ferritas primarias e um aumento na quantidade de perlitas degeneradas com aumento do nível de oxigênio.

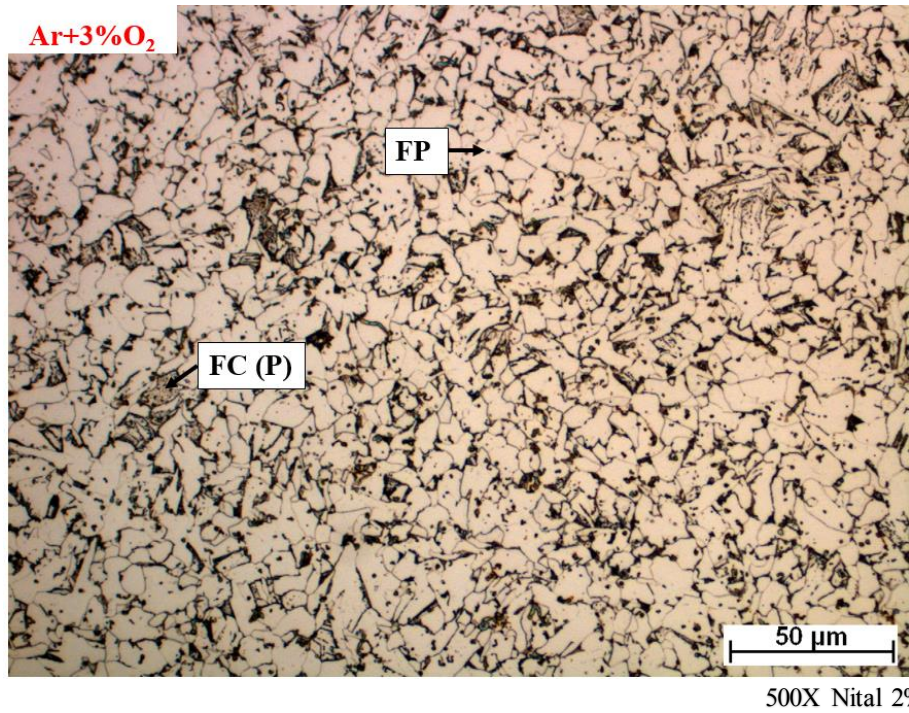
Figura 83- Microestruturas da ZAC-GF para misturas de Ar+2% O₂. 500x



Fonte: Autor

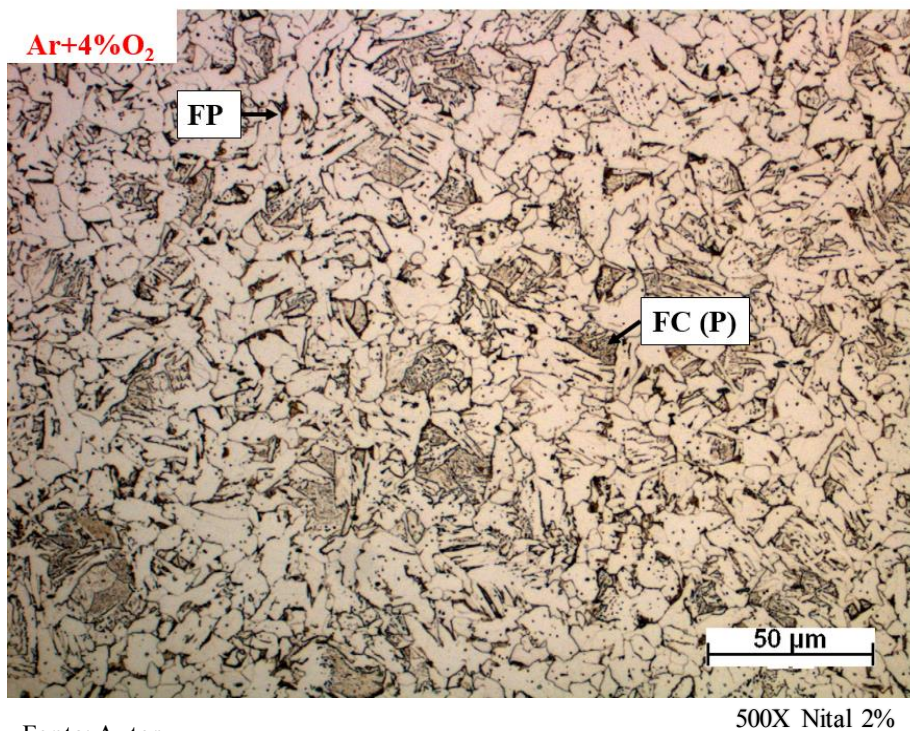
Na Figura 84 foi observado a presença de inclusões de óxidos de tamanhos menores, devido aumento da quantidade de oxigênio.

Figura 84- Microestruturas da ZAC-GF para misturas de Ar+3%O₂. 500x



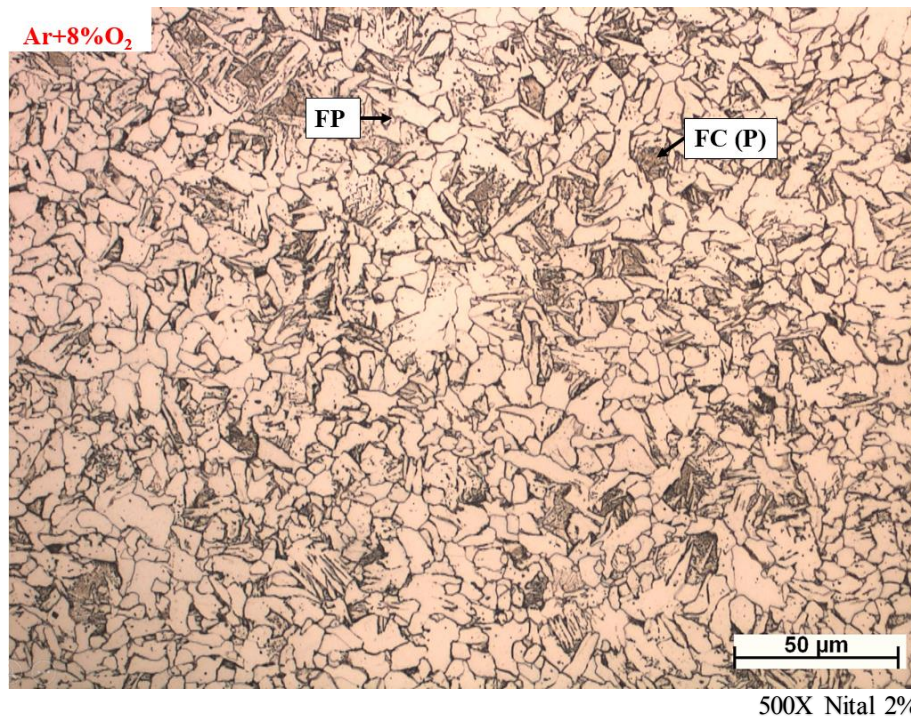
Fonte: Autor

Figura 85- Microestruturas da ZAC-GF para misturas de Ar+4%O₂. 500x



Fonte: Autor

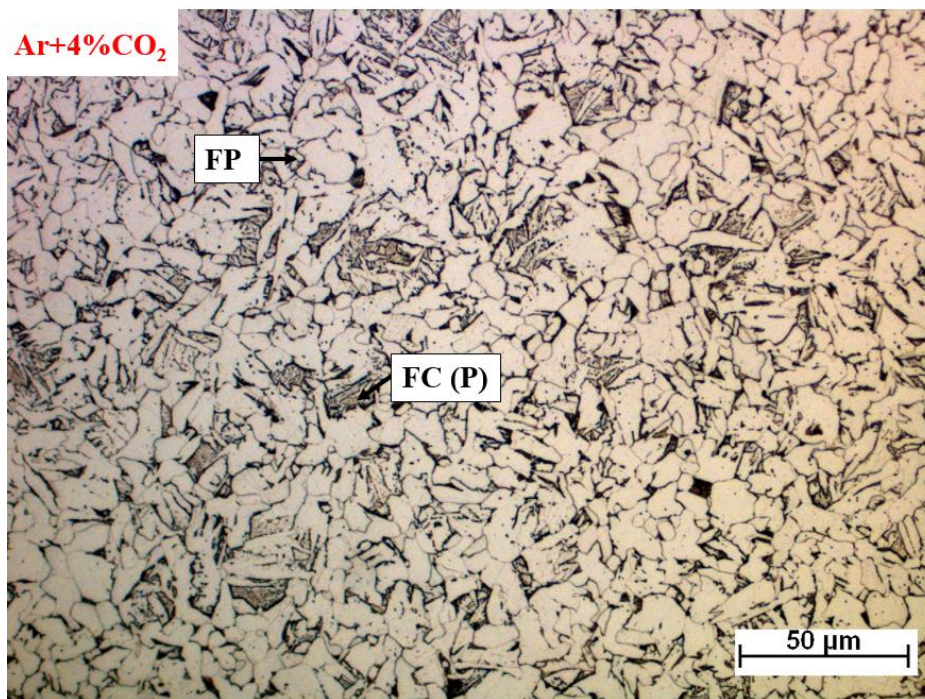
Figura 86- Microestruturas da ZAC-GF para misturas de Ar+8%O₂. 500x



Fonte: Autor

As Figuras 85 e 86 com 4% até 8% de oxigênio foram observados qualitativamente que com aumento do teor desse gás, mais ferritas são degeneradas e mais presença de perlitas. As Figuras 87 a 90 mostram a ZAC-GF com misturas de CO₂.

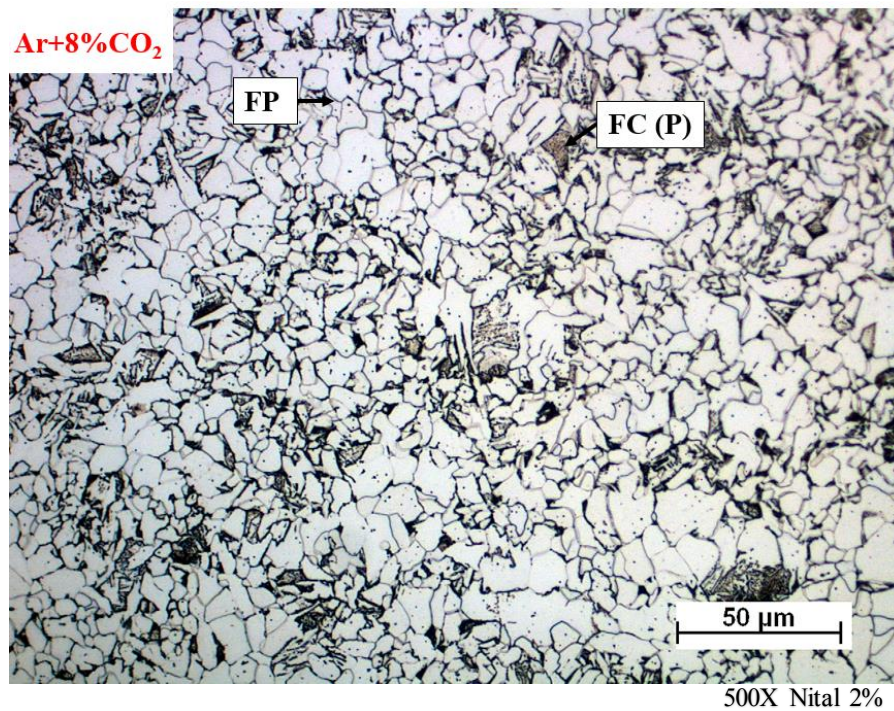
Figura 87- Microestruturas da ZAC-GF para misturas de Ar+4%CO₂. 500x



Fonte: Autor

500X Nital 2%

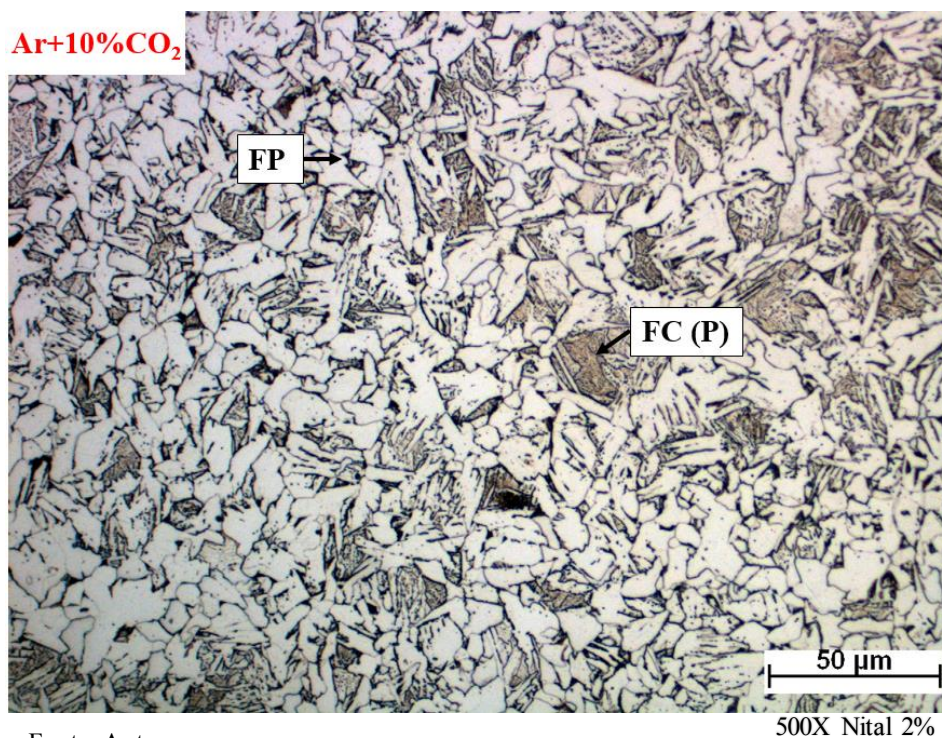
Figura 88- Microestruturas da ZAC-GF para misturas de Ar+8%CO₂. 500x



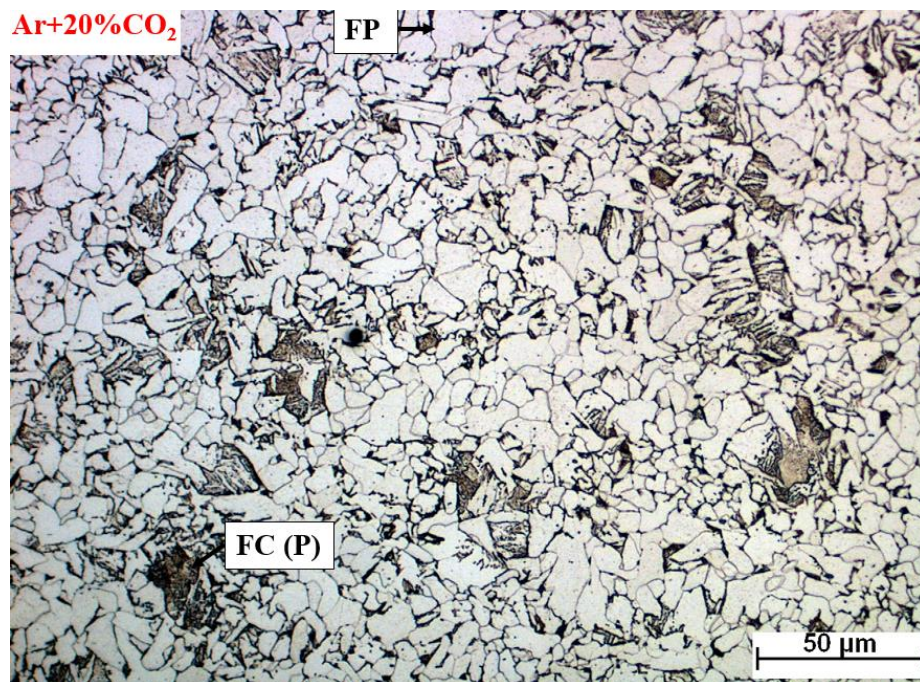
Fonte: Autor

As Figuras 88 e 89 com 8% até 10% de CO₂ mostram qualitativamente a presença de mais perlitas e menos ferritas primárias.

Figura 89- Microestruturas da ZAC-GF para misturas de Ar+10%CO₂. 500x

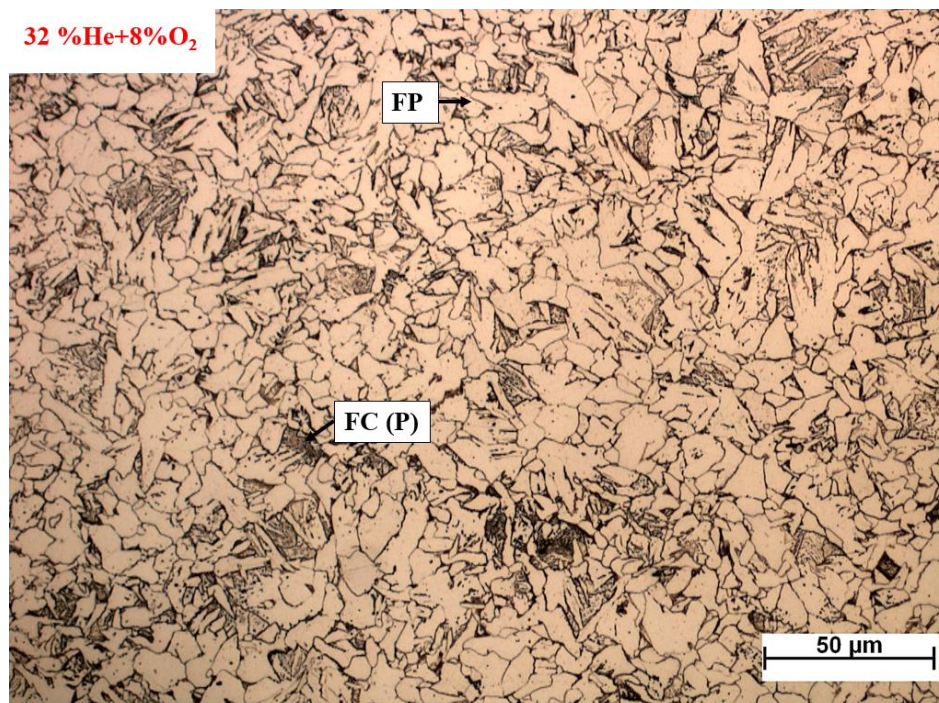


Fonte: Autor

Figura 90- Microestruturas da ZAC-GF para misturas de Ar+20%CO₂. 500x

Fonte: Autor

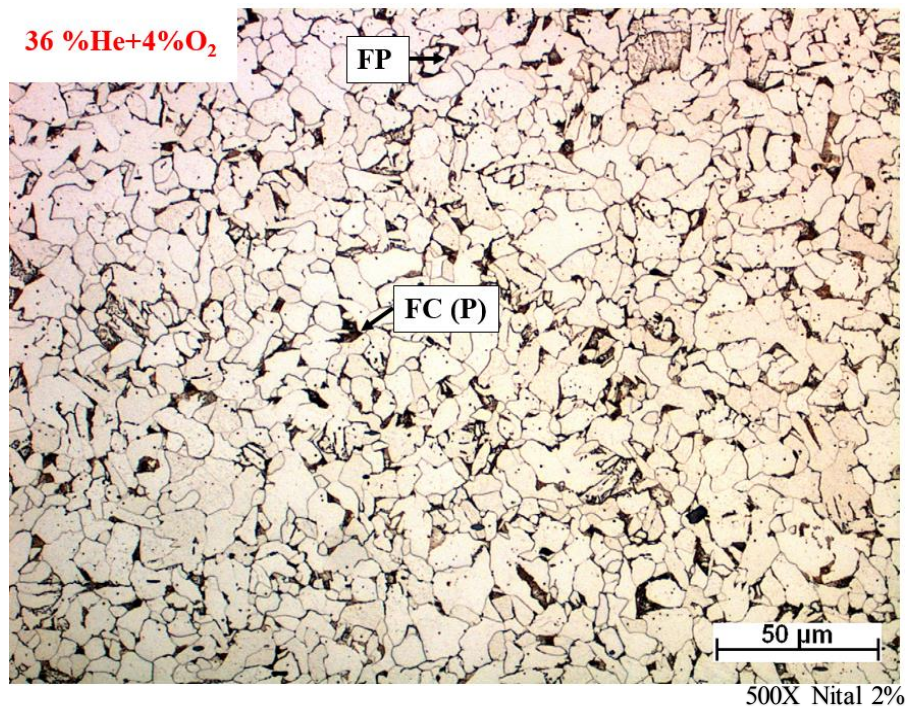
500X Nital 2%

Figura 91- Microestruturas da ZAC-GF para misturas de Ar+32%He+8%O₂. 500x

Fonte: Autor

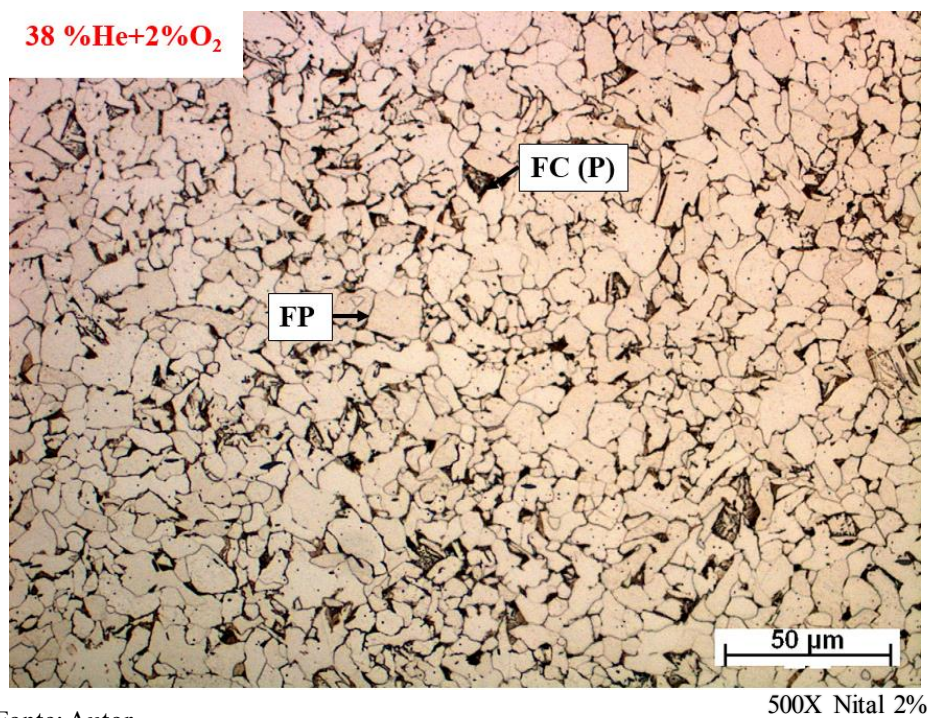
500X Nital 2%

Figura 92-Microestruturas da ZAC-GF para misturas de Ar+36%He+4%O₂. 500x



Fonte: Autor

Figura 93- Microestruturas da ZAC-GF para misturas de Ar+38%He+2%O₂. 500x



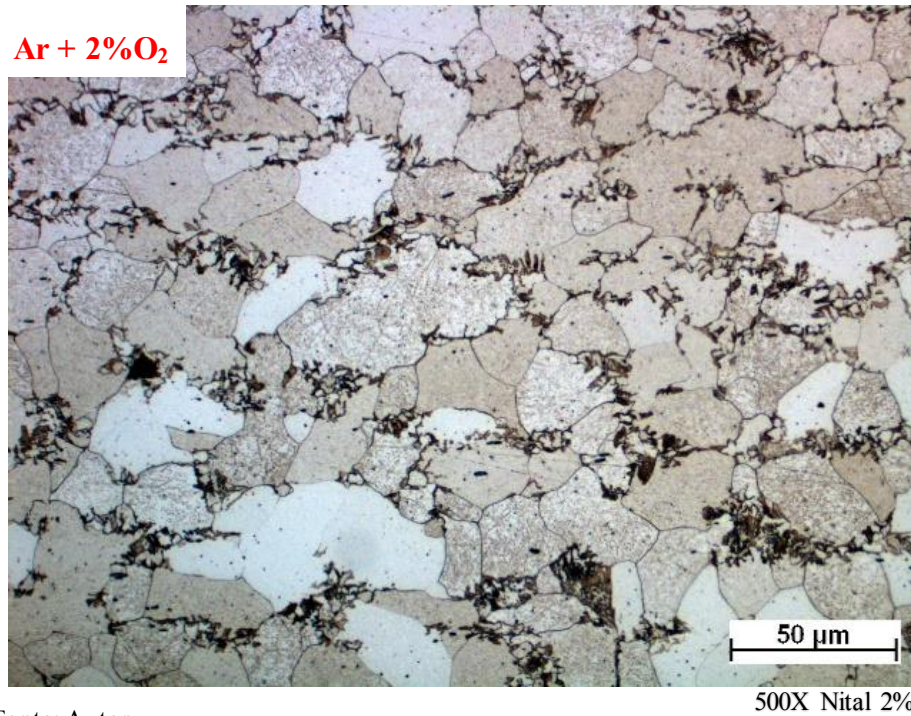
Fonte: Autor

5.3.5- Zona Afetada pelo Calor Inter-crítica

Nas Figuras a seguir foi possível analisar. As microestruturas das regiões inter-crítica.

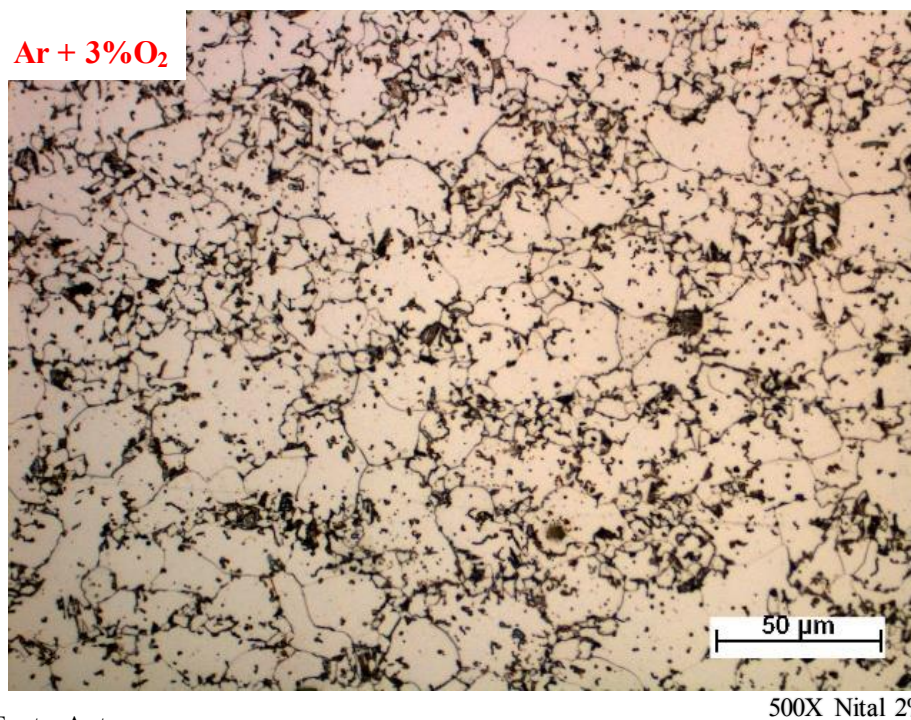
Não identificou diferenças significativas na microestrutura da ZAC intercrítica dos cordões. Observa-se uma matriz ferrítica com grãos degenerados de perlita, conforme o aumento de oxigênio.

Figura 94- Microestruturas da ZAC-IC para misturas de Ar+2%O₂. 500x



Fonte: Autor

Figura 95- Microestruturas da ZAC-IC para misturas de Ar+3%O₂. 500x



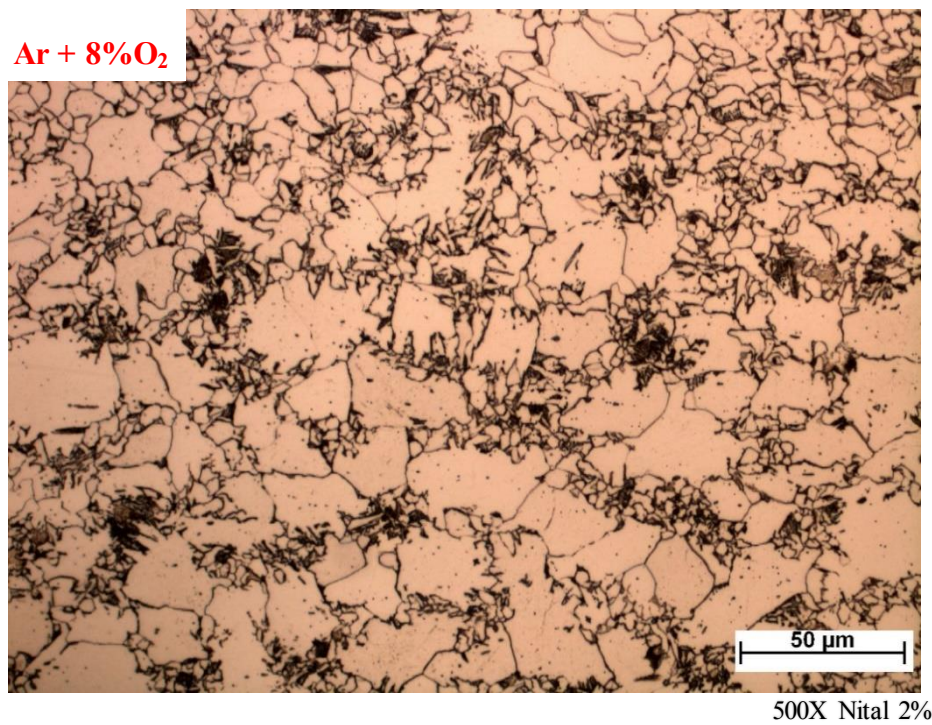
Fonte: Autor

Figura 96- Microestruturas da ZAC-IC para misturas de Ar+4%O₂. 500x



Fonte: Autor

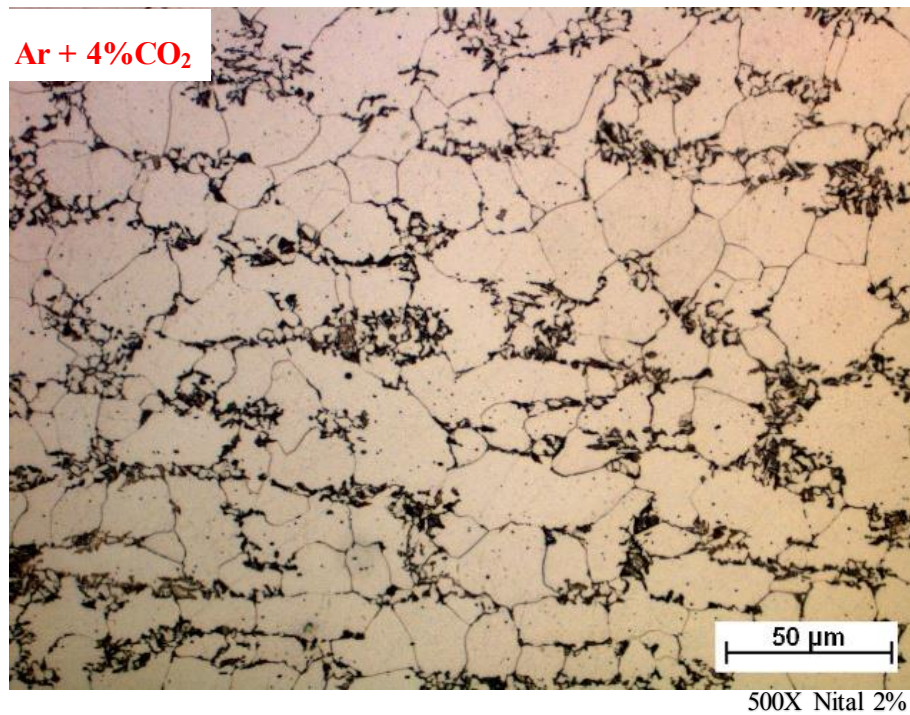
Figura 97- Microestruturas da ZAC-IC para misturas de Ar+8%O₂. 500x



Fonte: Autor

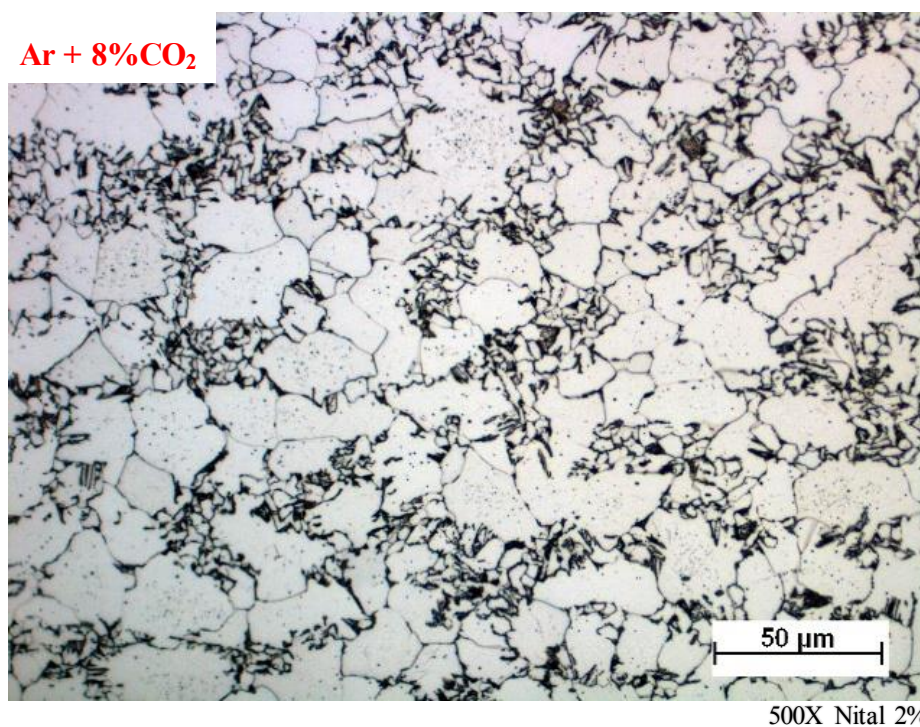
Não identificou diferenças significativas na microestrutura da ZAC intercrítica dos cordões. Observa-se uma matriz ferrítica com grãos degenerados de perlita, conforme o aumento de dióxido de carbono.

Figura 98- Microestruturas da ZAC-IC para misturas de Ar + 4%CO₂. 500x



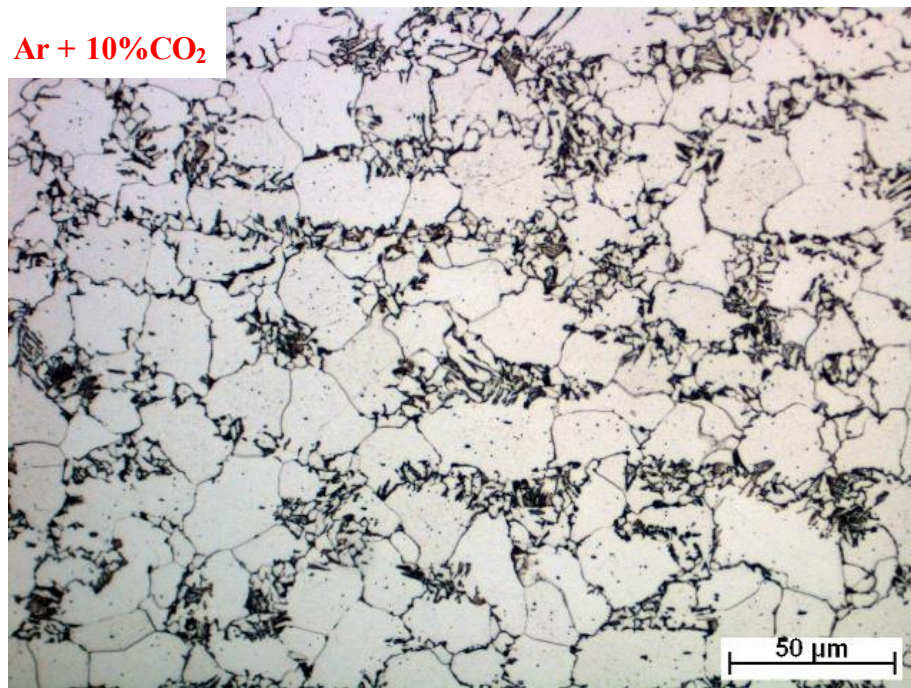
Fonte: Autor

Figura 99- Microestruturas da ZAC-IC para misturas de Ar + 8%CO₂. 500x



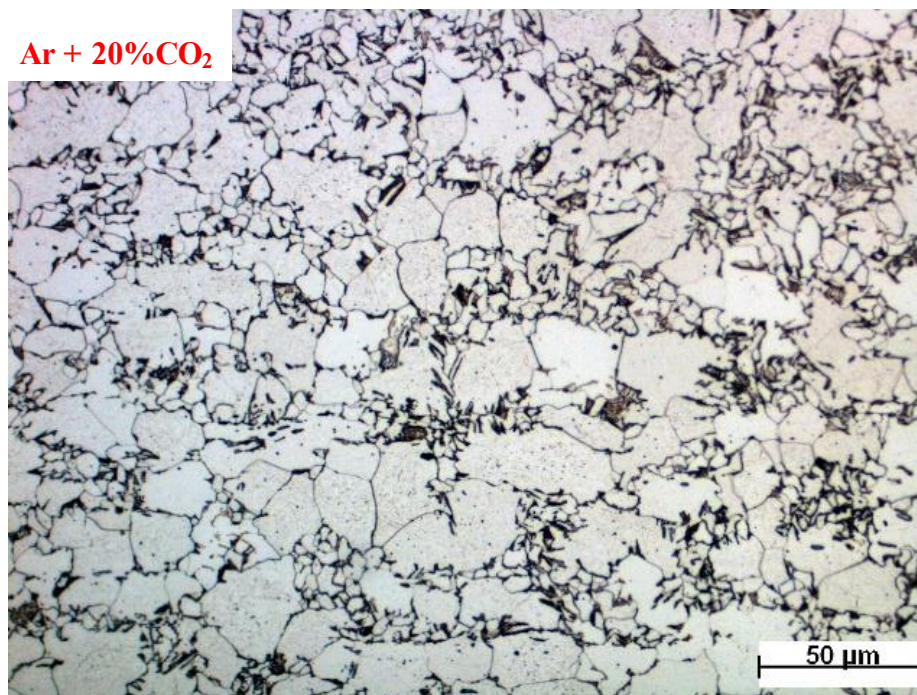
Fonte: Autor

Figura 100- Microestruturas da ZAC-IC para misturas de Ar+10%CO₂. 500x



Fonte: Autor

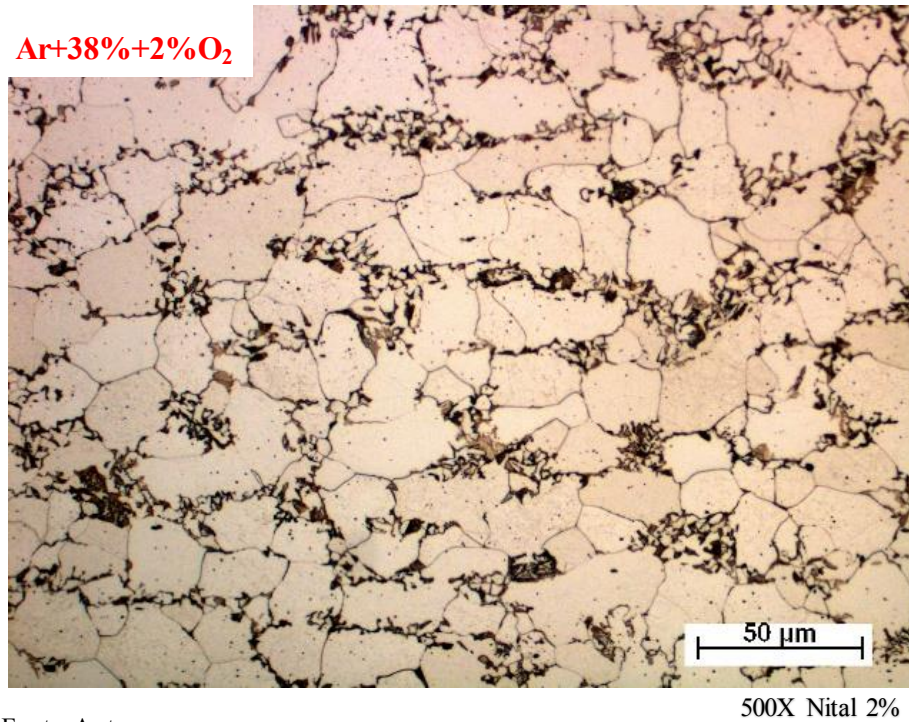
Figura 101- Microestruturas da ZAC-IC para misturas de Ar+20%CO₂. 500x



Fonte: Autor

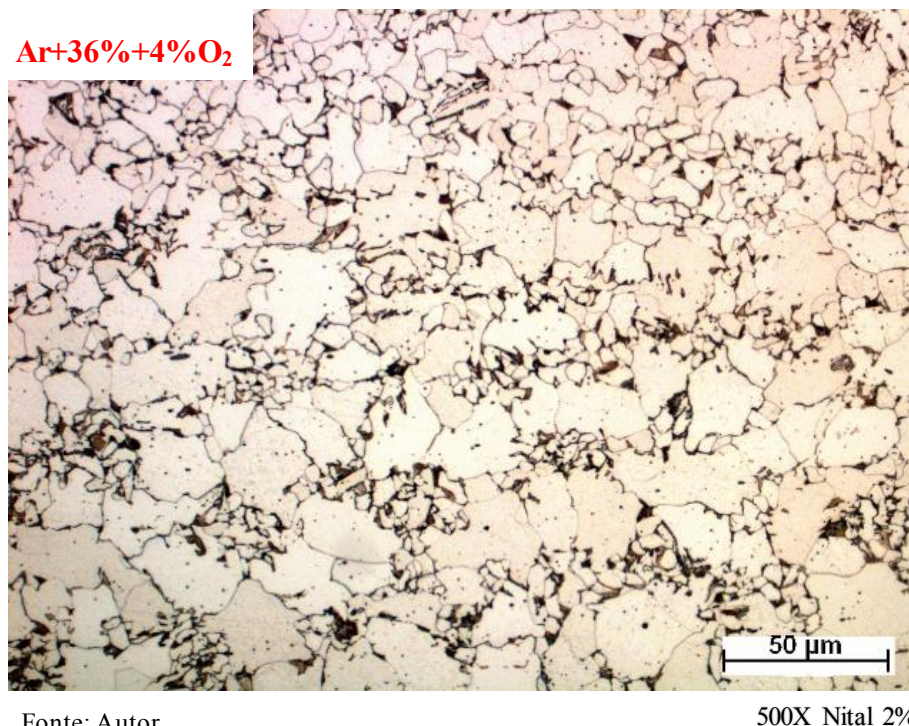
Com mistura de Hélio e O_2 não se identificou diferenças significativas na microestrutura da ZAC intercrítica dos cordões. Observa-se uma matriz ferrítica com grãos mais degenerados e presença de perlita, com aumento de oxigênio e grãos menores de ferrita degeneradas.

Figura 102- Microestruturas da ZAC-IC para misturas de $Ar+38\%He+2\%O_2$. 500x



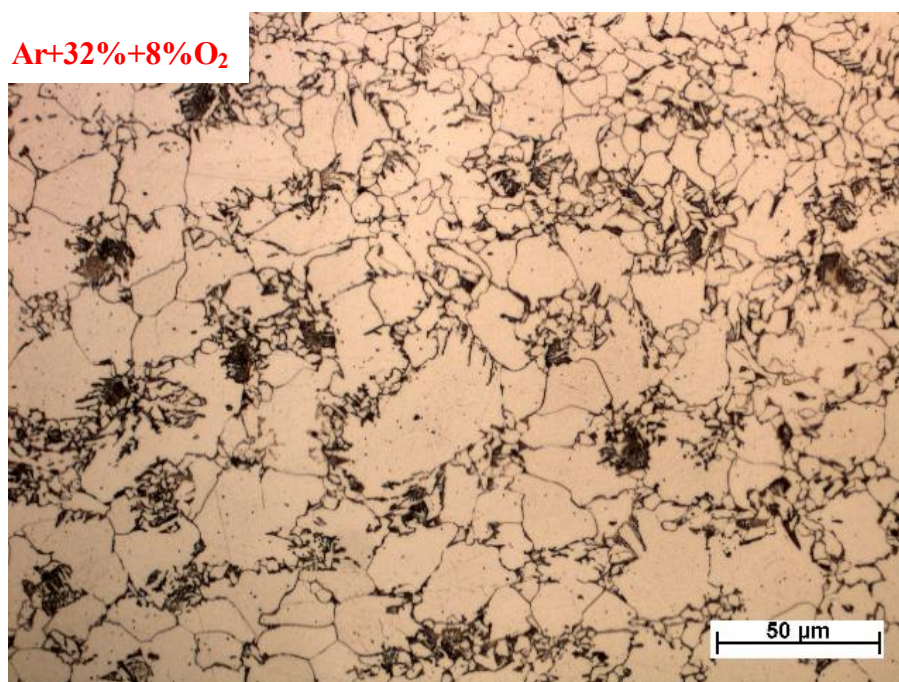
Fonte: Autor

Figura 103- Microestruturas da ZAC-IC para misturas de $Ar+36\%He+4\%O_2$. 500x



Fonte: Autor

Figura 104- Microestruturas da ZAC-IC para misturas de Ar+32%He+8%O₂. 500x



Fonte: Autor

500X Nital 2%

5.4 – Corrente de transição associada a transferência metálica.

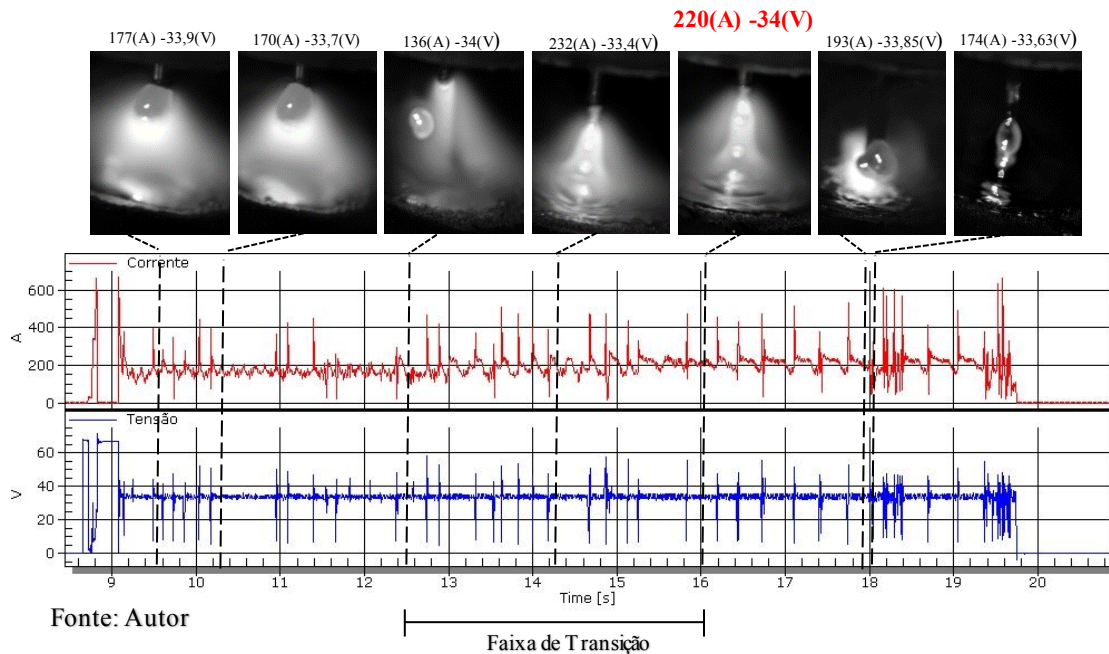
As Figuras a seguir mostram, as correntes de transição que estão na Tabela 7 e realçadas em negrito sobre as Figuras, onde a transferência metálica associada ao frame e ao mesmo tempo foi ajustado a corrente e a tensão de acordo com a sincronização dos sinais obtidos pelo programa de aquisição.

Foi adotada como corrente de transição globular-goticular, a corrente a partir da qual o diâmetro de gota é menor o diâmetro do eletrodo. Para realizar a sincronização dos sinais elétricos entre si e com as imagens da soldagem, foi necessário utilizar uma das saídas da câmera – o sinal de “Ready”. Nesta saída, toda vez que a câmera realiza a gravação de um novo quadro, o sinal oscila de 0 para 5 V e vice-versa. Um equipamento chamado de sensor hall foi utilizado para medir a corrente de soldagem (adequado para corrente de até 500 A), gera um sinal de tensão proporcional a corrente de soldagem.

As Figuras a seguir mostram que a corrente aumenta com a diminuição do nível de gás Hélio na mistura do gás de proteção Ar+He+CO₂.

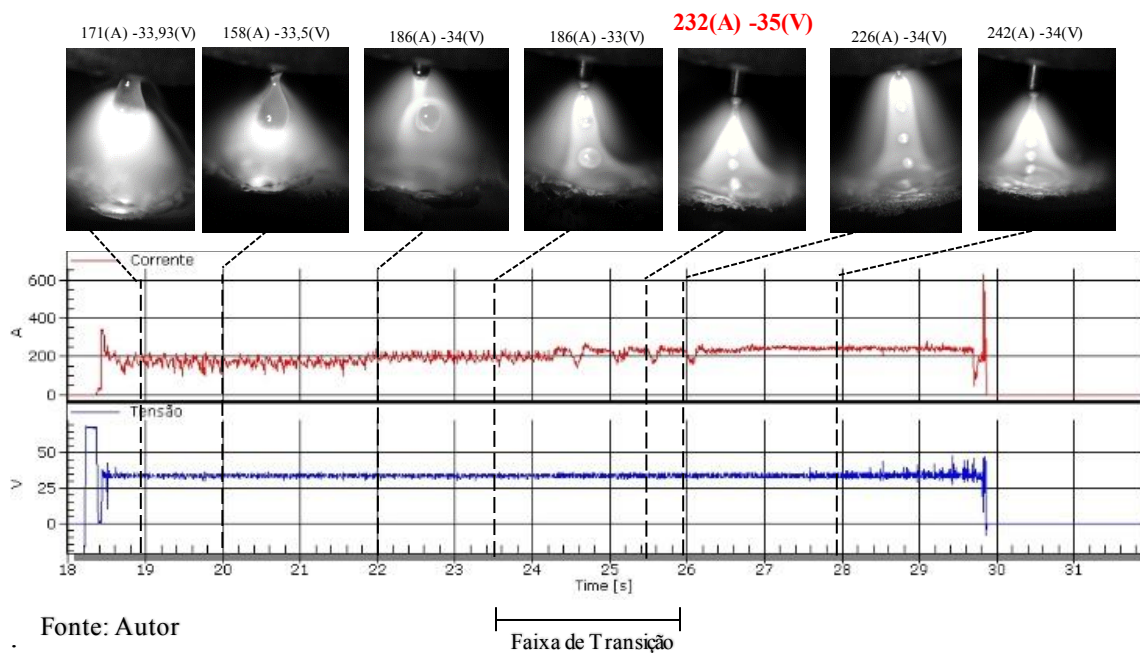
Tensão de referência 33 V. Transição mostrada entre o 3º frame até o 5º frame. Com essa porcentagem e parâmetros não foi possível transferência goticular. Normalmente se utiliza curto-circuito. Mostrado na Figura 105.

Figura 105- Gás de proteção: Ar+38%He+2%CO₂



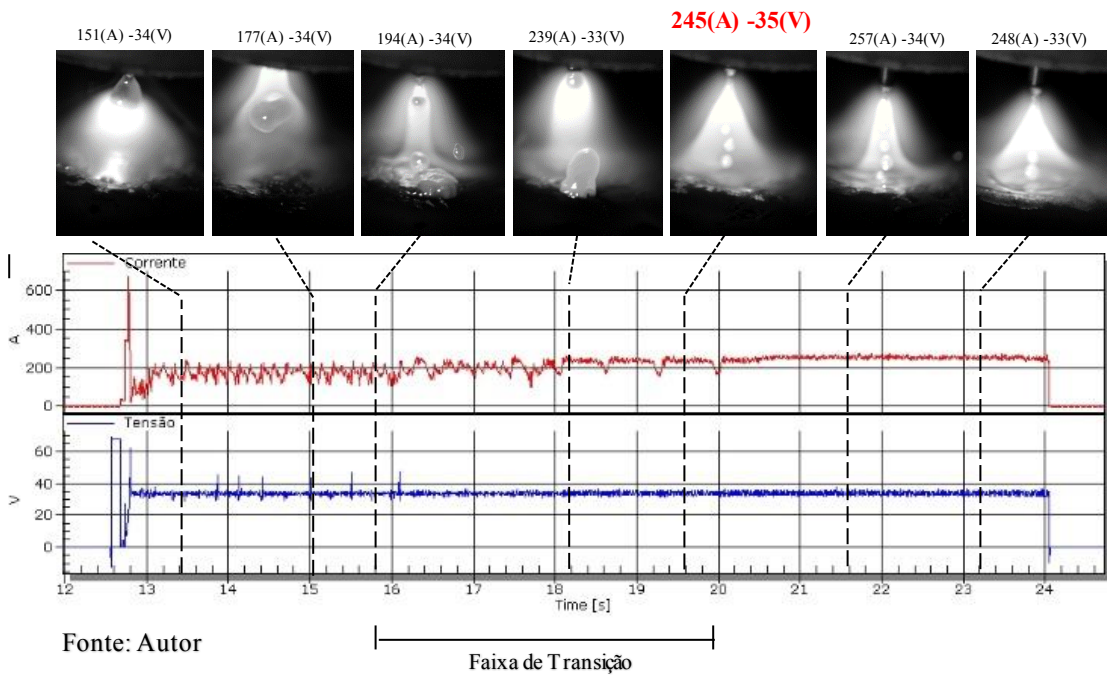
Tensão de referência 33 V. Transição mostrada a partir do 5º frame, Figura 106.

Figura 106- Gás de proteção: Ar+18%He+2%CO₂.



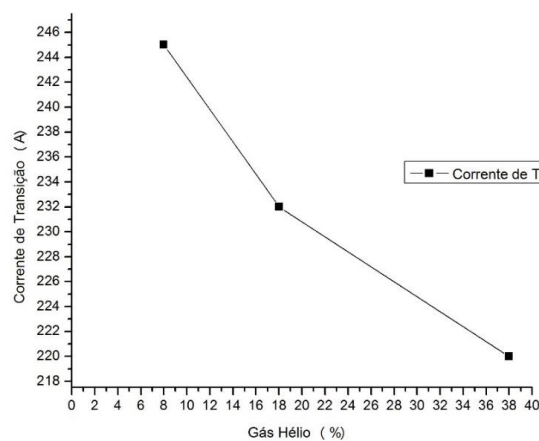
Tensão de referência 33 V. Transição mostrada a partir do 5º frame. Na Figura 107

Figura 107- Gás de proteção: Ar+8%He+2%CO₂.



Adições de Hélio e Dióxido de carbono ao argônio aumentam o aporte térmico na região de solda e melhoram a estabilidade do arco. A medida que o teor de He aumenta a tensão do arco cresce aumentando a resistência elétrica e diminuindo a corrente.

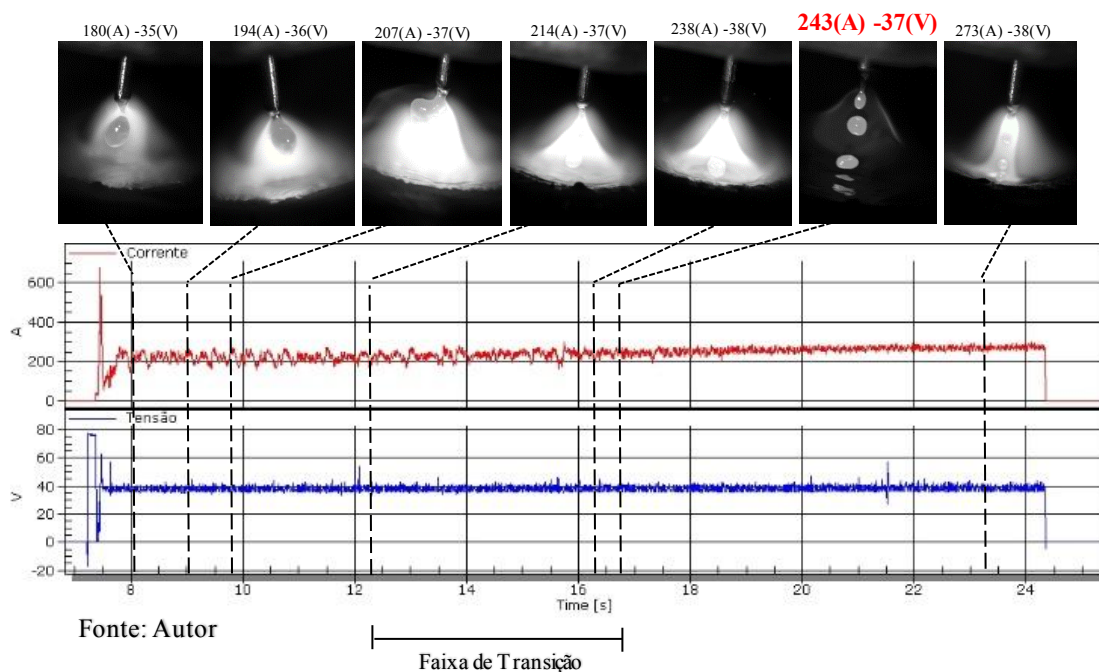
Figura 108- Influência na corrente de transição com mistura de Ar +He+ CO₂



As Figuras a seguir mostram os valores da corrente de transição para os teores das misturas dos gases de proteção. O aumento do teor de CO_2 na mistura aumenta o valor da corrente de transição globular-goticular, bem como aumenta as instabilidades do arco e da transferência metálica, refletindo em uma elevação na quantidade de ruídos proporcional ao aumento do teor de CO_2 na mistura. Para a mistura com 20% de CO_2 , a transição não ocorreu de forma característica como para as outras porcentagens, o que pode indicar que existe um limite para a porcentagem de CO_2 . Para que ocorra a transição globular-goticular é apresentada uma sequência de quadros correspondentes a mistura de 20% de CO_2 , na qual a gota se destaca da ponta do eletrodo, e na trajetória até a poça de fusão, ocorre um movimento de rotação da gota que faz com que ele toque simultaneamente a poça e o eletrodo, provocando uma sequência de curtos circuitos. Este fenômeno é observado várias vezes ao longo da soldagem. Esta característica ressalta a dificuldade em se caracterizar o momento da transição globular-goticular para misturas com maiores teores de CO_2 .

Tensão de referência 38 V. Transição mostrada a partir do 6º frame. Na Figura 109.

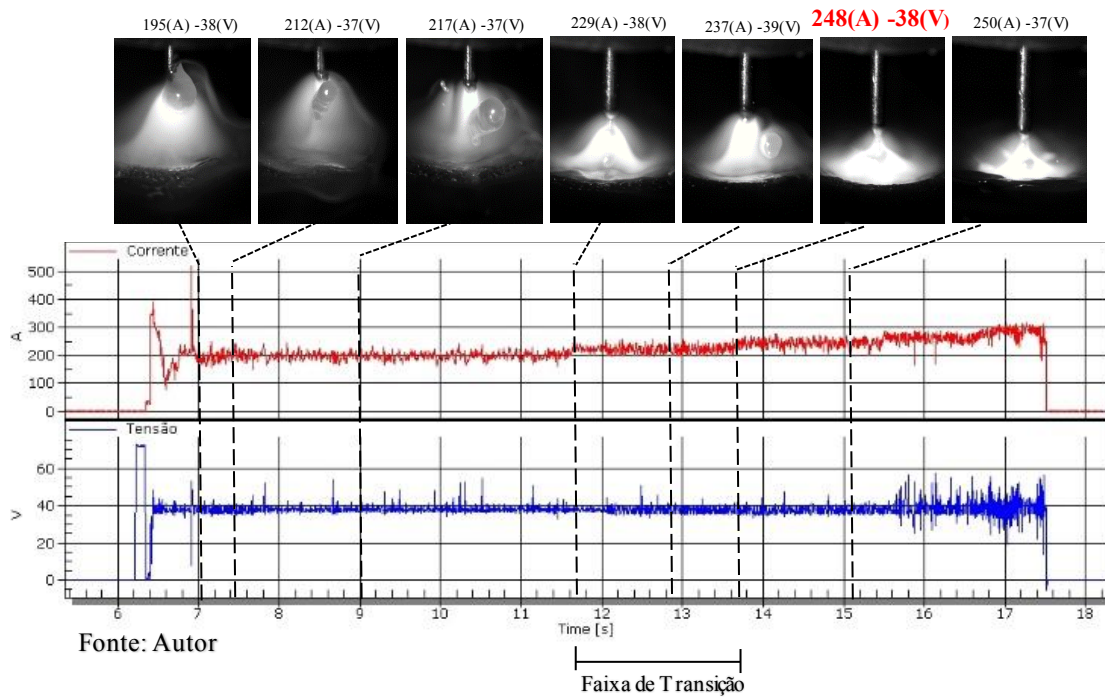
Figura 109- Gás de proteção: Ar+4% CO_2 .



O fenômeno de repulsão e distorção da gota, que ocorre para correntes próximas, mas ainda inferiores a corrente de transição, que se torna mais evidente com o aumento do teor de CO_2 , e é reduzido com o aumento da corrente.

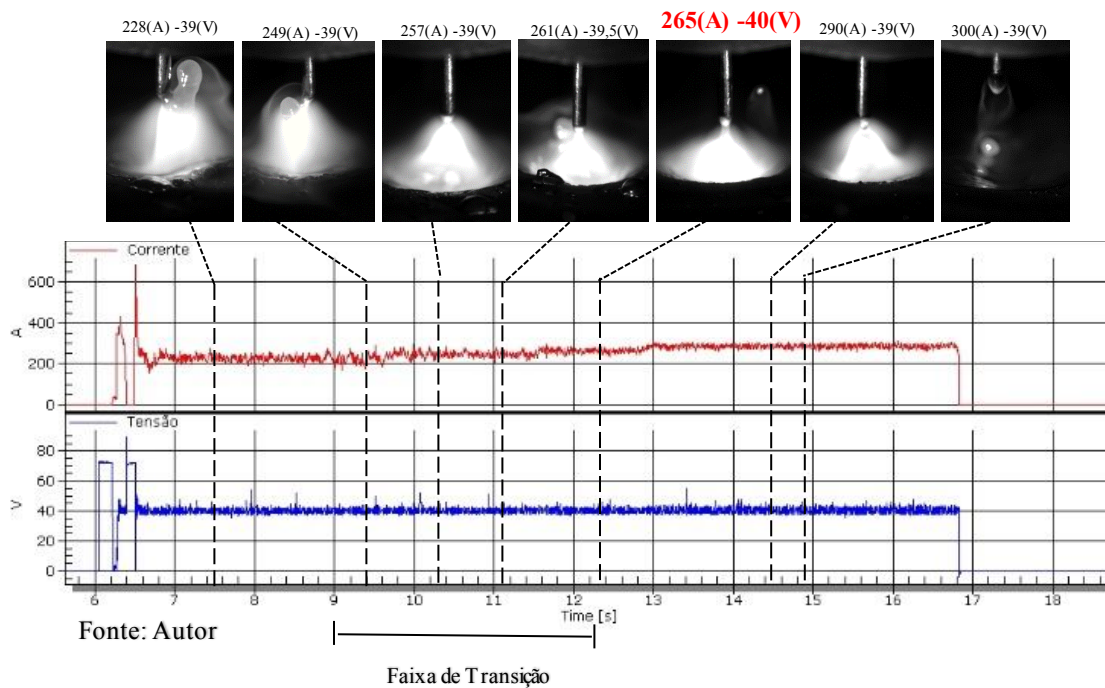
Tensão de referência 36 V. Transição mostrada a partir do 6º frame. Figura 110.

Figura 110- Gás de proteção: Ar+8%CO₂



Tensão de referência 36 V. Transição mostrada a partir do 5º frame. Figura 111.

Figura 111- Gás de proteção: Ar+10%CO₂.



Tensão de referência 40 V. Transição mostrada a partir do 6º frame. Na Figura 112.

Figura 112- Gás de proteção: Ar+20%CO₂

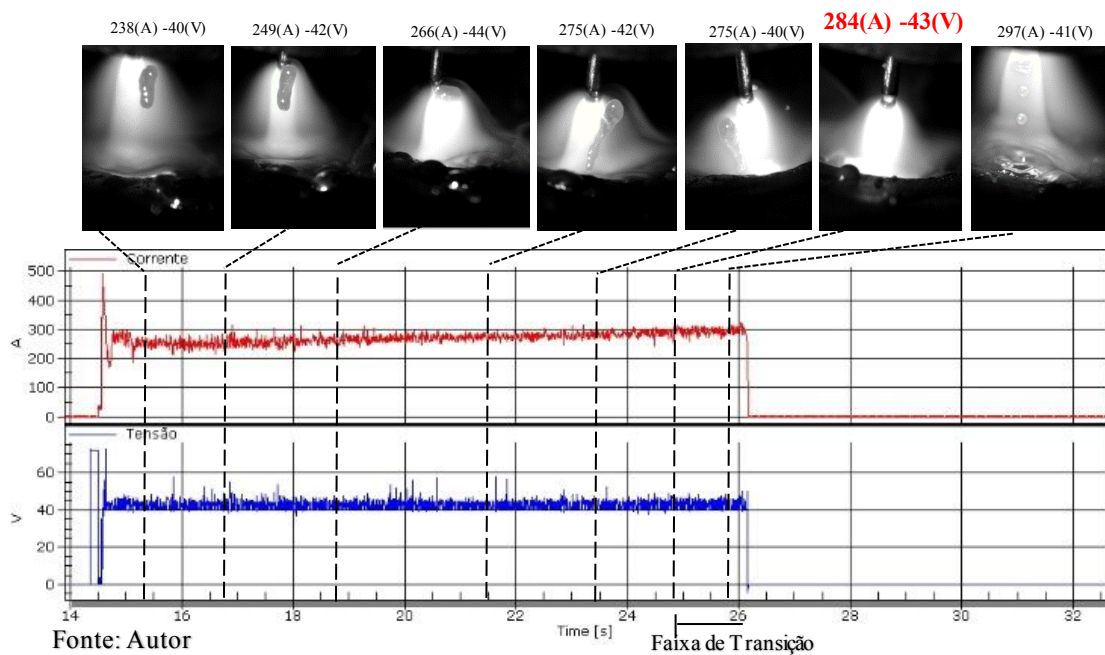
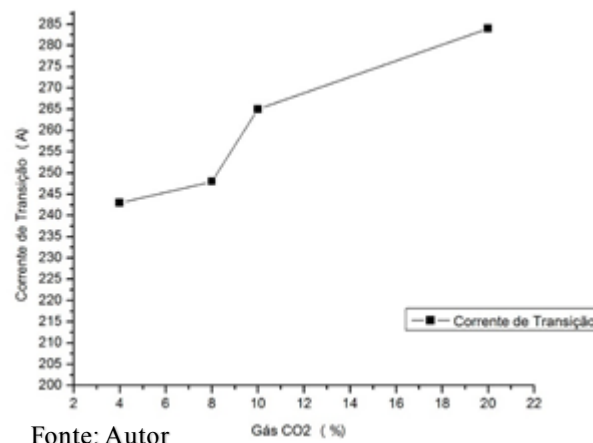


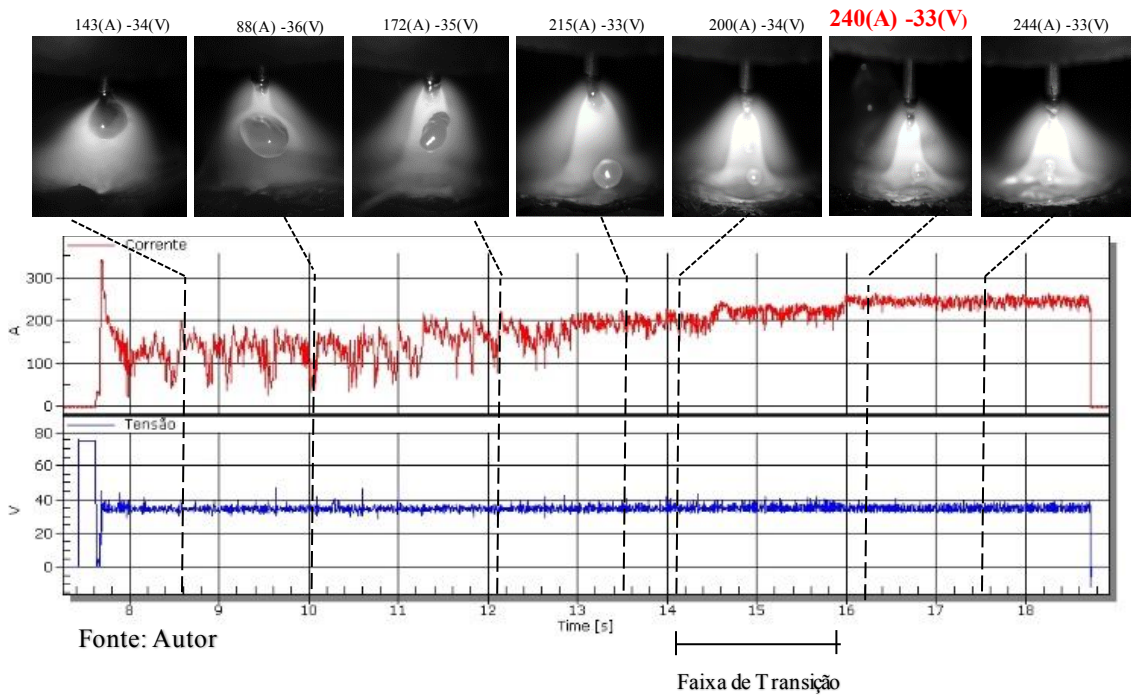
Figura 113- Influência na corrente de transição com mistura de Ar + CO₂



Nos ensaios apresentados nas Figuras a seguir, correspondem às misturas binárias (Ar+O₂), quando o nível de corrente se aproxima da transição ocorrem instabilidades na transferência e no tamanho da gota, provocando o destacamento de gotas de diâmetro inferior o diâmetro do eletrodo. Esse fenômeno é refletido nos oscilogramas, pelos picos de corrente e tensão. No entanto, quando é atingido o valor da transição, a transferência ocorre de maneira estável e a amplitude dos picos de corrente e tensão reduzem consideravelmente.

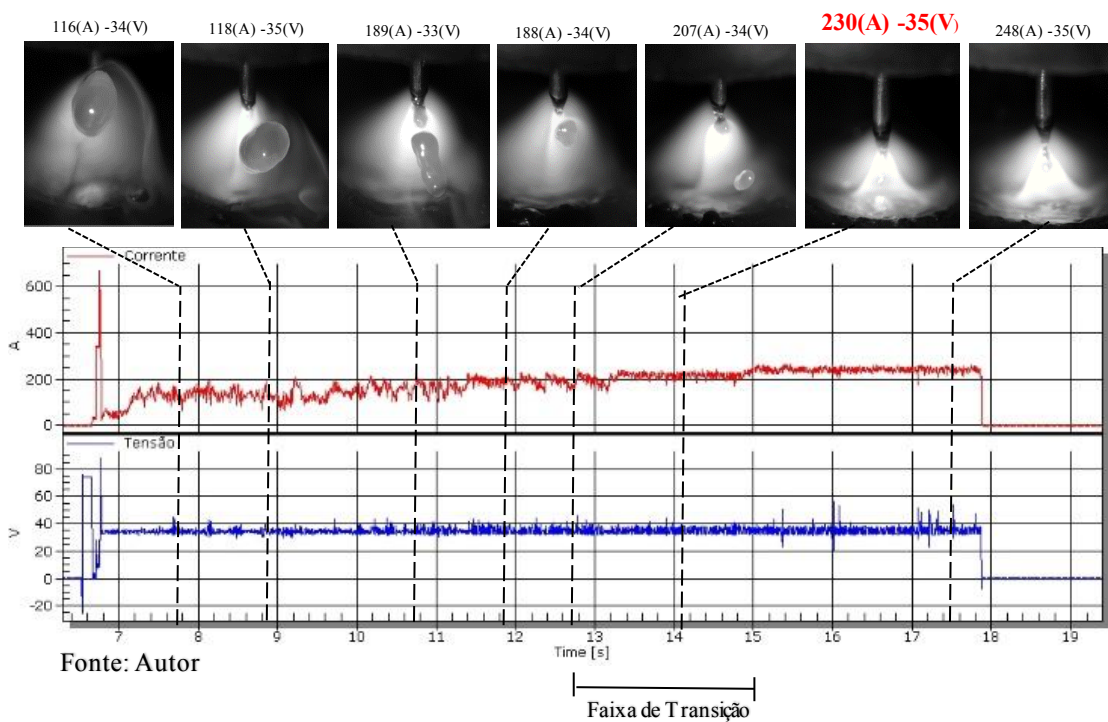
Tensão de referência 33 V. Transição mostrada a partir do 6º frame. Na Figura 114

Figura 114- Gás de proteção: Ar+2%O₂



Tensão de referência 33 V. Transição mostrada a partir do 6º frame. Adição de teores até 4% de oxigênio diminuí a corrente de transição. Na Figura 115.

Figura 115- Gás de proteção: Ar+4%O₂.



Tensão de referência 33 V. Transição mostrada a partir do 6º frame. Gotas explosivas não muito definidas.

Figura 116- Gás de proteção: Ar+8%O₂.

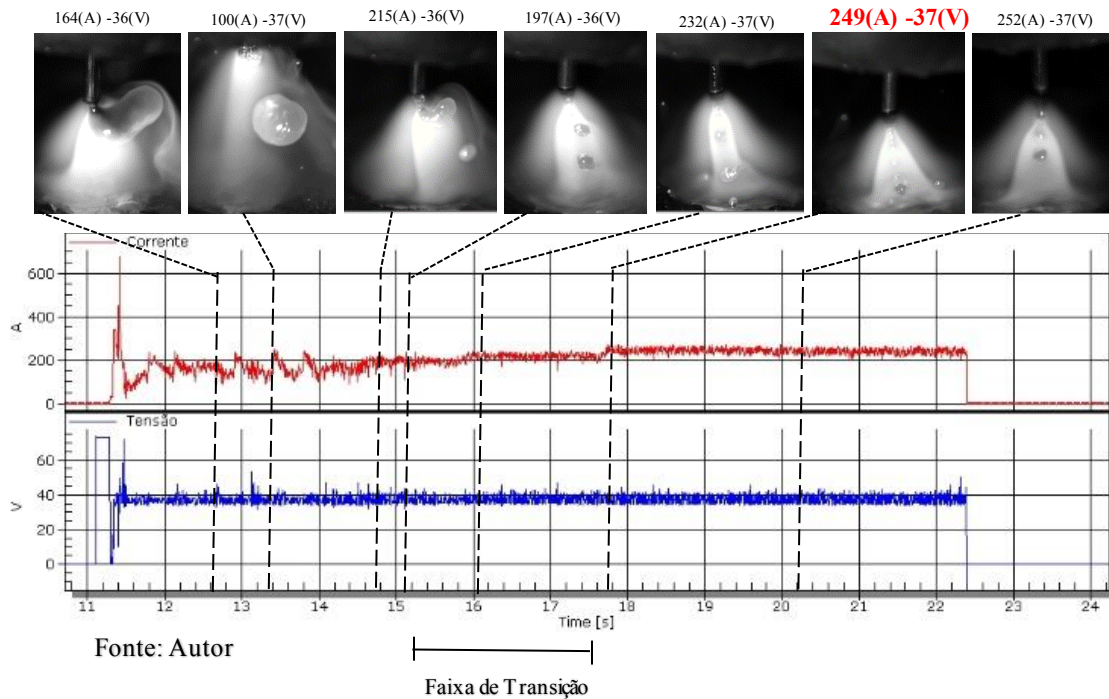
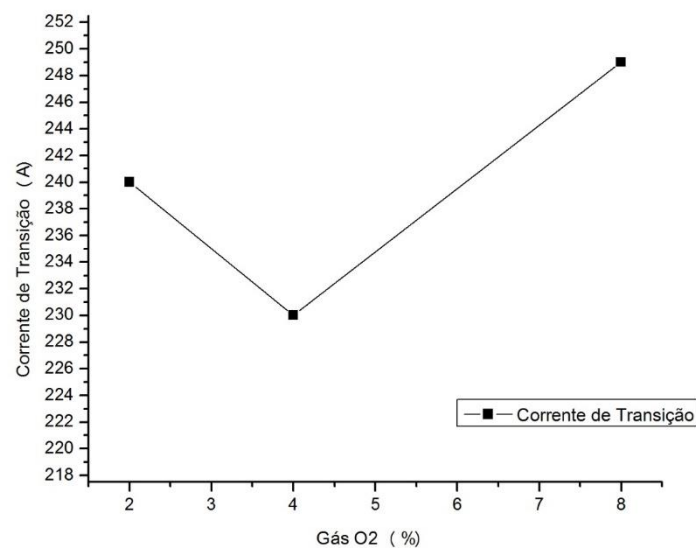


Figura 117- Influência na corrente de transição com mistura de Ar + O₂



Observa-se uma queda na corrente com teores a partir de 4% de O₂ a corrente volta a aumentar o efeito desse gás sobre a tensão superficial e para que o destacamento da gota o arco necessita de mais energia aumentando a corrente.

6 – CONCLUSÃO

O estudo analisou o uso da mistura dos gases de proteção utilizados nos processos de soldagem MIG/MAG. Com base em uma revisão da literatura relevante e as várias recomendações feitas, os seguintes resultados foram obtidos e foi possível concluir que:

- Os perfis geométricos dos cordões de solda depositados sobre chapa foram influenciados pelas misturas dos gases de proteção e transferência metálica. As amostras soldadas com o gás Ar+2%CO₂ apresentaram perfis do tipo “taça” mais acentuado em relação aos gases Ar+8%CO₂. Já para teores de 10% de CO₂ até 20%CO₂ os perfis apresentaram-se mais arredondados. Observou-se uma tendência com o aumento do teor de CO₂ que gerou uma redução da largura para energias mais elevadas.
- A adição de O₂ menores que 4% aumenta a estabilidade do arco e melhora a molhabilidade da poça de fusão e diminui a tenção superficial até 3% de O₂.
- A molhabilidade é relevante até 8% CO₂. A instabilidade do arco aumenta com teores até 10% de CO₂ devido à alta capacidade térmica o arco diminui a mancha catódica.
- Teores muito baixos ou muitos altos de oxigênio inibem a formação de inclusões finamente dispersas na austenita que favorecem a formação da ferrita acicular, cuja nucleação se dá apenas intragranularmente.
- A ZAC foi composta basicamente por ferritas e perlitas. Foi observado um intenso refino de grãos para teores maiores de gases ativos.
- Misturas binárias com teores de CO₂ de 20% estão num patamar claramente superior ao que é possível obter um modo de transferência claramente goticular. O nível da corrente de transição aumenta com o aumento do teor de CO₂.
- Para a mistura binária Ar+O₂, o aumento do teor de O₂ reduz o nível da corrente de transição para teores até 4%. Após este valor, a corrente de transição volta a subir.
- Desta forma, conclui-se que é de fundamental importância entender os conceitos para o comportamento dos gases nas altas temperaturas experimentadas pelo arco, para que parâmetros como tensão, corrente, velocidade de alimentação e velocidade de soldagem sejam especificados e utilizados da maneira correta.

7- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando os resultados encontrados nesta pesquisa, sugere-se que:

Outras composições de misturas de gases de proteção sejam analisadas, juntamente com velocidades de soldagem diferentes utilizando o gás Hélio com o objetivo de melhorar ainda mais a distribuição da penetração nos cordões de solda, para transferência por curto-circuito.

Ensaio Mecânicos sejam realizados em corpos de prova obtidos, para uma avaliação detalhada do comportamento mecânico.

8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MIRANDA, H. C. Reconhecimento e Controle da Transferência Metálica no processo MIG/MAG pulsado, Tese de Doutorado apresentada na Universidade Federal de Uberlândia, 2002

MARQUES, P. V. Soldagem: Fundamentos e Tecnologia. Belo Horizonte: UFMG, 2005.

SCOTTI, A. PONOMAREV, V. Soldagem MIG/MAG. Melhor Entendimento. Melhor desempenho. 2ª Edição. Artliber Editora Ltda. 2014. 288 p.

WEMAN, K. Welding Processes Handbook. Second Edition. Elsevier. 2003. 208 p.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho. Artliber, 2008. p.

COSTA E SILVA, André Luiz & Mei, Paulo Roberto, Aços e ligas especiais, Editora Edgard Blucher, São Paulo, 2006.

MAMAT, SARIZAM BIN, Tashiro, Shinichi Tanaka, Manabu Yusoff, Mahani Study on factors affecting the droplet temperature in plasma MIG welding process-Journal of Physics D: Applied Physics 2018.

MODENESI, Paulo José Marques, Paulo Villani Bracarense, Alexandre Queiroz, Soldagem-fundamentos e tecnologia, 2005

VICTOR ÁQUILA Apostila mig-mag e arame tubular 2012

MODENESI, P.J. Soldabilidade de algumas ligas. Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Apostila do Programa de pós-graduação em Engenharia Metalúrgica. Belo Horizonte. 2011.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. Introdução à Metalurgia da Soldagem. Belo Horizonte: UFMG, 2012.

CALLISTER, W. D. Fundamentos de Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Abordagem Integrada. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos. São Paulo: ABM, 2008.

COLPAERT, H. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns. São Paulo: Blucher, 2008.

XIAOYU CAI, CHENGLI FAN & SANBAO LIN & CHUNLI YANG¹ & LI HU & XIANGRU JI, Effects of shielding gas composition on arc behaviors and weld formation in narrow gap tandem GMAW ORIGINAL ARTICLE, 2016

P. KAH & J. MARTIKAINEN Influence of shielding gases in the welding of metals Article in International Journal of Advanced Manufacturing Technology, February 2012

BELINGA MVOLA & PAUL KAH, Effects of shielding gas control: welded joint properties in GMAW process optimization Received: 28 September 2015 /Accepted: 16 May 2016 /Published online: 1 June 2016

L L WANG, F G LU, H P WANG, A B MURPHY AND X H TANG, Effects of shielding gas composition on arc profile and molten pool dynamics in gas metal arc welding of steels, Received 24 July 2014, revised 15 September 2014 Accepted for publication 25 September 2014 Published 27 October 2014

BY W. R. REICHELT, J. W. EVANCHO AND M. G. HOY, Effects of Shielding Gas on Gas Metal Arc Welding Aluminum, 1980.

9 – APÊNDICE 1

Tabelas das medidas d do Perfil Geométrico dos cordões de solda para utilização da análise de variância ANOVA.

Tabela 11- Ensaios para a Média da Largura

Ensaios	Largura 1	Largura 2	Largura 3	Largura Total	Desvio Padrão
Ar+2%O ₂	12,79	12,81	12,68	12,76	0,07
Ar+3%O ₂	13,44	13,01	12,88	13,11	0,29
Ar+4%O ₂	12,6	12,88	12,62	12,70	0,16
Ar+8%O ₂	12,35	12,48	12,35	12,39	0,08
Ar+32%He+8%O ₂	13,2	13,27	13,66	13,38	0,25
Ar+36%He+4%O ₂	13,38	13,51	13,44	13,44	0,07
Ar+38%He+2%O ₂	13,57	14,19	14,38	14,05	0,42
Ar+04%CO ₂	13,44	13,33	13,66	13,48	0,17
Ar+08%CO ₂	13,77	13,4	13,86	13,68	0,24
Ar+10%CO ₂	12,27	12,42	12,22	12,30	0,10
Ar+20%CO ₂	12,99	13,4	12,94	13,11	0,25

Tabela 12- Ensaio para a Média da Penetração

Ensaio	Penetração 1	Penetração 2	Penetração 3	Pent. Total	Desvio Padrão
Ar+2%O ₂	2,79	2,75	2,68	2,74	0,06
Ar+3%O ₂	2,73	2,68	2,55	2,65	0,09
Ar+4%O ₂	2,08	2,16	2,09	2,11	0,04
Ar+8%O ₂	1,83	1,83	1,7	1,79	0,08
Ar+32%He+8%O ₂	1,7	1,75	1,75	1,73	0,03
Ar+36%He+4%O ₂	1,82	1,69	1,75	1,75	0,07
Ar+38%He+2%O ₂	1,37	1,57	1,5	1,48	0,10
Ar+04%CO ₂	2,66	2,68	2,75	2,70	0,05
Ar+08%CO ₂	2,92	2,88	3,01	2,94	0,07
Ar+10%CO ₂	2,73	2,81	2,94	2,83	0,11
Ar+20%CO ₂	2,86	2,94	2,81	2,87	0,07

Tabela 13- Ensaio para a Média do Reforço

Ensaio	Reforço 1	Reforço 2	Reforço 3	Reforço Total	Desvio Padrão
Ar+2%O ₂	2,34	2,22	2,29	2,28	0,06
Ar+3%O ₂	1,88	1,96	2,03	1,96	0,08
Ar+4%O ₂	2,21	2,09	2,16	2,15	0,06
Ar+8%O ₂	1,83	1,9	1,83	1,85	0,04
Ar+32%He+8%O ₂	1,83	1,76	1,76	1,78	0,04
Ar+36%He+4%O ₂	2,14	2,08	2,14	2,12	0,03
Ar+38%He+2%O ₂	2,53	2,48	2,49	2,50	0,03
Ar+04%CO ₂	2,27	2,48	2,42	2,39	0,11
Ar+08%CO ₂	2,53	2,55	2,48	2,52	0,04
Ar+10%CO ₂	2,34	2,42	2,61	2,46	0,14
Ar+20%CO ₂	2,47	2,62	2,48	2,52	0,08

Tabela 14- Ensaio para cálculo da Diluição

Ensaio	ad 1	ad 2	ad 3	ad Total
Ar+2%O ₂	20,89	19,68	19,95	20,17
Ar+3%O ₂	17,75	16,34	17,12	17,07
Ar+4%O ₂	18,64	18,65	18,55	18,61
Ar+8%O ₂	16,53	15,95	14,75	15,74
Ar+32%He+8%O ₂	15,47	13,73	15,17	14,79
Ar+36%He+4%O ₂	17,57	17,16	17,85	17,53
Ar+38%He+2%O ₂	19,61	19,49	19,6	19,57
Ar+04%CO ₂	19,66	21,55	20,71	20,64
Ar+08%CO ₂	21,1	21,83	20,2	21,04
Ar+10%CO ₂	19,86	19,47	19,03	19,45
Ar+20%CO ₂	19,74	19,69	19,48	19,64

Tabela 15- Ensaios para cálculo da Diluição

Ensaios	afm 1	afm 2	afm 3	afm Total
Ar+2%O ₂	16,37	16,92	16,57	16,62
Ar+3%O ₂	18,33	18,35	18,48	18,39
Ar+4%O ₂	17,5	16,42	17,27	17,06
Ar+8%O ₂	14,06	14,43	13,24	13,91
Ar+32%He+8%O ₂	14,42	15,87	13,34	14,54
Ar+36%He+4%O ₂	17,2	17,97	17,38	17,52
Ar+38%He+2%O ₂	14,46	14,85	15,04	14,78
Ar+04%CO ₂	11,82	12,27	11,36	11,82
Ar+08%CO ₂	15,58	16,95	17,4	16,64
Ar+10%CO ₂	18,95	18,77	19,09	18,94
Ar+20%CO ₂	22,33	22,74	22,16	22,41

Tabela 16- Ensaios para a área Fundida

Ensaios	Área ZF 1	Área ZF 2	Área ZF 3	Área Total	Desvio Padrão
Ar+2%O ₂	16	14,75	16,93	15,9	1,09
Ar+3%O ₂	18,28	17,95	19,43	18,6	0,78
Ar+4%O ₂	17,99	18,03	19,1	18,4	0,63
Ar+8%O ₂	16,39	14,43	13,24	14,7	1,59
Ar+32%He+8%O ₂	14,42	15,87	13,34	14,5	1,27
Ar+36%He+4%O ₂	17,87	16,82	17,24	17,3	0,53
Ar+38%He+2%O ₂	13,51	16,86	14,65	15,0	1,70
Ar+04%CO ₂	13,61	13,58	13,54	13,6	0,04
Ar+08%CO ₂	17,74	17,61	16,65	17,3	0,60
Ar+10%CO ₂	19,3	18,77	18,97	19,0	0,27
Ar+20%CO ₂	23,62	23,01	22,98	23,2	0,36

Tabela 17- Ensaios para a Relação Reforço/Largura

Misturas	Reforço Total	Largura Total	R/L
Ar+2%O ₂	2,28	12,8	0,18
Ar+3%O ₂	1,96	13,1	0,15
Ar+4%O ₂	2,15	12,7	0,17
Ar+8%O ₂	1,90	12,4	0,15
Ar+32%He+8%O ₂	1,80	13,4	0,13
Ar+36%He+4%O ₂	2,12	13,4	0,16
Ar+38%He+2%O ₂	2,50	14,0	0,18
Ar+04%CO ₂	2,39	13,5	0,18
Ar+08%CO ₂	2,52	13,7	0,18
Ar+10%CO ₂	2,46	12,3	0,20
Ar+20%CO ₂	2,52	13,1	0,19