

VALTER ALVES DE MENESES

EFEITO DA ESTABILIDADE DA TRANSFERÊNCIA
METÁLICA (RESPINGOS) NA SOLDAGEM MIG/MAG
POR CURTO-CIRCUITO SOBRE A GERAÇÃO DE
FUMOS E GASES



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA FACULDADE DE
ENGENHARIA MECÂNICA

2013

VALTER ALVES DE MENESES

EFEITO DA ESTABILIDADE DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA
(RESPINGOS) NA SOLDAGEM MIG/MAG POR CURTO-CIRCUITO
SOBRE A GERAÇÃO DE FUMOS E GASES

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Américo Scotti

Co-orientador: Prof. Dr. Valdemar Silva Leal

UBERLÂNDIA - MG

2013

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU , MG, Brasil

M543 e Meneses, Valter Alves de, 1960-
2013

Efeito da estabilidade da transferência metálica (respingos) na soldagem MIG/MAG por curto-circuito sobre a geração de fumos e gases / Valter Alves de Meneses. - 2013.

192 f. : il.

Orientador: Américo Scotti.

Coorientador: Valdemar Silva Leal.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Soldagem - Teses. 3. Poluentes - Teses. 4. Fumo - Teses. 5. Gases - Teses. I. Scotti, Américo, 1955-II. Leal, Valdemar Silva. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621

VALTER ALVES DE MENESES

EFEITO DA ESTABILIDADE DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA
(RESPINGOS) NA SOLDAGEM MIG/MAG POR CURTO-CIRCUITO
SOBRE A GERAÇÃO DE FUMOS E GASES

Tese **APROVADA** pelo Programa de
Pós-graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia.

Área de Concentração: Processos de
Fabricação.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Américo Scotti – UFU - Orientador

Prof. Dr. Valdemar Silva Leal – IFMA - Co-orientador

Prof. Dr. Valtair Antonio Ferraresi - UFU

Prof. Dr. Theóphilo Moura Maciel UFCG

Prof. Dr. Augusto José de Almeida Buschinelli – UFRN

Prof^a. Dra. Lídia Santos Pereira Martins – UEMA

Uberlândia, 21 de novembro de 2013

Dedico este trabalho aos meus queridos pais
André Alves de Carvalho e Maria Santa de Meneses (*in memoriam*),
exemplos de caráter, virtude, sinceridade, humildade e perseverança
que com muita dedicação, simplicidade e carinho
me conduziram a esta trajetória vitoriosa.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Prezado Orientador, Prof. Américo Scotti, pela sua valiosa orientação e profissionalismo demonstrado nestes anos de trabalho e que muito contribuiu para minha formação, mas também pela amizade;

Ao meu Co-orientador Prof. Valdemar Silva Leal, pelo incentivo, apoio e ensinamentos;

Ao Laprosolda, pelo oferecimento de apoio laboratorial, sem os quais não seria possível a realização deste trabalho;

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFU, pela oportunidade de realização deste trabalho, tendo um agradecimento especial ao Coordenador Prof. Márcio Bacci;

À Capes pelo apoio financeiro, através do programa de Doutorado Interinstitucional (DINTER) em Engenharia Mecânica da UFU/ IFMA;

A FAPEMA pela aquisição do analisador de gases modelo PC MULTIGÁS;

Ao amigo, também coordenador operacional do DINTER, Prof. Keyll Carlos Ribeiro, pelo incentivo e apoio, mas principalmente por que sem o esforço dele o DINTER não teria existido;

Agradecimento especial ao Prof. João Fernando Pereira Gomes, do Instituto Politécnico de Engenharia, Portugal, pelo interesse no trabalho, realização das análises químicas e morfológicas de fumos e discussão dos resultados;

Aos Professores Volodymyr Ponomarov, Louriel Oliveira Vilarinho, Valtair Ferraresi e Ruham Pablo Reis pelos ensinamentos, apoio e amizade;

De forma diferenciada, meu muito obrigado ao Vinicius Mainardi, pelo incentivo, amizade e apoio na área computacional, e a meus amigos Zé Francisco, Hélio Antonio Lameira de Almeida e Victor Augusto, da UFU, pelas suas contribuições nas realizações dos ensaios e amizade;

Aos técnicos Euripedes Bausanufu e Lázaro Henrique da Oficina Mecânica, pelo apoio nas motagens experimentais e amizade, e ao pessoal da limpeza, aos técnicos Sr. Francisco, Carlos Humberto e Neuzadir, pelo incentivo e amizade;

A todos os amigos e amigas do Laprosolda, Diandro Bailoni, Thonson Ferreira, Edmundo, Anna Tokaz, Maksym Ziberov, Iaroslav Skabosvskyi, Oksana Kovalenco e Andej Mishenko, pelo incentivo e amizade;

Aos amigos Waldemir dos Passos Martins e o Prof. Antonio Ernandes Macedo Paiva, pelo apoio e incentivo;

Outro agradecimento especial à minha grande amiga Carmem Célia Francisco, pelo incentivo e apoio.

A todos meus familiares;

Sempre a Deus, por ter atendido as minhas orações pelo desenvolvimento deste trabalho.

Por último, mas não menos importante, agradeço à minha querida esposa Rosinete Pereira

de Lima de Meneses pelo incentivo e apoio, e também pela paciência de suportar minha ausência com tanto carinho.

MENESES, V. A. de. **Efeito da estabilidade da transferência metálica (respingos) na soldagem MIG/MAG por curto-circuito sobre a geração de fumos e gases**. 2013. 192 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

A melhor condição de soldagem por curto-circuito no processo MIG/MAG não é aquela que necessariamente vai resultar em uma menor oscilação dos sinais elétricos, mas sim aquela que proporciona uma maior regularidade de transferência e com a transferência dominada pela tensão superficial. Esse comportamento relaciona-se com a estabilidade da transferência. Sabe-se que quanto maior a estabilidade de transferência, maior a penetração, melhor o acabamento do cordão e menor a quantidade de respingos. Este trabalho teve como objetivo principal analisar e avaliar o efeito da estabilidade de transferência metálica por curto-circuito no processo de soldagem MIG/MAG sobre os níveis de emissão de fumos metálicos e gases e sobre a morfologia e composição dos fumos gerados. Utilizando-se como gases de proteção diversas misturas à base de Argônio com CO_2 e O_2 e mantendo-se fixos a corrente média e volume do cordão depositado, soldagens foram realizadas com um arame maciço de aço comum ao carbono em arco curto suficiente para levar a transferência por curto-circuito. Varreu-se a regulagem de tensão de soldagem para variar progressivamente a estabilidade de transferência, mas mantendo-se a mesma corrente média. A quantificação da regularidade da transferência se deu através do critério laprosolda para estabilidade de transferência por curto-circuito. Usou-se duas condições de menor estabilidade e uma de alta estabilidade para avaliar a geração, morfologia e composição dos fumos. Os resultados mostraram que o critério laprosolda de estabilidade de transferência por curto-circuito mostrou-se preciso e é uma ferramenta importante para permitir comparar o efeito da regularidade de transferência sobre a geração de fumos e de gases, mesmo sob diferentes gases de proteção e parâmetros. A maior estabilidade de transferência metálica não apresentou, como esperado, menor taxa de geração de fumos, apesar de levar a menos respingos. Em função disto, diferentes técnicas de soldagem foram usadas para separar o efeito de parâmetros de soldagem correlacionados com a transferência por curto-circuito sobre a geração de fumos e verificar os governantes. Verificou-se que maiores correntes de curto-circuito, comprimentos de arco mais longos e tempo maiores de arco aberto contribuem individualmente para o aumento da taxa de geração de fumos, mas se eles agirem em conjunto na mesma direção, a contribuição deles

é significativa. Também que não há qualquer evidência de que um maior diâmetro de gota poderia diminuir a taxa de geração de fumos. Os fumos gerados apresentaram majoritariamente partículas ultrafinas (< 100 nm), aproximadamente redondas e com composição de Fe, Mn e Si, C e O. Porém, a regularidade de transferência não demonstrou influenciar na morfologia, tamanho ou composição dos fumos. Foi feita também a verificação do efeito da composição dos gases de proteção, da intensidade de corrente e da regularidade de transferência sobre a emissão de CO_2 e CO. Constatou-se que quanto mais rica de CO_2 a composição do gás de proteção, mais CO e CO_2 são gerados pelo arco. Mas, ao contrário da emissão de fumos, não há efeito da tensão, estabilidade de transferência e da corrente média sobre a geração desses gases. Verificou-se também que apesar da grande quantidade de CO e CO_2 emitido pelo arco, principalmente quando se utiliza a proteção com CO_2 puro, não houve concentração de CO e CO_2 significantes nas zonas de respiração do soldador ou próxima, mesmo em células de trabalho parcialmente confinadas.

Palavras-chave: MIG/MAG. Regularidade de transferência. Geração de fumos. Geração de gases. Estabilidade. Respingos.

MENESES, V. A. de. **Effect of stability of metal transfer (spatter) in GMAW process by short-circuit on the generation of fumes and gases**. 2013. 192 f. Doctoral Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

ABSTRACT

The best short-circuit welding condition in the GMAW process is not the one that will necessarily result in a lower variation of electrical signals, but rather that which provides greater transfer regularity and with transfer being dominated by surface tension. This behavior is related to transfer stability. It is known that the greater the transfer stability, the greater the penetration, the better finish to the bead and the lower amount of spatter. This study had as its main aim the analyzes and evaluation of the effect of the stability of short-circuit metal transfer of the GMAW welding process on the emission levels of metal fumes and gases and on the morphology and composition of the fumes generated. Using various mixtures of an Argon and CO₂ and O₂ base as protective gases and maintaining the average current and volume of weld bead deposited fixed, welds were made with a solid wire of carbon steel in an arc short enough to carry a transfer by way of short-circuit. The welding voltage was regulated to progressively vary transfer stability while maintaining the same average current. The quantification of transfer regularity was made through the Laprosolda criterion for short-circuiting metal transfer stability. Two conditions of low stability and one of high stability were used to assess the generation, morphology and composition of the fumes. The results showed that the Laprosolda Criterion proved accurate and it is an important tool which permits one to compare the effect of transfer regularity on the generation of fumes and gases, even under different shielding gases and parameters. The greater stability of metal transfer did not show, as expected, a lower rate of fume generation, even with less spatter. Because of this, different welding techniques were used to separate the effects of the welding parameters correlated to the short-circuiting metal transfer on the fume generation and checking governing principles. It was found that higher short-circuit currents, longer arc lengths and greater time with arc open contributed individually to an increase in the rate of fume generation, but if they acted together in the same direction, their contribution is significant. Also there is no evidence that a larger droplet diameter would decrease the rate of fume generation. The fumes generated mainly presented ultrafine particles (< 100 nm), and approximately round and with a composition of Fe, Mn and Si, C and O. However, the regularity of transfer did not show that it influenced morphology, size or composition of the

fumes. The effect of the composition of the shielding gas was also verified, together with the current intensity and transfer regularity of the CO₂ and CO emission. It was found that the richer the composition of CO₂ of the shielding gas, the more CO and CO₂ are generated by the arc. But, unlike fume emission, there is no effect of voltage, stability transfer and average current on the generation of these gases. It was also found that in spite of the large amount CO and CO₂ emitted by the arc, especially when using pure CO₂ protection, there was no significant concentration of them in the welder's breathing areas or proximity, not even in partially confined work cells.

Keywords: *GMAW. Transfer regularity. Fume generation. Gas generation. Stability and Splatters.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Fatores responsáveis pela formação de fumos: 1) evaporação da ponta do eletrodo ou gota; 2) respingos incandescentes e também alguma evaporação resultante da explosão do arame	37
Figura 2.2	Vista em corte da câmara para determinação de geração de fumos em soldagem, de acordo com a norma AWS F1.2:2006	40
Figura 2.3	Coletor de fumos usado nos procedimentos experimentais, onde: 1 = Sonda de fluxo de ar; 2 = Filtro de fibra de vidro; 3 = Tocha de soldagem	41
Figura 2.4	Arranjo do coletor de fumos para ambiente de trabalho perto da superfície de trabalho	42
Figura 2.5	Esquema de uma unidade de medição de geração de fumos, com tubo de amostragem em um fluxo separado de extração	43
Figura 2.6	Diagrama esquemático do sistema de coleta de fumos utilizado por Yamazaki et al. (2007)	43
Figura 2.7	Mostrador Pessoal ligado à máscara sobre a cabeça do soldador	44
Figura 2.8	Arranjo da amostragem na máscara do soldador	45
Figura 2.9	Diagrama esquemático de operação de soldagem e amostragem do método de medição usado por Saito et al.(2000)	45
Figura 2.10	Fatores que influenciam na geração de fumos de soldagem	48
Figura 2.11	Concentração de fumos (mg/m^3) no ar a uma taxa de 1,8 l/min em função da tensão média e da corrente média, para as transferências por curto-circuito, globular e spray	50
Figura 2.12	Taxa de geração de fumos (mg/m^3) no ar a uma taxa de 1.8 l/min em função da tensão média e da corrente média, para as transferências por curto-circuito, globular e spray	51
Figura 2.13	Variação da taxa de geração de fumos em relação à intensidade da corrente para as diferentes misturas de gases de proteção estudadas equivalente para cada mistura de gás de proteção	52

Figura 2.14	Influência da corrente pulsada na taxa de geração de fumos para o aço inoxidável AISI 316 L	53
Figura 2.15	Influência da corrente pulsada na taxa de geração de fumos, usando as ligas de alumínio AW 6082 e EM AW 5083 e argônio como gás de proteção	54
Figura 2.16	Taxa de geração de fumos metálicos para diferentes modos de transferência metálica para um aço inoxidável 316, destacando-se o comportamento das taxas e da tensão na mudança dos modos de transferência	55
Figura 2.17	Tamanho de partículas de diferentes fumos de soldagem	63
Figura 2.18	Espectro de difração de raios-X de fumos criados na soldagem do aço carbono A500 usando como consumíveis o gás de proteção 2%O ₂ – Ar e o arame ER70S-3, adotando como parâmetros de soldagem o comprimento de arco de 0,0045 pol com voltagem de 30V e amperagem de 200A	63
Figura 2.19	Efeito do teor de CO ₂ no gás de proteção sobre a taxa de geração de respingos, para soldagem MIG/MAG convencional utilizando arame-eletrodo maciço	67
Figura 2.20	Dependência da taxa de geração de fumos do gás de proteção, I=250 A	69
Figura 2.21	Coletor de fumos preparado para análise de emissões gasosas	78
Figura 3.1	Equipamento usado para soldagens MIG/MAG convencionais (Lincoln Power Wave 455 STT)	79
Figura 3.2	Coletor de fumos de soldagem do Laprosolda/UFU, com detalhes da mesa rotatória e do suporte para colocação do filtro coletor de fumos	81
Figura 3.3	Ilustração do aspecto de uma manta (filtro) usada para coleta de fumos, após soldagem	82
Figura 3.4	Velocidade angular em função da posição do potenciômetro para a mesa giratória, usando-se a engrenagem de 60 dentes	83
Figura 3.5	(a) Analisador de gases modelo PC MULTIGÁS, marca NAPRO (ELETRÔNICA INDUSTRIAL LTDA); (b) detalhes da sonda de captação dos gases	84
Figura 3.6	Analisador de gases modelo Oxybaby 6.0 - O ₂ /CO ₂ , marca WITT- GASETECHNIK GmbH&Co KG	85
Figura 3.7	Dispositivo utilizado para garantir a mistura dos gases para as medições durante a aferição do PC-MULTIGÁS	86
Figura 3.8	Montagem do suporte metálico na coifa coletora de	

	fumos para posicionar a sonda em relação à posição da tocha	88
Figura 3.9	Vista da montagem do coletor de fumos adaptada para medição de emissão de gases	89
Figura 3.10	Montagem da coifa especial coletora de gases no equipamento para medição de emissão de fumos	91
Figura 3.11	Detalhe da posição de montagem da sonda de captação de gases	92
Figura 3.12	Detalhe da posição de montagem da sonda de captação de gases	96
Figura 3.13	Detalhe da posição da sonda na coifa	97
Figura 3.14	Concentração de CO_2 em função do tempo, para a proteção com 100% CO_2 , com arco e sem arco	99
Figura 3.15	Concentração de CO em função do tempo, para a proteção com 100% CO_2 , com arco e sem arco	99
Figura 3.16	Concentração de CO_2 em função do tempo, para a proteção com a mistura 25% CO_2 , com arco e sem arco	100
Figura 3.17	Concentração de CO em função do tempo, para proteção com a mistura 25% CO_2 , com arco e sem arco	100
Figura 3.18	Velocidade angular em função da posição do potenciômetro para a mesa giratória, usando-se a engrenagem de 60 dentes (nova calibração)	102
Figura 3.19	Chapa de acrílico confeccionada para coleta dos fumos para medição de granulometria de composição química dos fumos	102
Figura 3.20	Coletores de fumos adaptados sobre a chapa de acrílico antes das soldagens	103
Figura 3.21	Coletores de fumos sobre a chapa de acrílico após a soldagem	103
Figura 3.22	Equipamento SDP-600 utilizado nas soldagens das placas de testes durante a parametrização	104
Figura 4.1	(a) Faixas de trabalho para soldagem em que os IV_{cc} são aceitáveis em função da tensão de regulagem; (b) Rendimento de deposição e acabamento do cordão em função da tensão de regulagem	111
Figura 4.2	Índices de regularidades de transferências e diâmetros de gota em função da tensão de regulagem: taxa de aquisição de 2000 Hz e tempo de aquisição de 50 segundos em média (amostra de 20 s para os cálculos)	113
Figura 4.3	Aparência do cordão em função da tensão de regulagem	114
Figura 4.4	Rendimentos e acabamento do cordão em função da	

	tensão de regulagem	114
Figura 4.5	Índices de regularidades e taxa de geração de fumos em função da tensão de regulagem	118
Figura 4.6	Tempo médio de arcos abertos /Tempo médio dos curtos circuitos e taxa de geração de fumos em função da tensão de regulagem	119
Figura 4.7	Tempo médio de arcos abertos e taxa de geração de fumos, em função da tensão de regulagem	119
Figura 4.8	Média das correntes de curto-circuito e taxa de geração de fumos, em função da tensão de regulagem	120
Figura 4.9	Diâmetro de gota e taxa de geração de fumos em função da tensão de regulagem	120
Figura 4.10	Índice de regularidade e taxa de geração de fumos em função da tensão de regulagem, comparando as condições de regulagem do fator indutivo em zero e +10	123
Figura 4.11	Tempo médio de arcos abertos/Tempo médio dos curtos circuitos e taxa de geração de fumos em função da tensão de regulagem, comparando as condições de regulagem do fator indutivo em zero e +10	124
Figura 4.12	Tempo médio de arcos abertos e taxa de geração de fumos, em função da tensão de regulagem, comparando as condições de regulagem do fator indutivo em zero e +10	124
Figura 4.13	Média das correntes de curto-circuito e taxa de geração de fumos, em função da tensão de regulagem, comparando as condições de regulagem do fator indutivo em zero e +10	125
Figura 4.14	Diâmetro de gota e taxa de geração de fumos, em função da tensão de regulagem, comparando as condições de regulagem do fator indutivo em zero e +10	125
Figura 5.1	Corrente de curto-circuito (I_{cc}) e a Taxa de geração de fumos (TGF) em função das Indutâncias de regulagens	132
Figura 5.2	Mecanismos de geração de fumos pela corrente de curto-circuito (I_{cc})	133
Figura 5.3	Relação entre o comprimento do arco e a taxa de geração de fumos (TGF) usando os dados apresentados na Tab. 1	134
Figura 5.4	Corrente de curto-circuito (I_{cc}) e taxa de geração de fumos em função do comprimento do arco	134
Figura 5.5	Tempo médio de curto- circuito (t_{cc}) e a taxa de geração de fumos (TGF) em função do comprimento do arco	135

Figura 5.6	Tempo médio de arco aberto (t_{ab}) e a taxa de geração de fumos (TGF) em função do comprimento do arco	135
Figura 5.7	Diâmetro de gotas antes do destacamento (ϕ_{gota}) e a taxa de geração de fumos (TGF) em função do comprimento do arco	135
Figura 5.8	Arco voltagem e taxa de geração de fumos (TGF) em função do comprimento do arco	137
Figura 5.9	Tempo de arco aberto (t_{ab}) e a taxa de geração de fumos (TGF) em função da composição do gás de proteção (assumindo um mesmo comprimento de arco) para dois diferentes modos operacionais (sinérgico e CMT): os pontos do lado esquerdo foram obtidos com Ar+15%CO ₂ , enquanto os da direita com 100%CO ₂	139
Figura 6.1	Concentração de CO ₂ em função do gás de proteção para diferentes gases de proteção	146
Figura 6.2	Concentração de CO em função do gás de proteção para diferentes gases de proteção	147
Figura 6.3	Concentração de CO ₂ em função da tensão (diretamente proporcional ao comprimento de arco e à estabilidade de transferência) na soldagem protegida com 100%CO ₂	149
Figura 6.4	Concentração de CO em função da tensão (diretamente proporcional ao comprimento de arco e à estabilidade de transferência) na soldagem protegida com 100%CO ₂	149
Figura 6.5	Concentração de CO ₂ em função da tensão (diretamente proporcional ao comprimento de arco e à regularidade de transferência) na soldagem protegida com 100%CO ₂	152
Figura 6.6	Concentração de CO em função da tensão (diretamente proporcional ao comprimento de arco e à regularidade de transferência) na soldagem protegida com 100%CO ₂	152
Figura 6.7	Sonda dentro da máscara na região de respiração do soldador: (a) sem arco; (b) com arco	154
Figura 6.8	Sonda colocada ± 30 cm acima da chapa e sobre o arco: (a) sem arco; (b) com arco	154
Figura 6.9	Sonda colocada sobre a chapa (mesmo plano do arco) a ± 30 cm da tocha: (a) sem arco; (b) com arco	154
Figura 6.10	Concentrações de CO e CO ₂ em dois tempos de medição na soldagem protegida com 100%CO ₂ , com a sonda colocada dentro da máscara do soldador	156
Figura 6.11	Concentrações de CO e CO ₂ em dois tempos de medição	

	na soldagem protegida com 100%CO ₂ , com a sonda colocada sobre o arco a ± 30 cm da tocha	156
Figura 6.12	Concentrações de CO e CO ₂ em dois tempos de medição na soldagem protegida com 100%CO ₂ , com a sonda colocada a ± 30 cm de distância da tocha	157
Figura 6.13	Posição da sonda sobre a mesa na célula automatizada	158
Figura 6.14	Concentração de CO ₂ em função do tempo na soldagem protegida com 100%CO ₂	159
Figura 6.15	Concentração de CO em função do tempo na soldagem protegida com 100%CO ₂	159
Figura 6.16	Posições da sonda e da chapa colocadas dentro do tambor	160
Figura 6.17	Concentração de CO ₂ em função do tempo na soldagem protegida com 100%CO ₂ nos testes dentro de tambor aberto	161
Figura 6.18	Concentração de CO em função do tempo na soldagem protegida com 100%CO ₂ nos testes dentro de tambor aberto	162
Figura 6.19	Ilustração do tambor fechado após a soldagem	162
Figura 6.20	Posições da sonda e da chapa colocadas dentro do tambor	163
Figura 6.21	Concentração de CO ₂ em função do tempo na soldagem protegida com 100%CO ₂ nos testes dentro de tambor que foi fechado ao terminar a soldagem	163
Figura 6.22	Concentração de CO em função do tempo na soldagem protegida com 100%CO ₂ nos testes dentro de tambor que foi fechado ao terminar a soldagem	164
Figura 6.23	Concentração de CO ₂ em função do tempo nos testes dentro de tambor sem arco	165
Figura 6.24	Concentração de CO em função do tempo nos testes dentro de tambor sem arco	165
Figura 6.25	Vista da montagem do coletor de fumos adaptado para medição dos gases CO e CO ₂ residuais	166
Figura 6.26	Concentração de CO ₂ em função do tempo na soldagem protegida com 100%CO ₂ no ensaio com o coletor de fumo sem sucção	167
Figura 6.27	Concentração de CO em função do tempo na soldagem protegida com 100%CO ₂ no ensaio com o coletor de fumo sem sucção	168
Figura 7.1	Coletores de fumos sobre a chapa de acrílico para a	

	condição de (17 V)	171
Figura 7.2	Coletores de fumos sobre a chapa de acrílico para a condição de 21 V	171
Figura 7.3	Coletores de fumos sobre a chapa de acrílico para a condição de 25 V	171
Figura 7.4	Vista típica das partículas de fumos de soldagem obtidas a 17 V, depositadas sobre grelhas de cobre, revestidas com Formvar, com um diâmetro de 3 mm (gás de proteção 25%CO ₂ e arame ER70S-6 com diâmetro de 1,2 mm)	173
Figura 7.5	Vista típica das partículas de fumos de soldagem obtidas a 17 V, depositadas sobre grelhas de cobre, revestidas com Formvar, com um diâmetro de 3 mm (gás de proteção 25%CO ₂ e arame ER70S-6 com diâmetro de 1,2 mm)	173
Figura 7.6	Vista típica das partículas de fumos de soldagem obtidas a 17 V, depositadas sobre grelhas de cobre, revestidas com Formvar, com um diâmetro de 3 mm (gás de proteção 25%CO ₂ e arame ER70S-6 com diâmetro de 1,2 mm)	174
Figura 7.7	Vista típica das partículas de fumos de soldagem obtidas a 21 V, depositadas sobre grelhas de cobre, revestidas com Formvar, com um diâmetro de 3 mm, (gás de proteção 25%CO ₂ e arame ER70S-6 com diâmetro de 1,2 mm)	174
Figura 7.8	Vista típica das partículas de fumos de soldagem obtidas a 21 V, depositadas sobre grelhas de cobre, revestidas com Formvar, com um diâmetro de 3 mm, (gás de proteção 25%CO ₂ e arame ER70S-6 com diâmetro de 1,2 mm)	175
Figura 7.9	Vista típica das partículas de fumos de soldagem obtidas a 25 V, depositadas sobre grelhas de cobre, revestidas com Formvar, com um diâmetro de 3 mm, (gás de proteção 25%CO ₂ e arame ER70S-6 com diâmetro de 1,2 mm)	175
Figura 7.10	Vista típica das partículas de fumos de soldagem obtidas a 25 V, depositadas sobre grelhas de cobre, revestidas com Formvar, com um diâmetro de 3 mm, (gás de proteção 25%CO ₂ e arame ER70S-6 com diâmetro de 1,2 mm)	176

Figura 7.11	Vista típica das partículas de fumos de soldagem obtidas a 25 V, depositadas sobre grelhas de cobre, revestidas com Formvar, com um diâmetro de 3 mm, (gás de proteção 25%CO ₂ e arame ER70S-6 com diâmetro de 1,2 mm)	176
Figura 7.12	Espectro de difração de raios-X de fumos obtidos na soldagem com tensão de 17 V (gás de proteção Ar+25%CO ₂ e arame ER70S-6, diâmetro 1,2 mm)	177
Figura 7.13	Espectro de difração de raios-X de fumos obtidos na soldagem com tensão de 21V (gás de proteção Ar+25%CO ₂ e arame ER70S-6, diâmetro 1,2 mm)	178
Figura 7.14	Espectro de difração de raios-X de fumos obtidos na soldagem com tensão de 25V (gás de proteção Ar+25%CO ₂ e arame ER70S-6, diâmetro 1,2 mm)	178

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	O ₂ equivalente para cada mistura de gás de proteção	58
Tabela 2.2	Composição química, técnicas de caracterização de tamanho de partículas e comentários para identificação e análise de fumos de soldagem	64
Tabela 2.3	Síntese dos limites selecionados de exposição ocupacional a fumos de soldagem	70
Tabela 3.1	Valores nominais da taxa de fumos gerada para a calibração do coletor de fumos em função da tensão, segundo a norma AWS F1.2:2006	83
Tabela 3.2	Tempo para a mesa completar uma volta completa em função da posição do potenciômetro	83
Tabela 3.3	Aferição do PC-MULTIGÁS usando como referência o Oxybaby 6 com a mistura Ar+12%CO ₂	86
Tabela 3.4	Aferição do PC-MULTIGÁS usando como referência o Oxybaby 6 com a mistura Ar+15%CO ₂	87
Tabela 3.5	Aferição do PC-MULTIGÁS usando como referência o Oxybaby 6 com a mistura Ar+ 5%O ₂	87
Tabela 3.6	Concentração de CO ₂ medido na sonda em função do aumento da vazão de sucção (medida pela pressão da saída da coifa) utilizando-se uma mistura Ar +15%CO ₂ , a uma vazão de 14l/min	90
Tabela 3.7	Concentração de CO ₂ medido na sonda em função do aumento da vazão de sucção (medida pela pressão da saída da coifa) com gás de proteção Ar + 15%CO ₂ e vazão de 20l/min	90
Tabela 3.8	Concentração de CO ₂ medido na sonda em função do aumento da vazão de sucção (medida pela pressão da saída na coifa especial), utilizando como gás de proteção Ar + 15%CO ₂ e vazão de 14l/min, com sucção de purga entre as medições	93
Tabela 3.9	Concentração de CO ₂ medido na sonda em função do aumento da vazão de sucção (medida pela pressão da saída da coifa especial) utilizando como gás de proteção 100%CO ₂ , vazão de 14l/min, e vazões de sucção de purga em torno de 2.0 inH ₂ O entre cada medição	93

Tabela 3.10	Concentração de CO ₂ medido na sonda em função do aumento da vazão de sucção (medida pela pressão da saída da coifa especial) utilizando como gás de proteção a mistura Ar + 15%CO ₂ , vazão de 8 l/min e vazões de sucção de purga em torno de 2.0 inH ₂ O entre as medições	94
Tabela 3.11	Concentração de CO ₂ medido na sonda em função do aumento da vazão de sucção (medida pela pressão da saída da coifa especial) utilizando como gás de proteção Ar+ 5%CO ₂ , vazão de 14l/min, e vazões de sucção de purga em torno de 2.0 inH ₂ O entre as medições	94
Tabela 3.12	Concentração de CO ₂ medido na sonda em função do aumento da vazão de sucção (medida pela pressão da saída da coifa especial) utilizando como gás de proteção a mistura Ar + 15%CO ₂ , vazão de 20 l/min e vazões de sucção de purga em torno de 2.0 inH ₂ O entre as medições	95
Tabela 3.13	Concentração de CO (monóxido de carbono), CO ₂ (dióxido de carbono) e O ₂ (oxigênio) medido na sonda em função do tempo, com os gases de proteção 100%CO ₂ e 25%CO ₂ , com arco e sem arco e pressão de sucção zero	98
Tabela 3.14	Tempo para a mesa completar uma volta completa em função da posição do potenciômetro (nova calibração)	101
Tabela 4.1	Parâmetros de regulagem e monitoramento dos testes para definição das condições de estabilidade de transferência (corrente média almejada de 150 ± 2A)	112
Tabela 4.2	Índices médio de caracterização da transferência por curto-circuito obtidos durante os ensaios descritos na Tab. 4.1	112
Tabela 4.3	Rendimento de deposição e acabamento do cordão em função da tensão de regulagem	113
Tabela 4.4	Parâmetros de regulagem e monitoramento dos experimentos para coletas de fumos, para as regulagens de 21 V (maior estabilidade) e 17 V e 25 V (menores estabilidades), com regulagem do fator indutivo na posição central zero (corrente média almejada de 150 ± 2 A)	115
Tabela 4.5	Taxa de geração de fumos obtidos durante os ensaios descritos na Tab. 4.4	116
Tabela 4.6	Índices médio de caracterização da transferência por curto-circuito obtidos durante os ensaios descritos na Tab. 4.4	116
Tabela 4.7	Comparação dos resultados da replicagem do experimento com em 21 V em coletas de fumos com regulagem do fator indutivo na posição central zero (corrente média almejada de 150 ± 2 A)	117

Tabela 4.8	Parâmetros de regulagem e monitoramento dos experimentos para coletas de fumos, para as regulagens de 21 V (maior estabilidade) e 17 V e 25 V (menores estabilidades) com regulagem do fator indutivo de +10 (corrente média almejada de $150 \pm 2A$)	121
Tabela 4.9	Taxa de geração de fumos obtidos durante os ensaios descritos na Tab. 4.8	122
Tabela 4.10	Índices médios de caracterização da transferência por curto-circuito obtidos durante os ensaios descritos na Tab. 4.8	122
Tabela 4.11	Parâmetros de regulagem e monitoramento dos experimentos para coletas de fumos, para a regulagem de 21 V (maior estabilidade) com regulagem do fator indutivo de -10 (corrente média almejada de $150 \pm 2A$)	126
Tabela 4.12	Taxa de geração de fumos obtidos durante os ensaios descritos na Tab. 4.11	126
Tabela 4.13	Índices médios de caracterização da transferência por curto-circuito obtidos durante os ensaios descritos na Tab. 4.11	127
Tabela 5.1	Matriz experimental para determinar o efeito da corrente de curto-circuito (I_{cc}) sobre a geração de fumos (valores médios para três repetições – Fonte de energia Lincoln Power Wave)	130
Tabela 5.2	Matriz experimental para determinar o efeito do comprimento do arco sobre a geração de fumos (dois valores repetidos para cada condição – Fonte de energia 2)	136
Tabela 5.3	Matriz experimental para determinar o efeito do tempo de arco aberto (t_{ab}) sobre a geração de fumos (valores para duas repetições para cada condição – fonte de energia CMT)	138
Tabela 6.1	Parâmetros de regulagem e monitoramento dos testes para definição das condições de melhores estabilidades de transferência ($I_m = 175 + 2 A$)	144
Tabela 6.2	Parâmetros de regulagem e monitoramento dos testes para determinação das concentrações de CO_2 e CO , utilizando diferentes gases de proteção e uma vazão de 14 l/min	145
Tabela 6.3	Concentrações de CO , CO_2 e O_2 medido na sonda em função do tempo para se fazer a coleta e diferentes gases de proteção	145

Tabela 6.4	Parâmetros de regulação e monitoramento dos testes para determinação das concentrações de CO ₂ , CO e O ₂ em função da estabilidade de transferência utilizando como gases de proteção 100%CO ₂ a uma vazão de 14 l/min	148
Tabela 6.5	Concentrações de CO, CO ₂ e O ₂ medidas na sonda em função do tempo nas soldagens com proteção de 100%CO ₂ em dois níveis de estabilidade de transferência	148
Tabela 6.6	Parâmetros de regulação e monitoramento dos testes para determinação das concentrações de CO ₂ , CO e O ₂ em função da estabilidade de transferência utilizando como gás de proteção 100%CO ₂ a uma vazão de 14 l/min	150
Tabela 6.7	Concentrações de CO, CO ₂ e O ₂ medidas na sonda em função do tempo, com o gás de proteção 100%CO ₂ , com arco mais curto (22 V), médio (24 V) e mais longo (26 V)	151
Tabela 6.8	Aferição do PC-MULTIGÁS usando como referência o Oxybaby 6 com a mistura Ar+15%CO ₂	153
Tabela 6.9	Parâmetros de regulação e monitoramento dos testes para determinação das concentrações de CO ₂ e CO em função do tempo, utilizando o gás de proteção 100%CO ₂ a uma vazão de 14l/min	155
Tabela 6.10	Concentração de CO (monóxido de carbono), CO ₂ (dióxido de carbono) e O ₂ (oxigênio) medido na sonda em função do tempo, com o gás de proteção 100%CO ₂	155
Tabela 7.1	Parâmetros de regulação e monitoramento dos testes para definição das condições de regularidade de transferência (a corrente média almejada de 150 ± 2A)	170

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\varnothing g$	diâmetro de gotas (mm)
AA	afastado do sensor em relação ao arco (cm)
ACGIH	Conferência Governamental de Higienistas Industriais (USA)
AWS	American Welding Society
Ca	potencial cancerígeno ocupacional (NIOSH)
CMT	mode operacional de um equipamento comercial (transferência de metal frio)
DBCP	distância bico de contato-peça
DM	dentro da máscara
Exp	experimentos
F_{cc}	frequência de curtos circuitos (Hz)
I_b	corrente de base (A)
I_{cc}	média das correntes de curto-circuito (A)
$I_{média}$	corrente média (A)
I_{nd}	indutância
I_p	corrente de pulso (A)
I_{reg}	corrente de regulagem (A)
I_{RMS}	corrente eficaz (A)
IV_{cc}	índice de regularidade de transferência
LFC	menor concentração possível
M_f	massa final do filtro (g)
M_i	massa inicial do filtro (g)
MIG/MAG	Metal Inert Gas/ Metal Active Gas
NIOSH	Instituto Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional (USA)
OSHA	Segurança Ocupacional e Administração de Saúde (USA)
PEL	limite de exposição permissível
PS	posição da sonda
REL	limites de exposição
SA	posição do sensor sobre o arco
SYN	sinérgico

T	tempo de coleta de fumos (s)
t_{ab}	tempo médio dos arcos aberto (s)
t_{ab}/t_{cc}	tempo médio dos arcos abertos/ tempo médio dos curtos circuitos
σ_{tcc}	desvio padrão dos tempos de curto-circuito (s)
σ_{tab}	desvio padrão dos tempos de arco aberto (s)
σ_{icc}	desvio padrão médio da corrente média de curto-circuito
t_b	tempo de base (mm)
t_{cc}	tempo médio dos curtos circuitos (s)
TGF	taxa de geração de fumos (g/min)
TIG	Gas tungsten arc welding
TLV	valor teto do limite de exposição
t_p	tempo de pulso (ms)
Trim	ajuste fino
TWA	média ponderada pelo tempo
U	tensão de regulação (V)
$U_{média}$	tensão média (V)
V_{alim}	velocidade de alimentação (m/min)
Vs	velocidade de soldagem (cm/min)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	29
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1	Geração de fumos no processo MIG/MAG	33
2.2	Mecanismos de formação de fumos	35
2.3	Métodos de medição de geração de fumos	39
2.3.1	<i>Medição de geração de fumos em câmara fechada</i>	39
2.3.2	<i>Medição de geração de fumos ao ar livre</i>	44
2.4	Formas de calcular e/ou expressar a quantificação de geração de fumos	46
2.5	Efeitos das variáveis do processo MIG/MAG na geração de fumos	48
2.5.1	<i>Efeito do modo de transferência metálica</i>	49
2.5.2	<i>Efeito da corrente</i>	51
2.5.3	<i>Efeito da tensão (comprimento do arco).....</i>	54
2.5.4	<i>Efeito do gás de proteção</i>	56
2.5.5	<i>Efeito da dimensão da gota na geração de fumos</i>	59
2.5.6	<i>Efeitos do material de adição</i>	60
2.6	Composição e tamanho de partículas de fumos	61
2.7	Efeito da estabilidade de transferência metálica sobre geração de respingos em soldagem MIG/MAG por curto-circuito	66
2.8	Formas de redução da geração de fumos	68
2.9	Concentração permissível de fumos (normas)	69
2.10	Efeitos nocivos dos fumos na soldagem	72
2.11	Gerações de gases nos processos de soldagens	73
2.11.1	<i>Introdução</i>	73
2.11.2	<i>Mecanismos de geração de gases</i>	75
2.11.3	<i>Métodos de medição de gases</i>	77
2.11.4	<i>Efeitos nocivos de gases na soldagem</i>	78

3	EQUIPAMENTOS, DISPOSITIVOS E ACESSÓRIOS	79
3.1	Equipamentos de soldagem	79
3.2	Tocha de soldagem	80
3.3	Equipamentos para Coleta de fumos	80
3.4	Equipamentos para determinação da composição dos gases .	84
3.5	Dispositivo para coleta de gases	88
3.5.1	<i>Avaliação de desempenho da coifa coletora de fumos do laprosolda para medição da emissão de gás pelos processos de soldagem</i>	88
3.5.2	<i>Projeto e avaliação de uma coifa especial para coleta de gases de soldagem</i>	91
3.5.3	<i>Modificação da coifa especial com a finalidade de se obter maior sensibilidade das medidas de CO₂ (dióxido de carbono) e CO (monóxido de carbono)</i>	95
3.6	Dispositivo para coleta de fumos para medição de composição química, morfologia e tamanho de partículas de fumos	102
3.7	Dispositivo de condução da tocha para parametrização	104
3.8	Sistema de aquisição de dados	104
4	INFLUÊNCIA DA ESTABILIDADE DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA SOBRE A GERAÇÃO DE FUMOS NO PROCESSO MIG/MAG	106
4.1	Metodologia para o estudo da influência da estabilidade da transferência na geração de fumos	106
4.1.1	<i>Critério laprosolda de estabilidade de transferência</i>	107
4.1.2	<i>Medição do rendimento de deposição (η)</i>	109
4.2	Parametrização das condições para ensaio de geração de fumos	109
4.3	Determinação das condições de estabilidades	110
4.4	Influência das condições de maior (21 V) e menores estabilidades (17 e 25 V) de transferência por curto-circuito na geração de fumos no processo MIG/MAG convencional	115
4.4.1	<i>Medição de geração de fumos (com fator indutivo regulado na</i>	

	<i>posição zero)</i>	115
4.4.2	<i>Medição de geração de fumos (com o fator indutivo regulado na posição +10)</i>	121
4.4.3	<i>Medição de geração de fumos (com o fator indutivo regulado na posição -10)</i>	126
4.4.4	<i>Discussão geral do efeito da indutância sobre a geração de fumos</i>	127
5	DETERMINAÇÃO DOS FATORES GOVERNANTES NA GERAÇÃO DE FUMOS EM SOLDAGEM CURTO-CIRCUITO	128
5.1	Estudo da influência da corrente de curto-circuito sobre a geração de fumos	128
5.1.1	<i>Metodologia e planejamento experimental</i>	128
5.2	Estudo da influência do comprimento do arco sobre a geração de fumos	133
5.3	Estudo da influência do tempo de arco aberto sobre a geração de fumos	137
5.4	Influência do diâmetro de gotas antes do destacamento (ϕ_{gota}) sobre a geração de fumos	140
5.5	Considerações finais	141
6	INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO GÁS DE PROTEÇÃO E DA REGULARIDADE DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA SOBRE A EMISSÃO DE CO e CO₂ EM SOLDAGEM MIG/MAG POR CURTO-CIRCUITO.....	142
6.1	Metodologia básica	142
6.2	Determinação do efeito da composição do gás de proteção sobre a emissão de CO e CO₂ sob as mesmas condições de soldagem	143
6.3	Determinação do efeito da regularidade de transferência metálica sobre a emissão de CO e CO₂ sob as mesmas condições de soldagem	147

6.4	Determinações da concentração dos gases CO e CO ₂ em diferentes regiões de exposição para o soldador em soldagem semi-automática e ambiente não confinado	153
6.5	Determinações da concentração dos gases CO e CO ₂ em diferentes regiões de exposição para o operador em soldagem em ambiente confinado	157
6.5.1	<i>Célula de soldagem automatizada</i>	157
6.5.2	<i>Simulação do local de trabalho confinado</i>	160
6.6	Determinações da concentração dos gases CO e CO ₂ em diferentes regiões de exposição para o operador em soldagem no coletor de fumos sem vazão de sucção	166
7	INFLUÊNCIA DA EMISSÃO DE RESPINGOS SOBRE A COMPOSIÇÃO E TAMANHO DE PARTÍCULAS DE FUMOS NO PROCESSO MIG/MAG	169
7.1	Metodologia	169
7.2	Resultados	172
7.3	Discussão geral	179
8	CONCLUSÕES	180
9	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	182
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	184
	ANEXO A - Relatório NAPRO	190

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Vários agentes perigosos, na forma de fumos, gases, vapores, calor, ruído e radiações, são produzidos durante operações de soldagem. Os agentes de maior preocupação em higiene industrial são os fumos e, especificamente, aqueles contendo cromo hexavalente (Cr+6), o qual é um carcinógeno humano (AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS, 2002; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 1987). Mas deve-se atentar para os gases, devido a seus efeitos tóxicos e/ou asfixiantes. Problemas relacionados com emissão de fumos e gases tóxicos nos processos de soldagem já são de muito tempo conhecidos.

Cada processo de soldagem tem suas particularidades no que concerne à emissão de poluentes, dependendo do tipo de consumível utilizado, da energia de soldagem aplicada, das composições do material de base e revestimentos, enfim, de uma série de fatores que influenciam quantitativa e qualitativamente as emissões de fumos e gases dos processos. Segundo Castner (1995) é possível minimizar a quantidade de fumos gerados, aos quais os soldadores estão expostos, avaliando-se uma série de fatores operacionais, tais como seleção adequada de parâmetros de soldagem, eficiência do processo de soldagem de acordo com sua aplicação, utilização da ventilação mais adequada para o ambiente de soldagem, utilização do material de adição adequado e os gases de proteção.

Normalmente estes poluentes atingem as maiores concentrações na zona de respiração do soldador, ou seja, o soldador, por estar muito próximo ao ponto de emissão, fica sujeito a altas concentrações de fumos metálicos e gases tóxicos na sua zona de respiração, o que pode causar problemas de saúde, podendo levar a óbito (REIS, 2003).

Assim, o estudo e a análise da geração de fumos possuem um papel de grande importância no que se refere à soldagem, uma vez que normas rígidas de Segurança do Trabalho determinam o tempo e o limite de exposição do soldador aos fumos. Desta forma, minimizar a taxa de geração de fumos e dos riscos à saúde do trabalhador é sempre uma preocupação, uma vez que, conforme Antonini et al. (1998) elementos químicos presentes

nos fumos são responsáveis pelo alto índice de doenças respiratórias ocupacionais que afetam o pulmão entre os soldadores.

Entretanto, a procura por otimização dos processos de soldagem no ambiente industrial tem visado, sobretudo, elevar os índices de produtividade, aliados à redução de custos. E hoje encontram-se processos de alta produtividade (alta produção a baixo custo) com garantia de qualidade, tais como o processo MIG/MAG, que têm dominado soberanamente o mundo da união dos metais por soldagem (CASTNER, 1995). Por exemplo, segundo Garcia (2010), o processo Eletrodo Tubular tem se despontado como uma alternativa para suprir as deficiências do processo MIG/MAG, garantindo ou até superando a mesma eficiência no que tange a produtividade. Entretanto, pouco se tem demonstrado da relação entre esta produtividade obtida com a geração de fumos destes processos/técnicas. Porém, foi demonstrado que o eletrodo tubular produz maiores taxas de geração de fumos com o aumento da corrente do que o processo MIG/MAG, fato provavelmente devido a um aumento na taxa de fusão, onde há uma maior evaporação de material fundido oriundo da ponta do eletrodo.

De acordo com Sferlazza e Becket (1991), um outro inconveniente de elevadas taxas de geração de fumos por processos de soldagem é que na ausência de uma boa ventilação a contaminação geral do ambiente pode ocorrer rapidamente, principalmente em espaços confinados. Roesler e Weitowitz (1996) descreveram um exemplo de um soldador que desenvolveu fibrose intersticial do pulmão, sendo atribuída ao óxido de ferro acumulado nos pulmões. O homem tinha trabalhado por 27 anos em espaços confinados com ventilação inadequada e nenhuma proteção respiratória. Esses autores acreditam que embora seja útil caracterizar a concentração das partículas no ar durante a soldagem, a dose real absorvida pelos pulmões é mais importante para se determinar os efeitos causados pelas emanações de soldagem sobre a saúde.

Um terceiro aspecto a ser considerado é a dimensão dos particulados dos fumos. De acordo com Sampaio (1998), as partículas dos fumos de soldagem quando da sua geração, normalmente são menores do que 1 μm em diâmetro, mas crescem em tamanho com o tempo devido à aglomeração. As partículas de 1 a 7 μm de diâmetro constituem o maior perigo à saúde pela capacidade que elas têm de penetrar profundamente nos pulmões e por não serem eficientemente capturadas pelos cílios presentes no trato respiratório. As partículas dos fumos de soldagem que são visíveis são geralmente as mais pesadas, o que faz com que se precipitem rapidamente em forma de pós em superfícies adjacentes. As partículas na zona de respiração do soldador têm geralmente em torno de 2 μm ou menos, podendo permanecer no ar por horas se não forem removidas pela ventilação, oferecendo risco mesmo depois da realização da operação de soldagem.

Mas não é só com fumos que se deve preocupar numa análise sobre aspectos de saúde ocupacional em indústrias que se utilizam da soldagem como meio de produção. Segundo a norma da Occupational Safety & Health Administration (OSHA, 2002), quando dióxido de carbono (CO_2) é usado como gás de proteção na soldagem a arco, monóxido de carbono (CO) pode-se formar, sendo totalmente prejudicial ao ser humano, podendo matá-lo (o monóxido de carbono pode ser formado também na soldagem oxiacetilênica). Ainda de acordo com a norma OSHA (2002), no arco elétrico de soldagem podem ser formados o gás ozônio e óxidos de nitrogênio, sendo que na soldagem TIG e MIG a concentração de ozônio é máxima, sobretudo quando o alumínio é soldado. Também de acordo com essa mesma norma OSHA (2002), a soldagem produz fumos metálicos e gases que podem causar doenças no soldador.

Entretanto, apesar da importância do assunto no tocante à higiene e segurança do trabalho, e até mesmo quanto ao meio ambiente, a literatura sobre o assunto se desenvolve através do estudo de parâmetros isolados de soldagem sobre a geração de fumos e gases. Porém, na prática os parâmetros de soldagem são geralmente inter-relacionados, levando a certas condições operacionais. Uma destas condições, ao se tratar da soldagem MIG/MAG por curto-circuito seria a regularidade de transferência do metal fundido. Souza et al. (2011) afirmam que a melhor condição de soldagem por curto-circuito no processo MIG/MAG não é aquela que necessariamente vai resultar em uma menor oscilação dos sinais elétricos, mas sim aquela que proporciona uma maior regularidade de transferência e com a transferência dominada pela tensão superficial. Esse comportamento relaciona-se com a estabilidade da transferência. Esses autores observaram que quanto maior a estabilidade de transferência, maior a penetração, melhor o acabamento do cordão e menor a quantidade de respingos.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo principal analisar e avaliar o efeito da estabilidade de transferência metálica por curto-circuito no processo de soldagem MIG/MAG sobre os níveis de emissão de fumos metálicos e gases.

Como objetivo específico tem-se:

- a) avaliar a adequabilidade do Critério Laprosolda de Estabilidade de Transferência por curto-circuito para determinar a regularidade de transferência;
- b) avaliar a hipótese de que quanto maior a estabilidade de transferência metálica por curto-circuito no processo MIG/MAG, menos respingos e, consequentemente, menos geração de fumos;

- c) correlacionar a estabilidade de transferência, consequentemente o grau de emissão de respingos, com a composição e tamanho das partículas de fumos geradas em soldagem MIG/MAG com transferência por curto-circuito;
- d) identificar os fatores governantes na geração de fumos pelo processo MIG/MAG com transferência por curto-circuito e desenvolver e aplicar uma metodologia para se tentar individualizar o efeito de cada um destes fatores;
- e) verificar e quantificar a geração de gases tóxicos/asfixiantes, como monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂), pelo processo MIG/MAG por curto-circuito e analisar o efeito da estabilidade de transferência sobre a emissão de gases e a potencialidade desta emissão como agentes nocivos à saúde do soldador, sobretudo em locais confinados.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Geração de fumos no processo MIG/MAG

Jenkins e Eagar (2005) citam que os fumos são constituídos por diversos metais (alguns dos quais tomam a forma de óxidos), que em excesso são prejudiciais à saúde. Esses metais são alumínio, berílio, cádmio, cromo, cobre, ferro, magnésio, manganês, níquel, chumbo, zinco. Ainda de acordo com os autores, o estudo dos fumos resultantes da soldagem é crucial para o futuro da soldagem, pois além de melhorar as condições de trabalho dos soldadores, poderá ainda reduzir os custos associados à soldagem. Porém, segundo a revisão de Rosado (2008), a formação de fumos em processos de soldagem só recentemente começou a ganhar maior relevância, devido aos diversos processos judiciais que ocorreram nos Estados Unidos sobre doenças que podem estar relacionadas a uma longa exposição a fumos e gases de soldagem por parte do soldador, como é o caso do efeito do manganês.

Segundo a revisão de Carpenter, Monaghan e Norrish (2008), os fatores críticos que controlam a taxa de geração de fumos na soldagem são a corrente, a tensão, a temperatura do arco, a área de superfície da ponta do eletrodo e o tamanho das gotas expostas à zona do arco quente. Por outro lado, Quimby e Ulrich (1999), em seus estudos analisando a taxa de geração de fumos metálicos no processo MIG/MAG, relataram que a análise dessa taxa é mais complexa e influenciada por uma série de variáveis, dificultando a realização comparativa entre os resultados disponíveis, inclusive para propor modelos teóricos que expliquem de forma exata o aumento da taxa de geração de fumos metálicos. Essas observações são compartilhadas por Pires, Miranda e Gomes (2006), que acham, no entanto, importante o estudo dos fatores que afetam a geração de fumos. Quimby e Ulrich (1999) afirmam que as variáveis que influenciam diretamente a taxa de geração de fumos são, em geral, a corrente, a tensão, o tipo de gás de proteção e o modo de transferência metálica, diferenciando um pouco dos dados de Carpenter, Monaghan e Norrish (2008) e de Grudmann (2005) citados por Sterjovski et al. (2006), que relata que os principais parâmetros variáveis que afetam a geração de fumos são temperatura na vizinhança do

arco elétrico, a composição do gás de proteção, velocidade de soldagem e a corrente de soldagem. Gray et al. (1992) citados por Garcia (2010) observaram que a taxa de geração de fumos é praticamente independente da corrente se a distância bico contato peça for mantida constante.

Garcia (2010) cita que a taxa de geração de fumos é fortemente influenciada pelas características da transferência metálica (volume da poça de fusão, frequência de transferência, tempo de arco aberto, etc.), podendo até superar o efeito da corrente e/ou gás de proteção (efeito da taxa de fusão do arame), como acontece com o processo MIG/MAG. Ainda segundo a autora, tanto um aumento da corrente (aumento da taxa de fusão do arame), como o uso do gás de proteção mais rico em CO_2 favorecem uma maior geração de fumos, a menos que outro efeito concorrente o superem.

De acordo com Castner (1995), quando a corrente de soldagem aumenta, é frequente o caso em que a tensão também precisará aumentar. Isto é devido estar relacionado com um maior comprimento do arco. Um maior comprimento do arco força as gotas fundidas a serem expostas ao arco por um maior período de tempo, aumentando a vaporização, portanto a quantidade de fumos.

Segundo Pires, Miranda e Gomes (2006), a intensidade dos perigos criados pelos fumos de soldagem depende da composição e da concentração dos fumos e do tempo de exposição e que a redução das emissões de fumos na fonte é de extrema importância, uma vez que a eficácia do controle de fumos emitidos durante a soldagem, por meio de extração geral e local nem sempre é adequada. Neste contexto, Dennis et al. (2001) citam que a geração de fumos no processo MIG/MAG é derivada de três principais fontes, isto é, gotas fundidas na ponta do eletrodo e viajando através do arco (no modo de transferência por curto-circuito, a ponta do arame derrete, mas as gotas livres não são formadas), poça de fusão e respingos. Ainda de acordo com citações desses autores, o metal de base tem influência mínima sobre a geração de fumos, mas encontraram em outro trabalho que de 6% a 14% dos fumos são originados dos respingos. Já Gray (1980) citado por Dennis e Mortazavi (1997) encontrou que 35% dos fumos são originados dos respingos.

De acordo com a revisão de Ascenço et al. (2005), os fumos de soldagem contém substâncias tóxicas e sua composição depende de múltiplos fatores, tais como a natureza do processo de soldagem e as composições químicas de ambos os consumíveis e materiais de base. Os fumos de soldagem consistem, normalmente, de determinadas quantidades de pequenas partículas que são mantidas suspensas na atmosfera (local de trabalho) durante algum tempo, de acordo com o seu tamanho e peso específico. Ainda segundo os autores, a quantidade de fumos e de gases tóxicos que são envolvidos durante o processo de

soldagem aumentam significativamente, de modo que os valores dos limites de exposição valor teto (TLVs) da norma ACGIH para soldadores expostos podem ser ultrapassados.

Portanto, a concentração de fumos na atmosfera local de trabalho deve ser controlada usando exaustores eficazes e sistemas de ventilação. Estes sistemas devem ser adequadamente projetados, tendo em mente as concentrações de fumos que variam em cada situação de soldagem. De acordo com a Sociedade Japonesa de Engenharia de Soldagem (1995) citada por Saito et al. (2000), um sistema de exaustão local não tem sido geralmente utilizado no local de trabalho de soldagem, porque uma alta velocidade do vento na captura dos fumos de soldagem muitas vezes deteriora a qualidade dos materiais soldados. No entanto, foi relatado que uma baixa velocidade do vento em uma exaustão local permitiria a remoção eficaz dos fumos de soldagem sem deterioração dos materiais. Portanto, o uso de sistemas de exaustores locais é considerado eficaz na proteção dos soldadores expostos aos fumos de soldagem.

Ainda segundo a revisão de Saito et al. (2000), o maior teor de manganês (Mn) nos fumos de soldagem é presumivelmente causada pelo baixo ponto de ebulição do Mn (2151° C), em comparação com os pontos de ebulição do ferro (2735°C) e do cromo (2842° C). Os autores também relataram que uma exposição dos soldadores por um longo período ao Mn pode causar a doença denominada de manganismo crônica, conhecida também como syndrome de parkinson.

A norma NIOSH (2002) cita que, além de outros fatores físicos nocivos perigosos, tais como ruído, radiações ultravioleta e infravermelha, também substâncias químicas reativas são gerados durante a soldagem. Estas incluem substâncias gasosas, tais como O₃ (Ozônio), monóxido de carbono (CO), óxidos nítricos e partículas, tais como ferro (Fe), cromo (Cr), níquel (Ni), manganês (Mn), cobre (Cu) e seus óxidos.

2.2 Mecanismos de formação de fumos

Kodas e Hampeden-Smith (1999) citados por Mendez, Jenkins e Eagar (2000) citam que a formação de partículas de fumos pode se dar por duas origens:

- a) A partir de sólidos e líquidos por meios mecânicos, por exemplo, esmerilhamento ou atomização (as partículas formadas mecanicamente são raramente menores do que 1 µm de diâmetro e quando são menores elas estão agregadas à partículas de 1 µm ou maior);
- b) A partir da condensação de vapor (as partículas criadas por condensação têm de 0,01 a 0,4 µm de diâmetro). Desta forma, assumindo os tamanhos das partículas de fumos em soldagem, para Mendez, Jenkins e Eagar (2000) os fumos de soldagem são formados apenas por condensação de vapor. Portanto, a taxa de formação de fumos no processo

MIG/MAG deve ser diretamente relacionada com a taxa de vaporização da gota na soldagem. Ainda segundo esses autores, a geração de fumos está relacionada com a evaporação do líquido a partir da extremidade do eletrodo. Esta evaporação depende da temperatura da superfície e da geometria do líquido, a qual pode ser dividida em três regimes:

Regime I: A mancha anódica cobre apenas uma fração da superfície da gota. Neste regime, as forças eletromagnéticas agitam o líquido no interior da gota criando duas camadas térmicas limites (CTL) no líquido, uma na região da mancha e outra na interface líquido-sólido com o arame. Através do volume da gota, o calor é transportado por convecção (este regime corresponde ao modo de transferência globular de grandes diâmetros);

Regime II: A mancha anódica cobre também apenas uma fração da superfície da gota, mas o calor é transportado através do volume da gota por condução (este regime corresponde aos modos de transferência metálica globular de pequeno diâmetro ou spray);

Regime III: A mancha anódica cobre completamente a gota e atinge o lado do arame. Neste caso, o arame derrete formando uma fina camada de metal líquido através do qual o calor é transportado por condução. O líquido derretido se estende a partir da ponta do eletrodo formando um alongamento. As gotas são destacadas a partir da extremidade do alongamento (este regime corresponde a transferência metálica spray com alongamento).

Ainda segundo Mendez, Jenkins e Eagar (2000), o aquecimento da gota se dá essencialmente pela condensação dos elétrons (região anódica), desprezando o efeito joule e a dissipação viscosa. Esse calor é perdido por condução para dentro do arame, assim como por vaporização e parte dele fica acumulado para fundir e aquecer o metal líquido. Assim, quanto maior a parcela de calor para a evaporação, maior a geração de fumos. Esses autores demonstraram matematicamente que quando o diâmetro da gota vai ficando menor ao passar do regime I para o regime II e depois para o regime III, há pouca resistência do fluxo de calor para o arame, conseqüentemente maior condução para o arame e menos geração de fumos. De forma resumida, estes autores concluem que o regime III gera a menor quantidade de fumos para uma dada corrente. Neste regime pode ser facilmente obtido usando diâmetros de arames menores. Uma diminuição da extensão do eletrodo aumenta o calor através do arame, reduzindo também a geração de fumos. Tal diminuição também pode ser conseguida pela redução da velocidade de alimentação do arame. Ainda segundo os autores, pulsando a corrente antes ou depois da gota atingir o regime I, pode reduzir a geração de fumos.

Bosworth e Deam (2000), em seus estudos destinados a compreensão dos mecanismos importantes do controle da taxa de geração de fumos no processo MIG/MAG,

relatarem também, em concordância com Mendez, Jenkins e Eagar (2000), que a taxa de geração de fumos aumenta com o aumento do tamanho de gotas. Porém, Dennis et al. (2001) afirmam que os fumos de soldagem podem ser formados por outros mecanismos que não a evaporação, como, por exemplo, através da ruptura das bolhas de CO (monóxido de carbono) formadas nas gotas.

Jenkins (1999), em seus estudos sobre formação de fumos em soldagem com proteção gasosa no passado, chegou à conclusão de que os fumos resultantes da soldagem são formados principalmente a partir de gotas de soldagem. O autor chegou a esta conclusão comparando os diversos processos de soldagem existentes. Por exemplo, comparando dois processos, TIG e MIG/MAG, verificou-se que o processo MIG/MAG forma uma maior quantidade de fumos (como o processo MIG/MAG forma gotas de material em fusão como modo de transferência e o TIG não, o principal fator responsável da formação de fumos é a formação de gotas). Ainda segundo o autor, um outro fator responsável pela produção de fumos são os respingos que resultam da instabilidade do arco elétrico. Ainda segundo o autor, os fumos são então formados por dois mecanismos, a partir da evaporação na gota do material em fusão e dos respingos incandescentes que resultam do processo de soldagem (Fig. 2.1). Mas como foi referido anteriormente, o principal fator que domina a formação de fumos no processo MIG/MAG é a evaporação que se dá a partir da gota (JENKINS; EAGAR, 2005).

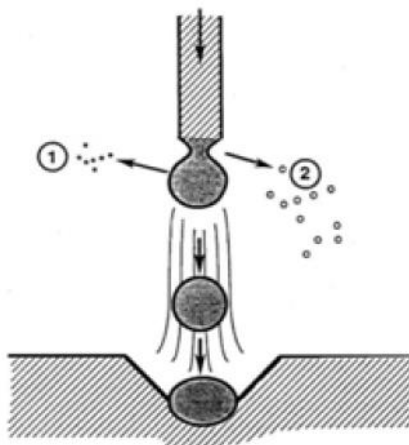


Figura 2.1 - Fatores responsáveis pela formação de fumos: 1) evaporação da ponta do eletrodo ou gota; 2) respingos incandescentes e também alguma evaporação resultante da explosão do arame (JENKINS, 1999)

Jenkins (1999) explica que existe também formação de fumos ao nível do cordão, especificamente na poça de fusão e no cordão acabado de soldar, mas a quantidade de fumos produzidos não é significativa. Já segundo a revisão de Shimichi e Manabu (2011), em soldagem a arco, a alta temperatura do vapor metálico é gerada a partir da ponta do

aramé fundido, da gota e da poça de fusão. Ainda segundo os autores, este vapor metálico é resfriado rapidamente durante a difusão na vizinhança do arco e em seguida as partículas com tamanhos de 1 nm a 100 nm são formadas através da nucleação a partir do vapor metálico. Além disso, uma parte das referidas partículas se condensam e produzem partículas secundárias com tamanhos de no máximo 1nm. Ainda de acordo com os autores, as partículas formam fumaça que sobe a partir do arco e esse fenômeno é chamado de fumos em soldagem.

Shinichi e Manabu (2011) citam que, até agora, a maioria dos trabalhos mostram a composição química e a taxa de geração de fumos, em comparação com as condições de soldagem para o processo MIG/MAG por causa da elevada utilização nas indústrias de diferente fabricação em todo mundo. Por exemplo, Kobayashi et al. (1980) citados por Shinichi e Manabu (2011) observaram uma situação de geração de fumos, utilizando uma câmara de vídeo de alta velocidade. Os autores observaram através da câmara de vídeo que qualitativamente o vapor metálico que tenha sido evaporado principalmente a partir da gota foi liberado a partir da parte inferior da coluna do arco e gerou os devidos fumos para o resfriamento rápido com condensação e oxidação. Os autores, também observaram que a quantidade de vapor metálico originado a partir da gota era maior do que a partir da poça de fusão.

Shimichi e Manabu (2011) explicaram que, sobre o esclarecimento dos mecanismos de formação de fumos na soldagem, é necessário discutir os fenômenos quantitativamente com base nas interações entre o eletrodo, o arco e a poça de fusão. Infelizmente, os fenômenos no processo MIG/MAG não são completamente compreendidos, devidos aos problemas complexos representados por uma transferência metálica. Ainda segundo os autores, a abordagem de pesquisa teórica é avançada no campo da produção industrial de nano-partículas.

Muitos pesquisadores fizeram simulações numéricas para esclarecer o mecanismo de formação de fumos. Watanabe et al. (2007) citados por Shimichi e Manabu (2011) investigaram uma série de processos de evaporação de pó por plasma para a nucleação e condensação na região de arrefecimento para a produção de nano-partículas no Plasma Indutivamente Acoplado (PIA). Segundo os autores, as alterações em forma de partículas secundárias não foram consideradas porque todas as partículas que se enquadram neste modelo têm forma esférica. Shmid et al. (2006) citados por Shimichi e Manabu (2011), em seus estudos sobre mecanismos de formação de fumos, propuseram um modelo considerando mudanças na forma de partículas secundárias em processo de coagulação, mas este modelo não foi acoplado com os processos de nucleação e condensação. Eles demonstraram matematicamente através de simulações numéricas que a maior parte dos

fumos fora produzido na vizinhança do arco, proveniente do vapor metálico evaporado, principalmente a partir da gota no processo MIG/MAG com proteção gasosa de argônio. Este tipo de fumo era constituído por partículas com tamanhos de várias dezenas de nanômetros (nm). Ainda segundo os autores, se o vapor metálico nas proximidades das gotas foi difundido diretamente para as imediações do arco e não ficando sobre o fluxo do plasma, o tamanho das partículas atinge dimensões de várias centenas de nanômetros no processo MIG/MAG. Esta tendência concordou com as formas de fumos obtidos no processo MIG/MAG com o gás ativo CO₂ obtidas a partir de observações experimentais.

2.3 Métodos de medição de geração de fumos

2.3.1 Medição de geração de fumos em câmara fechada

Um das formas mais populares de se determinar a geração de fumos é através da norma da American Welding Society F1.2 (AWS, 2006). O método padronizado por essa norma consiste em coletar os fumos gerados na soldagem durante a realização de cordões de solda sob condições pré-estabelecidas. A quantificação dos fumos é realizada por meio de filtros de fibra de vidro, fabricados de acordo com padrões estabelecidos pela norma da American Society for Testing and Materials, ASTM C800 (ASTM, 2008), em um coletor padrão, como ilustra a Fig. 2.2. A quantidade de fumos gerada em cada teste é obtida através da razão entre a diferença de massa do filtro, antes e após a realização do teste, observando-se o tempo de execução do teste (tempo de arco aberto). Porém, pelas características, este método não determina se os fumos gerados vão para área de respiração do soldador ou não, ou seja, determina apenas o potencial de gerar fumos de um processo, parâmetros e/ou consumíveis.

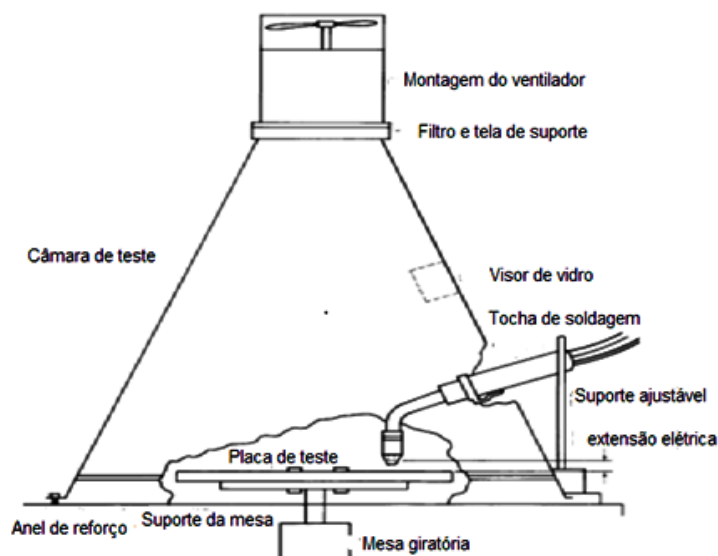


Figura 2.2 - Vista em corte da câmara para determinação de geração de fumos em soldagem, de acordo com a norma AWS F1.2 (AWS, 2006)

Rosado, Pires e Quintino (2009), em seus estudos sobre a coleta de fumos e gases no processo MIG/MAG, utilizaram os procedimentos padrões descritos na norma (EN 15011-2, 2003 citados por ROSADO; PIRES; QUINTINO, 2009) sob condições pré-estabelecidas. Para isso, um coletor de fumos foi construído, como ilustra a Fig. 2.3, bastante similar ao da norma AWS F1. 2 (AWS, 2006) acima descrito. A quantificação dos fumos foi realizada por meios de filtros de fibra de vidro de 240 mm de diâmetro, pesados antes e após cada teste. Para a obtenção da massa total de fumos produzidos, a massa foi então usada juntamente com o tempo de arco aberto (t_{ab}) para calcular a taxa de geração de fumos (TGF). Nestes experimentos o tempo de arco aberto (t_{ab}) foi de 60 segundos. Os filtros de fibra de vidro antes de serem utilizados, foram aquecidos durante uma hora a 150°C, para uma completa eliminação da umidade nos filtros. Para a obtenção de resultados mais confiáveis e consistentes, cada teste foi realizado três vezes, e os resultados apresentados sob a média das três medições.

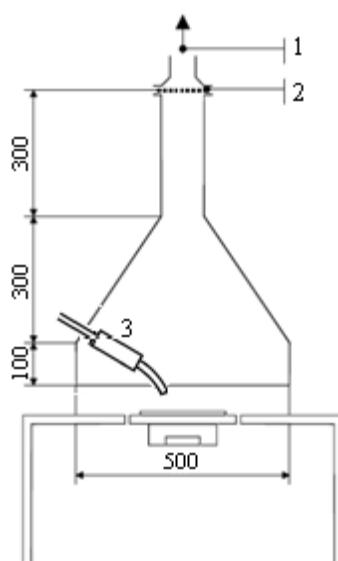


Figura 2.3 - Coletor de fumos usado nos procedimentos experimentais, onde: 1 = Sonda de fluxo de ar; 2 = Filtro de fibra de vidro; 3 = Tocha de soldagem (EN ISO 15011-2, 2003 apud ROSADO; PIRES; QUINTINO, 2009)

Ascenço et al. (2005) utilizaram um coletor um pouco modificado em relação aos já apresentados, como ilustra a Fig. 2.4, já que visavam não somente a quantificação de fumos, mas também a determinação da composição do fumo. A coleta da amostra a partir da atmosfera de soldagem é feita através de uma bomba de vácuo, a uma taxa de fluxo de 4 cm³/min. A poeira é retida num filtro de tela feita de celulose de 0,3 mm de tamanho de poros. Ainda de acordo com os autores, o procedimento analítico para determinação de poeiras totais segue o método NIOSH 0500 (NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH – NIOSH, 1994) e os metais pesados são determinados de acordo com o método NIOSH 7300 (NIOSH, 2003). Após pesagem, no laboratório, a tela do filtro é digerida no laboratório e finalmente os fumos analisados por meio Plasma Indutivamente Acoplado/ Absorção atômica (PIA/AA), diferenciando do método padronizado pela norma AWS F1.2 (AWS, 2006), que utiliza a coleta das amostras de fumos gerados na soldagem por meio de filtros de fibra de vidro, fabricados de acordo com padrões estabelecidos pela norma ASTM C800 (ASTM, 2008).

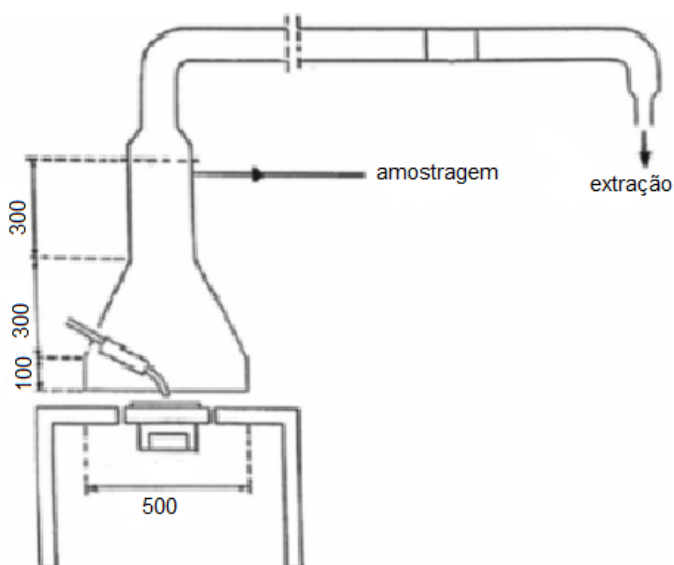


Figura 2.4 – Arranjo do coletor de fumos para ambiente de trabalho perto da superfície de trabalho (ASCENÇO et al., 2005)

Sterjovski e outros, em seus estudos sobre coletas de fumos no processo MIG/MAG, usam a Norma Australiana (AS 2985 2004 apud STERJOVSKI et al., 2006), a qual usa um coletor similar aos até então apresentados. A diferença para as abordagens anteriores é que as partículas são coletadas através de um tubo coletor de amostragem separado, com um fluxo de 1,8 L/min, inserido dentro da coifa (Fig. 2.5). De acordo com os autores, o tubo de amostragem de fumos recolhe as partículas de fumos de soldagem por gravimetria e, como resultado, as partículas com diâmetro aproximadamente maiores do que 5 μm são rejeitadas e coletadas em uma cápsula na parte inferior do tubo de amostragem. O restante das partículas de fumos é recolhido através de filtros de papel de PVC com diâmetro de 25 mm e 0,8 μm de poros.

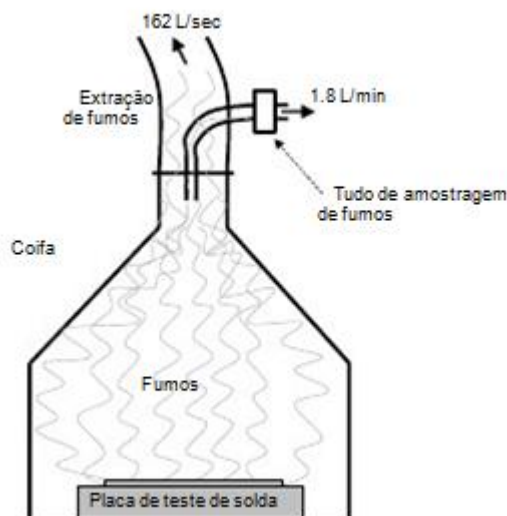


Figura 2.5 – Esquema de uma unidade de medição de geração de fumos, com tubo de amostragem em um fluxo separado de extração (STERJOVSKI et al., 2006).

Uma outra versão de câmara coletora de fumos é apresentada por Yamazaki et al. (2007), em conformidade com a norma JIS 3990. Como ilustra a Fig. 2.6, soldas sobre chapas foram realizadas durante 30 segundos, e, em seguida, os fumos emitidos foram coletados pelo amostrador de ar (taxa de sucção : $1,8 \text{ m}^3/\text{min}$) durante 3 minutos (duração suficiente, após o que nenhum resíduo de fumos foi reconhecido na câmara sobre o filtro).

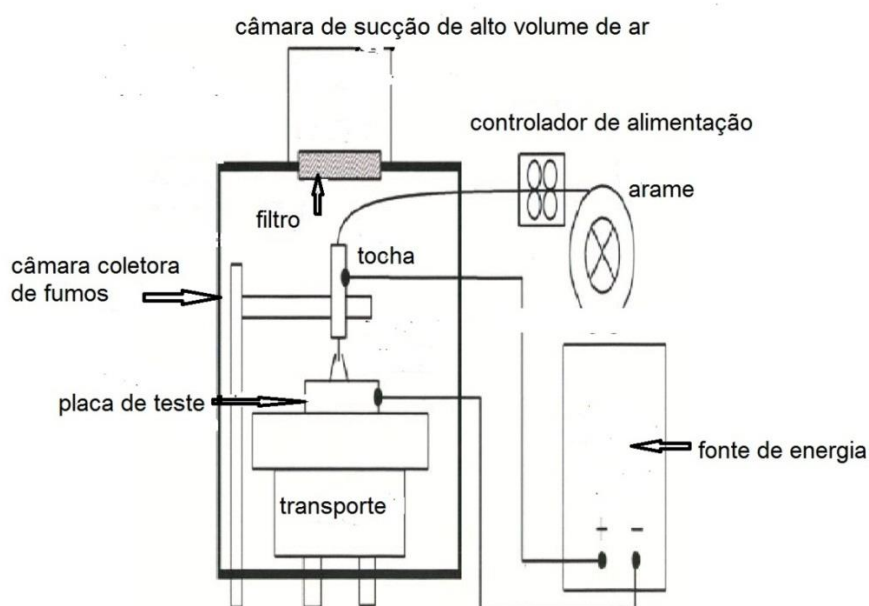


Figura 2.6 – Diagrama esquemático do sistema de coleta de fumos utilizado por Yamazaki et al. (2007)

2.3.2 Medição de geração de fumos ao ar livre

A norma ISO/10882 -1 (INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION – ISO, 2008) por outro lado, recomenda que a determinação dos níveis de concentração específica de partículas de fumos de soldagem na zona de respiração do soldador seja feita mediante amostragem ativa (uso de bomba de sucção). Durante as coletas, uma máscara tipo escudo é usada pelo soldador e a amostragem é realizada extraindo um volume conhecido de ar através de um substrato de coleta, por exemplo, um filtro, montado em um mostrador concebido para coletar a fração apropriada de partículas transportadas pelo ar. Para a amostragem pessoal, o filtro é posicionado na zona de respiração do soldador (dentro da máscara), como ilustra a Fig. 2.7. Se a máscara não é usada pelo soldador, a amostra na zona de respiração é obtida pela colocação do filtro cassete em um raio de 30 cm em frente da face, centrado em um ponto médio da linha que une as orelhas.

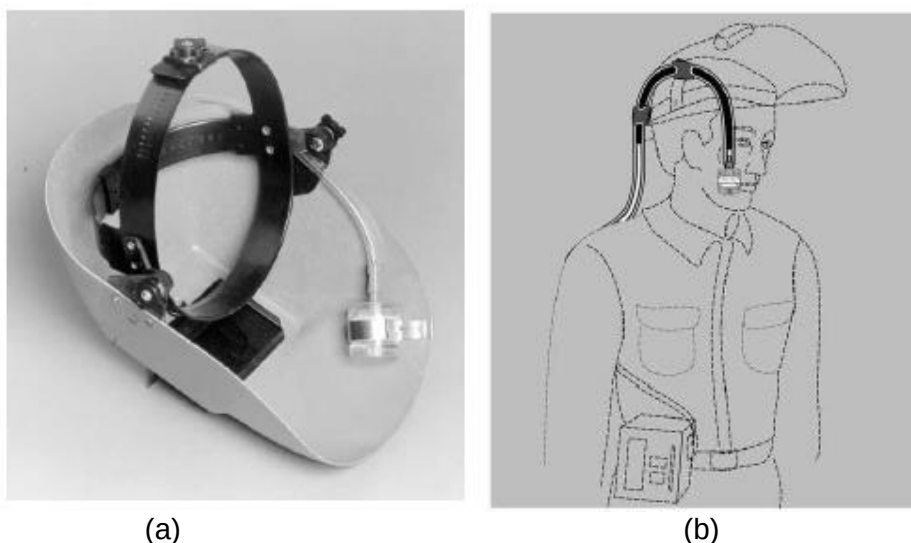


Figura 2.7 - Mostrador Pessoal ligado à máscara sobre a cabeça do soldador (ISO, 2008)

Ascenço et al. (2005) coletaram amostra de fumos da máscara do soldador de forma similar (Fig. 2.8) ao método utilizado pela norma ISO/10882 -1 (ISO, 2008), pois ambos utilizam bombas de sucção para as coletas das partículas de fumos. Porém, a diferença entre ambos é que durante a coleta utilizando o método descrito por Ascenço et al. (2005) o ponto de amostragem é movido para uma distância de 50 cm na horizontal e na vertical entre o arco móvel e o ponto correspondente à zona de respiração do soldador

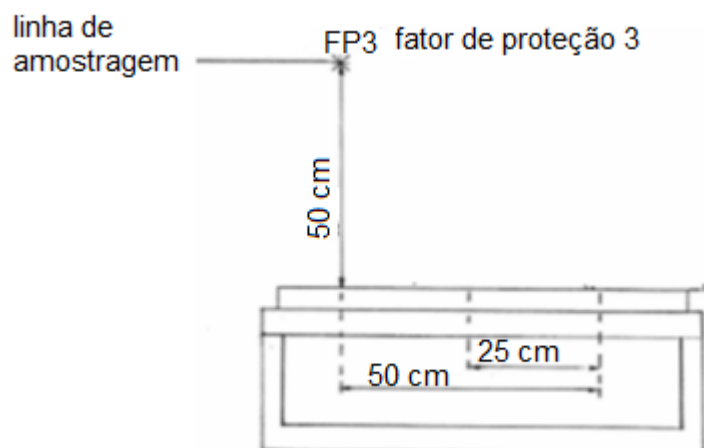


Figura 2.8 – Arranjo da amostragem na máscara do soldador (ASCENÇO et al., 2005).

Saito et al. (2000) obtiveram experimentalmente as concentrações de fumos, ozônio (O_3), monóxido de carbono (CO), óxido nítrico (NO), manganês (Mn) e cromo hexavalente total (Cr-VI), bem como a distribuição do tamanho das partículas destes fumos, em um ponto correspondente à zona de respiração do soldador em soldagem MIG/MAG protegida com CO_2 . O método de medição utilizado pelos autores, mostrado na Fig. 2.9, é similar ao método descrito por Ascenço et al. (2005) mostrado na Fig. 2.8. Porém a diferença entre ambos é que neste método o ponto de amostragem moveu-se acompanhando o movimento do arco, mantendo uma distância de 200 mm na horizontal e 300 mm na vertical, correspondente à zona de respiração do soldador durante operações semiautomáticas de soldagem.

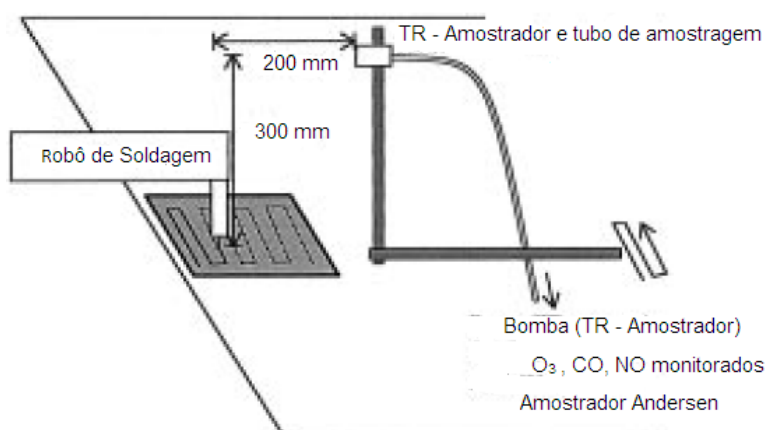


Figura 2.9 – Diagrama esquemático de operação de soldagem e amostragem do método de medição usado por Saito et al. (2000)

2.4 Formas de calcular e/ou expressar a quantificação de geração de fumos

Segundo Sterjovski et al. (2006), a concentração de fumos (CF) coletados a partir do volume medido pode ser calculada usando-se a Eq. (2.1):

$$CF = \frac{1000m}{f' \times t} \quad (2.1)$$

Onde:

CF = Concentração de fumos no ar (mg/m³)

m = Massa de partículas coletadas (mg)

f' = Fluxo da bomba de amostragem (L/min)

t = Tempo de coleta da amostra (min)

Ainda segundo esses autores, a taxa de geração de fumos (TGF), que é a massa de fumos coletados por volume do arame depositado (mg/m³), pode ser calculada, usando-se a Eq. (2.2):

$$TGF = \frac{m'}{VAD \times t} \quad (2.2)$$

Onde:

TGF = Taxa de Geração de fumos

m' = 1,8 m/f' massa de partículas coletadas (mg) para uma taxa de fluxo nominal de 1,8 L/min

VAD = Volume do arame depositado (mm³/min)

t = Tempo de coleta da amostra (min)

De acordo com Rosado; Pires; Quintino (2009), a taxa de geração de fumos (TGF) pode ser calculada usando-se a Eq. (2.3):

$$TGF = M_{\text{fumo}} / M_{\text{metal depositado}} \quad (\text{mg/Kg}) \quad (2.3)$$

Onde:

M_{fumo} = Massa de fumo (mg)

M_{metal depositado} = massa do metal depositado (Kg)

Ainda, de acordo com os autores, o cálculo da massa do metal depositado pode ser feito a partir da velocidade de alimentação do arame, de acordo com a Eq. 2.4:

$$M_{\text{depositado}} = V_{\text{arame}} \times \delta \times 10^{-3} (\text{Kg}) \quad (2.4)$$

Onde:

V_{arame} = Volume do arame do metal depositado (dcm^3)

δ = Peso específico (Kg/m^3)

V_{arame} = volume do arame (calculada utilizando a Eq. 2.5):

$$V_{\text{arame}} = \pi \phi^2 / 4 \times v \times t \times 10^{-3} (\text{dcm}^3) \quad (2.5)$$

Onde:

Φ = Diâmetro do arame (mm)

v = Velocidade de alimentação do arame (m/s)

t = Tempo de teste (s)

As eq. 2.1 e 2.2 descritas por Sterjovski et al. (2006), podem ser aplicadas para ambos os coletores de fumos descritos anteriormente itens 2.3.1 e 2.3.2, já que os mesmos utilizam bomba de sucção, porém não se aplicam para o coletor de fumos descrito pela norma AWS F1.2 (AWS, 2006), porque a mesma não recomenda o uso de bomba de sucção. Porém, as equações 2.3 e 2.4 descritas por Rosado, Pires e Quintino (2009), podem se aplicadas em ambos casos. Garcia e Scotti (2010), em seu estudo comparativo da geração de fumos entre o processo MIG/MAG com transferência metálica por curto-circuito e o processo Eletrodo tubular, afirmam que do ponto de vista metodológico, os resultados de emissão de fumos podem ser avaliados sob dois ângulos. O primeiro, referente ao aspecto da capacidade maior ou menor de um consumível em gerar fumos. Desta forma, torna-se importante expressar os resultados como massa de fumos coletadas por unidade de massa de arame consumido, como recomendado por Rosado, Pires e Quintino (2009).

Ainda segundo Garcia e Scotti (2010), o segundo ângulo se refere à exposição do soldador aos fumos, o que, a princípio, requereria os resultados expressos como massa de fumo coletado por unidade de tempo. Seja por um ângulo ou por outro, acredita-se que uma comparação entre os consumíveis só seria correta se realizada para um mesmo volume de cordão de solda, pois, afinal, uma comparação teria de ter como base a realização de um mesmo trabalho (um mesmo volume de cordão representaria preencher um mesmo chanfro, qualquer que seja ele). Entretanto, no caso da exposição ao fumo, aplicar-se-ia uma nova correção, pois um material que produza uma grande quantidade de fumos por unidade de

tempo, mas gaste menos tempo para se fazer uma soldagem, pode ser menos problemático. Assim, os autores concluíram que o resultado correto do ponto de vista de exposição seria massa de fumos coletado por unidade de comprimento de solda (já que os volumes são iguais).

2.5 Efeitos das variáveis do processo MIG/MAG na geração de fumos

De acordo com Geoffrey (2004), os principais fatores que influenciam na taxa de geração de fumos durante a soldagem podem ser resumidos como mostra a Fig. 2.10. Essas observações são compartilhadas por Carpenter, Monaghan e Norrish (2008).

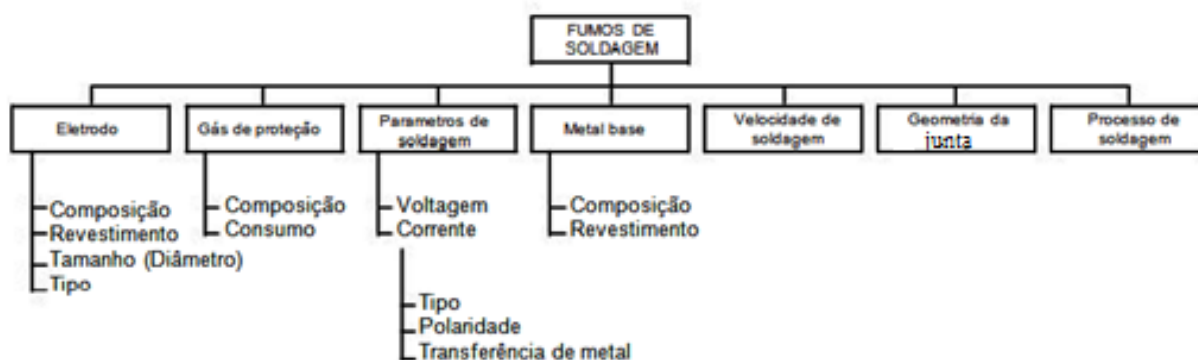


Figura 2.10 - Fatores que influenciam na geração de fumos de soldagem (GEOFFREY, 2004)

Segundo a revisão de Sterjovski et al. (2006), os vários fatores que influenciam a taxa de geração de fumos podem ser classificados em um ou mais dos seguintes fatores:

- a) tempo;
- b) temperatura;
- c) composição (atmosférica e consumíveis) e/ou a geometria.

Ainda segundo Sterjovski et al. (2006), a relação do tempo com os parâmetros incluem o tempo total em que o metal fundido é exposto à atmosfera. O tempo total está relacionado:

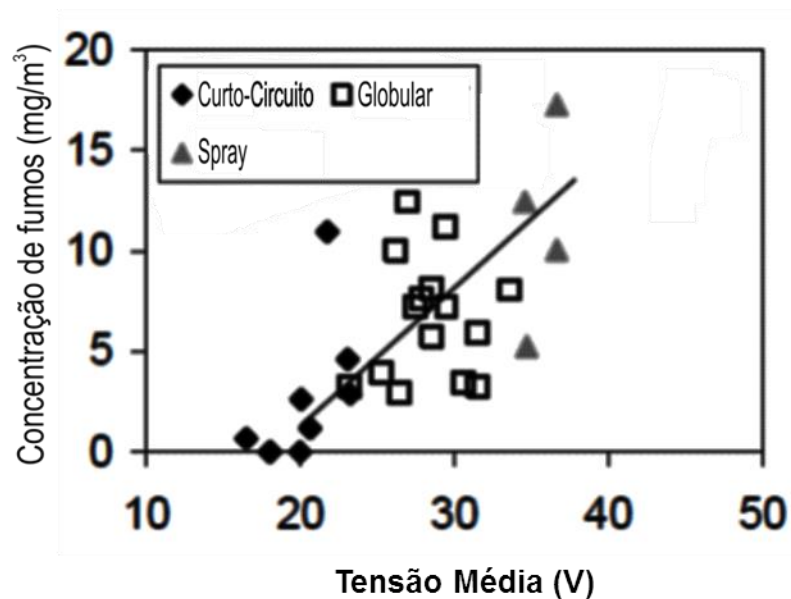
- a) Indiretamente com o modo de transferência metálica;
- b) Comprimento do arco;
- c) Diretamente com a área da superfície do metal líquido;
- d) À entrada de calor;

- e) Com a geometria da junta;
- f) Com a espessura do material de base.

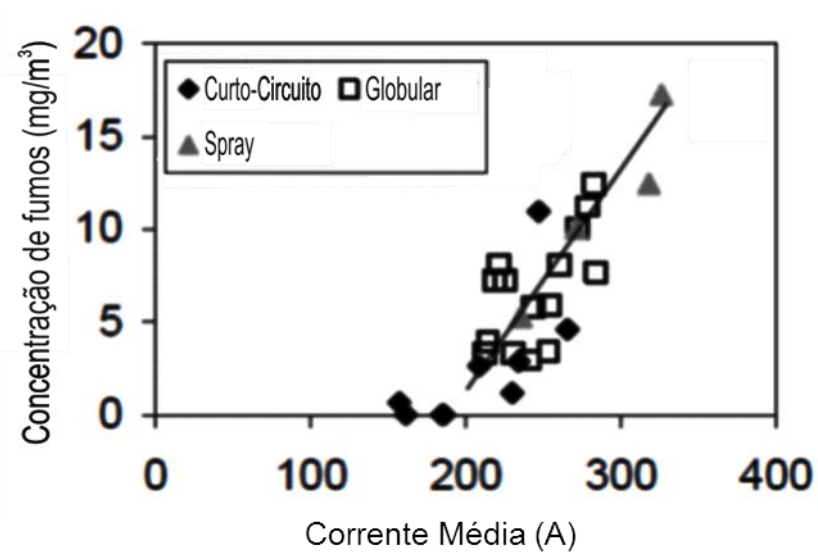
2.5.1 Efeito do modo de transferência metálica

Pires, Miranda e Gomes (2006), utilizando mistura de argônio com diferentes teores de dióxido de carbono (CO_2) e O_2 para o processo MIG/MAG, concluíram que a geração de fumos é estreitamente dependente dos modos de transferência metálica e que, ao selecionar corretamente os parâmetros de soldagem, tais como intensidade de corrente e a tensão, a emissão de fumos poderá ser reduzida. Ainda de acordo com os autores, o aumento na taxa de geração de fumos não é linear, devido aos diferentes comportamentos do arco de soldagem e também dos modos de transferência metálica. Estes modos estão intrinsecamente relacionados com a intensidade da corrente e a tensão na ponta do eletrodo. Quando estes parâmetros aumentam, o modo de transferência muda de curto-circuito para globular e, em seguida, para spray, com um aumento na transferência da gota fundida por unidade de tempo.

Sterjovski et al. (2006), em sua revisão, afirmam que o modo de transferência metálica afeta tanto a geração de fumos de soldagem como também o tamanho de partículas de fumos. A transferência metálica globular produz uma maior taxa de geração de fumos, consecutivamente seguida pela transferência por spray e curto-circuito. Esses autores também citam que a relação entre os modos de transferência metálica e fumos não é unívoca. As Fig. 2.11 e 2.12 mostram claramente uma sobreposição entre os valores de concentração de fumos e taxa de geração de fumos para todos os diferentes modos de transferência metálica. Jenkins et al. (2000) citados por Garcia (2010) afirmam que as taxas de geração de fumos produzidas por curto-circuito e spray são menores em função dos tamanhos de gotas serem menores do que para a transferência globular.

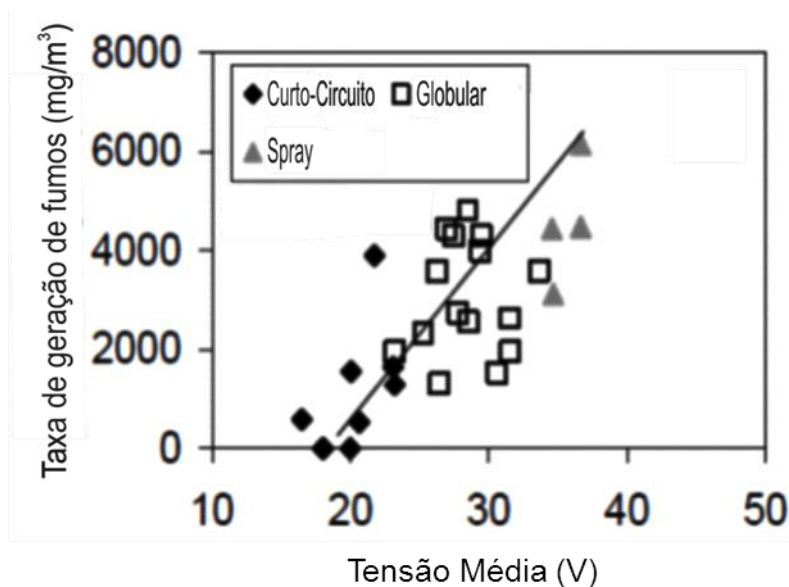


(a)

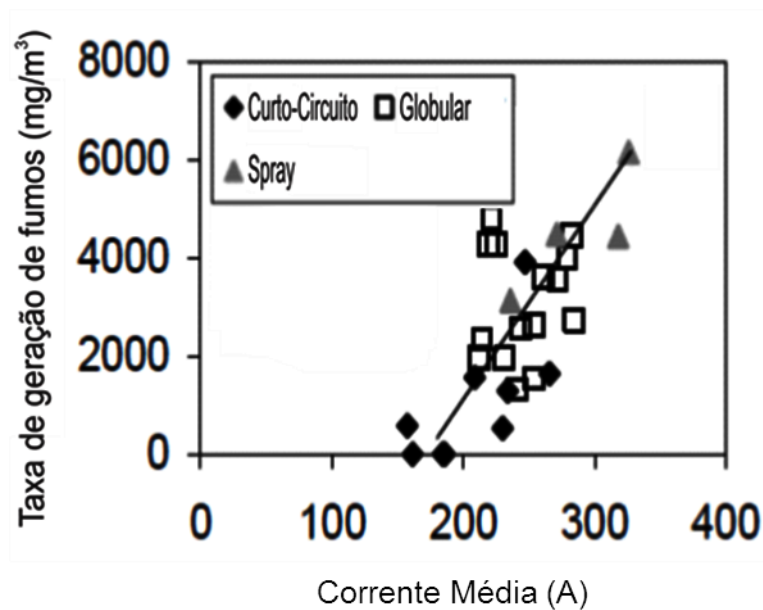


(b)

Figura 2.11 - Concentração de fumos (mg/m^3) no ar a uma taxa de 1,8 l/min em função da tensão média e da corrente média, para as transferências por curto-circuito, globular e spray (STERJOVSKI et al., 2006)



(a)



(b)

Figura 2.12 - Taxa de geração de fumos (mg/m^3) no ar a uma taxa de 1.8 l/min em função da tensão média e da corrente média, para as transferências por curto-circuito, globular e spray (STERJOVSKI et al., 2006)

2.5.2 Efeito da corrente

Castner (1995) e Yamane (2007) citados por Garcia (2010) citam que um aumento da corrente atua diretamente na elevação da taxa de geração de fumos, isso como consequência de um aumento da temperatura do arco, uma vez que proporciona uma maior

vaporização de metais presentes no arco. Outro fator apontado pelos autores para uma maior geração de fumos é que o aumento da corrente promove um aumento da taxa de fusão do eletrodo por unidade de tempo (resultando numa quantidade maior de gotas que contribuem para uma maior evaporação).

Pires, Miranda e Gomes (2006) afirmam que, sempre que possível, os usuários do processo MIG/MAG devem utilizar a menor intensidade de corrente. No entanto, quando se torna possível, devido às limitações das peças a serem soldadas, ou seja, sua espessura e da produtividade do processo, os usuários devem selecionar correntes mais altas, mas com as misturas dos gases de proteção $\text{Ar}+2\%\text{CO}_2$ e $\text{Ar}+3\%\text{CO}_2+1\%\text{O}_2$, que levam a menos emissões de fumos. Ainda segundo Pires, Miranda e Gomes (2006), a Fig. 2.13 representa a evolução da taxa de geração de fumos com a intensidade da corrente para diferentes misturas de gases de proteção. As curvas são semelhantes para todas as misturas, que podem ser relacionadas com os modos de transferências metálicas. Globalmente, a Fig. 2.13 indica que a taxa de geração de fumos aumenta com a intensidade da corrente, como resultado de uma maior temperatura do arco.

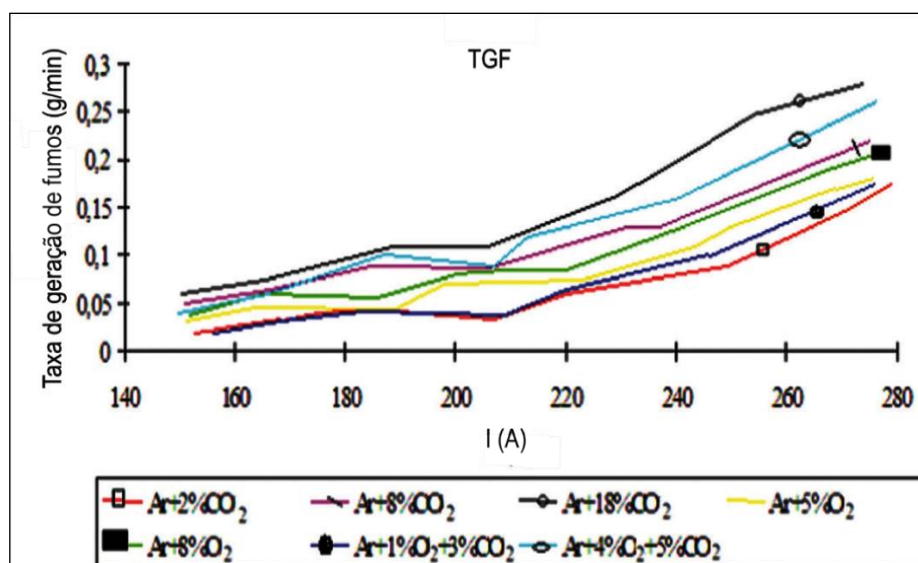


Figura 2.13 - Variação da taxa de geração de fumos em relação à intensidade da corrente para as diferentes misturas de gases de proteção estudadas equivalente para cada mistura de gás de proteção (PIRES; MIRANDA; GOMES, 2006)

Kobayashi et al. (1976) citados por Geoffrey (2004), em seus estudos sobre os fatores que afetam a quantidade de fumos no processo MIG/MAG, observaram que as condições de soldagem têm uma grande influência sobre a geração de fumos, ainda que sob o mesmo método utilizado e o mesmo material. De todos os parâmetros de soldagem, a corrente de soldagem é considerada o parâmetro mais crítico na geração de fumos. Em primeiro lugar, o aumento da corrente provoca um aumento na temperatura na ponta do eletrodo, bem como

a temperatura do arco devido ao maior fornecimento de elétrons na ponta do eletrodo. Ainda segundo os autores, este aumento de temperatura provoca uma elevada taxa de evaporação, causando uma maior quantidade de fumos. Em segundo lugar, um aumento na corrente através do eletrodo provoca um aumento na taxa de fusão do eletrodo (isto significa que mais material é transferido através do arco).

Concordando, Sterjovski et al. (2006) relatam que um aumento da corrente aumenta a concentração de fumos e a taxa de geração de fumos [Fig. 2.11(b) e 2.12(b)], devido aos aumentos subsequentes da poça de fusão e taxas de deposição, que por um determinado tempo e comprimento do cordão de solda, irá resultar em uma maior área superficial da poça de fusão. Ainda segundo os autores, correntes mais altas significam também aumento da temperatura na vizinhança do arco, a qual resulta em maior pressão de vapor e, por sua vez, maior geração de fumos.

Rosado (2008) cita como regra geral que a quantidade de fumos produzida no processo MIG/MAG diminui com o aumento do diâmetro do eletrodo para iguais valores de intensidade de corrente. Em outro artigo, Rosado, Pires e Quintino (2009), em seus estudos sobre a geração de fumos e emissões de gases utilizando os processos MIG/MAG e MIG/MAG pulsado, concluíram a partir das Fig. 2.14 e 2.15, que o processo MIG/MAG pulsado leva a uma menor taxa de geração de fumos (TGF) comparativamente ao processo MIG/MAG para uma mesma corrente média. Porém, isto está relacionado com o fato de que o processo MIG/MAG pulsado promove uma diminuição da temperatura da gota, e, simultaneamente, uma transferência metálica mais estável, levando a níveis baixos de respingos. Porém, uma menor quantidade de respingo correspondente dos materiais, são projetados para fora das regiões de influência dos gases de proteção e vaporizados.

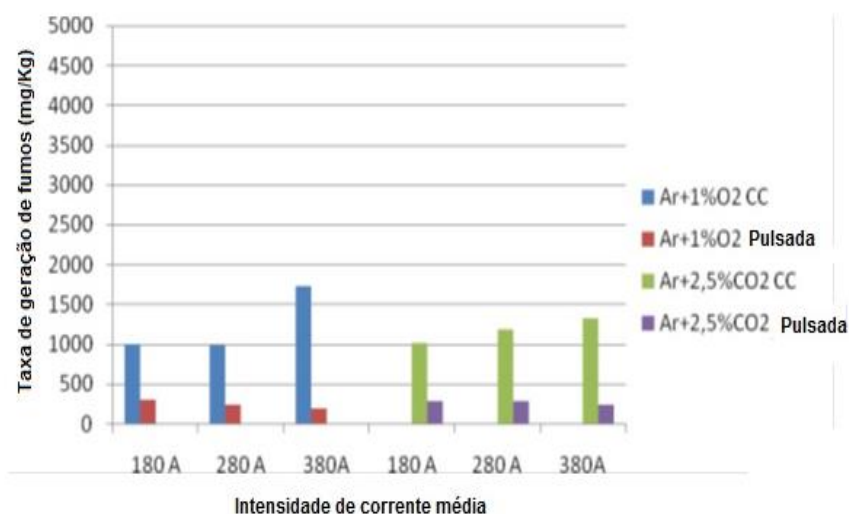


Figura 2.14 – Influência da corrente pulsada na taxa de geração de fumos para o aço inoxidável AISI 316 L (ROSADO; PIRES; QUINTINO, 2009)

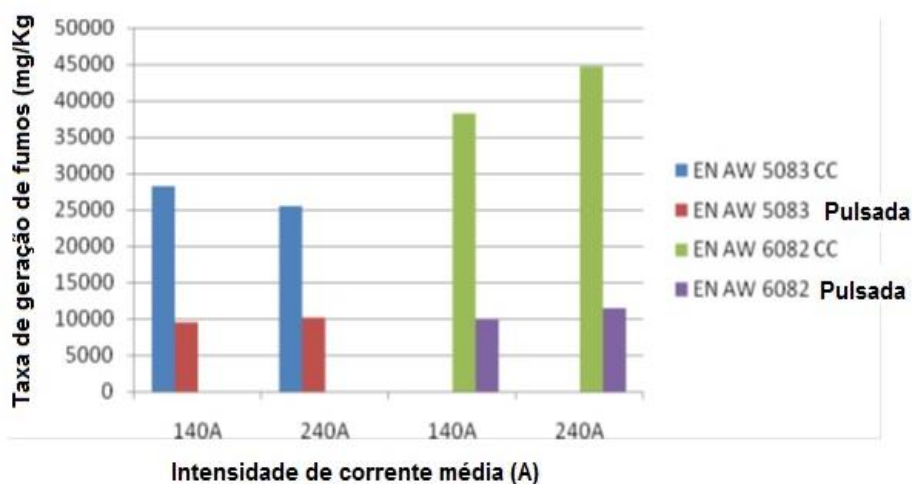


Figura 2.15 – Influência da corrente pulsada na taxa de geração de fumos, usando as ligas de alumínio AW 6082 e EM AW 5083 e argônio como gás de proteção (ROSADO; PIRES; QUINTINO, 2009)

2.5.3 Efeito da tensão (comprimento do arco)

Castner (1995) e Yamane (2007) citados por Garcia (2010) descreveram que um aumento da tensão aumenta a taxa de geração de fumos, pois ocorre uma maior liberação de vapores a altas temperaturas do arco para a atmosfera, pois com o aumento da tensão há um aumento da velocidade do fluxo de plasma causando maiores turbulências e, consequentemente, uma maior geração de fumos. Por outro lado, Gray et al. (1982) citados por Garcia (2010), avaliando o efeito da tensão para o processo MIG/MAG para soldagem de um aço inoxidável AISI 316, com uma corrente constante, obtiveram os resultados mostrados na Fig. 2.16 que representa a geração de fumos para diferentes tensões e consequentemente para diferentes modos de transferência metálica.

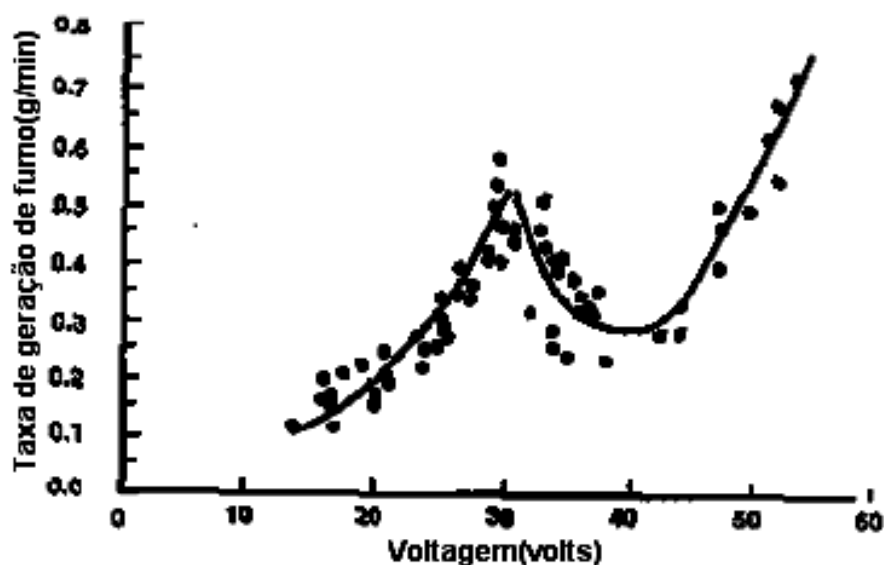


Figura 2.16 - Taxa de geração de fumos metálicos para diferentes modos de transferência metálica para um aço inoxidável 316, destacando-se o comportamento das taxas e da tensão na mudança dos modos de transferência (GRAY et al., 1982 citados por GARCIA, 2010)

Ainda segundo os autores, nos valores de baixa tensão (12-22 V) da Fig. 2.16 ocorrem curto-circuito, nos quais os valores de tensão acontecem de forma intermitente, com picos de baixa tensão, onde há uma baixa geração de fumos e de respingos, e picos de altas tensões, onde ocorre um aumento na taxa de fumos e dos respingos. O aumento na taxa de geração de fumos com o aumento da tensão é atribuído ao aumento na taxa de respingos gerados. O ponto máximo para geração de fumos é para o modo de transferência globular em torno da tensão de 30 V; as formações de gotas grandes contribuem para uma maior formação de fumos. A partir deste ponto há uma transição para o modo de transferência spray onde apesar do aumento da tensão há uma redução da quantidade de fumos formados em função da formação de gotas menores e também por esse tipo de transferência metálica ocorre de forma menos turbulenta.

De acordo com Kobayashi et al. (1979) citados por Geoffrey (2004), um aumento no comprimento do arco produz um aumento das taxas de geração de fumos. Os autores argumentam que o contato maior com o ambiente e o enfraquecimento do gás de proteção pode causar um aumento da taxa de geração de fumos em altas tensões e flutuações do arco. Sterjovski et al. (2006) também mostram, através das Fig. 2.11(a) e 2.12(a), que um aumento na tensão geralmente aumenta a concentração de fumos e a taxa de geração de fumos, porque uma tensão no arco implica em um maior comprimento do arco, permitindo assim mais tempo para a formação de fumos.

2.5.4 Efeito do gás de proteção

De acordo com a revisão de Nakhla, Shen e Bethea (2012), o dióxido de carbono (CO_2) e o argônio (Ar) são utilizados preferencialmente como gases de proteção por causa da sua disponibilidade e custo relativamente baixo. Ainda de acordo com os autores, o uso extensivo de gases de proteção tem um impacto negativo sobre o meio ambiente e apresenta despesas desnecessárias para a indústria se não regulados corretamente. As propriedades físicas dos gases de proteção têm um grande efeito sobre a velocidade de soldagem, a penetração, propriedades mecânicas, aparência da solda, geração de fumos e estabilidade do arco.

Carpenter, Monaghan e Norrish (2008), em seus estudos sobre a influência da composição de gases de proteção sobre a taxa de geração de fumos e do tamanho de partículas, para o processo MIG/MAG robotizado, utilizando aço carbono comum, mostraram que:

- a) A taxa de geração de fumos é fortemente afetada pelas adições crescentes de CO_2 , para ambas as misturas binárias e terciárias Ar - CO_2 - O_2 ;
- b) A adição de 2% O_2 para as misturas binárias Ar- CO_2 não teve efeito sobre a taxa de geração de fumos, mas quando o O_2 foi adicionado nas misturas terciárias, a taxa de geração de fumos aumentou para a mistura de Ar+5% CO_2 , mas o aumento observado não foi perceptível para as misturas Ar+12% CO_2 ;
- c) A adição de He ou CO_2 na mistura terciária Ar – He – CO_2 foi a mais estável para a taxa de geração de fumos;
- d) Para 100% CO_2 , a taxa de geração de fumos aumentou significativamente devido ao modo de transferência globular e altos níveis de respingos;
- e) O índice de oxigênio somente se correlaciona fracamente com a taxa de geração de fumos e, portanto, o aumento de CO_2 adicionado em argônio baseado nos gases de proteção, é o fator principal de controle de geração de fumos; atribuído à influência de CO_2 sobre a transferência metálica e as características do arco;
- f) A combinação das técnicas de caracterização de TEM-EDS com DRX identificaram partículas de fumos como $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{O}_4$ com adição de Si, mas que a composição dos gases de proteção não tiveram efeito óbvio sobre a composição dos fumos e que também o enriquecimento de Mn na composição dos fumos foi observada.

Segundo Pires, Miranda e Gomes (2006), em suas observações sobre o efeito dos gases de proteção no processo MIG/MAG, relataram que as misturas de gases de proteção

afetam a taxa de emissão de fumos devido ao efeito do potencial de ionização do gás no modo de transferência metálica. Os aumentos da taxa de emissão ocorrem com o aumento dos teores de CO_2 e O_2 na mistura gasosa. Neste contexto, a geração de fumos para diferentes misturas de gases, tais como Argônio, CO_2 e O_2 , obtiveram os seguintes resultados:

- a) Para a faixa de parâmetros, para os quais a transferência por spray ocorre, a taxa de geração de fumos diminui com o aumento da condutividade térmica e do componente ativo da mistura;
- b) A transferência globular repulsiva ocorre devido ao comportamento reativo da mistura e da diminuição da zona de condução, causada pelo aumento da condutividade térmica da mistura;
- c) O comprimento do arco aumenta com o potencial de oxidação da mistura, na ausência de outros fatores;
- d) A taxa de geração de fumos aumenta com o aumento de CO_2 e O_2 na mistura;
- e) A taxa de geração de fumos aumenta com o aumento da temperatura do arco e a instabilidade, com o componente ativo, condutividade térmica da mistura e com o volume das gotas;
- f) A quantidade de fumos lançada durante a soldagem é relativamente maior para as mistura com CO_2 do que a de O_2 , sendo que ambos têm o mesmo potencial de oxidação.

Ainda segundo Pires, Miranda e Gomes (2006), a partir da Fig. 2.13, também pode ser visto que com teores crescentes de CO_2 e O_2 nas misturas dos gases de proteção as taxas de geração de fumos aumentam, tanto para as misturas terciárias quanto para as binárias. Ainda segundo os autores, deve também ser notado que o componente oxidante do gás de proteção (Tab. 2.1) também tem um papel importante na quantidade de fumos produzidos durante a soldagem, especialmente para baixo teor de CO_2 . A Tab. 2.1 mostra O_2 equivalente para cada mistura de gás de proteção.

Tabela 2.1 - O₂ equivalente para cada mistura de gás de proteção (PIRES; MIRANDA; GOMES, 2006)

Mistura de Gases	O ₂ equivalente (%)
Ar + 2% CO ₂	0,8
Ar + 8% CO ₂	3,0
Ar + 18% CO ₂	7,2
Ar + 5% O ₂	5,0
Ar + 8% O ₂	8,0
Ar + 3% CO ₂ + 1% O ₂	2,2
Ar + 5% CO ₂ + 4% O ₂	6,0

Ainda segundo Pires, Miranda e Gomes (2006), os resultados da Fig. 2.13 e da Tab. 2.1 dão uma boa indicação sobre a mistura de gases de proteção e os parâmetros que conduzem a uma menor quantidade de fumos durante a soldagem. Em geral, as taxas de geração de fumos aumentam com:

- A diminuição da estabilidade do arco que promove um aumento na quantidade de respingos que são liberados durante a soldagem, o qual é projetado sobre as regiões fora da influência do gás de proteção, e são oxidados e vaporizados;
- Um aumento na condutividade térmica da mistura que promove uma redução da zona de condução, sendo que quase todo calor gerado concentra-se na zona de condução. Portanto, há um aquecimento local e intenso da gota fundida que rapidamente entra em ebulição;
- Um aumento no tamanho de gota fundida que promove um aumento do período de tempo durante o qual as gotas são expostas a uma temperatura elevada;
- Um aumento do gás ativo CO₂ da mistura – quando a quantidade de CO₂ aumenta na mistura, a velocidade de reação que ocorre na fusão também aumenta, como resultado da decomposição de CO₂ em CO e O₂;
- O conteúdo oxidante da mistura – devido ao aumento da temperatura do arco, como resultado das reações exotérmicas entre os elementos oxidantes e os elementos da poça de fusão.

2.5.5 Efeito da dimensão da gota na geração de fumos

Bosworth e Deam (2000), em sua revisão sobre o tamanho de gotas, observaram uma grande variação na taxa de geração de fumos no processo MIG/MAG Pulsado, com uma mesma velocidade de alimentação do arame, mas com diferentes parâmetros de pulsos e diferentes fontes de energia. A razão para esta variação não tem sido bem compreendida. Por outro lado, os autores em suas observações acham que quanto menor o tamanho de gotas individuais, menor a geração de fumos e que a física por trás disso é dupla:

- a) Quanto menor o tamanho de gotas, menor a queda de temperatura do outro lado da gota para uma mesma taxa de fusão do arame, isto significa que a pressão de vapor do metal é menor para gotas menores;
- b) A massa total transferida do vapor metálico para a gota aumenta com o tamanho de gota, um aumento na área da superfície da gota, compensa o decaimento no coeficiente de transferência de massa. Assim, gotas menores têm menores taxas de geração de vapor metálico. Embora, haja um aumento na frequência de gotas para pequenas gotas à uma determinada taxa de alimentação do arame, o efeito global é a redução na geração de vapor metálico, porque não há apenas uma gota no arco, em determinado momento.

Porém, Deam et al. (1998) citados por Geoffrey (2004), em seus estudos sobre o entendimento da formação de fumos no processo MIG/MAG, observaram que a gota na ponta do eletrodo tem uma maior temperatura na poça de fusão, tornando a poça de fusão uma dissipadora de calor e o eletrodo a principal fonte de vapor do metal. Ainda segundo os autores, essa observação corresponde à teoria de que o eletrodo é a principal fonte de produção de fumos. O efeito do diâmetro das gotas é semelhante ao diâmetro do eletrodo. As gotas menores tem menos entrada de calor, porque são mais frias. Esta temperatura mais baixa produz taxas menores de geração de vapor, levando a uma redução da taxa de geração de fumos.

Haidar e Lowke (1997), em seus estudos sobre geração de fumos no processo MIG/MAG, desenvolveram um modelo computacional para determinar a taxa de geração de fumos, que pode ser usado para prever o tempo dependente de evaporação do vapor metálico para o anôdo, em mudanças nas condições de soldagem. Ainda segundo os autores, seu modelo computacional resolve as equações que regem a transferência de calor e massa nos processos. Por outro lado, Workman et al. (1997) citados por Bosworth e Deam (2000) desenvolveram um modelo mais simples, mas não obstante o trabalho desenvolvido que reflete as complicações completas dos processos que são envolvidos na formação de fumos. Essas observações também são compartilhadas por Bosworth e Deam (2000), que

em sua revisão tentaram simplificar o entendimento da formação de fumos no processo MIG/MAG, adotando uma abordagem semi-empírica. Ainda segundo os autores, as correlações de engenharia são usadas para descrever a transferência de calor e massa nos processos envolvidos. Simples expressões podem ser expressas em termos das variáveis do processo, que podem ser medidas, a fim de prever a taxa de geração de fumos. Uma vez que o gás de soldagem e as propriedades do arame são conhecidas, as principais variáveis que controlam a taxa de geração de fumos, vem a ser o tamanho de gota transferida para a poça de fusão e taxa de alimentação do arame.

2.5.6 Efeitos do material de adição

De acordo com Geoffrey (2004), o arame eletrodo (ou metal de enchimento) é considerado a principal fonte de geração de fumos (os arames eletrodos tem composição semelhante a do metal de base a ser soldado). O metal mais utilizado em eletrodos é o aço carbono comum. Há também uma variedade de aços que contém elementos químicos tais como cromo, alumínio, cobalto, molibdênio, vanádio e tungstênio. Alguns desses elementos têm mostrado efeitos prejudiciais sobre o corpo humano, se os níveis de exposição são elevados. Ainda segundo o autor, os fabricantes de eletrodos fornecem informações da provável composição dos fumos produzidos por cada tipo de eletrodo, na forma de Ficha de Dados de Segurança (FDS), de modo que o usuário tenha conhecimento claro da composição química dos metais de adição utilizados. Heile e Hill (1995) citados por Geoffrey (2004), em suas observações sobre o efeito das pressões de vapor dos componentes no arame sobre o volume de fumos gerados e da composição total dos fumos, chegaram à conclusão de que os eletrodos que continham elementos de alta volatilidade produziam mais fumos do que aqueles que continham elementos de menor volatilidade. Essas observações são compartilhadas com Castner (1995) citado por Geoffrey (2004), que acha, no entanto, que a pressão de vapor também explica o porquê na soldagem de alumínio contendo os metais de enchimento Si-Al gerarem menos fumos do que metais de enchimento Mg-Al.

Porém, Kobayashi et al. (1976) citados por Geoffrey (2004) afirmam que o efeito do teor de umidade do eletrodo contribuirá também para os níveis de fumos; um aumento na porcentagem da umidade do eletrodo produz um aumento de fumos. Isto acontece devido ao nível de umidade que altera o comportamento do arco.

Geoffrey (2004), em sua revisão sobre a investigação dos efeitos do teor de cobre sobre a produção de fumos gerados por eletrodos no processo MIG/MAG, concluiu que o componente de cobre nos fumos pode ser correlacionado com o teor total de cobre no eletrodo, ao invés do teor de cobre na espessura do revestimento do eletrodo. Ainda

segundo o autor, o limite de 18% de cobre no eletrodo foi determinado como valor crítico e acima desse valor as concentrações de fumos irão exceder os níveis de exposição. Ainda em sua revisão, o autor observou que o diâmetro do eletrodo afeta a quantidade de material depositado sobre a peça de trabalho, eletrodos de maiores diâmetros geram altas emissões de fumos para taxas de depósitos semelhantes. Voitkevich (1995) citado por Geoffrey (2004) observou que sobre os efeitos da composição do revestimento do eletrodo na geração de fumos de soldagem devem ser levados em conta a volatilidade dos produtos de reações químicas entre os componentes e o teor dos compostos. Kobayashi et al. (1979) citados por Geoffrey (2004) relatam que é possível reduzir a taxa de geração de fumos, limitando o teor de elementos do grupo I da tabela periódica (em 1º lugar o de potássio e compostos orgânicos). Koshiishi e Shimizu (2001) citados por Geoffrey (2004) afirmam que a remoção do revestimento de cobre em arames no processo MIG/MAG melhora a alimentação do arame e as características de estabilidade do arco. Estas características do arco devem contribuir para a redução de fumos e emissão de respingos a partir do processo de soldagem.

2.6 Composição e tamanho de partículas de fumos

Yamazaki et al. (2007), em seus estudos sobre a taxa de geração de fumos na soldagem, observaram que a composição química dos fumos é afetada principalmente pelas características dos arames de soldagem, temperatura e o tempo de formação da gota. Como para o manganês (Mn), por exemplo, que tem alta pressão de vapor, o teor de fumos deste elemento é mais elevado na soldagem MIG/MAG pulsada. Ainda segundo os autores, isto é provavelmente por que a temperatura da duração da gota na corrente de pico na soldagem MIG/MAG pulsada é muito além da temperatura de ebulição do manganês (Mn), 2423 K. Assim, a composição química dos fumos pode eventualmente ser controlada pela otimização da composição química do arame de soldagem, temperatura da gota metálica, em suas suposições.

Segundo Voitkevich (1995) citado por Mendez, Jenkins e Eagar (2000), experimentalmente descobriu-se que o tamanho de partículas de fumos de soldagem varia na faixa de centésimos de vários décimos de micrômetros. O autor utilizou a microscopia eletrônica de transmissão para estudar fumos de soldagem criados sob uma variedade de condições e não descobriu quaisquer partículas maiores do que 0,5 μm .

Em sua revisão, Sowards (2006) afirma que a terminologia geral usada para determinar as faixas de tamanho de partículas as dividem em grosseira, fina e ultra fina. As partículas ultrafinas são aquelas com diâmetro menor do que 0,1 μm ($< 100 \text{ nm}$). As

partículas finas estão na faixa entre 0,1 e 2,5 μm (100 a 2500 nm) e as partículas grosseiras são consideradas aquelas com diâmetro maiores do que 2,5 μm ($> 2500 \text{ nm}$). O autor observou também que as partículas na faixa de 0,1 a 1 μm serão inaladas e exaladas, enquanto que as partículas ultrafinas ($<100 \text{ nm}$) serão depositadas nos pulmões e, além disso, dissolvidas na corrente sanguínea. Tem sido debatido que a maioria das partículas de diâmetros ($<100 \text{ nm}$) são possivelmente até mesmo exaladas. Antonini et al. (1998), por sua vez, observaram que as partículas de fumos respiráveis são aquelas menores de 10 μm de diâmetro. Os autores observaram também que existem algumas discrepâncias sobre as quais faixas de tamanho de partículas que podem ser depositadas nos pulmões e exaladas.

Ainda segundo Sowards (2006), o diâmetro de partículas aerodinâmico (equivalente) é um importante conceito a considerar desde que as partículas tenham diferentes morfologias, que fazem com que se comportem de maneira diferente em uma corrente de ar. Estas morfologias incluem variações na geometria, densidade e tamanho (a menos que todas as partículas estudadas tenham geometria esférica, torna-se difícil aplicar o termo diâmetro geométrico médio a essas partículas). As partículas podem também consistir de diferentes elementos ou compostos, que teriam, portanto uma mudança da densidade das partículas. Portanto, torna-se necessário uma forma de comparação das partículas para todas as formas e densidades. O diâmetro aerodinâmico é usado para relacionar os efetivos dos diâmetros efetivos de partículas com as suas variações morfológicas e é definido como o diâmetro de uma partícula esférica com uma densidade de 1 mg/cm^3 com as mesmas propriedades aerodinâmicas (ou inerciais), no gás como as partículas de interesse.

Rosado, Pires e Quintino (2009), em sua revisão sobre a geração de fumos na soldagem, utilizando o processo MIG/MAG, observaram que os fumos de soldagem são partículas muito pequenas que se formam quando os metais vaporizados condensam-se rapidamente no ar e são tipicamente pequenos para serem vistos pelo olho nu, mas em conjunto, formam uma nuvem visível. Ainda de acordo com os autores, os fumos de soldagem penetram no corpo do soldador, principalmente através dos órgãos respiratórios. Porém, é sabido que a maioria das partículas de fumos na soldagem respiráveis estão na faixa de 0,1 a 5 μm de tamanho e que as partículas ($>5 \mu\text{m}$) são depositadas no trato respiratório superior e inferior. Já aquelas com ($< 1 \mu\text{m}$) são principalmente removidas do corpo através da exalação. Assim, as partículas de fumos na soldagem estão entre as mais respiráveis, como mostra a Fig. 2.17.

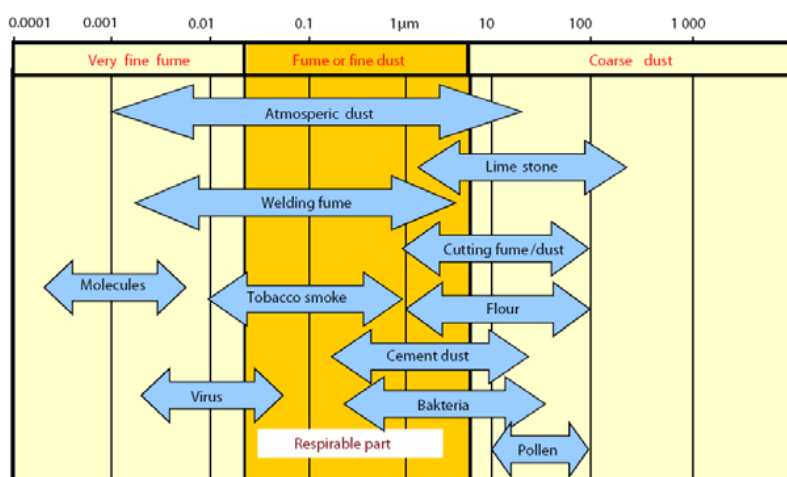


Figura 2.17 – Tamanho de partículas de diferentes fumos de soldagem (ROSADO; PIRES; QUINTINO, 2009)

Jenkins e Eagar (2005), em seus estudos sobre análises de composição química das partículas, mostraram através da técnica de difração de raios-X que na soldagem de um aço carbono A500 utilizando o processo MIG/MAG, Fig. 2.18, a predominância de partículas de fumos é a magnetita, um componente que em grande quantidade e dependendo do tamanho das partículas é altamente tóxico e poderá causar sérios danos à saúde do soldador.

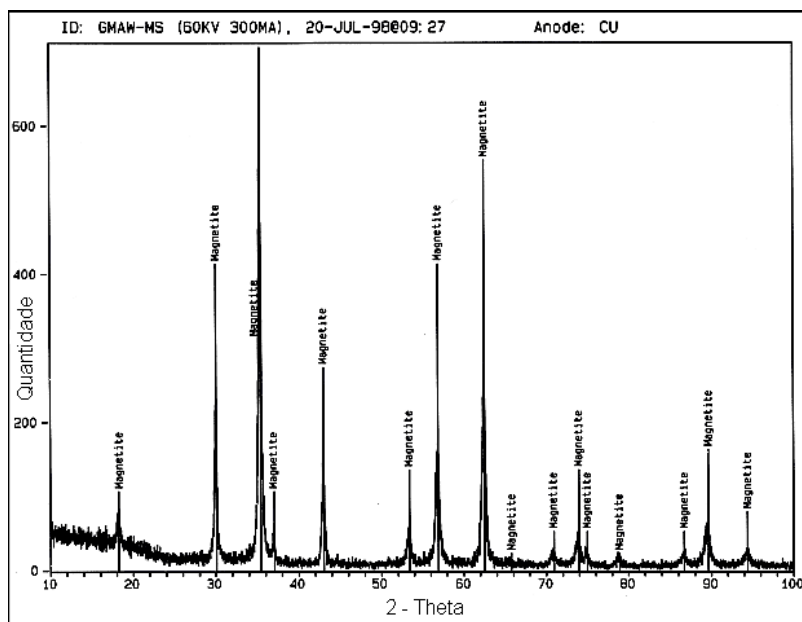


Figura 2.18 - Espectro de difração de raios-X de fumos criados na soldagem do aço carbono A500 usando como consumíveis o gás de proteção 2%O₂ – Ar e o arame ER70S-3, adotando como parâmetros de soldagem o comprimento de arco de 0,0045 pol com voltagem de 30V e amperagem de 200A (JENKINS; EAGAR, 2005).

Jenkins e Eagar (2005) afirmam que os múltiplos elementos presentes na vaporização de ligas terão diferentes pressões de vapores, resultando na condensação de elementos com maiores pressões de vapor sobre a superfície de partículas previamente nucleadas, variações do tamanho de partículas e composição. Portanto, a forma mais conveniente para analisar os fumos de soldagem é pela fração molar dos cátions metálicos. As técnicas de Espectrometria de energia dispersiva (EDS) e Espectrometria de foto induzida de elétrons por raios-X (XPS) estão bem adaptadas para análise de fumos metálicos, especialmente quando se considera os respectivos limites de tamanho com relação às partículas ultrafinas (JENKINS; EAGAR, 2005). A Tab. 2.2 mostra a composição química das partículas de fumos e as técnicas de caracterização.

Tabela 2.2 - Composição química, técnicas de caracterização de limites do tamanho de partículas e comentários para identificação e análise de fumos de soldagem (JENKINS; EAGAR, 2005)

Método de Caracterização	Faixa de tamanho (µm)	Limite de detecção NA= Não aplicável	Notas
Distribuição do Tamanho de Partículas			
Impactores (vários tipos)	0,1 – 20	NA	Analizar quimicamente a distribuição do tamanho em massa por tamanho de grupos
Analizador elétrico de aerosol (CEA - Electric aerosol analyzer) e diferencial mobilidade do tamanho de partículas	0,01 - 1	NA	Distribuição do tamanho de partículas pelo número
Tamanho de partículas aerodinâmico	0,1 - 25	NA	Distribuição do tamanho de partículas pelo número
Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	0,5 - 50	NA	Os tamanhos de partículas podem ser medidos a partir de micrografias
Alta resolução	0,002 - 1		Medições do tamanho de partículas a nível atômico
Microanálise (EPMA - Electron probe microanalysis)	0,5 – 50	NA	Os tamanhos de partículas podem ser medidos a partir de micrografias
Microscopia eletrônica de transmissão (TEM Transmission electron microscope)	0,001 – 1	NA	Os tamanhos de partículas podem ser medidos a partir de micrografias
Microscopia óptica	1 - 400	NA	
Composição Química das Partículas			
Espectrometria de fluorescência de raios – X (XRF - X-ray fluorescence spectrometry)	volume	100ppm	Números atômicos >10 (muito maiores)
Análise por ativação de nêutrons	volume	0,01%	Números atômicos >10,

Método de Caracterização	Faixa de tamanho (μm)	Limite de detecção NA= Não aplicável	Notas
(NAA -Neutron activation analysis)			(exige reator nuclear)
Espectrometria de emissão óptica e espectrometria de massa	Volume	1 – 10 ppm	Números atômicos >10
Espectrometria de absorção atômica (AAS - Atomic absorption spectrometry)	Volume	10 ppm	
Espectrometria de energia dispersiva com SEM (MEV – EDS - Energy-dispersive spectrometry)	1 – 50	0,1%	Números atômicos >10
Espectrometria de comprimento de onda com (EPMA – WDS - “Wavelength-dispersive spectrometry”)	1 – 50	0,1%	Números atômicos > 4
Espectrometria de energia dispersiva com TEM (TEM-EDS - Energy-dispersive spectrometry)	0,01- 0,5	0,1%	Números atômicos > 5
Espectrometria de próton induzido por emissão de raios-X (PIXE – Proton – induced X – Ray emission spectrometry)	> 5	0,1%	Número atômico > 10
Espectrometria de massa a laser microsonda (LAMMS - Laser microprobe mass spectrometry)	> 1	10 ppm	Todos os elementos
Espectrometria de massa de íons secundários (SIMS -Secondary ion mass spectrometry)	> 5	10 ppm	Elemento capaz de emitir luz
Espectrometria de elétrons por sonda (AES - Auger electron spectrometry)	0,1	0,1%	Números atômicos > 3 (amostras inferiores devem ser condutoras)
Espectrometria de foto induzida de elétrons por raios – X (XPS ou ESCA -X-ray-induced photo-electron spectrometry)	> 5	0,1	Composição da superfície (3 – 5 nm de profundidade) Erro comum de contaminação
Composição Cristalográfica das Partículas			
Difração de raios-X (XDR)	Estrutura	NA	Somente de material cristalino; as partículas devem ser > 0,05μm ou elas vão parecer amorfas
Espectrometria de foto induzida de elétrons por raios– X (XPS ou ESCA -X-ray-induced photo-electron spectrometry)	Estrutura	NA	Necessita de normas adequadas para o recolhimento de filtros não interagentes
Difração de raios-X em área selecionada com TEM (TEM – SAED - Selected area electron diffraction)	≈ 0,3	NA	Somente material cristalino

2.7 Efeito da estabilidade de transferência metálica sobre geração de respingos em soldagem MIG/MAG por curto-circuito

Dentre os parâmetros que influenciam a transferência por curto-circuito, cita-se a tensão de soldagem, a indutância e o gás de proteção. A influência da tensão de soldagem na estabilidade da transferência reside na proporcionalidade desta com o comprimento de arco. Como exemplo da influência do comprimento do arco sobre a estabilidade da transferência metálica, pode-se citar um trabalho de Baixo e Dutra (1991) citados por Souza et al. (2011), no qual se explica o mecanismo de geração de respingos em arcos muito curtos operando no modo de transferência por curto-circuito. Segundo estes autores, em comprimentos de arco muito pequenos, o tempo de arco (tempo em que ocorre a fusão do eletrodo) torna-se muito pequeno. Ao ocorrer o contato com a poça de fusão, a extremidade fundida do eletrodo ainda pode se encontrar em um estágio de fusão impróprio à transferência. Quanto mais prematuro o contato, maior o tempo para que o calor gerado por efeito Joule na ponte de ligação gere sua fusão, promovendo um maior valor de pico da corrente de curto. Ainda segundo estes autores, outro efeito seria uma pressão da extremidade fundida do eletrodo na poça de fusão devido ao constante avanço do arame durante o curto-circuito. Como resultado, há um deslocamento continuado da posição relativa da linha de fusão e geração de uma perturbação excessiva do metal fundido na poça metálica.

A indutância é uma propriedade que o circuito elétrico possui de resistir à variação da corrente. Souza et al. (2011) explicam que esta propriedade é de extrema importância para o processo MIG/MAG quando operando em curto-circuito, pois o efeito da indutância, que é o de variar a taxa de crescimento/decrescimento da corrente, afeta diretamente o comportamento de destacamento das gotas. No processo por curto-circuito, a estabilidade da transferência e, em boa parte, a formação de respingos estão fortemente relacionados ao efeito indutivo. Ainda segundo Souza et al. (2011), em soldagem não é possível se basear somente numa regulagem de um valor de indutância na fonte, pois a indutância do sistema não depende só do circuito da fonte, mas também do próprio arco, cabos, etc.

Ainda de acordo com Souza et al. (2011), em seus estudos explicam que misturas com de dióxido de carbono, comumente argônio entre 18 a 25% de CO₂, são usadas para transferência por curto-circuito. Porém, Stenbacka e Persson (1989) citados por Souza et al. (2011) demonstram que mais do que 15% de CO₂ no gás de proteção desestabilizam a transferência metálica e aumentam a quantidade de respingos, ou seja, torna o processo menos regular como é mostrado na Fig. 2.19.

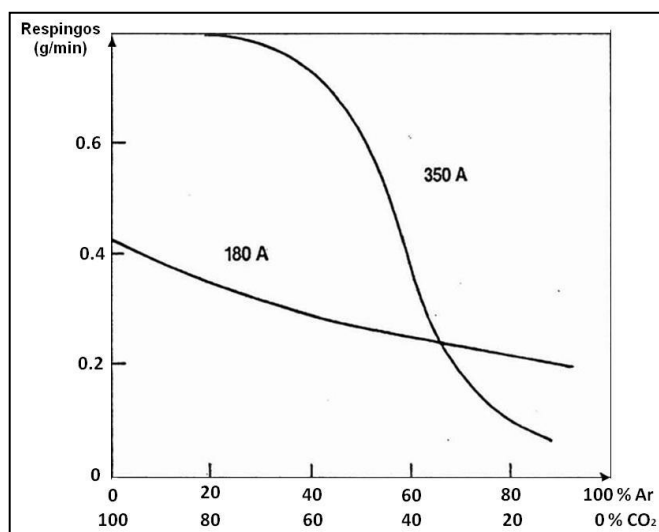


Figura 2.19 - Efeito do teor de CO₂ no gás de proteção sobre a taxa de geração de respingos, para soldagem MIG/MAG convencional utilizando arame-eletrodo maciço (STENBACKA; PERSSON, 1989 apud SOUZA et al., 2011)

Ainda segundo Souza et al. (2011), em seus estudos concluíram que:

- a) A estabilidade da transferência metálica é dependente do gás de proteção e da tensão de soldagem, mas esses parâmetros não afetam as taxas de subida e descida da corrente quando a posição de regulação do efeito indutivo é mantida fixa (possível em fontes eletrônicas);
- b) Por outro lado, as correntes de pico e os tempos de curto-circuito se afastam muito da média em situações onde a transferência está instável (transferências irregulares que acontecem em comprimentos de arco curtos ou longos demais), provocando grandes oscilações na poça e respingos;
- c) Regulagens que promovem taxas de subida e descida maiores resultaram em transferências mais regulares independente do gás de proteção utilizado. Porém, nestas condições a transferência é mais abrupta, provocando mais oscilações da poça de fusão.

Segundo Ponomarev et al. (1997), a estabilidade do processo de soldagem MIG/MAG é avaliada por três fatores: estabilidade do arco, estabilidade da transferência metálica e comportamento operacional do processo de soldagem. E estes fatores se relacionam de forma muito próxima e complicada. Desta maneira, surgiu-se a necessidade de desenvolvimento de índices para indicar estabilidade/instabilidade de ocorrência dos fenômenos indicados anteriormente. Um critério denominado “Laprosolda para quantificar a estabilidade de transferência por curto-circuito no processo de soldagem MIG/MAG” foi descrito por Resende et al. (2011). Este critério se baseia na premissa de que a estabilidade

da transferência por curto-circuito está ligada com a constância dos tempos em curto-circuito e com arco aberto, assim como com o fato de que cada gota ao se destacar tenha um volume apropriado para haver a ação da tensão superficial para se obter a transferência.

Assim, esse critério tem de satisfazer dois parâmetros, a saber:

- a) Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência por Curto-circuito, cujo símbolo é IV_{cc} : o meio para determinar o IV_{cc} é através dos coeficientes de variação dos tempos de curto-circuito (t_{cc}) e de arco aberto (t_{ab});
- b) Faixa admissível de tamanho de gota em transferência por curto-circuito (que garantiria uma transferência dominada pela tensão superficial), cujo símbolo é $\varnothing g$. O meio para determinar $\varnothing g$ é pela faixa de frequências máxima e mínima calculadas, a partir da velocidade de alimentação, diâmetro e densidade do arame, para atingir o tamanho de gota para uma transferência adequada (para arames de 1,2 mm de diâmetro, tem se assumido que as gotas calculadas devam ter diâmetros de 1,1 a 1,25 do diâmetro do arame, mas estes valores demandam maiores investigações).

Ainda segundo Resende et al. (2011), o postulado de que a estabilidade de transferência em soldagem MIG/MAG com curto-circuito pode ser medida por meio do índice Vilarinho de regularidade (IV_{cc}), desde que aplicado uma restrição baseada em um corte pelo afastamento do tamanho adequado das gotas. Assim, a faixa de regulagem de tensão que garanta uma maior estabilidade de transferência metálica em soldagem MIG/MAG por curto-circuito pode ser quantitativamente determinada e monitorada em uma linha de produção.

2.8 Formas de redução da geração de fumos

Rosado (2008) cita que uma maneira de reduzir a emissão de fumos na fonte é controlar fatores tais como temperatura da gota, composição do eletrodo e composição do gás de proteção. Ainda segundo o autor, para que haja uma redução na taxa de geração de fumos, a dimensão da gota e a sua temperatura têm de diminuir. Tais condições só aparecem no modo de transferência por spray ou numa zona de transição para spray. Mas na maior parte dos casos tal condição não é possível, pois esse tipo de transferência tem uma grande energia térmica e nem todas as ligações requerem tais condições de soldagem.

Jenkins, Mendez e Eagar (2005) afirmam que utilizando-se na soldagem gases de proteção com porcentagem baixa de gases ativos (baixando deste modo o potencial oxidante) também se pode reduzir muito a taxa de formação de fumos como é mostrado na

Fig. 2.20. Esta solução é apenas possível para os casos em que seja possível realizar a redução dos gases ativos, pois existem situações em que isto não é possível.

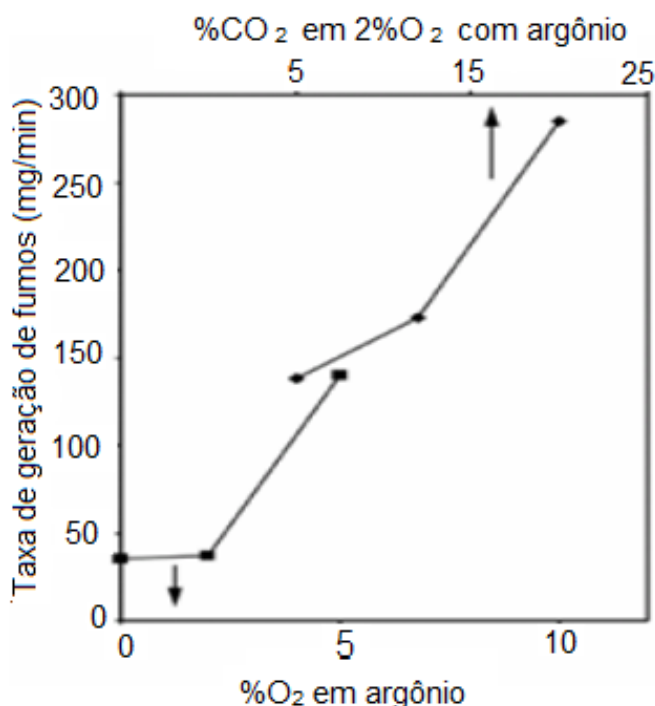


Figura 2.20 – Dependência da taxa de geração de fumos do gás de proteção, I=250 A (JENKINS; MENDEZ; EAGAR, 2005)

2.9 Concentração permissível de fumos (normas)

De acordo com Wallace, Fischbach e Kovein (1997), as fontes primárias de avaliação ambiental nos Estados Unidos, que podem ser utilizadas para o local de trabalho são:

- Segurança Ocupacional e Administração de Saúde (OSHA) com limites de exposição permissíveis (PELs);
- Instituto Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional (NIOSH) com limites de exposição (RELs);
- Conferência Americana de Higienistas Industriais (ACGIH) com limites de exposição (TLVs).

Ainda de acordo com os autores Wallace, Fischbach e Kovein (1997), os limites de exposição permissíveis (PELs) da norma OSHA são obrigados a considerar a viabilidade de controle de exposições em várias Indústrias onde os agentes são usados. Os limites de exposição (RELs) da norma NIOSH pelo contrário, são baseados primeiramente em preocupações relativa à saúde ocupacional. Os valores dos Limites de exposição valor teto

(TLVs) da norma ACGIH referem-se às concentrações de substâncias no ar e representam as condições sob as quais se acredita que quase todos os trabalhadores podem estar repetidamente expostos, dia após dia sem efeitos adversos à saúde.

Os autores descrevem que a norma ACGIH é uma sociedade privada e que os limites de exposição valor teto (TLVs) são diretrizes e que as indústrias estão legalmente obrigadas a atender apenas os limites de exposição específico (PEL) da norma OSHA. Em 1989, o limite de exposição permissível (PEL) da OSHA para fumos totais de soldagem era de 5 mg/m³ (5000 µg/m³) com uma média ponderada pelo tempo (TWA) de 8 horas. No entanto, este limite foi extinto e, atualmente, não é exequível. Ainda de acordo com os autores, desde 1989 a norma OSHA não têm restabelecido um limite de exposição permissível (PEL) para fumos totais de soldagem. No entanto, os limites de exposição permissíveis (PELs) foram definidos para vários componentes que podem serem encontrados em fumos de soldagem, como mostra a Tab. 2. 3.

Tabela 2.3 - Síntese dos limites selecionados de exposição ocupacional a fumos de soldagem (WALLACE; FISCHBACH; KOVEIN, 1997)

SUBSTÂNCIA	OSHA PEL-TWA (µg/m ³)	NIOSH REL-TWA (µg/m ³)	ACGIH TLV-TWA (µg/m ³)
Fumo de Alumínio	15.000(Total) 5.000(Respirável)	5.000	5.000
Arsênico	10	2 (Teto)	10
Bário	500	500	500
Berílio	2	0,5 (Teto)	2
Óxido de Cálcio	-	2.000	2.000
Fumo de Cádmio	5	LFC(Ca)	10 (Total) 2 (Respirável)
Cobalto	100	50	20
Cromo Hexavalente	-	1	50
Cromo Metal	1.000	500	500
Fumo de Cobre	100	100	200
Fumo de Óxido de Ferro	10.000 (Equivalente ao ferro)	5.000	5.000
Óxido de Magnésio	15.000	-	10.000
Manganês	5.000 (Teto)	1000	200
Molibdênio	5.000 (Solúvel) 15.000 (Insolúvel)	-	5.000 (Solúvel) 10.000 (Insolúvel)
Níquel	1000	15 (Ca)	1000
Chumbo	50	100	50
Fósforo	100	100	100
Platina	2 (Solúvel)	1000 (Metal) 2 (Solúvel)	1000

SUBSTÂNCIA	OSHA PEL-TWA ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NIOSH REL-TWA ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ACGIH TLV-TWA ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Selênio	200	200	200
Prata	10	10	100
Telúrio	100	100	100
Tálio	100	100 (Solúvel)	100
Dióxido de Titânio	15.000	LFC (Ca)	10.000
Pentóxido de Vanádio	100 (Teto)	50 (Teto)	50
Ítrio	1.000	1.000	1.000
Fumo de Óxido de Zinco	5.000	5.000	5.000
Zircônio	5.000		
Ítrio	1.000	1.000	1.000
Fumo de Óxido de Zinco	5.000	5.000	5.000
Zircônio	5.000	5.000	5.000
Fumos de Soldagem	-	LFC (Ca)	5.000

NOTA: OSHA – Segurança Ocupacional e Administração de Saúde (USA); ACGIH – Conferência Governamental de Higienistas Industriais (USA); NIOSH – Instituto Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional (USA); LFC - menor concentração possível; Ca – potencial cancerígeno ocupacional (NIOSH); TWA – média ponderada pelo tempo; PEL - limite de exposição permissível; TLV – valor teto do limite de exposição; REL – limites de exposição

Ainda de acordo com Wallace, Fischbach e Kovein (1997), a norma OSHA também estabeleceu os limites de exposição (PEL –TWA) para particulados totais de fumos de uma outra forma não regulamentada a uma concentração de $15 \text{ mg}/\text{m}^3$. A norma OSHA, descreve também que a média ponderada pelo tempo (TWA) refere-se a concentração média atmosférica de uma substância durante 8 horas normais para 10 horas/dia de trabalho e recomenda o uso do limite de exposição suplementar (STEL) ou os valores de teto que se destinam a complementar o limite TWA, onde não são reconhecidos os altos efeitos tóxicos de algumas substâncias para exposições a curta-duração. Por outro lado, a ACGIH (1994) citada por Wallace, Fischbach e Kovein (1997), estabeleceu os limites (TLV – TWA) para particulados totais de fumos de soldagem a concentração de $5 \text{ mg}/\text{m}^3$. Ainda segundo os autores, a norma ACGIH recomenda que conclusões baseadas na concentração total de fumos são geralmente suficientes se não há elementos tóxicos presentes na solda, ou no revestimento do metal e, se as condições não são favoráveis para a formação de gases tóxicos.

A norma NIOSH (2002) indica que não é possível estabelecer um limite de exposição para as emissões totais de fumos de soldagem, desde que as composições dos fumos e gases variarem consideravelmente e que os constituintes possam interagir para produzir

efeitos adversos à saúde. Portanto, a NIOSH sugere que os limites de exposição definidos para cada constituinte de fumos de soldagem devem ser utilizados de acordo com a Tab. 2.3.

De acordo com a Legislação Brasileira (Ministério do Trabalho e Emprego, 2009), a norma regulamentadora NR-9 (programa de prevenção de riscos ambientais) recomenda que na ausência dos limites de tolerância definidos na NR-15 (atividades e operações insalubres), devem ser utilizados os adotados pela ACGIH - Conferência Governamental de Higienistas Industriais (USA), ou aqueles que venham a ser estabelecidos em negociação coletiva de trabalho, desde que mais rigorosos do que os critérios técnico-legais estabelecidos. Como a NR-15 não se manifesta em relação a vários componentes presentes nos fumos devidos à soldagem e nem estabelece um único limite geral de exposição para fumos, recomenda-se adotar o limite de exposição de 5 mg/m^3 definido pela ACGIH.

2.10 Efeitos nocivos dos fumos na soldagem

De acordo com a revisão de Achebo e Oghoore (2011), o elemento químico alumínio, pode causar danos no pulmão, aumento de demência, esclerose lateral amiotrófica, demência de parkinson e de Alzheimer. O cádmio pode causar edema pulmonar grave e efeitos crônicos, tais como enfisema e danos nos rins. Uma exposição prolongada ao cromo podem provocar irritação da pele, ulceração do septo nasal e um maior risco de câncer de pulmão. O cobre pode causar irritação das vias respiratórias, náuseas, lesão pulmonar aguda e febre dos fumos metálicos. Em longo prazo, exposição a fluoretos podem causar alterações ósseas e deterioração conjunta. Uma exposição excessiva mais leve a fluoretos podem ter efeitos crônicos, tais como o edema pulmonar e erupções cutâneas. O ferro provoca irritação nas vias respiratórias e também é capaz de causar a Siderose, a acumulação benigna de óxido de ferro nos pulmões, levando a perturbações nas funções pulmonares, bem como diabetes. O manganês pode levar ao Manganismo (encefalopatia de manganês semelhante á doença de Parkinson). Os sintomas são irritabilidade, dificuldade em andar, distúrbios da fala, comportamentos compulsivos e cirrose hepática.

Ainda segundo os autores Achebo e Oghoore (2011), a exposição ao chumbo, pode levar a neuropatia periférica (danos que interrompe a comunicação entre o cérebro e outras partes do corpo e pode prejudicar o movimento muscular, impedir a sensação normal nas extremidades, e causar dores), que também afeta os sistemas urinário, gastrointestinal, reprodutivo e esquelético. O molibdênio pode causar irritação nas vias respiratórias e o comprometimento da respiração e o níquel pode causar irritação nos olhos e garganta e é um conhecido cancerígeno no trato respiratório. A carbonila de níquel é extremamente

tóxica por conta própria. Os fumos de estanho são conhecidos por esterase, a pneumoconiose benigna. O vanádio pode causar sintomas de irritação nos olhos e respiratória, bronquite, rinite, edema pulmonar e pneumonia. O zinco está presente em metais galvanizados e poderia conduzir à febre de fumos metálicos. O berílio pode causar a berilose (cicatrização dos pulmões impedindo a troca de oxigênio e dióxido de carbono e não há nenhuma cura conhecida), bem como o câncer de pulmão. O cobalto quando inalado pode causar asma, alterações pulmonares cumulativas e dermatite. O magnésio quando inalado, pode causar a febre dos fumos metálicos (calafrios, febre, dores musculares).

Os fumos também podem causar efeitos retardados, devido sua ação residual. No introdutório do documento “Nomination of Welding Fumes for Toxicity Studies” da AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS (2002) é dito que estudar a quantificação de alguns tipos de partículas de fumos através de autópsia do pulmão de soldadores, mas que muitas vezes estas medições são realizadas anos após a exposição do soldador a estas partículas, após cessar a exposição e já ter havido limpeza parcial. Uma vez que há um elevado teor de metais ferrosos magnéticos em fumos de soldagem, é possível fazer a medição destas partículas ferrosas nos pulmões utilizando-se de métodos não evasivo, como através de magnetometria. É dito ainda, citando artigo de KALLIOMÄKI et al.,(1983 a) apud AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS (2002) que foi estudado o efeito dessas partículas ferrosas em pulmões de soldadores trabalhando em estaleiros, usando o método de magnetometria. Eles descobriram que a taxa líquida de deposição alveolar de partículas por ano em soldadores em tempo integral foi estimada em 70 mg de ferro por ano, após 10 anos de soldagem, Entretanto, a massa média de partículas de metais ferrosos nos pulmões encontrada foi de 1 g, representando um equilíbrio entre a retenção e liberação. Em soldadores aposentados foram encontrados um teor de partículas variando de 10 a 20% do acumulado por ano.

2.11 Gerações de gases nos processos de soldagens

2.11.1 Introdução

Antonini et al. (2006), relataram que certos gases podem ser formados durante os processos de soldagem e podem afetar a saúde respiratória de soldadores. Os gases de proteção usados durante o processo MIG/MAG podem aumentar a radiação ultravioleta produzida no arco, levando à formação fotoquímica de gases potencialmente prejudiciais, tais como óxidos de nitrogênio e ozônio (O₃). Ainda de acordo com os autores, o dióxido de

carbono (CO_2) pode ser reduzido e convertido em monóxido de carbono (CO), um gás altamente tóxico. Além disso, a oxidação de vapores a partir de agentes desengordurantes que às vezes são utilizados para limpeza de metais de base na soldagem, podem produzir gases altamente tóxicos (por exemplo, o fosgênio).

Palmer (1989) citado por NIOSH (2002) explica que o ozônio (O_3) é um severo irritante respiratório. A exposição aos níveis acima de 0,3 ppm pode causar um desconforto extremo, enquanto se a exposição ocorrer a 10 ppm por diversas horas pode causar edema pulmonar. Steel (1968) citado por NIOSH (2002), em seus estudos sobre a medição da concentração (O_3) feitas em quarenta estaleiros, usando três diferentes processos de soldagem, encontrou uma concentração de ozônio na faixa de 0,1 a 0,6 ppm, um valor bem acima do nível de exposição permissível (PEL) da norma OSHA que é atualmente de 0,1 ppm. Em outros estudos, Nemacova (1984; 1985) citados por NIOSH (2002) encontrou níveis de concentração de ozônio (O_3) gerados por meio de diferentes soldagem e procedimentos de corte bem abaixo dos níveis (TLVs – ACGIH).

De acordo com Saito et al. (2000), os níveis de concentração de ozônio (O_3) produzidos durante a soldagem dependem não apenas dos métodos e materiais de soldagem, mas também do espaço onde a solda é realizada. Os níveis de concentração de ozônio (O_3) são prováveis de ser mais elevados em qualquer espaço confinado do que em espaço aberto. Portanto, os autores recomendam o uso de equipamento de proteção respiratória, anexado a um filtro de carvão ativado durante as operações de soldagem a arco, porque o filtro remove eficazmente o ozônio (O_3). Os autores citam dados bibliográficos para mostrar que as concentrações médias de ozônio (O_3) na zona de respiração do soldador foi de 1,27 ppm para o processo MIG utilizando alumínio e 0,28 ppm para o CO_2 em um aço carbono.

Villaume et al. (1979) citados por NIOSH (2002), explicam que os óxidos de nitrogênio podem ser irritantes para os olhos e para os pulmões quando inalados. Ichinose et al. (1997) citados por NIOSH (2002), descreveram que a exposição a elevadas concentrações de óxidos de nitrogênio pode causar irritação pulmonar severa e edema.

Segundo a norma NIOSH (2002), o monóxido de carbono (CO) é um gás incolor, inodoro e insípido produzido por queima incompleta de materiais que contém carbono, por exemplo, o gás natural. Os sintomas iniciais de envenenamento por monóxido de carbono (CO) podem incluir dor de cabeça, tonturas, sonolência e náusea. Estes sintomas iniciais podem avançar para vômitos, perda de consciência e colapso se o tempo de exposição for prolongado ou em altas exposições. Coma ou morte pode ocorrer se exposições elevadas continuarem. Smith (1991) citado por NIOSH (2002), explica que a toxicidade do monóxido de carbono (CO) é responsável pela formação da carboxihemoglobina (COHb), o que diminui a

capacidade do sangue de conduzir oxigênio aos vários tecidos do organismo. Sendo que se o nível de carboxihemoglobina no sangue alcançar 50 %, pode ocorrer inconsciência no indivíduo.

De acordo com a revisão de Saito et al. (2000), existem relatos que de 1 a 2% do dióxido de carbono (CO_2) utilizado como gás de proteção é decomposto em monóxido de carbono (CO) pela radiação ultravioleta e o calor. De seus experimentos, esses autores encontraram que a concentração de CO na região de respiração do soldador ficou entre 78 to 90 ppm, que supera o “excursion limit” (a máxima exposição que um indivíduo pode ter frente a um dado produto químico em um período de tempo) do OEL para CO recomendado pela ACGIH TLV-TWA (25 ppm). Estimaram ainda que uma exposição do soldador a esse nível de CO por 1 e 8 horas corresponderiam a concentrações de carboxyhemoglobina (COHb) no sangue de 3% e 11%, respectivamente [acredita-se que 5% de COHb no sangue já causaria efeitos supressivos no sistema nervoso central, o que seria alcançado, de acordo com Saito et al. (2000), em 2,5 horas em nível de 80–90 ppm de CO].

De acordo com a norma NIOSH (2002), o nível de monóxido de carbono (CO) pode ser muito elevado tanto em áreas bem como mal ventiladas.

2.11.2 Mecanismos de geração de gases

De acordo com a Norma NIOSH (2002), vários gases tóxicos são gerados durante os processos comuns de soldagem a arco, entre estes gases incluem-se o ozônio (O_3), óxidos de nitrogênio (NO), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) e o fosgênio. Villame et al. (1979) citados por NIOSH (2002), descreveram que os gases produzidos durante a soldagem têm diversas origens, dependendo dos processos específicos de soldagem e incluem:

- a) Gases de proteção;
- b) Produtos da decomposição de revestimentos e de núcleos dos eletrodos;
- c) Reação no arco com os constituintes atmosféricos;
- d) Reação da luz ultravioleta com os gases atmosféricos;
- e) Decomposição de agentes desengraxantes e de revestimentos orgânicos sobre o metal de base.

- Ozônio

A norma NIOSH (2002), explica que o ozônio pode ser produzido na maioria das operações de soldagem a arco, ocorrendo principalmente nas realizadas em ligas de

alumínio. O ozônio (O_3) é uma fórmula alotrópica do oxigênio. É produzido durante a soldagem a arco a partir do oxigênio atmosférico em uma reação fotoquímica induzida pela radiação ultravioleta emitida pelo arco elétrico. Edwards (1975) citado por NIOSH (2002), explica que esta reação fotoquímica é induzida em duas etapas pela radiação das ondas de comprimento menores que 210 nm:

a) $O_2 + \text{LUZ ultravioleta } (< 210 \text{ nm})$ produz $2O$

b) $O + O_2$ produz O_3

Pattee et al. (1973) citados por NIOSH (2002), descrevem que a taxa da formação do ozônio (O_3) depende dos comprimentos de onda e da intensidade da luz ultravioleta gerada no arco, que são afetados por sua vez pelo material que está sendo soldado, pelo processo de soldagem utilizado, pelo tipo de eletrodo usado, pelo gás de proteção e por variáveis da soldagem tais como a tensão, a corrente, e o comprimento do arco. Maizlish et al. (1988) citados por NIOSH (2002), descrevem que o ozônio (O_3) é instável no ar e sua decomposição é acelerada por emissões de óxidos metálicos. Portanto, as quantidades significativas do ozônio não são associadas geralmente com os processos de soldagem tais como Arame Tubular e Eletrodo Revestido, que geram grandes quantidades de fumos.

- Óxidos de Nitrogênio (NO)

Villaume et al. (1979) citados por NIOSH (2002) descrevem que os óxidos de nitrogênio (NO) são formados durante processos de soldagem pela oxidação direta do nitrogênio atmosférico nas altas temperaturas produzidas pelo arco ou chama. A primeira reação que ocorre é a formação do óxido nítrico (NO) pelo nitrogênio e o oxigênio como ilustra a Eq. 2.6:



Ainda segundo os autores, a taxa da formação do óxido nítrico (NO) não é significativa abaixo de uma temperatura de 1200 °C, mas aumentam com temperaturas mais elevadas. Após a diluição no ar, o óxido nítrico (NO) pode reagir com o oxigênio dando origem ao dióxido de nitrogênio como ilustra a Eq. 2.7:



- Dióxido de carbono e monóxido de carbono

Howden et al. (1988) citados por NIOSH (2002) explicam que o dióxido de carbono (CO_2) e o monóxido de carbono (CO) são formados pela decomposição de compostos orgânicos presentes nos revestimentos e núcleos dos eletrodos, e dos carbonatos inorgânicos presentes nos revestimentos. Ainda segundo os autores, o monóxido de carbono (CO) é encontrado frequentemente durante a soldagem de aços por eletrodos revestidos quando os revestimentos do eletrodo contêm o carbonato de cálcio (CaCO_3 -Cal) ou quando se utiliza o processo MIG/MAG com CO_2 ou com misturas Ar/ CO_2 como gás de proteção. Nas altas temperaturas do arco elétrico e na superfície do metal fundido, o dióxido de carbono (CO_2) é reduzido a monóxido de carbono CO por este ser quimicamente mais estável.

- Fosgênio

Hawden et al. (1998) citados por NIOSH (2002), descreveram que produtos químicos desengraxantes, tais como os hidrocarbonetos clorados são muitas vezes utilizados para assegurar a limpeza dos metais de base antes da solda e, que o tricloroetileno (CHClCCl_2) é um dos agentes comumente utilizados e têm uma elevada pressão de vapor. Villaume et al. (1979) citados por NIOSH (2002) explicam que os vapores provenientes do ar em torno do arco, são submetidos à uma oxidação que é reforçada pela radiação ultravioleta a partir do arco de soldagem para produzir um gás irritante pulmonar conhecido como fosgênio (COCl_2).

2.11.3 Métodos de medição de gases

A norma NIOSH (2002), explica que as medidas dos níveis de monóxido de carbono (CO) são feitas utilizando um Dataloger. Este instrumento utiliza um sensor eletroquímico e que o mesmo deve ser calibrado no dia das medições e zerado no campo.

Rosado, Pires e Quintino (2009), em seus estudos sobre a medição das emissões de gases na soldagem, utilizando o processo MIG/MAG, utilizaram um procedimento semelhante ao utilizado para as coletas de fumos (Fig. 2.2). Porém, as medições das emissões do gás monóxido de carbono (CO) e da geração de fumos originado do óxido nítrico (NO_x) foram feitas utilizando um analisador de combustão Testo 350 – S. A sonda de captação foi colocada como mostrada na Fig. 2.21.



Figura 2.21 – Coletor de fumos preparado para análise de emissões gasosas

2.11.4 Efeitos nocivos de gases na soldagem

Segundo a revisão de Achebo e Ogboore (2011), o ozônio (O_3) pode ser muito prejudicial à saúde, causando congestionamento pulmonar, edema, hemorragias. Concentrações mínimas podem secar os olhos e causar dores de cabeça. A exposição prolongada ao ozônio (O_3) pode resultar em alterações graves na função pulmonar. Os óxidos de nitrogênio (NO) podem causar irritação nos olhos, nariz e pulmão em concentrações de 20-25 ppm (partes por milhão). Em concentrações mais elevadas, podem causar edema pulmonar e outras doenças pulmonares graves. O monóxido de carbono (CO) é absorvido na corrente sanguínea causando palpitações, tonturas, dores de cabeça, confusão, e altas concentrações pode resultar em inconsciência e morte. O fluoreto de hidrogênio provoca irritação para os olhos e também para o trato respiratório. Uma superexposição pode causar danos nos pulmões, ossos e danos nos rins. Ainda segundo os autores, deficiência de oxigênio ocorre durante a soldagem em espaços confinados, causando deslocamento de ar, levando à tontura, confusão mental, asfixia e morte.

Ainda de acordo com os autores Achebo e Ogboore (2011), os vapores orgânicos produzidos durante a soldagem são aldeído, fosgênio e fosfina. Eles muitas vezes atuam como irritantes graves para os olhos, nariz e o sistema respiratório e também podem deteriorar os rins e outros órgãos.

CAPÍTULO III

EQUIPAMENTOS, DISPOSITIVOS E ACESSÓRIOS

3.1 Equipamentos de soldagem

a) Para o processo MIG/MAG convencional:

O equipamento de soldagem utilizado foi um de uso comercial, ilustrado na Fig. 3.1, o qual permite a realização de uma série de processos de soldagem, tais como, ao arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW), o MIG/MAG, eletrodo tubular (FCAW), entre outros. Todos os modos de seleção de programas da máquina encontram-se disponíveis no visor do cabeçote, fazendo com que a operação de seleção do processo ocorra de forma simples pelo usuário. Para a realização deste trabalho, foi selecionado o programa de número cinco (MIG/MAG convencional com proteção gasosa e com polaridade positiva). Para este programa, que faz a fonte operar no modo de tensão constante, se regula a tensão, a velocidade de alimentação do arame e o fator indutivo.



Figura 3.1 - Equipamento usado para soldagens MIG/MAG convencionais (Lincoln Power Wave 455 STT)

Antes da utilização do mesmo, regulou-se a velocidade de alimentação em 3,0 m/min e mediu-se os tempos de 15,66, 15,81 e 15,81 segundos para o arame percorrer uma distância de 783 mm, proporcionando uma velocidade média de 3,0 m/min (assumindo uma

casa decimal, coerente com a escala de regulagem do equipamento) ou $2,98 \pm 0,02$ m/min. Já a tensão de regulagem foi aferida com um multímetro de precisão, com a fonte em vazio. O efeito do fator indutivo é mais difícil de ser determinado, pois é um valor de regulagem cujo efeito sobre o desempenho da soldagem depende das condições operacionais (gases de proteção, arame, corrente, comprimento de arco, etc.)

b) Para o processo MIG/MAG CMT, sinérgico e pulsado:

Para estas versões operacionais do processo MIG/MAG, foi utilizado outro equipamento comercial de soldagem, que é uma fonte inversora totalmente digitalizada, com comando microprocessado. Cada modo de operação é feito pela escolha do programa adequado no painel de controle: “CMT/CMT – PULSE” para o processo MIG/MAG CMT; “SYNERGIC” para o sinérgico; e “PULSE SYNERGIC” para o pulsado.

3.2 Tocha de soldagem

Durante a realização de soldagens utilizando o processo MIG/MAG convencional, foi utilizada uma tocha automática modelo Aut 241, fabricada pela TBI, com refrigeração a ar, com capacidade de trabalho de 290 A com misturas e 310 A com CO_2 . Durante a realização de soldagens semi-automáticas, utilizando o processo MIG/MAG convencional, foi utilizada uma tocha manual do modelo MB 24 KD, fabricada pela BINZEL, com refrigeração a ar. Durante a realização de soldagens nos modos CMT, sinérgico e pulsado, foi utilizada uma tocha automática, modelo Pull MIG CMT, com refrigeração à água. Durante a realização de soldagens em local confinado (simulação de uma célula de soldagem automatizada), utilizando o processo MIG/MAG convencional, foi utilizada uma tocha automática do modelo AUT 501 D, fabricada pela BINZEL, com refrigeração à água.

3.3 Equipamento para coleta de fumos

Os fumos de soldagem foram coletados através de um Coletor de Fumos que atende a norma AWS F.2: 2006, ilustrado na Fig. 3.2. O ensaio consiste em coletar fumos gerados durante a realização de cordões de solda sob condições pré-estabelecidas pela referida norma, que contempla toda a parametrização utilizada para a execução dos testes.



Figura 3.2 – Coletor de fumos de soldagem do Laprosolda/UFU, com detalhes da mesa rotatória e do suporte para colocação do filtro coletor de fumos

O coletor de fumos é composto por elementos tais como:

- a) Uma mesa giratória de 500 mm de diâmetro, movimentada por um eixo central, conectado a um motor de corrente contínua através de uma transmissão composta de correia e polias dentadas, sendo uma fixa no eixo do motor (com 10 dentes) e outra fixa no eixo da mesa giratória (de 60 dentes ou 30 dentes, com suas respectivas correias dentadas). O motor de corrente contínua é alimentado por um controlador, que possui um potenciômetro de dez posições, permitindo variar a velocidade de rotação da mesa entre 0,11 e 1,46 rpm ao se usar a engrenagem de 60 dentes, ou entre 0,22 e 2,92 rpm, ao usar a engrenagem menor;
- b) Uma coifa móvel, no formato de tronco de cone, posicionada sobre a mesa giratória, que possibilita a condução dos fumos na direção do filtro;
- c) Um suporte para fixação de uma manta (filtro, como ilustrado na Fig. 3.3), utilizada para coleta dos fumos, situado entre a base menor da coifa e do sistema de exaustão;
- d) Um sistema de sucção, capaz de regular e manter uma vazão constante entre 709 e 989 litros/minuto, através de um manômetro com escala de 0 a 54,7 mmH₂O (0 a 2,0 inH₂O), conectado ao tubo de sucção, com a função de indicar a vazão imposta pelo sistema de sucção, e outro manômetro (com escala de 0 a 254 mmH₂O (0 a 10 inH₂O), conectado à câmara de sucção, com a função de

indicar a queda de pressão que o filtro causa à medida que o mesmo coleta os fumos durante a execução do teste.

Mais detalhes sobre o equipamento utilizado neste trabalho podem ser obtidos no relatório de Fernandes, Scotti e Vilarinho (2009).



Figura 3.3 – Ilustração do aspecto de uma manta (filtro) usada para coleta de fumos, após soldagem

A quantificação dos fumos durante os ensaios é realizada por meio dos filtros compostos de fibra de vidro, com diâmetro de 305 ± 5 mm, cujo material deve estar de acordo com as especificações da norma ASTM C 800 – Specification for Glass Fiber Blank Insulation. Os filtros foram ressecados em uma estufa, à uma temperatura de 100°C , durante uma hora. A quantidade gerada de fumos foi obtida através da diferença de massa do filtro antes e após a realização de cada teste, observando-se o tempo de execução do teste (tempo de arco aberto). Para tal, os filtros foram pesados em uma balança, com resolução de 0,01 g e capacidade de 2000 g. Os resultados obtidos das coletas, para os cálculos da taxa de geração de fumos, foram expressos pela média resultante de no mínimo três experimentos válidos.

O coletor de fumos foi devidamente aferido antes de usado, conforme instruções da própria norma AWS F1.2:2006 (AWS, 2006). A Tab. 3.1 apresenta os valores esperados de taxa de geração de fumos para diferentes regulagens de tensão. De acordo com a norma, estes valores devem ser alcançados ao serem usadas as seguintes regulagens: arame AWS ER70S-3 de 1,2 mm de diâmetro; velocidade de alimentação de $7,6 \pm 0,2$ m/min; distância bico de contato-peça (DBCP) de $19 \pm 0,5$ mm; corrente de 225 ± 10 A; proteção com CO_2 puro à uma vazão de $17,5 \pm 1,5$ l/min; e velocidade de soldagem (V_s) de 35 ± 2 cm/min.

Tabela 3.1 - Valores nominais da taxa de fumos gerada para a calibração do coletor de fumos em função da tensão, segundo a norma AWS F1.2:2006

Tensão do Arco (V)	Taxa de Geração de Fumos (g/min)
24	0,32 ± 20%
26	0,43 ± 20%
28	0,61 ± 20%

Durante a aferição, foi utilizada uma tensão de 24 V, uma distância bico contato-peça (DBCP) de 19 mm, gás de proteção 100% CO₂ a uma vazão de 19 l/min, velocidade de alimentação do arame de 7,8 m/min. Estas regulagens levaram a uma corrente média de aproximadamente 225 A e a uma taxa de geração de fumos de 0,35 g/min, valores considerados aceitáveis pela norma.

A rotação da mesa giratória foi também aferida antes dos testes. Procurou-se encontrar a velocidade de rotação (ω_M) em função da posição do potenciômetro, como mostrado na Tab. 3.2. A Fig. 3.4 ilustra a curva de calibração definida pela equação $y = 1,0417x - 1,9028$ (rpm).

Tabela 3.2 – Tempo para a mesa completar uma volta completa em função da posição do potenciômetro

Posição	3	4	5	6	7	8	9	10
Tempo (s)	5:42;56	2:47;53	1:52;72	1:25;44	1:11;78	58;25	50;22	44;54

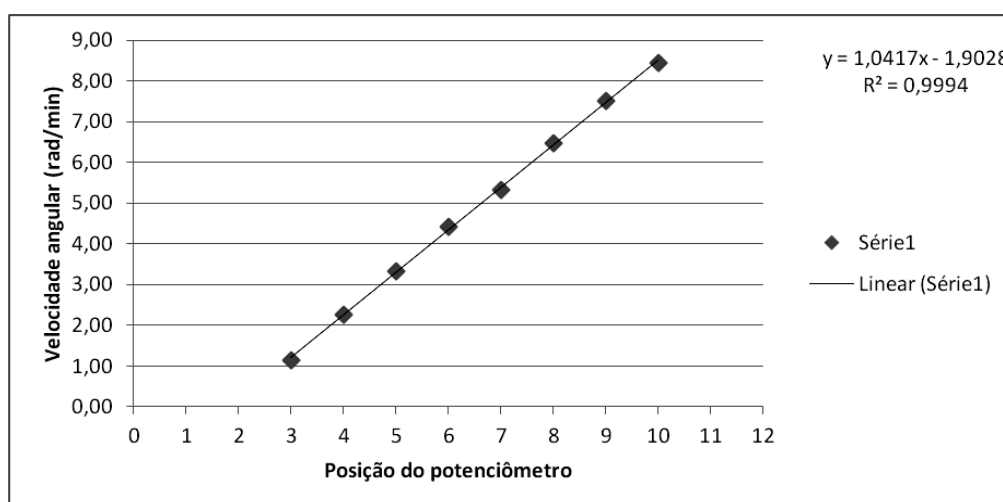


Figura 3.4 - Velocidade angular em função da posição do potenciômetro para a mesa giratória, usando-se a engrenagem de 60 dentes (devido à necessidade de manutenção da mesa do coletor de fumos, foi necessário se fazer uma nova calibração antes da etapa de avaliação da geração de gases, como será mostrada no item 3.5.3).

3.4 Equipamentos para determinação da composição dos gases

A medição dos gases foi feita por um analisador de gases comercial (Fig. 3.5(a)) usado para medições de emissões em escapamentos automobilísticos. Esse equipamento tem a seguinte faixa nominal de medição:

- CO (Monóxido de Carbono) = 0- 15%
- CO₂ (Dióxido de Carbono) = 0 -20%
- HC (Hidrocarbonetos Hexano) = 0 – 20000 ppm
- O₂ (Oxigênio) = 0 - 25%



(a)



(b)

Figura 3.5 - (a) Analisador de gases modelo PC MULTIGÁS, marca NAPRO (ELETRÔNICA INDUSTRIAL LTDA); (b) detalhes da sonda de captação dos gases

Mesmo considerando haver um laudo de aferição do equipamento (ver anexo A), antes de aplicá-los procurou-se aferi-lo novamente, comparando-se suas medidas com as de outro medidor de gases dedicado a gases de soldagem (Oxybaby 6 da WITT, Fig. 3.6) como referência. As medidas foram feitas simultaneamente, usando-se três misturas produzidas com um misturador de gás, sendo elas Ar+12%CO₂, Ar+15%CO₂ e Ar+ 5%O₂.



Figura 3.6 - Analisador de gases modelo Oxybaby 6.0 - O_2/CO_2 , marca WITT-GASETECHNIK GmbH&Co KG

Para garantir a homogeneidade da mistura, as medidas foram feitas dentro de uma garrafa PET (ver Fig. 3.7) com volume de 1,5 litros, onde a mistura vinda do misturador de gases foi injetada na parte inferior da garrafa através de um furo (a conexão foi devidamente vedada com silicone). Na saída (boca da garrafa PET), as ponteiros das duas sondas dos medidores (PC-Multigás e Oxybaby 6) foram inseridas para fazer as medições (cerca de 3 cm abaixo do nível da boca da garrafa). A garrafa permaneceu na vertical com a boca para cima na intenção de expulsar o ar previamente contido na garrafa com a mistura (mais densa que o ar ambiente). Assim, as medidas foram realizadas após inflar gás na garrafa por 3 minutos a uma vazão de 15 l/min. As medições da mistura $Ar+12\%CO_2$ encontram-se na Tab.3.3, para a mistura $Ar+15\%CO_2$ na Tab. 3.4 e para a mistura $Ar + 5\%O_2$ na Tab. 3.5.



Figura 3.7 – Dispositivo utilizado para garantir a mistura dos gases para as medições durante a aferição do PC-MULTIGÁS

Tabela 3.3 - Aferição do PC-MULTIGÁS usando como referência o Oxybaby 6 com a mistura Ar+12%CO₂

Medições	OXYBABY		PC-Multigás		
	O ₂	CO ₂	O ₂	CO ₂	CO
1	0,0	12,1	0,1	12,1	0,02
2	0,0	12,0	0,0	12,0	0,02
3	0,0	12,0	0,1	11,9	0,00
4	0,0	11,8	0,0	11,9	0,01
Média	0,0	12,0	0,1	12,0	0,01
Desvio Padrão	0,0	0,1	0,1	0,1	0,01

Tabela 3.4 - Aferição do PC-MULTIGÁS usando como referência o Oxybaby 6 com a mistura Ar+15%CO₂

Medições	OXYBABY		PC-Multigás		
	O ₂	CO ₂	O ₂	CO ₂	CO
1	0,0	14,8	0,0	14,9	0,02
2	0,0	14,9	0,0	15,0	0,00
3	0,0	14,8	0,0	15,0	0,01
4	0,0	14,7	0,1	14,9	0,00
Média	0,0	14,8	0,0	15,0	0,01
Desvio Padrão	0,0	0,1	0,1	0,1	0,01

Tabela 3.5 - Aferição do PC-MULTIGÁS usando como referência o Oxybaby 6 com a mistura Ar+ 5%O₂

Medições	OXYBABY		PC-Multigás		
	O ₂	CO ₂	O ₂	CO ₂	CO
1	4,3	0,1	4,5	0,0	0,02
2	4,3	-0,1	4,4	0,0	0,02
3	4,3	-0,1	4,4	0,0	0,02
4	4,3	-0,1	4,4	0,0	0,02
Média	4,3	-0,1	4,4	0,0	0,02
Desvio Padrão	0,0	0,1	0,1	0,0	0,00

Os valores das medições de O₂ e CO₂ das misturas utilizadas durante a aferição do analisador de gases PC – Multigás coincidiram com os valores de O₂ e CO₂ das medições com o Oxybaby 6.

3.5 Dispositivo para coleta de gases

3.5.1 Avaliação de desempenho da coifa coletora de fumos do laprosolda para medição da emissão de gás pelos processos de soldagem

Inicialmente foi feita uma adaptação da coifa, como é mostrado na Fig. 3.8, para posicionar a sonda do analisador de gases. Nessa adaptação, foi usado um suporte metálico feito de metalon com dimensões de 450x40x20mm, instalado numa posição vertical, com furos nas mesmas dimensões da ponteira da sonda de captação de gases do analisador de gases, de tal forma a permitir se avaliar a melhor posição para colocação da sonda.

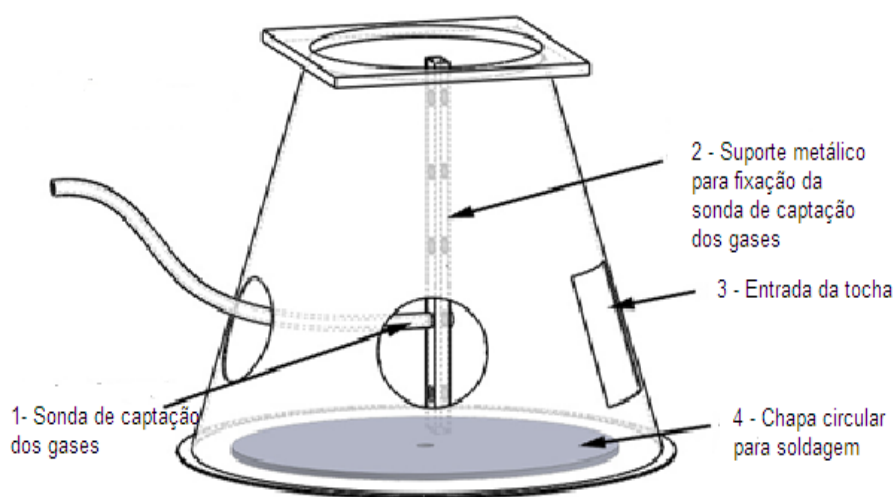


Figura 3.8 – Montagem do suporte metálico na coifa coletora de fumos para posicionar a sonda em relação à posição da tocha

Como os gases de soldagem a serem utilizados neste trabalho (Ar, CO₂ e mistura Ar+CO₂) são mais densos do que o ar [1,78 Kg/m³ para o Ar, 1,98 Kg/m³ para CO₂, contra 1,2 Kg/m³ para o Ar atmosférico, segundo Scotti e Panomarev (2008, p. 98)] para se usar a coifa da coleta de fumos seria necessário o uso de exaustão. Outra adaptação feita na coifa foi a retirada do filtro, permitindo que se fizesse uma sucção sem grandes perdas de carga. A Fig. 3.9 mostra a vista externa da coifa, com destaques para o manômetro da esquerda, que indica a pressão de sucção (proporcional à vazão) na saída da coifa e para o regulador da vazão.



Figura 3.9 – Vista da montagem do coletor de fumos adaptada para medição de emissão de gases

As medições iniciais foram feitas colocando-se a sonda numa posição central do suporte ($d = 180$ mm da chapa circular). Sem abrir arco, liberou-se pela tocha a mistura Ar +15% CO_2 , a uma vazão de 14l/min. A vazão do gás de proteção foi medida através de um medidor digital que usa turbinas, calibrado anteriormente por um bibímetro. A medição dos gases emitidos foi após alguns segundos da vazão de sucção do gás de proteção, iniciando com uma vazão de sucção zero e progressivamente aumentando-a. Os resultados deste procedimento são mostrados na Tab. 3.6. Por essa tabela, observa-se que a leitura progressivamente aumenta proporcionalmente ao aumento da vazão de sucção, até atingir um valor máximo, quando o manômetro marcava em torno de 0,3 e 0,4inH₂O, caindo em seguida. Pode-se deduzir que o aumento inicial da concentração de CO_2 se deva ao efeito da sucção, que fez trazer CO_2 do gás de proteção (mais denso que o ar atmosférico) para perto da sonda de captação. Mas, ao se aumentar muito a vazão, a sucção do ar atmosférico também aumenta progressivamente, fazendo-se diluir a mistura medida, uma vez que a concentração de CO_2 não tem como aumentar, pois a vazão do gás de proteção é constante.

Tabela 3.6 – Concentração de CO₂ medido na sonda em função do aumento da vazão de sucção (medida pela pressão da saída da coifa) utilizando-se uma mistura Ar +15% CO₂, a uma vazão de 14l/min

Pressão (in H ₂ O)	CO ₂ (% Vol.)
0,00	0,0
0,10	0,4
0,20	0,7
0,30	0,8
0,40	0,8
0,50	0,7
0,60	0,6
0,70	0,6
0,50	0,5
0,30	0,5

Foram feitas novas medições de concentrações de CO₂, como é mostrado na Tab. 3.7, utilizando como gás de proteção ainda uma mistura de 15%CO₂, mas a uma vazão de 20l/min, com sucção em torno de 2.0 inH₂O entre as medições para limpar os gás residual. O ponto ótimo para as medidas de concentrações de CO₂ ficou entre as vazões de sucção 0,0375 e 0,05, vazão muito menor do que a medição anterior (Tab. 3.6).

Tabela 3.7 – Concentração de CO₂ medido na sonda em função do aumento da vazão de sucção (medida pela pressão da saída da coifa) com gás de proteção Ar + 15%CO₂ e vazão de 20l/min

Pressão (inH ₂ O)	CO ₂ (% Vol.)
0	0,1
0.0125	0,7
0,0375	0,9
0,05	0,9
0,10	0,8
0,25	0,8
0,30	0,5
0,40	0,5
0,50	0,5
0,00	0,1

Verificou-se haver um ponto ótimo para a vazão de sucção, o qual se mostrou diferente quando a vazão do gás foi diferente e seria provavelmente desigual se o arco estivesse aberto (gases mais quente, com menor densidade). Mas, de qualquer forma, a leitura foi muita pequena (baixa sensibilidade), provavelmente devido ao tamanho da coifa

coletora. Além disto, como a sonda ficaria fixa no centro, mas a tocha variaria de posição radialmente, haveria uma fonte adicional de erro. Por todas estas razões preferiu-se abandonar a ideia de se utilizar a coifa do sistema de coleta de fumos para a medição da emissão de gases.

3.5.2 Projeto e avaliação de uma coifa especial para coleta de gases de soldagem

Uma coifa especial de menor tamanho, dimensões de 260 mm de diâmetro na base, 55 mm de diâmetro na saída dos gases e 180 mm de altura, conectada a uma mangueira de 2000 mm de comprimento e 55 mm de diâmetro, como é mostrado na Fig. 3.10, foi projetada com a finalidade de fazer coletas de gases. O mesmo sistema de sucção dos gases e a mesma mesa rotacional e fixadores das tochas foram preservados do equipamento para medição de fumos. Durante a realização das medições do gás CO_2 (dióxido de carbono) utilizando o processo MIG/MAG convencional, foi utilizada a mesma tocha utilizada durante as coletas de fumos, mantendo-se as mesmas condições de soldagens em relação ao cordão de solda e o ângulo de ataque. A sonda coletora de gases foi neste caso montada na mangueira de sucção (Fig.3.11) em posição fixa, frente à redução do volume da coifa coletora.



Figura 3.10 – Montagem da coifa especial coletora de gases no equipamento para medição de emissão de fumos



Figura 3.11 – Detalhe da posição de montagem da sonda de captação de gases

As medições iniciais foram feitas sem abertura de arco, após alguns segundos da vazão de sucção do gás de proteção, iniciando com uma vazão de sucção zero e progressivamente aumentando-a até o valor desejado (utilizando-se sucções de purga em torno de 2.0 inH₂O entre cada medição, visando limpar o sistema de gases residuais das medição anteriores).

As Tab. de 3.8 a 3.11 mostram a concentração de CO₂, utilizando como gás de proteção Ar + 15%CO₂, 100%CO₂ novamente Ar + 15%CO₂, mas com menor vazão, e Ar + 5%CO₂. Pode-se perceber que a maior concentração foi obtida a uma vazão de sucção medida como 0,0125 inH₂O em todos os casos. Também que quanto maior o teor de CO₂ no gás de proteção, maior a quantidade de CO₂ captada. É importante ressaltar que para valores de sucção baixos (menores que 0,05 inH₂O), houve oscilações de grandeza considerável nas medições de teor de CO₂ para todas as misturas. Porém, os valores citados nas tabelas são os valores mais estáveis observados durante as medições. Mas, para valores a partir de 0,05, a constância dos valores é considerável.

Tabela 3.8 – Concentração de CO₂ medido na sonda em função do aumento da vazão de sucção (medida pela pressão da saída na coifa especial), utilizando como gás de proteção Ar + 15%CO₂ e vazão de 14l/min, com sucção de purga entre as medições

Pressão (inH ₂ O)	CO ₂ (% Vol.)
0,00	0,5
0,0125	1,3
0,025	1,2
0,0375	1,0
0,050	0,8
0,10	0,6
0,25	0,4
0,30	0,4
0,30	0,4
0,40	0,3
0,50	0,3
0,50	0,3
0,60	0,3
0,70	0,3

Tabela 3.9 – Concentração de CO₂ medido na sonda em função do aumento da vazão de sucção (medida pela pressão da saída da coifa especial) utilizando como gás de proteção 100%CO₂, vazão de 14l/min, e vazões de sucção de purga em torno de 2.0 inH₂O entre cada medição

Pressão (inH ₂ O)	CO ₂ (% Vol.)
0,00	0
0,0125	16,3
0,025	11,3
0,05	8,3
0,10	5,7
0,25	3,6
0,50	2,5
0,75	2,0
1,0	1,3

Tabela 3.10 – Concentração de CO₂ medido na sonda em função do aumento da vazão de sucção (medida pela pressão da saída da coifa especial) utilizando como gás de proteção a mistura Ar + 15%CO₂, vazão de 8 l/min e vazões de sucção de purga em torno de 2.0 inH₂O entre as medições

Pressão (inH ₂ O)	CO ₂ (% Vol.)
0,00	0,5
0,0125	1,5
0,025	1,2
0,05	1,0
0,10	0,6
0,25	0,4
0,30	0,3
0,40	0,3
0,50	0,3
0,50	0,3
0,40	0,3
0,30	0,3
0,0125	1,5

Tabela 3.11– Concentração de CO₂ medido na sonda em função do aumento da vazão de sucção (medida pela pressão da saída da coifa especial) utilizando como gás de proteção Ar+ 5%CO₂, vazão de 14l/min, e vazões de sucção de purga em torno de 2.0 inH₂O entre as medições

Pressão (inH ₂ O)	CO ₂ (% Vol.)
0	0,1
0,0125	0,4
0,0250	0,3
0,05	0,2
0,10	0,2
0,25	0,1
0,30	0,1
0,40	0,1
0,50	0,1
0	0,1
0,0125	0,4
0,0250	0,3
0,05	0,2

A Tab. 3.12 mostra a concentração de CO₂ em uma replicagem utilizando-se como gás de proteção Ar + 15%CO₂, mas agora com uma vazão maior, de 20l/min. Percebe-se como esperado, um aumento do teor de CO₂ captado (de 1,5% para 2,0%).

Tabela 3.12 – Concentração de CO₂ medido na sonda em função do aumento da vazão de sucção (medida pela pressão da saída da coifa especial) utilizando como gás de proteção a mistura Ar + 15%CO₂, vazão de 20 l/min e vazões de sucção de purga em torno de 2.0 inH₂O entre as medições

Pressão (inH ₂ O)	CO ₂ (% Vol.)
0,00	0,4
0,0125	2,0
0,0375	1,7
0,05	1,6
0,10	1,2
0,25	0,7
0,30	0,6
0,40	0,6
0,50	0,5
0,0375	1,8
0,0125	2,0
0,00	0,3

A coifa especial mostrou uma maior sensibilidade do que a coifa grande usada em ensaios de coleta de fumos e que foi possível determinar um ponto ótimo para as medidas de concentrações de CO₂ (vazão de sucção de 0,0125), independente do gás e da vazão. Porém, ainda com uma sensibilidade baixa, já que mesmo para a proteção com 100% de CO₂, o teor medido de CO₂ ficou em torno de 16%, caindo para menos de 2% quando se usou uma mistura Ar + 15%CO₂. O teor de CO seria, com certeza, muito baixa. Desta forma, optou-se por tentar aperfeiçoar ainda mais o coletor de gases.

3.5.3 Modificação da coifa especial com a finalidade de se obter maior sensibilidade das medidas de CO₂ (dióxido de carbono) e CO (monóxido de carbono)

Inicialmente, testou-se mudar a sonda da posição mostrada na Fig. 3.11 para um plano próximo da tocha (Fig. 3.12), preservando-se ainda a mesma mesa rotacional e fixadores das tochas do equipamento para medição de fumos. Utilizando como gases de proteção 100%CO₂ e 25%CO₂, sem arco e pressão de sucção zero, procurando-se variar a posição da sonda em relação à tocha, no sentido horizontal, para uma distância que desse uma maior concentração de CO₂. A distância ideal foi de 70 mm, como ilustra a Fig. 3.13.

Porém, foi verificado que o valor de CO_2 não se estabilizava com o tempo, fato justificado pelas maiores densidades dos gases em relação ao ar atmosférico e a falta de sucção (a câmara permite que o ar mais denso vá ocupando o espaço do ar menos denso, mas progressivamente). O uso de qualquer sucção mostrou ser suficiente para diluir o gás de proteção e fazer a concentração de CO_2 cair para valores muito baixos. Desta forma, se propôs criar um critério que seria baseado num tempo após o início da vazão do gás de proteção dentro da câmara, permitindo comparações quantitativas entre cada condição.

Assim, as medições das concentrações de CO_2 e CO foram feitas em função do tempo (5s, 10s, 15s e 20s), utilizando como gases de proteção 100% CO_2 e 25% CO_2 , pressão de sucção zero, sem arco e com arco. Como o Instrumento PC-MULTIGÁS não tem uma interface que permitia monitorar as concentrações dos gases com o tempo, o seu painel foi filmado com uma câmera CCD durante os ensaios e os valores em função do tempo compilados para uma planilha. Durante a realização das medições do gás CO_2 (dióxido de carbono) e o CO (monóxido de carbono) utilizando o processo MIG/MAG convencional, foi utilizada a mesma tocha utilizada durante as coletas de fumos, mantendo-se as mesmas condições de soldagens em relação ao cordão de solda e o ângulo de ataque.



Figura 3.12 - Detalhe da posição de montagem da sonda de captação de gases

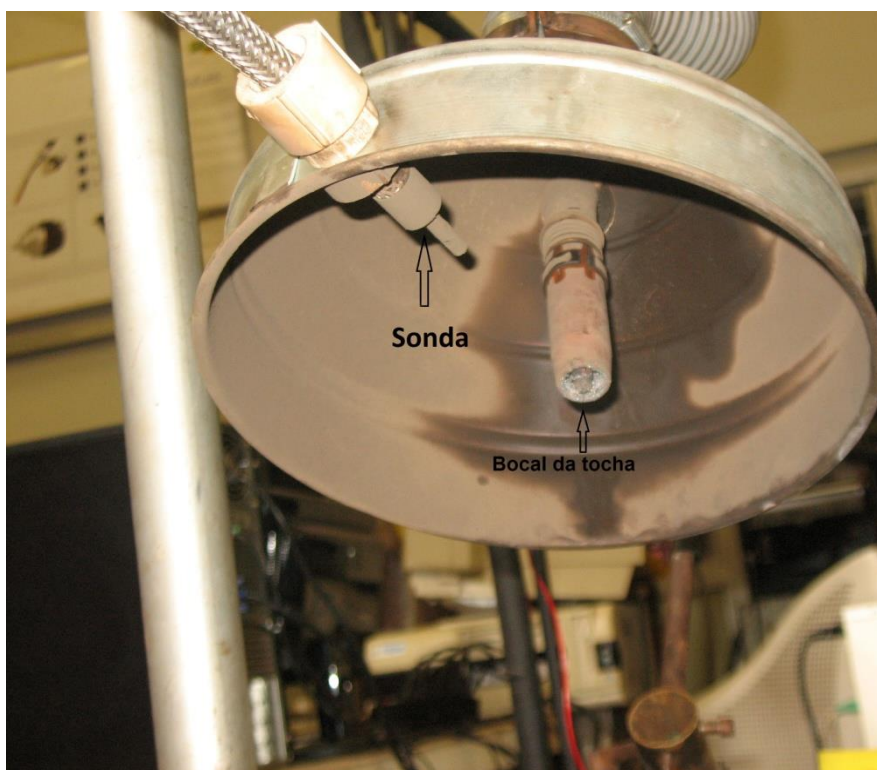


Figura 3.13 – Detalhe da posição da sonda na coifa

A Tab. 3.13 apresenta os valores da concentração de gases na câmara medidos em função do tempo, para os dois gases de proteção ($100\%CO_2$ e $25\%CO_2$) e para as duas condições, sem arco e com arco. As Fig. 3.14, 3.15, 3.16 e 3.17 mostram as relações entre as concentrações de CO_2 (dióxido de carbono) e CO (monóxido de carbono) em função do tempo, para as misturas de $100\%CO_2$ e $25\%CO_2$, com arco e sem arco. Por estes dados é possível observar que:

- os teores de CO e CO_2 são crescentes com o tempo, não alcançando uma saturação;
- após um tempo maior de medição, 15 a 20 s, os valores alcançados do conteúdo de CO_2 são bastante elevados, mesmo para a mistura $Ar + 15\% CO_2$ (cerca de 8%), alcançando mais 35 a 40% quando se protege com 100% de CO_2 ¹;
- usando-se proteção com $100\%CO_2$, não houve diferença entre as medições de CO_2 com arco e sem arco, ao contrário da condição com proteção de $Ar+15\%CO_2$, que na condição sem arco praticamente não apresentou CO_2 na região onde se encontrava

¹ Mesmo que o aparelho para medir a composição dos gases não tenha como faixa de medição para CO_2 valores maiores do que 20%, os teores alcançados em torno de 40% foram aferidos também com o Oxybaby 6, apresentando os mesmos resultados.

a sonda. O fato de se aumentar a concentração do CO_2 na condição com arco se explicaria pelo aquecimento do gás, fazendo que o mesmo suba, já que a sonda estava um pouco acima da superfície da placa. Mas se encontra dificuldades em explicar por que só teria acontecido este fato com a mistura $\text{Ar}+15\%\text{CO}_2$, uma vez que a densidade do CO_2 é maior do que a do Argônio;

- d) O teor de CO é também crescente com o tempo e, naturalmente, não acontece para a condição sem arco (já que se espera a formação de CO pela decomposição do CO_2 no arco). Na condição com proteção com $100\%\text{CO}_2$ o nível atingido foi em torno de 1,5% e, coerentemente, com proteção com $\text{Ar}+15\%\text{CO}_2$ este valor chegou a apenas 0,5%.

Tabela 3.13 – Concentração de CO (monóxido de carbono), CO_2 (dióxido de carbono) e O_2 (oxigênio) medido na sonda em função do tempo, com os gases de proteção $100\%\text{CO}_2$ e $25\%\text{CO}_2$, com arco e sem arco e pressão de sucção zero

Teste	Gás de proteção	Arco	5s			10s			15s			20s		
			CO_2	CO	O_2	CO_2	CO	O_2	CO_2	CO	O_2	CO_2	CO	O_2
A1	$100\%\text{CO}_2$	COM	6,1	0,08	20,5	17,3	0,53	18,1	32,3	1,07	14,6	40,3	1,50	11,4
A2	$100\%\text{CO}_2$	COM	7,0	0,04	20,2	21,7	0,69	17,0	29,0	0,97	14,7	34,0	1,26	13,0
A3	$100\%\text{CO}_2$	COM	4,7	0,06	20,6	19,6	0,60	17,9	34,9	1,09	13,8	39,8	1,40	11,3
B1	$100\%\text{CO}_2$	SEM	8,3	0,00	20,2	25,4	0,01	16,6	31,8	0,01	14,3	34,4	0,02	13,4
B2	$100\%\text{CO}_2$	SEM	0,4	0,00	20,9	12,0	0,00	19,7	27,4	0,00	16,2	34,3	0,01	13,6
C1	$25\%\text{CO}_2$	COM	2,1	0,02	19,7	5,6	0,19	17,2	8,0	0,54	12,6	8,8	0,54	12,7
C2	$25\%\text{CO}_2$	COM	2,3	0,07	19,8	5,8	0,30	16,4	6,4	0,42	14,9	7,9	0,55	14,0
C3	$25\%\text{CO}_2$	COM	2,0	0,05	20,0	4,5	0,25	17,4	5,6	0,39	15,9	7,7	0,48	14,0
D1	$25\%\text{CO}_2$	SEM	2,0	0,00	20,1	5,6	0,01	17,3	8,8	0,01	14,1	10,3	0,00	12,3
D2	$25\%\text{CO}_2$	SEM	2,3	0,00	20,1	5,7	0,00	17,1	8,1	0,01	14,6	9,6	0,00	12,8

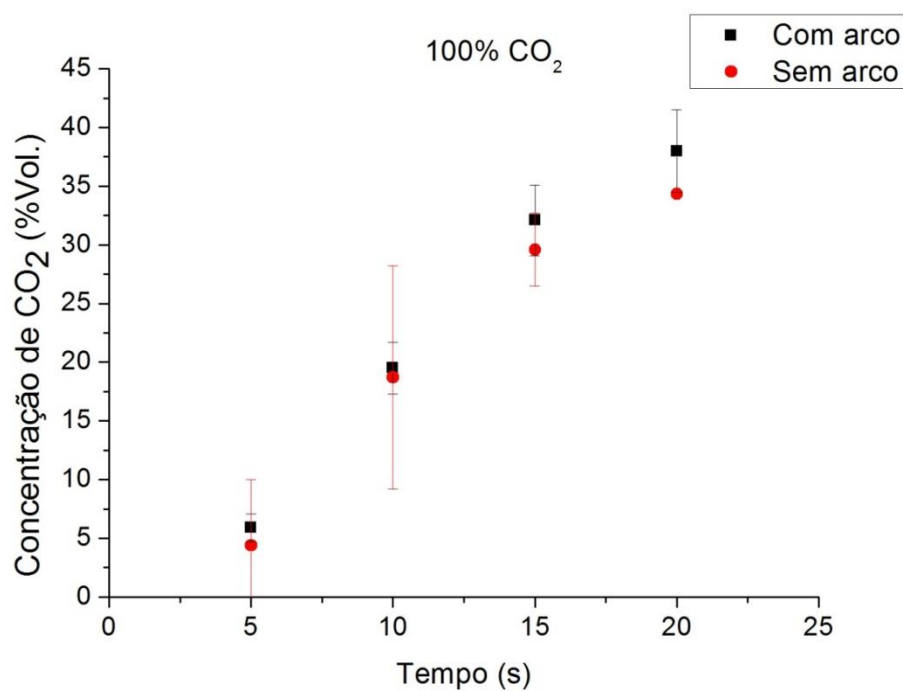


Figura 3.14 - Concentração de CO_2 em função do tempo, para a proteção com 100% CO_2 , com arco e sem arco

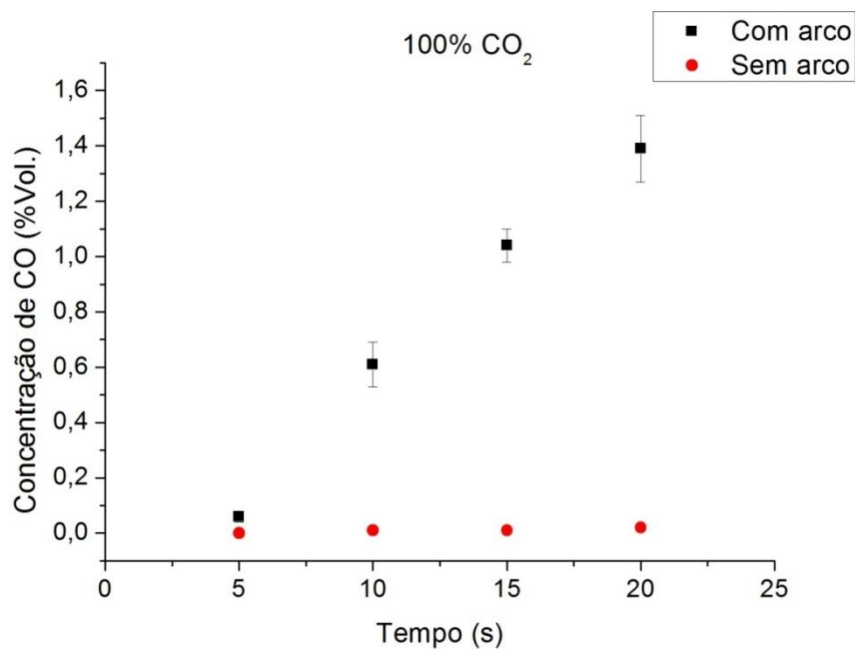


Figura 3.15 - Concentração de CO em função do tempo, para a proteção com 100% CO_2 , com arco e sem arco

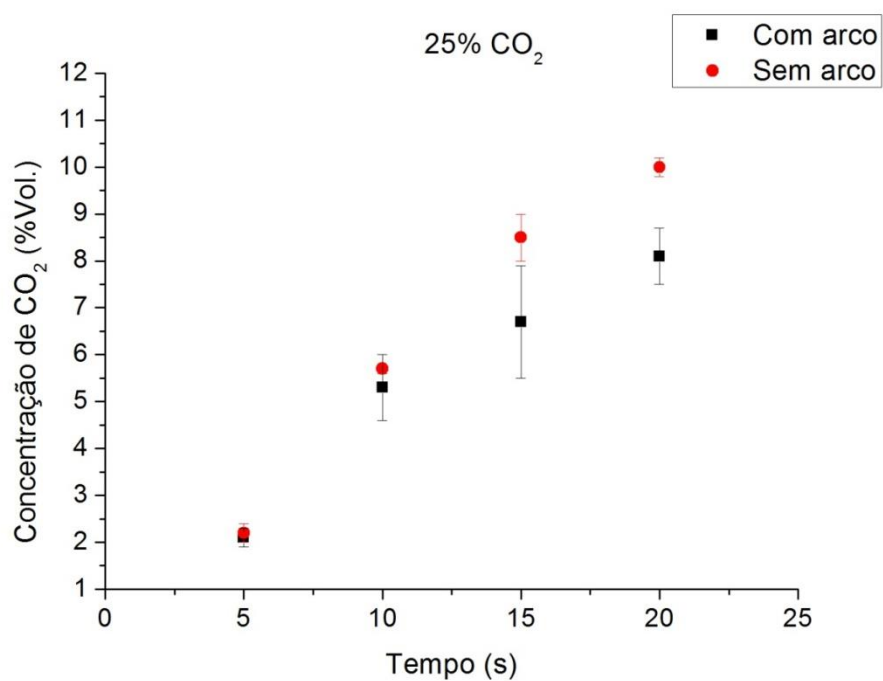


Figura 3.16 – Concentração de CO_2 em função do tempo, para a proteção com a mistura 25% CO_2 , com arco e sem arco

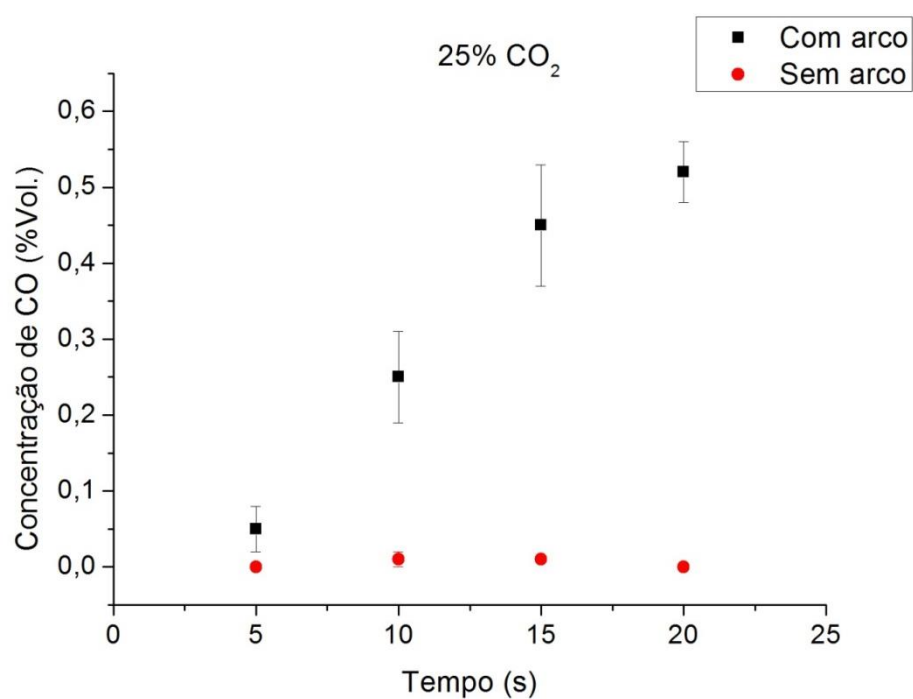


Figura 3.17 - Concentração de CO em função do tempo, para proteção com a mistura 25% CO_2 , com arco e sem arco

Pelos dados apresentados, pode-se dizer que o novo dispositivo (coifa menor, sem sucção e com a sonda próximo do bocal da tocha), aliado à técnica de se medir após um dado tempo de soldagem, por exemplo, 20s conforme Tab.3.13, apresenta sensibilidade e repetitividade suficientes para serem usados. Além disto, pode-se imaginar que esta situação de valor crescente de CO_2 e CO na região de respiração de um soldador sejam análogas, já que o mesmo usa o mascara tipo capacete, que permite o aprisionamento dos gases mais densos. Naturalmente os valores serão diferentes na região de respiração do soldador, mas, com certeza, proporcionais.

Porém, antes de iniciar o uso do sistema para medição de geração de gases, foi feita uma manutenção na mesa giratória e uma nova calibração. Apesar da pouca diferença para a curva de calibração anterior (ver item 3.3), a seguir se apresenta a nova tabela de calibração (Tab. 3.14), mostrando a velocidade de rotação (ω_M) em função da posição do potenciômetro e a respectiva curva de calibração (Fig. 3.18), $y = 1,0316x P - 1,8415(\text{rpm})$.

Tabela 3.14 – Tempo para a mesa completar uma volta completa em função da posição do potenciômetro (nova calibração)

Pos. Pot	tempo 1 [min]	tempo 2 [min]	tempo 3 [min]	média dos tempos	Desvio padrão	Vel. Angular [rad/min]	Vel. Linear [cm/min]	R máx [cm]
3	1,32	1,22	1,28	1,27	0,048	1,234	20,81	16,86
3,5	0,94	0,92	0,92	0,93	0,013	1,696	21,81	12,86
4	0,67	0,69	0,69	0,69	0,012	2,293	22,81	9,95
5	0,47	0,47	0,47	0,47	0,002	3,348	23,81	7,11
6	0,35	0,36	0,35	0,36	0,004	4,403	24,81	5,64
7	0,29	0,28	0,29	0,29	0,004	5,468	25,81	4,72
8	0,24	0,25	0,24	0,24	0,001	6,427	26,81	4,17
9	0,22	0,21	0,21	0,21	0,002	7,338	27,81	3,79

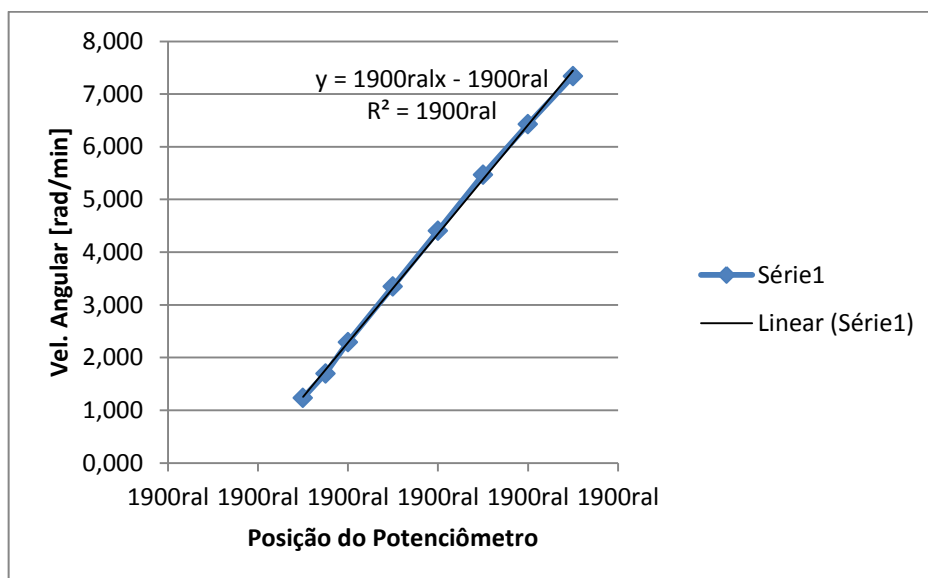


Figura 3.18 - Velocidade angular em função da posição do potenciômetro para a mesa giratória, usando-se a engrenagem de 60 dentes (nova calibração)

3.6 Dispositivo para coleta de fumos para medição de composição química, morfologia e tamanho de partículas de fumos

Para estes testes, foi feita uma adaptação do equipamento de coleta de fumos já descrito no item 3.3. Porém, no lugar da ilustração do aspecto de uma manta do filtro (Fig. 3.3), foi confeccionada uma base de acrílico com dimensões de 300 mm x 300mm x 5,2 mm numa posição horizontal com três furos de 37 mm de diâmetro (como ilustrado pela Fig. 3.19), de tal forma a permitir avaliar as melhores posições para a coleta dos fumos.

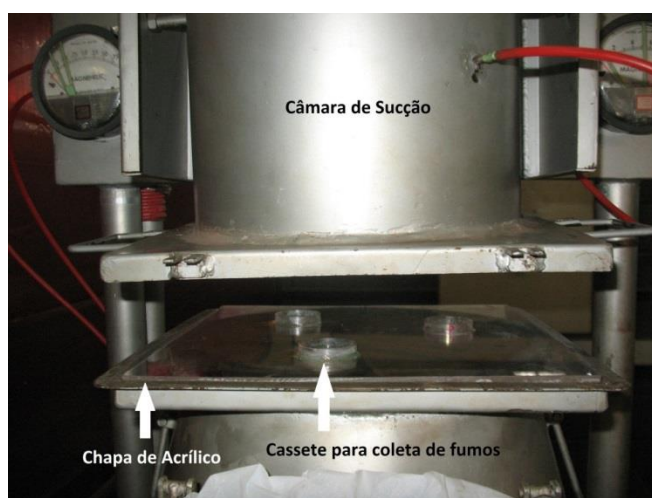


Figura 3.19 – Chapa de acrílico confeccionada para coleta dos fumos para medição de granulometria e composição química dos fumos

Um filtro de uma membrana de PVC, de 5 μm de porosidade e 37 mm de diâmetro, é colocado em cada coletor (cassete plástico de 37 mm de diâmetro). A Fig. 3.20, mostra os coletores antes das soldagens e a Fig. 3.21 mostram os coletores após a soldagem.



Figura 3.20 - Coletores de fumos adaptados sobre a chapa de acrílico antes das soldagens



Figura 3.21 - Coletores de fumos sobre a chapa de acrílico após a soldagem

3.7 Dispositivo de condução da tocha para parametrização

O equipamento SDP-600 (Fig. 3.22) foi utilizado nas soldagens de placas de testes, com a finalidade de determinar os parâmetros utilizados durante as coletas de fumos e emissão de gases. O mesmo foi devidamente aferido, usando-se uma régua condicionada com finais de curso para disparar e parar um cronômetro. Durante a aferição do equipamento, a velocidade de soldagem média obtida para os tempos de 83,03, 83,48 e 83,97 segundos e uma distância de 400 mm foi de 17,36 cm/min, coincidindo com a velocidade regulada.



Figura 3.22 - Equipamento SDP-600 utilizado nas soldagens das placas de testes durante a parametrização

3.8 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de sinais que foi usado neste trabalho é composto por um sensor Hall para monitoramento da corrente, com uma faixa de medição de ± 600 A, um divisor de tensão (DTS) para monitoramento da tensão, com uma faixa de medição de ± 100 V, um encoder para monitoramento da velocidade de alimentação e uma placa de aquisição de sinais elétricos da National Instruments NI USB 6009 com frequência de aquisição de até 48 kHz à 14 bits de resolução. O tempo de aquisição dos sinais foi determinado para cada ensaio.

A visualização, o tratamento preliminar e o arquivamento dos sinais elétricos oriundos da placa de teste foram feitos em um microcomputador, por meio de um programa implementado no ambiente Labview, denominado "Airproducts Vi", onde foram coletados e armazenados os sinais de corrente, tensão e velocidade de alimentação. Para tanto, os

sinais de tensão foram adquiridos entre a região equivalente ao final da tocha (região do bico de contato) e a mesa de soldagem. No programa em Labview, podem ser ajustados os valores de frequência de aquisição, o tempo de aquisição e os canais a serem utilizados para aquisição dos sinais elétricos.

Com uma frequência de aquisição de 2 a 5 kHz e tempo de aquisição de 50 a 180 segundos, foram feitos os cálculos do índice de regularidade (IV_{cc}) da transferência metálica por curto-circuito e do $\varnothing$ gota, para determinação dos parâmetros que dessem maiores e menores regularidades de transferência. Maiores detalhes da determinação da regularidade de transferência serão vistos no item 4.1.1.

CAPÍTULO IV

INFLUÊNCIA DA ESTABILIDADE DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA SOBRE A GERAÇÃO DE FUMOS NO PROCESSO MIG/MAG

4.1 Metodologia para o estudo da influência da estabilidade da transferência na geração de fumos

O objetivo desta etapa do trabalho foi tentar avaliar a hipótese de que quanto maior a estabilidade, menos respingos, conseqüentemente (quanto menos respingos), menos fumos. Para tal, foi proposto soldar usando-se diferentes condições de estabilidades de transferência e medir a geração de fumos. Foi procurado verificar o quanto de fumo é gerado para, comparativamente, fazer um mesmo cordão de solda (mesmo comprimento e mesmo volume), ou seja, pela óptica de exposição do soldador.

Para se conseguir soldas com diferentes estabilidades para uma dada corrente de soldagem, varreu-se a regulagem de tensões de soldagens, mantendo-se fixos a corrente média de soldagem (I_m), a velocidade de alimentação do arame (V_{alim}), a distância bico de contato-peça (DBCP), a velocidade de soldagem (V_s) e a vazão e tipo do gás de proteção. Mas, se ao variar a tensão também a corrente média (I_m) mudar de valor, é possível ajustar a corrente para ela se manter constante. Existem dois meios para tal:

a) Através da Velocidade de Alimentação

Se a velocidade de alimentação, por exemplo, for aumentada, a corrente aumenta. Mas, ao mesmo tempo o comprimento do arco diminui. Além disso, a taxa de fusão e deposição aumentam e, como consequência, o volume da poça de fusão também cresce. Esta variação do volume dificulta a comparação, pois o volume faz parte dos fatores que governam a geração de fumos. Nesta situação, as soldas foram feitas desde que se faça uma correção, mantendo-se $V_{alim}/V_s = \text{cte}$. Ainda assim persiste a variação intrínseca do comprimento do arco quando se faz a correção pela velocidade de alimentação. Este comportamento é inevitável e deverá ser levado em conta na análise dos resultados. É importante ressaltar que nem sempre é esperada variação da corrente quando se varre a tensão em condições de curto-circuito (SOUZA, 2010). Mas, se acontecer variação da corrente com o aumento da tensão, é de se esperar que a corrente assuma valores maiores.

Neste caso, ainda assim se terá aumento do comprimento do arco. Mas, ao agir no sentido de reajustar a corrente pela redução da velocidade de alimentação do arame, também se espera maiores arcos. Isto quer dizer que este fenômeno vai fazer com que sempre se aumente o comprimento do arco ao se aumentar progressivamente a tensão, não causando ambiguidade com experimentos com tensões menores.

b) Através da DBCP (Distância bico de contato-peça)

Se a DBCP, por exemplo, for aumentada, a corrente diminui, mas, ao mesmo tempo, o comprimento do arco aumenta. Entretanto, como a velocidade de alimentação é inalterada, a taxa de fusão e deposição permanecem constantes e, como consequência, o volume da poça de fusão não altera. Portanto, esta parece ser uma solução melhor do que a anterior, mesmo que também haja uma variação no comprimento do arco. Mas, como no caso anterior, o re-ajuste da corrente para um valor menor (devido ao aumento da tensão) pelo crescimento da DBCP também vai levar a arcos mais longos.

A quantificação da estabilidade de transferência foi feita através do Critério Laprosolda para Estabilidade de Transferência em MIG/MAG com curto-circuito (item 4.1.1).

Já para monitorar os parâmetros de soldagem, foi usado um sistema de aquisição de sinais elétricos (item 3.8 do capítulo III). Para cada uma das soldagens foram medidos e/ou calculados a média e desvio padrão do tempo de curto-circuito (σ_{cc}), média e desvio padrão do tempo de arco aberto (σ_{tab}), Frequência de curtos-circuitos (F_{cc}), Velocidade de alimentação (V_{alim}), t_{ab}/t_{cc} (tempo de arco aberto/tempo de curto-circuito), I_{cc} (corrente de curto-circuito), I_m (corrente média), rendimento de deposição (η) e a aparência do cordão.

4.1.1 Critério laprosolda de estabilidade de transferência

A análise da estabilidade da transferência metálica por curto-circuito proposta pelo Grupo Laprosolda (SOUZA et al., 2011) usa do seguinte postulado: a melhor condição de soldagem por curto-circuito não é aquela que necessariamente vai resultar em um maior rendimento de deposição ou menor oscilação dos sinais elétricos, mas sim aquela que proporciona uma maior estabilidade de transferência e com a transferência dominada pela tensão superficial.

O critério para quantificar a Estabilidade de Transferência em MIG/MAG com curto-circuito no processo de soldagem MIG/MAG se baseia na premissa de que a estabilidade da transferência por curto-circuito está ligada com a constância dos tempos em curto-circuito e em arco aberto, assim como com o fato de que cada gota ao se destacar tenha um volume apropriado para ter havido a ação da tensão superficial para se obter a transferência.

Assim, esse Critério tem de satisfazer dois parâmetros, a saber:

- a) Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência por Curto-Circuito, cujo símbolo é IV_{cc} : o meio para determinar o IV_{cc} é através dos coeficientes de variação dos tempos de curto-circuito (t_{cc}) e de arco aberto (t_{ab}).
- b) Faixa admissível de tamanho de gota em transferência por curto-circuito (que garantiria uma transferência dominada pela tensão superficial), cujo símbolo é ϕg . O meio para determinar ϕg é pela faixa de frequências máxima e mínima calculada, a partir da Velocidade de Alimentação do arame, seu diâmetro e densidade, para atingir o tamanho de gota para uma transferência adequada (para arames de 1,2 mm de diâmetro, tem se assumido que as gotas calculadas devam ter diâmetros de 1,1 a 1,25 do diâmetro do arame, mas estes valores demandam maiores investigações).

Para encontrar o Índice Vilarinho de Regularidade, utiliza-se um programa dedicado desenvolvido no ambiente MATLAB, o qual calcula numericamente os valores e respectivos desvios padrões da Eq. 4.1. Neste caso, o programa toma como entrada o tempo mínimo de curto-circuito igual a zero, ou seja, são contabilizados os tempos de todos os curtos-circuitos, sejam eles incipientes (quando não há transferência) ou normais. Acredita-se que se os tempos em curto-circuito e em arco aberto forem sempre constantes, a transferência está no mais alto grau de estabilidade. Assim, quanto menor o valor do IV_{cc} , mais regular é a transferência.

$$IV_{cc} = \frac{\sigma_{tcc}}{t_{cc}} + \frac{\sigma_{tab}}{t_{ab}} \quad (4.1)$$

onde σ_{tcc} = desvio padrão da média do tempo de curto-circuito; σ_{tab} = desvio padrão da média do tempo de arco aberto, t_{cc} = média do tempo de curto-circuito; t_{ab} = média do tempo de arco aberto.

Este programa também calcula e fornece a frequência de curtos-circuitos (F_{cc}) durante o processo. Os cálculos dos valores dos ϕg médio das gotas serão feitos, conforme Eq.4.2, tomando como base, de forma dedutível (observando a transferência), diâmetros de gota aceitáveis.

$$\phi g = \sqrt[3]{\frac{V_{alim} (d^2)}{F_{CC}}} \quad (4.2)$$

onde d = diâmetro do arame-eletrodo em milímetros; V_{alim} = velocidade de alimentação de arame em milímetros por segundo, $\varnothing g$ = diâmetro da gota em mm, F_{cc} = Frequência de curtos-circuitos em Hz.

A partir da frequência de curtos-circuitos é possível estimar o $\varnothing g$ médio das gotas. O programa é ainda capaz de calcular e fornecer os valores médios de tempo de arco aberto (t_{ab}) e tempo de curto-circuito (t_{cc}).

Tanto para o cálculo de frequência de transferência de gotas, como para o cálculo dos tempos de arco aberto e de curto-circuito, o programa toma como entrada o tempo mínimo de curto-circuito igual a 2ms, ou seja, só contabiliza os curtos com duração maior ou igual a 2ms (quando só espera haver transferência).

4.1.2 Medição do rendimento de deposição (η)

Para encontrar o rendimento de deposição, utilizou-se os valores da massa da chapa antes e depois da realização do cordão de solda. Da diferença das massas (levando-se em conta o cuidado em se retirar os respingos que ficam na chapa), obteve-se como resultado a massa real de material depositada na mesma, que é a própria massa do cordão de solda. Conhecendo-se a densidade, o diâmetro e o comprimento do arame utilizado (este último calculado a partir do tempo de arco aberto e da velocidade de alimentação), foi possível obter a massa de arame que foi alimentado. Dividiu-se a massa do cordão pela massa de arame alimentado para, assim, obter o rendimento de deposição (comumente expresso em porcentagem).

As medidas do rendimento de deposição (η) foram realizadas para validar os resultados obtidos para as condições de maior e menores estabilidades, obtidas através dos resultados das soldas feitas com diferentes condições de estabilidades de transferência por curto-circuito, para a obtenção da corrente média ($I_m = 150 \pm 2A$).

4.2 Parametrização das condições para o ensaio de geração de fumos

Com o objetivo de se determinar tanto a velocidade de alimentação (V_{alim}), que levasse à corrente média desejada ($I_m = 150 \pm 2 A$), como a velocidade de soldagem (V_s), que resultasse em um cordão de solda com volume adequado, foram feitas soldagens mantendo-se fixos o fator indutivo na posição central da regulagem no equipamento, distância de bico contato-peça (DBCP) em 12 mm, ângulo da tocha em $10 \pm 1^\circ$ puxando, gás de proteção Ar + 25%CO₂, arame-eletrodo classe AWS ER70S-6, com 1,2 mm de diâmetro e vazão do gás 16l/min. Com uma velocidade de soldagem (V_s) preliminar de 30

cm/min, variou-se sequencialmente a velocidade de alimentação (V_{alim}) até que a corrente média desejada fosse atingida. Uma vez encontrada a velocidade de alimentação, variou-se a velocidade de soldagem até se conseguir um cordão de solda com volume adequado (cerca de 10 mm de largura por 2 mm de reforço). Como placas de testes para parametrização, foram utilizadas barras chatas de aço carbono ABNT 1020, com dimensões de 200 x 31,7 x 6,3 mm. Na realização das soldagens, estas placas foram acopladas em um suporte mostrado na Fig. 3.25, já descrito no item 3.7 do capítulo III, o qual promoveu uma fixação adequada das placas de testes para que estas não sofressem distorções durante as soldagens.

4.3 Determinação das condições de estabilidades

A partir dos parâmetros iniciais levantados no item 4.2, soldas sobre as placas de testes foram realizadas, varrendo-se a regulagem de tensões de soldagens (17,19, 21, 23, 25 V), de modo a se obter desde comprimentos de arcos muito curtos a muito longos. Como ao variar a tensão, a corrente média (I_m) mudou de valor, a mesma foi ajustada para se manter constante, através da distância bico de contato-peça.

A partir dos sinais elétricos adquiridos durante as soldagens, do monitoramento dos valores da corrente média (I_m), tensão média (U_m) e da velocidade de alimentação (V_{alim}), foram feitos os cálculos do Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência por Curto-Circuito (IV_{cc}) e do diâmetro da gota (ϕ_g), conforme descrito no item 4.1.1. Foi, então, feito um gráfico, onde nas abcissas foi colocada a tensão média (X_1), enquanto na ordenada se colocou o correspondente índice de regularidade (IV_{cc}) e numa outra abcissa (X_2), o correspondente (ϕ_g). Com este gráfico Fig. 4.1(a), foi possível determinar as regiões de maior e menores estabilidades. Através do qual, se obteve valores de tensão de soldagem em que os valores de IV_{cc} são aceitáveis, em função das faixas de frequência máxima e mínima para haver a transferência com estabilidade nas regiões citadas. Assim, paralelamente, para validar os resultados, também foi avaliado o comportamento de cada soldagem em relação ao acabamento do cordão e do rendimento de deposição. Um segundo gráfico foi levantado, usando-se como modelo o da Fig. 4.1(b), o qual foi usado de forma comparativa com da Fig. 4.1(a). Neste gráfico, na abcissa (X_1) é colocada a tensão média ($U_{média}$) e numa outra abcissa (X_2) o acabamento do cordão, enquanto que na ordenada se coloca o rendimento de deposição (η).

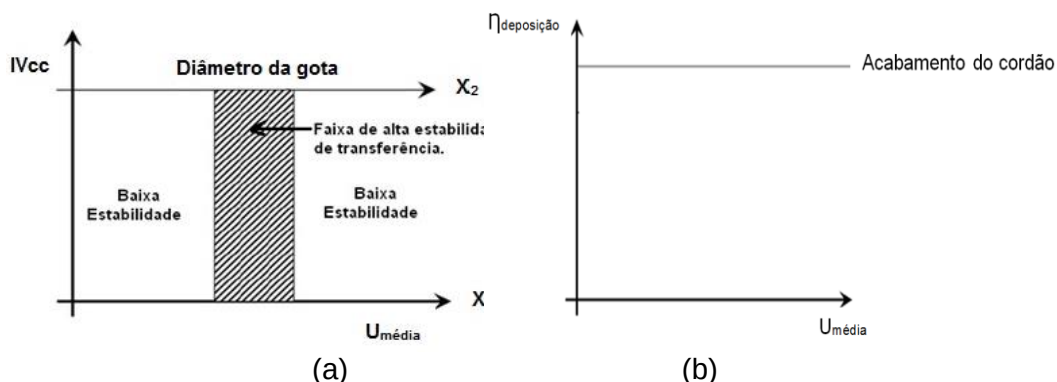


Figura 4.1 - (a) Faixas de trabalho para soldagem em que os IV_{cc} são aceitáveis em função da tensão de regulagem; (b) Rendimento de deposição e acabamento do cordão em função da tensão de regulagem

Através da Fig. 4.1(a), é possível determinar as regiões de maior e menores estabilidades. Através do qual, se espera valores de tensão de soldagem em que os valores de IV_{cc} são aceitáveis, em função das faixas de frequência máxima e mínima para haver a transferência com estabilidade nas regiões citadas.

A Tab. 4.1 apresenta os parâmetros regulados e monitorados dos testes durante as soldagens. Pode-se observar que o objetivo de se manter a corrente média em torno de 150 ± 2 A foi alcançado à medida que se aumentava a regulagem de tensão, à custa de regulagens da distância bico de contato-peça (DBCP). A Tab. 4.2 apresenta os índices que foram usados para caracterizar a estabilidade em cada regulagem de tensão, enquanto a Tab. 4.3 apresenta os valores de rendimento de deposição e acabamento do cordão em função da tensão de regulagem, utilizada na validação dos resultados.

Tabela 4.1 - Parâmetros de regulação e monitoramento dos testes para definição das condições de estabilidade de transferência (corrente média almejada de $150 \pm 2A$)

Exp	Regulados				Monitorados	
	U (V)	DBCP (mm)	V _{alim} (m/min)	Vs (cm/min)	U _{média} (V)	I _{média} (A)
1	17	15	3,0	17,36	14,9	148,3
2	19	14	3,0	17,36	16,9	151,3
3	21	12	3,0	17,36	18,6	151,8
4	23	12	3,0	17,36	20,4	148,7
5	25	9	3,0	17,36	22,2	151,8

Nota: Exp = experimentos; U = tensão de regulação; DBCP = distância bico de contato-peça; V_{alim} = velocidade de alimentação; Vs= velocidade de soldagem; U_{média} = tensão média e I_{média} = corrente média

Tabela 4.2 - Índices médio de caracterização da transferência por curto-circuito obtidos durante os ensaios descritos na Tab. 4.1

U (V)	IV _{cc}	Øg (mm)	I _{cc} (A)	σ _{cc} (A)	t _{ab} (s)	σ _{tab} (s)	t _{cc} (s)	σ _{tcc} (s)	F _{cc} (Hz)
17	1,3	0,97	203,0	47,0	0,00635	0,00415	0,00258	0,00168	112,1
19	1,2	1,08	231,7	34,1	0,00888	0,00563	0,00254	0,00148	87,6
21	1,0	1,12	250,0	42,7	0,01095	0,00624	0,00237	0,00112	75,1
23	1,2	1,40	270,8	70,3	0,02230	0,01399	0,00261	0,00154	40,1
25	1,3	1,57	302,3	70,0	0,03350	0,02178	0,00272	0,00178	27,1

Nota : U = tensão de regulação; IV_{cc} = índice de regularidade da transferência metálica por curto-circuito; Øg = diâmetro de gotas; I_{cc} = corrente média de curto-circuito; σ_{cc} (A) = desvio padrão médio da corrente média de curto-circuito; t_{ab} = tempo médio de arco aberto, σ_{tab} = desvio padrão dos tempos de arco aberto; t_{cc} = tempo médio dos curtos-circuitos; σ_{tcc} = desvio padrão dos tempos de curto-circuito; F_{cc} = frequência dos curtos-circuitos;

Tabela 4.3 – Rendimento de deposição e acabamento do cordão em função da tensão de regulagem

Tensão de regulagem (V)	$\eta_{\text{deposição}}$ (%)	Acabamento do Cordão
17	81,7	Ruim
19	84,7	Regular
21	93,6	Bom
23	91,6	Bom
25	91,3	Bom

A Fig. 4.2 apresenta a aplicação do critério Laprosolda de estabilidade de transferência. Pode-se observar que o valor mínimo de IV_{cc} (quanto menor, maior regularidade) cai dentro da faixa de diâmetro ($\varnothing g$) adequado de gotas. Isto sugere que as maiores estabilidades ficam entre 20 V e 22 V, podendo-se usar a regulagem de 21 V como a mais regular.

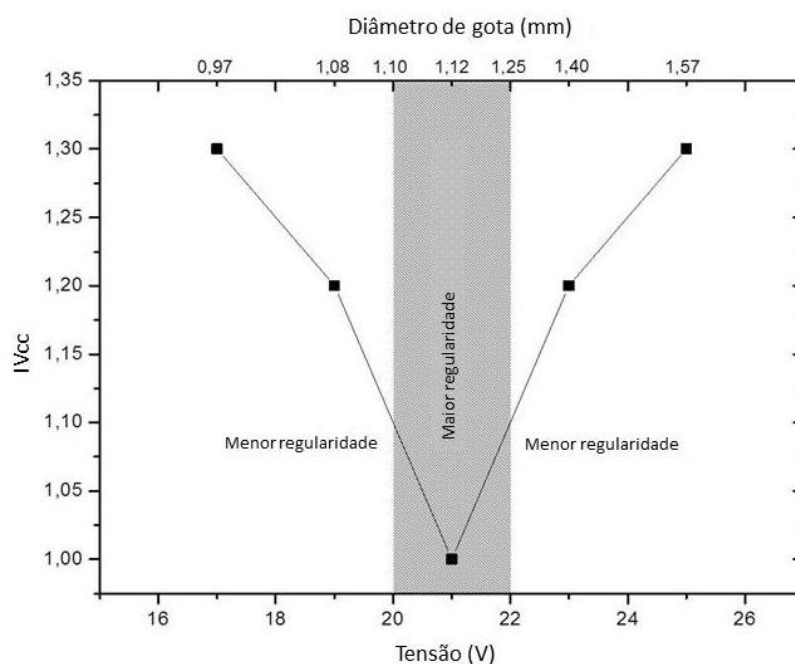


Figura 4.2 - Índices de regularidades de transferências e diâmetros de gota em função da tensão de regulagem: taxa de aquisição de 2000 Hz e tempo de aquisição de 50 segundos em média (amostra de 20 s para os cálculos)

Para validar estes resultados, foi observado o acabamento do cordão e o $\eta_{\text{deposição}}$ para cada condição, como mostram a Fig. 4.3 e a Tab. 4.3.

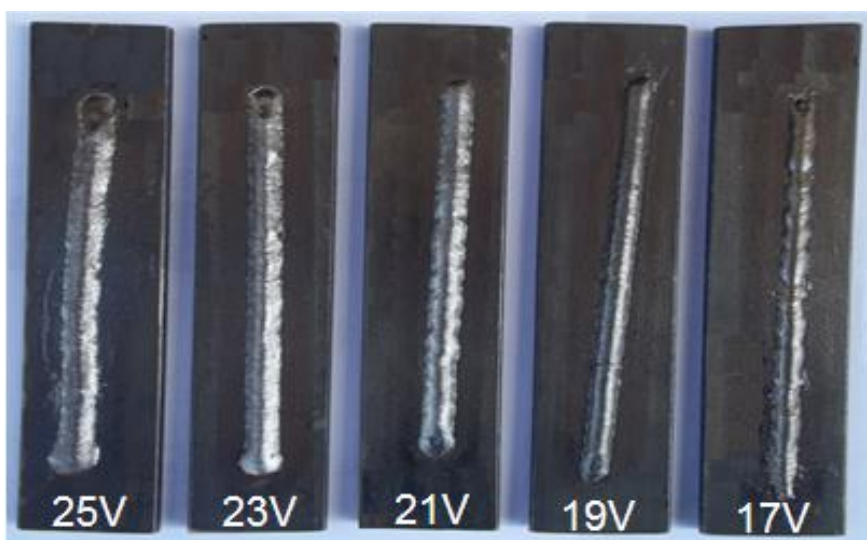


Figura 4.3 - Aparência do cordão em função da tensão de regulagem

A Fig. 4.4 ilustra o comportamento do acabamento do cordão e do rendimento de deposição em função das regulagens de tensão. Pode-se observar que o maior rendimento de deposição aconteceu para uma tensão de 21 V, valor acima de 19 V, para o que o acabamento se torna de regular para bom. Conclui-se que o critério Laprosolda de estabilidade de transferência é adequado para determinar a faixa de tensão de 20 V a 22 V como de maior estabilidade de transferência.

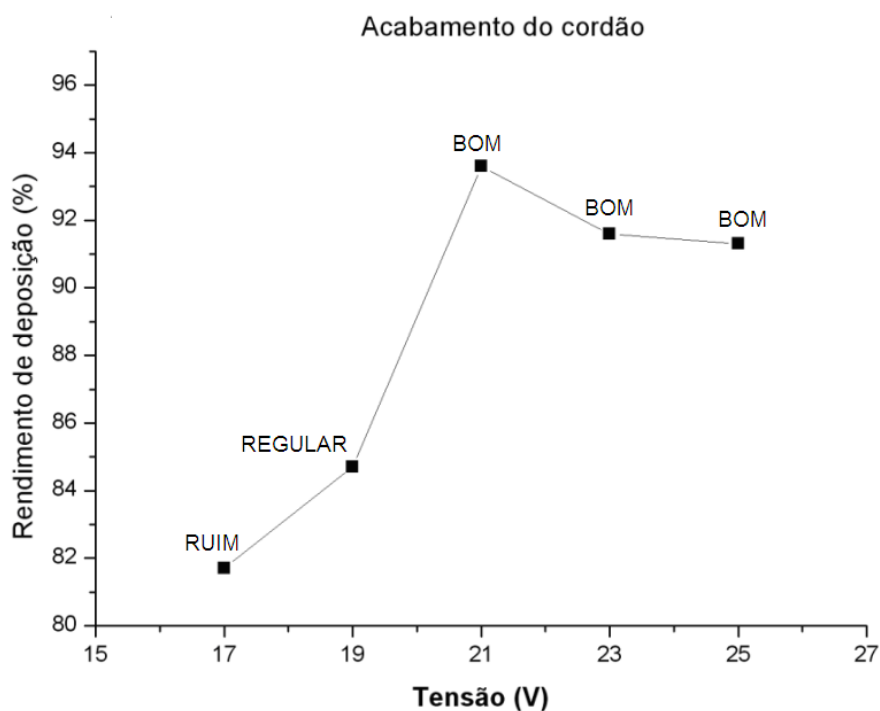


Figura 4.4 - Rendimentos e acabamento do cordão em função da tensão de regulagem

Para comparar condições de maior regularidade (21 V) com as de menores regularidades, escolheu-se as condições de 17 V e 25 V, que apresentam o mesmo IV_{cc} . Como acredita-se que juntamente com a regularidade, ou mesmo até superando o efeito da mesma, a corrente de curto-circuito (I_{cc}) e tempo de arco aberto (t_{ab}) também podem influir na geração de fumos, a escolha destas duas últimas condições para análise comparativa é bem adequada, pois, apesar de terem a mesma regularidade (Tab. 4.2), a condição de 17 V tem baixo I_{cc} e t_{ab} , em contraste com a de 25 V (alto I_{cc} e longo t_{ab}).

4.4 Influência das condições de maior e menores estabilidades de transferência por curto-circuito na geração de fumos no processo MIG/MAG convencional

4.4.1 Medição de geração de fumos com efeito indutivo médio (fator indutivo regulado na posição média, zero)

A Tab. 4.4 mostra os parâmetros de regulagem dos testes durante os ensaios de coleta de fumos. Para cada regulagem de parâmetro foi usada uma bobina diferente de arame, identificadas como B1, B2 e B3. A Tab. 4.5 por sua vez, mostra os dados dos experimentos obtidos durante as coletas de fumos.

Tabela 4.4 - Parâmetros de regulagem e monitoramento dos experimentos para coletas de fumos, para as regulagens de 21 V (maior estabilidade) e 17 V e 25 V (menores estabilidades), com regulagem do fator indutivo na posição central zero (corrente média almejada de 150 ± 2 A)

Exp/Bobina	Regulados				Monitorados	
	U (V)	V_{alim} (m/min)	V_s (cm/min)	DBCP (mm)	$U_{média}$ (V)	$I_{média}$ (A)
17/B1	17	3,0	17,36	15	14,70	150,6
17/B2	17	3,0	17,36	15	14,86	149,6
17/B3	17	3,0	17,36	15	14,90	152,0
21/B1	21	3,0	17,36	12	18,67	149,0
21/B2	21	3,0	17,36	12	18,65	152,0
21/B3	21	3,0	17,36	12	18,57	149,4
25/B1	25	3,0	17,36	9	22,39	151,0
25/B2	25	3,0	17,36	9	22,37	150,9
25/B3	25	3,0	17,36	9	22,34	149,6

Nota: Exp = experimentos; U = tensão de regulagem; V_{alim} = velocidade de alimentação; V_s = Velocidade de Soldagem; $U_{média}$ = tensão média; $I_{média}$ = Corrente média; DBCP = distância bico de contato-peça

Tabela 4.5 - Taxa de geração de fumos obtidos durante os ensaios descritos na Tab. 4.4

Exp/Bobina	U (V)	T(min)	Mi (g)	Mf (g)	TGF (g/min)
17-B1	17	3:00	12,50	12,65	0,05
17-B2	17	3:00	11,26	11,42	0,05
17-B3	17	3:00	11,16	11,33	0,05
21-B1	21	3:00	11,54	11,94	0,13
21-B2	21	3:00	11,62	12,02	0,13
21-B3	21	3:00	11,62	12,02	0,13
25-B1	25	2:44	10,76	11,42	0,24
25-B2	25	2:48	11,15	11,80	0,23
25-B3	25	3:00	11,30	11,92	0,20

Nota: Exp = experimento; U = tensão de regulação; T = tempo de coleta; Mi = massa inicial do filtro; Mf = massa final do filtro; TGF = taxa de geração de fumos

A Tab. 4.6 mostra os resultados das análises dos sinais elétricos e do diâmetro de gotas, obtidos durante as coletas de fumos para cada bobina-amostra.

Tabela 4.6 - Índices médio de caracterização da transferência por curto-circuito obtidos durante os ensaios descritos na Tab. 4.4

Exp/B	U (V)	t_{cc} (s)	σ_{tcc} (s)	t_{ab} (s)	σ_{tab} (s)	t_{ab}/t_{cc}	I_{cc} (A)	σ_{tcc} (A)	F_{cc} (Hz)	IV_{cc}	$\varnothing g$ (mm)
17/B1	17	0,00322	0,00161	0,00624	0,00445	1,94	307,9	219,0	91,56	1,69	0,92
17/B2	17	0,00317	0,00150	0,00600	0,00402	1,90	272,5	157,2	96,18	1,51	0,90
17/B3	17	0,00365	0,00183	0,00684	0,00587	1,87	280,2	255,4	88,04	1,85	0,93
21/B1	21	0,00310	0,00052	0,01209	0,00692	3,64	322,4	145,1	52,24	1,27	1,11
21/B2	21	0,00310	0,00059	0,01068	0,00633	5,39	326,4	149,2	56,66	1,32	1,08
21/B3	21	0,00327	0,00057	0,01217	0,00759	3,74	338,0	164,0	49,46	1,51	1,13
25/B1	25	0,00409	0,00097	0,03633	0,01874	8,90	398,8	159,1	18,62	1,51	1,56
25/B2	25	0,00390	0,00090	0,03300	0,01668	8,48	402,0	172,5	20,61	1,65	1,51
25/B3	25	0,00410	0,00087	0,03790	0,01893	9,26	432,0	194,0	19,00	1,84	1,55

Nota: Exp = experimento; Bobina; U = tensão de regulação; t_{cc} = tempo médio dos curtos circuitos; σ_{tcc} = desvio padrão dos tempos de curto-circuito; t_{ab} = tempo médio dos arcos abertos; σ_{tab} = desvio padrão dos tempos de arco aberto; t_{ab}/t_{cc} = tempo médio dos arcos abertos/ tempo médio dos curtos circuitos; I_{cc} = média das correntes de curto-circuito; σ_{tcc} (A) = desvio padrão médio da corrente média de curto-circuito; F_{cc} = frequência de curtos circuitos; IV_{cc} = Índice de regularidade de transferência; $\varnothing g$ = diâmetro de gotas

O experimento com regulagem em 21 V foi repetido para garantir a confiabilidade dos ensaios, usando-se a bobina B1. A Tab. 4.7 mostra os resultados dessa replicagem de forma comparativa aos dados originais (Tab. 4.5 e 4.6). Portanto, os ensaios são confiáveis.

Tabela 4.7 – Comparação dos resultados da replicagem do experimento com em 21 V em coletas de fumos com regulagem do fator indutivo na posição central zero (corrente média almejada de 150 ± 2 A)

Variável	Unidade	Valores encontrados na replicagem	Valores médios tirados das Tab.4.5/4.6
Tempo médio dos Curtos Circuitos	s	0,00238141	
Desvio padrão dos Tempos de Curto Circuito	s	0,001275298	
Tempo médio dos Arcos Abertos	s	0,010334285	
Desvio padrão dos Tempos de Arco Aberto	s	0,006231468	
Tempo médio entre Curtos Circuitos	s	0,012715695	
Desvio padrão do Tempo entre Curtos Circuitos	s	0,00676335	
Quantidade de Curtos Circuitos	curtos	12189	
Frequência de Curtos Circuitos	Hz	78,639	
Índice de Estabilidade		1,138512165	1,36
Estabilidade do Tempo de Curto Circuito		0,535522449	
Estabilidade do Tempo de Arco Aberto		0,602989716	
Tensão Média da Amostra	V	18,82792	
Corrente Média da Amostra	A	148,70853	
Tensão RMS da Amostra	V	20,39913	
Corrente RMS da Amostra	A	156,90952	
Média das Correntes de Pico	A	253,74141	
Desvio padrão das Correntes de Pico	A	65,91492	
Taxa de Geração de Fumos	g/min	0,12	0,13
Diâmetro de gota	mm	1,12	1,11

A Fig. 4.5 mostra a relação entre a estabilidade de transferência e a taxa de geração de fumos em função da tensão de regulação. Por essa figura, a maior estabilidade (21 V) não deu, como esperado, menor geração de fumos. Além disto, as duas condições paramétricas (17 V e 25 V) que apresentava aproximadamente a mesma estabilidade, mostraram diferentes taxas de geração de fumos (TGF).

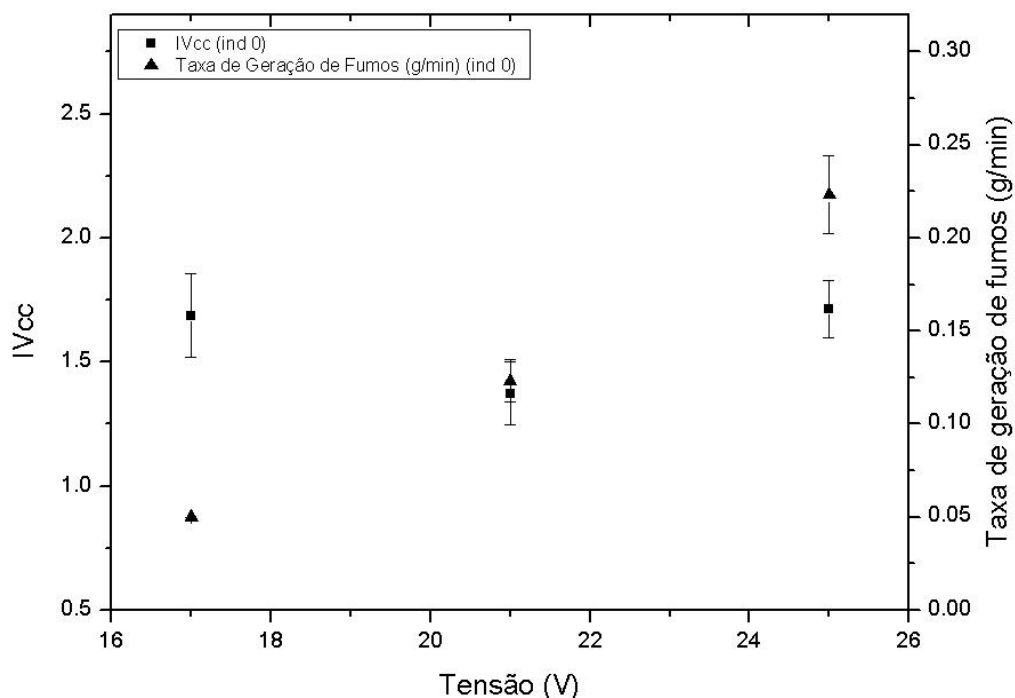


Figura 4.5 - Índices de regularidades e taxa de geração de fumos em função da tensão de regulação

Para tentar justificar o resultado acima, procurou-se correlacionar a taxa de geração de fumos com outros parâmetros, tais como tempo médio de arco aberto (t_{ab}) ou média das correntes de curto-circuito (I_{cc}). Pela Fig. 4.6, maiores tempo médio de arcos abertos/tempo médio dos curtos circuitos (t_{ab}/t_{cc}) deram maiores TGF. A Fig. 4.7 mostra ainda que maiores (t_{ab}) deram maiores TGF. Já a Fig. 4.8 mostra que maiores I_{cc} também deram maiores TGF, enquanto que pela Fig. 4.9 maiores diâmetros de gotas (ϕ_g) deram maiores TGF [que está de acordo com os resultados de Quimby e Ulrich (1999)] que, em seus estudos destinados à compreensão dos mecanismos importantes de taxa de geração de fumos no processo MIG/MAG, relataram que a taxa de geração de fumos aumenta com o aumento do diâmetro de gotas.

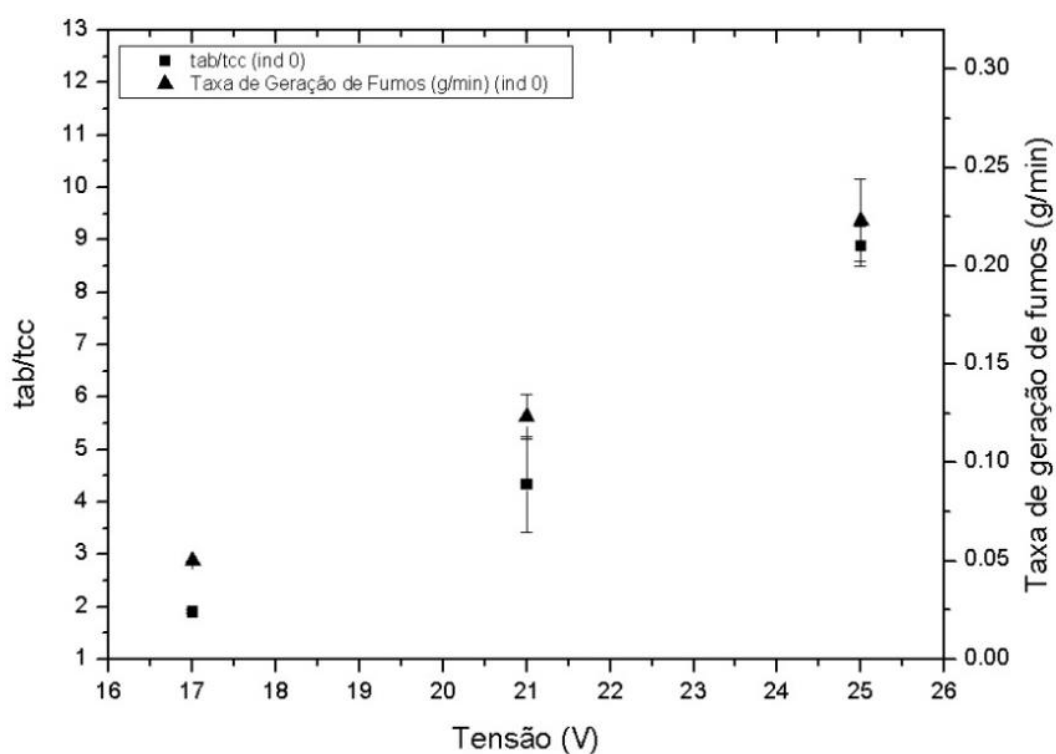


Figura 4.6 - Tempo médio de arcos abertos /Tempo médio dos curtos circuitos e taxa de geração de fumos em função da tensão de regulagem

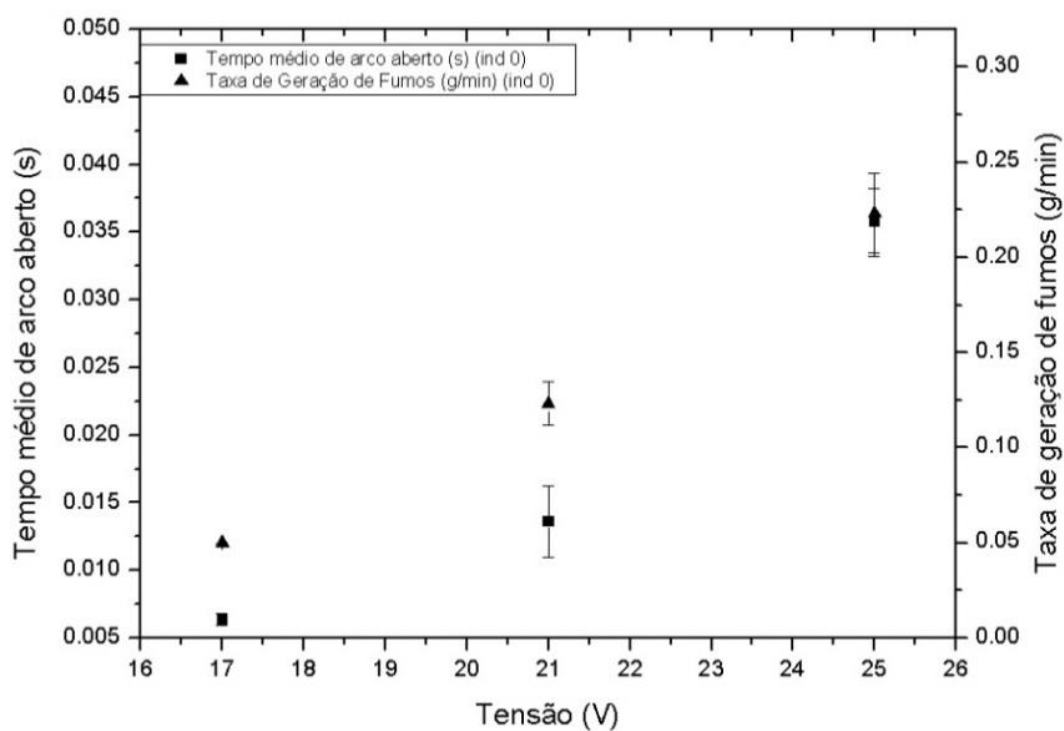


Figura 4.7 - Tempo médio de arcos abertos e taxa de geração de fumos, em função da tensão de regulagem

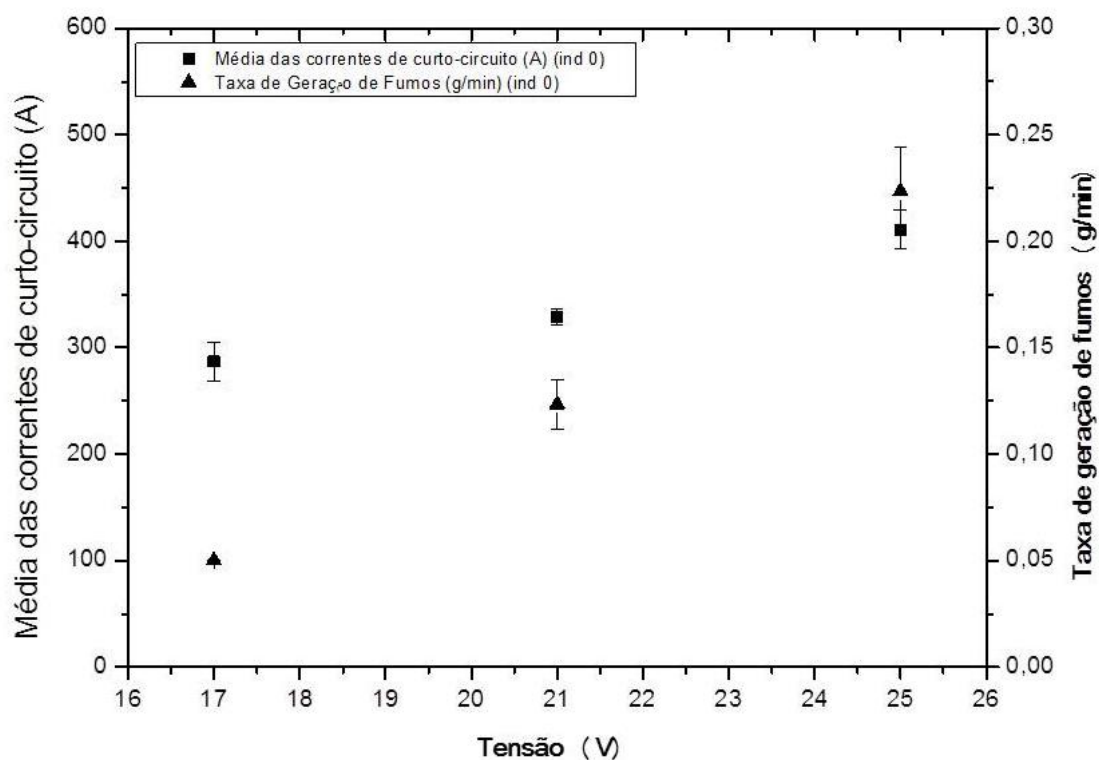


Figura 4.8 – Média das correntes de curto-circuito e taxa de geração de fumos, em função da tensão de regulação

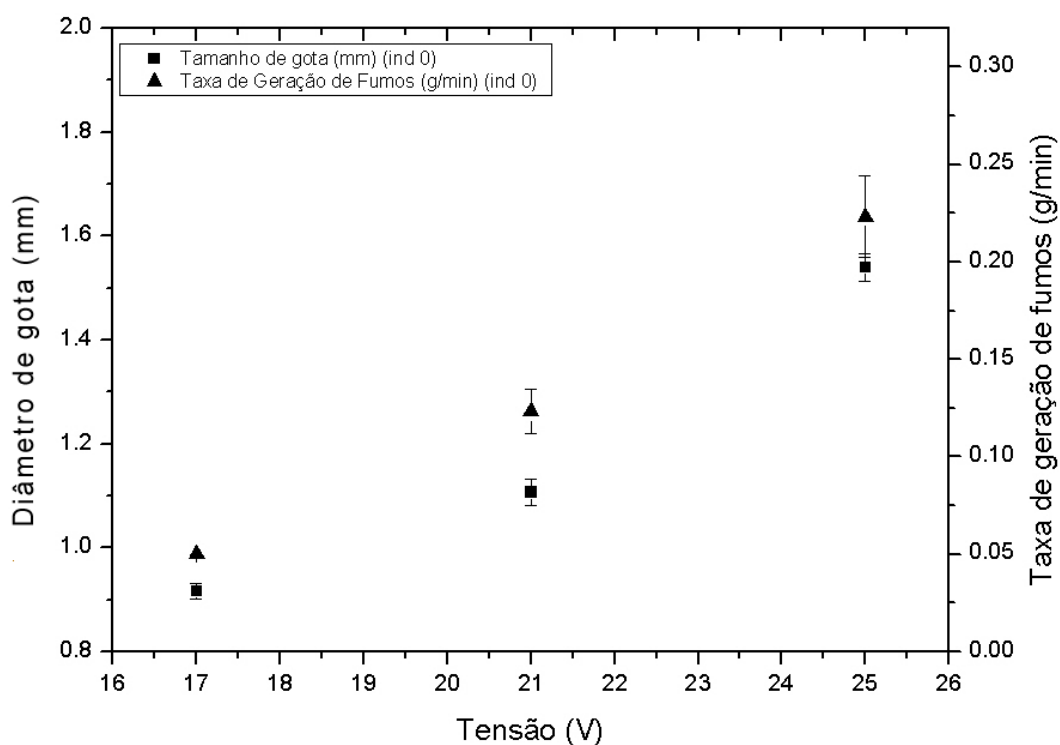


Figura 4.9 - Diâmetro de gota e taxa de geração de fumos em função da tensão de regulação

Assim, uma maior taxa de geração de fumos se daria não pela estabilidade, mas por um ou mais dos seguintes motivos, de forma isolada ou combinada: pelo maior comprimento do arco (maior tensão); pelo maior t_{ab} ; pelo maior $\varnothing$ gota; pelo maior I_{cc} ; pelo maior t_{ab}/t_{cc} .

Pires, Miranda e Gomes (2006), em seus estudos sobre geração de fumos no processo MIG/MAG, reconheceram que, apesar do conhecimento das fontes de emissões de fumos, é difícil separar o efeito individual de cada fator, já que muitos deles apresentam-se de uma certa forma inter-relacionados.

Na tentativa de se tentar isolar os motivos acima citados, para tentar encontrar qual deles é mais significativo, novas soldagens para coleta de fumos foram feitas, variando-se o fator indutivo na fonte. É de se esperar com esta abordagem que diferentes I_{cc} e t_{ab} , por exemplo, seriam obtidos para um mesmo comprimento de arco.

4.4.2 Medição de geração de fumos com efeito indutivo maior (fator indutivo regulado na posição +10)

A Tab. 4.8 mostra os parâmetros de regulação dos testes durante os ensaios de coleta de fumos em que a regulação do fator indutivo foi de +10. Para cada regulação de parâmetro foi usada uma bobina diferente de arame, identificadas como B1, B2 e B3. A Tab. 4.9, por sua vez, mostra os dados dos experimentos obtidos durante as coletas de fumos.

Tabela 4.8 - Parâmetros de regulação e monitoramento dos experimentos para coletas de fumos, para as regulações de 21 V (maior estabilidade) e 17 V e 25 V (menores estabilidades) com regulação do fator indutivo de +10 (corrente média almejada de $150 \pm 2A$)

Exp/B	R e g u l a d o s				M o n i t o r a d o s	
	U (V)	V _{alim} (m/min)	Vs (cm/min)	DBCP (mm)	U _{média} (V)	I _{média} (A)
17/B1	17	3,0	17,36	14	15,12	150,3
17/B2	17	3,0	17,36	14	15,09	151,0
17/B3	17	3,0	17,36	14	15,07	151,7
21/B1	21	3,0	17,36	12	18,70	150,5
21/B2	21	3,0	17,36	12	18,74	148,1
21/B3	21	3,0	17,36	12	18,76	148,3
25/B1	25	3,0	17,36	9	22,42	148,7
25/B2	25	3,0	17,36	9	22,36	148,7
25/B3	25	3,0	17,36	9	22,38	148,5

Nota; Exp = experimentos; B = bobina; U = tensão de regulação; V_{alim} = velocidade de alimentação; Vs = velocidade de soldagem; DBCP = distância bico de contato-peça; U_{média} = tensão média; I_{média} = corrente média

Tabela 4.9 - Taxa de geração de fumos obtidos durante os ensaios descritos na Tab. 4.8

Exp/B	U (V)	T(min)	Mi (g)	Mf (g)	TGF (g/min)
17-B1	17	3:00	11,66	11,90	0,08
17-B2	17	3:00	11,65	11,94	0,09
17-B3	17	3:00	11,30	11,56	0,08
21-B1	21	3:00	10,58	11,07	0,16
21-B2	21	3:00	10,85	11,40	0,18
21-B3	21	3:00	11,15	11,70	0,18
25-B1	25	2:20	10,74	11,43	0,29
25-B2	25	2:44	11,18	11,70	0,27
25-B3	25	2:33	10,89	11,55	0,26

Nota: Exp = experimento; B = bobina; U = tensão de regulação; T = tempo de coleta de fumos; Mi = massa inicial do filtro. Mf = massa final do filtro; TGF = taxa de geração de fumos

A Tab. 4.10, mostra os resultados das análises dos sinais elétricos e do diâmetro de gotas, obtidos durante as coletas de fumos.

Tabela 4.10 – Índices médios de caracterização da transferência por curto-circuito obtidos durante os ensaios descritos na Tab. 4.8

Exp/B	U (V)	t_{cc} (s)	σ_{tcc} (s)	t_{ab} (s)	σ_{tab} (s)	t_{ab}/t_{cc}	I_{cc} (A)	σ_{icc} (A)	F_{cc} (Hz)	IV_{cc}	$\varnothing g$ (m m)
17/B1	17	0,00338	0,00151	0,00756	0,00472	2,24	287,9	101,5	85,66	1,27	0,94
17/B2	17	0,00333	0,00163	0,00734	0,00472	2,10	345,2	191,0	84,38	1,27	0,94
17/B3	17	0,00331	0,00148	0,00731	0,00465	2,20	295,2	120,9	86,90	1,31	0,93
21/B1	21	0,00272	0,000472	0,01462	0,00914	5,37	392,8	121,3	50,73	1,00	1,12
21/B2	21	0,00272	0,00048	0,01435	0,00903	5,29	401,0	142,2	49,95	1,14	1,12
21/B3	21	0,00267	0,00044	0,01397	0,00865	5,22	406,4	153,1	51,64	1,12	1,11
25/B1	25	0,00328	0,00070	0,03731	0,03731	11,4	516,3	194,3	15,93	1,95	1,65
25/B2	25	0,00328	0,00064	0,03817	0,02169	11,6	526,3	206,4	15,30	1,95	1,65
25/B3	25	0,00331	0,00066	0,03685	0,01895	11,1	519,2	201,0	17,01	1,97	1,61

Nota: Exp = experimento; B = bobina; U = tensão de regulação; t_{cc} = tempo médio dos curtos-circuitos; σ_{tcc} = desvio padrão dos tempos de curtos-circuitos; t_{ab} = tempo médio dos arcos abertos; σ_{tab} = desvio padrão dos tempos de arco aberto; t_{ab}/t_{cc} = tempo médio dos arcos abertos/ tempo médio dos curtos circuitos; I_{cc} = média das correntes de curto-circuito; σ_{icc} = desvio padrão médio da corrente média de curto-circuito; F_{cc} = frequência de curtos circuitos; IV_{cc} = Índice de regularidade de transferência; $\varnothing g$ = diâmetro de gotas

Pela Fig. 4.10, assim como foi observado na Fig. 4.5, o índice de regularidade de transferência (IV_{cc}), maior regularidade (21V) novamente não deu, como esperado, menor

geração de fumos. Pelas Fig. 4.11 a 4.14, observa-se que os fatores t_{ab} , t_{ab}/t_{cc} , I_{cc} e diâmetro de gotas mantiveram o mesmo comportamento das Fig. 4.6 a 4.9, ou seja, maiores t_{ab}/t_{cc} , t_{ab} , I_{cc} e diâmetro de gotas deram também maiores taxas de geração de fumos em função do aumento da tensão de regulagem. Pelas figuras, observa-se também que os fatores tais como t_{ab} , I_{cc} , t_{ab}/t_{cc} , diâmetro de gotas e tensão (comprimento do arco) agem de forma inter-relacionados, mas ainda não se pode afirmar qual deles é mais governante.

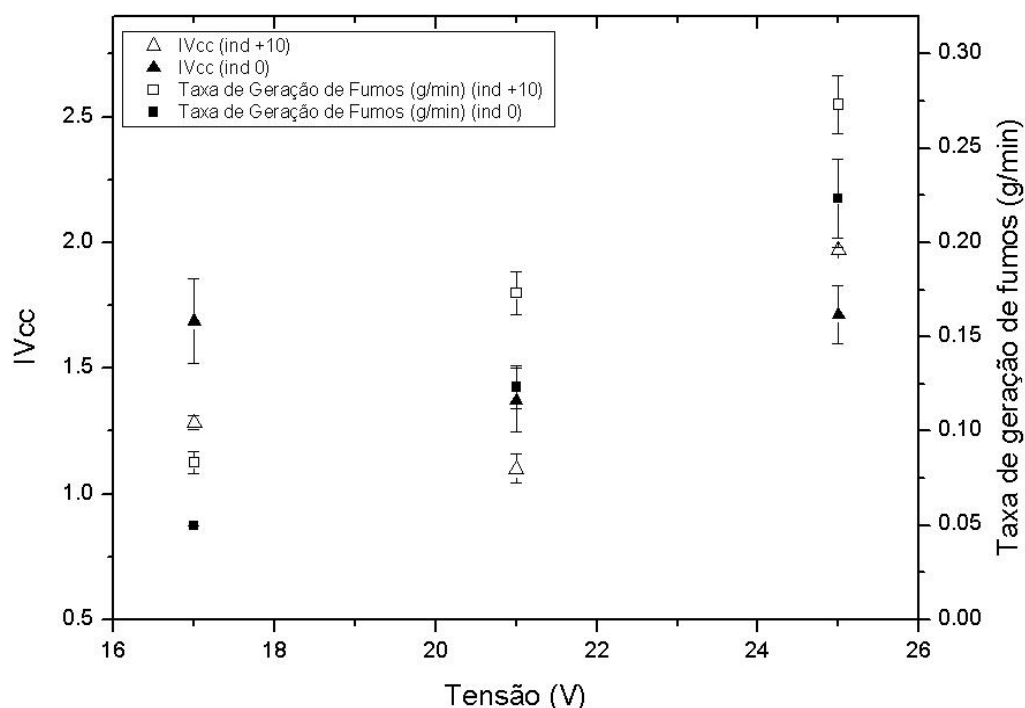


Figura 4.10 – Índice de regularidade e taxa de geração de fumos em função da tensão de regulagem, comparando as condições de regulagem do fator indutivo em zero e +10

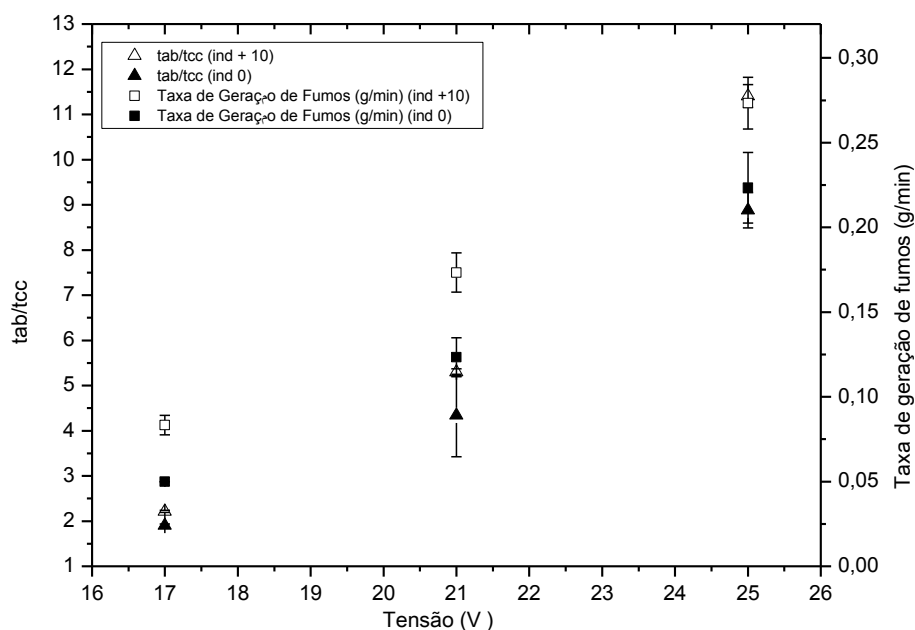


Figura 4.11 – Tempo médio de arcos abertos/Tempo médio dos curtos circuitos e taxa de geração de fumos em função da tensão de regulagem, comparando as condições de regulagem do fator indutivo em zero e +10

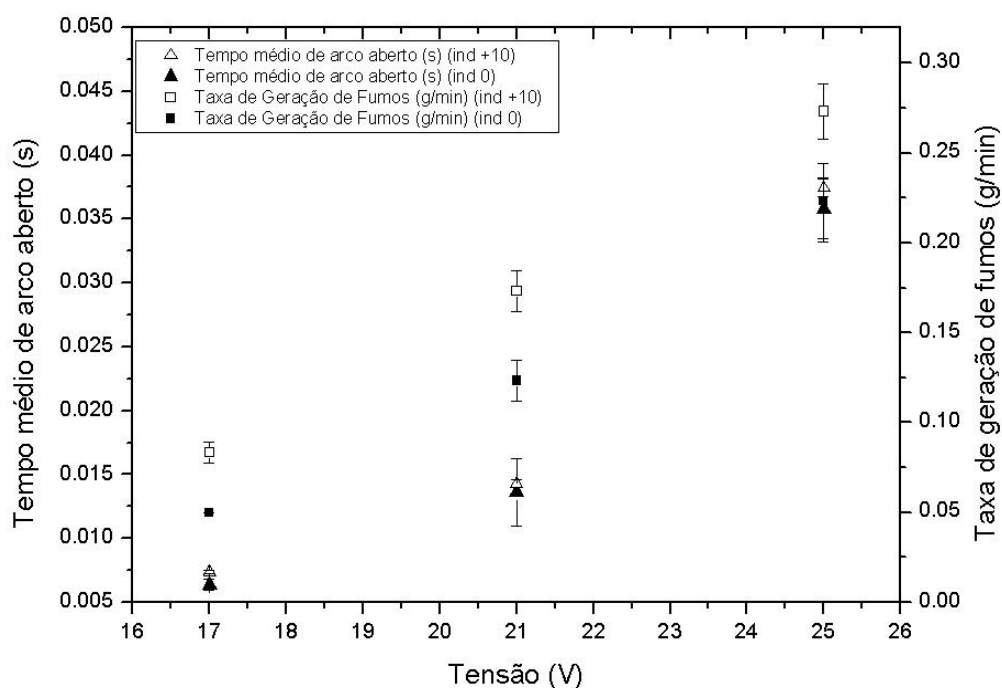


Figura 4.12 – Tempo médio de arcos abertos e taxa de geração de fumos, em função da tensão de regulagem, comparando as condições de regulagem do fator indutivo em zero e +10

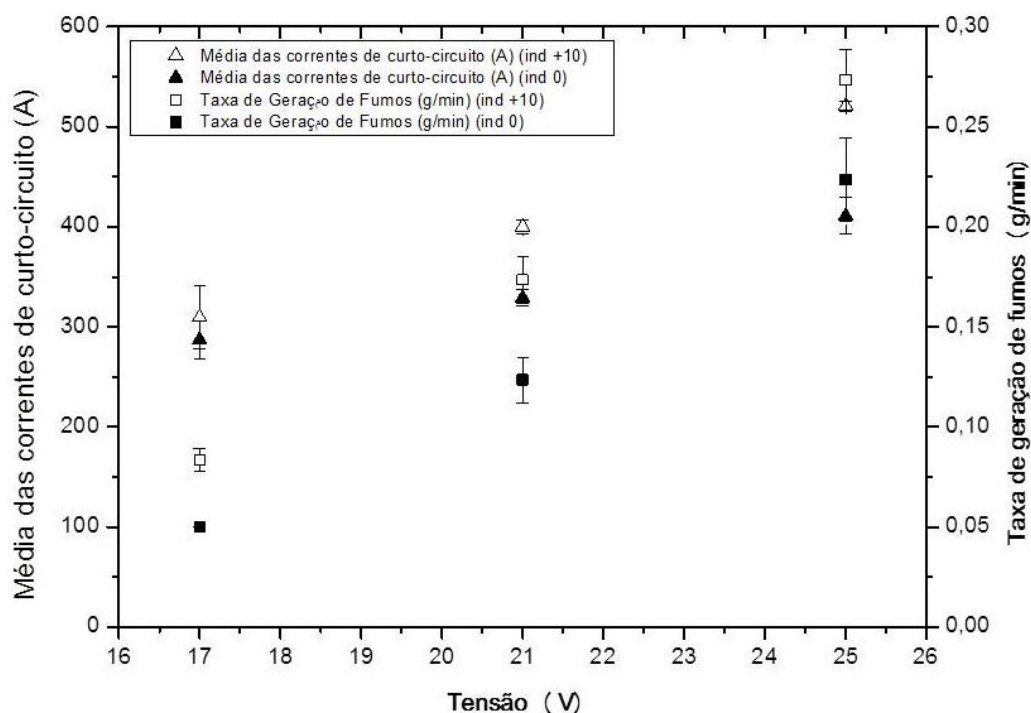


Figura 4.13 – Média das correntes de curto-circuito e taxa de geração de fumos, em função da tensão de regulagem, comparando as condições de regulagem do fator indutivo em zero e +10

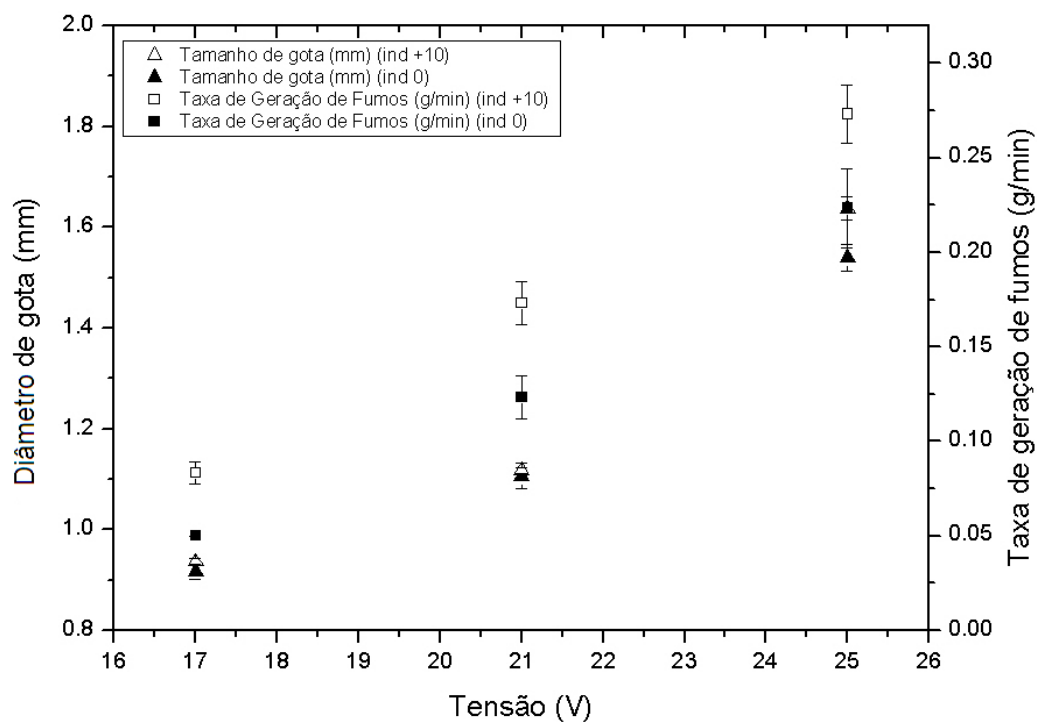


Figura 4.14 – Diâmetro de gota e taxa de geração de fumos, em função da tensão de regulagem, comparando as condições de regulagem do fator indutivo em zero e +10

4.4.3 Medição de geração de fumos com efeito indutivo menor (fator indutivo regulado na posição -10)

Devido às mesmas tendências observadas no item anterior, no caso da regulagem do fator indutivo em -10 aplicou-se apenas em uma tensão de soldagem. A Tab. 4.11 mostra os parâmetros de regulagem dos testes durante os ensaios de coleta de fumos. Para cada regulagem de parâmetro foi novamente usada uma bobina diferente de arame, identificadas como B1, B2 e B3. A Tab. 4.12 por sua vez, mostra os dados dos experimentos obtidos durante as coletas de fumos.

Tabela 4.11 - Parâmetros de regulagem e monitoramento dos experimentos para coletas de fumos, para a regulagem de 21 V (maior estabilidade) com regulagem do fator indutivo de - 10 (corrente média almejada de $150 \pm 2A$)

Exp/Bobina	Regulados				Monitorados	
	U (V)	V _{alim} (m/min)	Vs (cm/min)	DBCP (mm)	U _{média} (V)	I _{média} (A)
21/B1	21	3,0	17,36	12	18,82	150,9
21/B2	21	3,0	17,36	12	18,55	149,9
21/B3	21	3,0	17,36	12	18,61	149,2

Nota: Exp = experimentos; U = tensão de regulagem; V_{alim} = velocidade de alimentação; Vs = velocidade de soldagem; DBCP = distância bico de contato-peça; U_{média} = tensão média; I_{média} = corrente média

Tabela 4.12 - Taxa de geração de fumos obtidos durante os ensaios descritos na Tab. 4.11

Exp/Bobina	U (V)	T(min)	Mi (g)	Mf (g)	TGF (g/min)
21/B1	21	3:00	11,31	11,76	0,15
21/B2	21	3:00	11,17	11,60	0,14
21/B3	21	3:00	10,20	10,62	0,14

Nota: Exp = experimentos;; U = tensão de regulagem; T = tempo de coleta de fumos; Mi = massa inicial do filtro; Mf = massa final do filtro; TGF = taxa de geração de fumos

A Tab. 4.13 mostra os resultados das análises dos sinais elétricos e do diâmetro de gotas, obtidos durante as coletas de fumos.

Tabela 4.13 - Índices médios de caracterização da transferência por curto-circuito obtidos durante os ensaios descritos na Tab. 4.11

Exp/Bobina	U (V)	t_{cc} (s)	σ_{tcc} (s)	t_{ab} (s)	σ_{tab} (s)	t_{ab}/t_{cc}	I_{cc} (A)	σ_{icc} (A)	F_{cc} (Hz)	IV_{cc}	$\varnothing g$ (mm)
21/B1	21	0,00411	0,00110	0,01273	0,00768	3,09	217,4	39,5	37,63	1,58	1,24
21/B2	21	0,00409	0,00136	0,01273	0,00100	4,11	282,7	144,6	39,85	1,85	1,21
21/B3	21	0,00405	0,00123	0,01249	0,00951	3,08	275,1	130,4	39,49	1,76	1,22

Nota: Exp = experimentos; U = tensão de regulagem; t_{cc} = tempo médio dos curtos circuitos; σ_{tcc} = desvio padrão dos tempos de curtos-circuitos; t_{ab} = tempo médio dos arcos abertos; σ_{tab} = desvio padrão dos tempos de arco aberto; t_{ab}/t_{cc} = tempo médio dos arcos abertos/tempo médio dos curtos circuitos; I_{cc} = média das correntes de curto-circuito; σ_{icc} = desvio padrão médio da corrente média de curto-circuito; F_{cc} = frequência de curtos circuitos; IV_{cc} = Índice de regularidade de transferência; $\varnothing g$ = diâmetro de gotas

4.4.4 Discussão geral do efeito da indutância sobre a geração de fumos

Através das análises dos resultados obtidos da influência dos fatores IV_{cc} , t_{ab}/t_{cc} , t_{ab} , I_{cc} e diâmetro de gotas, para as indutâncias zero (item 4.4.1), +10 (4.4.2) e -10 (item 4.4.3), obteve-se os seguintes resultados:

- maior estabilidade de transferência metálica não apresentou, como esperado, menor taxa de geração de fumos, apesar de levar a menos respingos; portanto, a hipótese de que quanto maior a estabilidade, menos respingos, consequentemente, quanto menos respingos, menos fumos, não é verdadeira;
- maiores valores dos tempo médio de arcos abertos /tempo médio dos curtos circuitos (t_{ab}/t_{cc}), tempo médio de arcos abertos (t_{ab}), média das correntes de pico (I_{cc}) e diâmetro de gotas ($\varnothing g$) proporcionaram aumento na taxa de geração de fumos;
- através das análises das influências dos fatores t_{ab}/t_{cc} , t_{ab} , I_{cc} , $\varnothing g$ e comprimento do arco, não foi possível separar os efeitos dos mesmos sobre a taxa de geração de fumos e qual deles é mais governante, mas foi observado que eles agem de forma inter-relacionados.

CAPÍTULO V

DETERMINAÇÃO DOS FATORES GOVERNANTES NA GERAÇÃO DE FUMOS EM SOLDAGEM CURTO-CIRCUITO

O objetivo desta etapa do trabalho foi verificar a importância individual que os fatores apontados no Capítulo IV têm sobre a geração de fumos. Os fatores apontados foram a razão do tempo médio de arcos abertos e tempo médio dos curtos circuitos (t_{ab}/t_{cc}), tempo médio de arcos abertos (t_{ab}), diâmetro de gotas ($\varnothing g$), corrente de curto-circuito (I_{cc}) e comprimento do arco.

Para isto, procurou-se alguns parâmetros e/ou processos que se alterados teriam a potencialidade de identificar individualmente o efeito de cada um dos fatores apontados no capítulo anterior, por se conseguir que apenas o(s) fator(es) desejado(s) variasse(m), permanecendo constante os demais.

5.1 Estudo da influência da corrente de curto-circuito sobre a geração de fumos

5.1.1 Metodologia e planejamento experimental

O primeiro parâmetro a se alterar para estudar a influência da corrente de curto-circuito sobre a geração de fumos foi a indutância. Sabe-se que ao se variar a indutância numa dada condição de soldagem, altera-se os valores da corrente de curto-circuito (I_{cc}) e do tempo de curto-circuito (t_{cc}), considerando o estágio de ocorrência dos curtos. Quanto maior a indutância, maior deverá ser o tempo de curto-circuito (t_{cc}) e menor a corrente de curto-circuito (I_{cc}) ao se trabalhar com equipamentos sem controle do curto-circuito. Mas de maiores ou menores tempo de curto-circuito (t_{cc}) não se espera variação em termos de geração de fumos, uma vez que este é um tempo onde menos se aquece o material fundido. O tamanho da gota em transferência também pode ser afetado, esperando-se que as gotas fiquem maiores ao se transferir em curtos mais prolongados. Em transferências por curto-circuito, o efeito do tamanho de gota sobre a geração de fumos, que se daria por evaporação, aconteceria durante os tempos de arco em aberto (gota em formação). O problema é que vai existir uma correlação complexa e não facilmente previsível entre

tamanho de gota e tempo de arco aberto (t_{ab}). Por outro lado, não se espera ação significativa da indutância sobre o tempo de arco aberto (t_{ab}), pois a taxa de fusão neste período permanece a mesma. Assim, como existe uma relação inversa da indutância com a corrente de curto-circuito (I_{cc}), é possível que se isole o efeito deste fator pela variação da indutância.

Para se fazer a análise, soldagens utilizando o equipamento Lincoln Power Wave 455 STT, já descritas no item 3.1 do capítulo III, foram realizadas conforme o procedimento para medição de fumos, utilizando-se o programa de número cinco (MIG/MAG convencional com proteção gasosa e com polaridade positiva) já descrito no item 3.8 do capítulo III. Esta fonte, por ser eletrônica, não tem exatamente como regular a indutância, mas permite regular o fator indutivo, que no caso varia de +10 (menor efeito indutivo, ou taxa de crescimento da corrente maior) a -10 (maior efeito indutivo, ou taxa de crescimento da corrente menor). Utilizando as condições de soldagem já testadas no capítulo anterior, procurou-se manter a mesma corrente média (150 ± 2 A) à custa do ajuste da DBCP.

Foram feitas 3 medições de geração de fumos para cada condição de soldagem, cada uma usando arames de bobinas diferentes. Para o fator indutivo +10 (indutância baixa) foram usadas 3 (três) condições de estabilidade (maior estabilidade 21V, e menores estabilidades, 17 V e 25 V), enquanto para o fator de indutância -10 (indutância alta) foi usado apenas com a maior estabilidade de transferência (21 V). Para fins de comparação, usou-se nesta análise também os dados do capítulo IV referente à soldagem com a regulação do fator indutivo igual a zero (indutância média).

A Tab. 5.1, mostra o planejamento experimental para a determinação do efeito da corrente de curto- circuito (I_{cc}) sobre a taxa de geração de fumos.

Tabela 5.1 – Matriz experimental para determinar o efeito da corrente de curto-circuito (I_{cc}) sobre a geração de fumos (valores médios para três repetições – Fonte de energia Lincoln Power Wave)

Fatores Experimentais (Fonte de Energia 1)	Regulados		Monitorados		Determinados					
	U (V)	DBCP (mm)	I_m (A)	U_m (V)	IV_{cc}	I_{cc} (A)	t_{cc} (s)	t_{ab} (s)	ϕ_{gota} (mm)	TGF (g/min)
Indutância baixa (arco curto)	17	14	151 ± 1	15.1 ± 0.0	1.3 ± 0.0	309 ± 31	0.0033 $\pm$ 0.0000	0.0074 $\pm$ 0.0001	0.9 ± 0.0	0.08 ± 0.01
Indutância baixa (arco adequado)	21	12	149 ± 1	18.7 ± 0.0	1.1 ± 0.1	402 ± 8	0.0027 $\pm$ 0.0000	0.0143 $\pm$ 0.0003	1.1 ± 0.0	0.17 ± 0.01
Indutância baixa (arco longo)	25	9	149 ± 0	22.4 ± 0.0	1.9 ± 0.0	521 ± 5	0.0033 $\pm$ 0.0000	0.0374 $\pm$ 0.0007	1.7 ± 0.0	0.27 ± 0.02
Indutância média (arco curto)	17	15	151 ± 1	14.8 ± 0.1	1.7 ± 0.2	287 ± 19	0.0033 $\pm$ 0.0003	0.0064 $\pm$ 0.0004	0.9 ± 0.0	0.05 ± 0.00
Indutância média (arco adequado)	21	12	150 ± 2	18.6 ± 0.1	1.4 ± 0.1	329 ± 8	0.0031 $\pm$ 0.0001	0.0136 $\pm$ 0.0026	1.1 ± 0.0	0.13 ± 0.00
Indutância media (arco longo)	25	9	151 ± 1	22.4 ± 0.0	1.7 ± 0.2	411 ± 18	0.0040 $\pm$ 0.0001	0.0357 $\pm$ 0.0025	1.5 ± 0.0	0.22 ± 0.02
Indutância alta (arco adequado)	21	12	150 ± 1	18.7 ± 0.1	1.7 ± 0.2	258 ± 36	0.0041 $\pm$ 0.0001	0.0140 $\pm$ 0.0024	1.2 ± 0.0	0.14 ± 0.01

Nota: gás de proteção = Ar + 25%CO₂; arame AWS ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro, velocidade de alimentação do arame de 3,0 m/min; velocidade de soldagem de 17,36 cm/mim

Pode-se perceber pela Tab. 5.1, que o planejamento experimental apresentado deu o comportamento esperado. Por exemplo, como planejado e tendo sempre os dados de maior estabilidade de transferência metálica (comprimento de arco adequado), a redução dos valores de I_{cc} (402, 329 e 258 A) foram atingidos à medida que a indutância aumentou (de baixa para alta). Em paralelo, t_{cc} aumentou (0,0027, 0,0031 e 0,0041s). Como planejado, o diâmetro de gota ϕ_{gota} manteve-se praticamente o mesmo valor (1,1, 1,1 e 1,2 mm) e o tempo de arco aberto (t_{ab}) não foi afetado de forma significativa (0,0143, 0,0136 e 0,0140s) pela regulagem da indutância, respectivamente, para baixas, médias e altas indutâncias. Resumindo, a indutância afeta apenas t_{cc} (menor indutância, menor t_{cc}) e I_{cc} (menor indutância, maior I_{cc}). Porém, I_{cc} e t_{cc} são correlacionados, quanto maior I_{cc} , menor t_{cc} .

Acredita-se que, desta forma, o objetivo de tentar isolar o efeito da I_{cc} foi conseguido.

Como pode ser visto, o comprimento do arco foi também intencionalmente ajustado em três níveis (curto, adequado e longo) em duas regulagens de indutâncias (indutância baixa e média), pelo aumento da regulagem da tensão ($V_{reg.}$). A razão de inclusão destas variações na matriz experimental é que, para uma mesma regulagem da indutância, a corrente de curto-circuito (I_{cc}) aumenta para maiores comprimentos de arcos. Entretanto, neste caso, a I_{cc} não se encontra mais isolada. A não influência da indutância sobre a tensão média (V_m) se justifica pelo fato de que a fonte de energia é uma fonte eletrônica, estabelecida para controlar a tensão.

O índice de regularidade de transferência metálica por curto-circuito (IV_{cc}) foi utilizado neste trabalho para estabelecer a estabilidade de transferência metálica no processo de soldagem MIG/MAG. Quanto menor o IV_{cc} maior a estabilidade de transferência e menor a quantidade de respingos. Mais detalhes deste índice e sua aplicação podem ser encontrados em Rezende et al. (2011) e Scotti, Rezende e Liskévych (2011), assim como, em forma resumida, em Meneses, Gomes e Scotti (2013). A maior estabilidade de transferência metálica (menor IV_{cc}) foi alcançada com a regulagem média da tensão (21 V), mas os resultados mostram que uma mudança na indutância não interfere na regularidade de transferência metálica (1,1 a 1,7, a partir das indutâncias baixa para alta com comprimento de arco adequado), tanto como a regulagem da tensão (V_{reg}) interfere (1,3/1,4 a 1,9/1,7, a partir de comprimentos de arco curto para longo, e indutâncias baixa e média, respectivamente); na prática, a indutância é usada como um segundo fator no controle da estabilidade da transferência metálica. Deve-se também salientar que a partir de arcos curtos e longos para uma mesma indutância não é esperado manter os mesmos valores de I_{cc} .

A Fig. 5.1, apresenta a relação entre a indutância e a corrente de curto-circuito (I_{cc}) e a taxa de geração de fumos (TGF). Como visto, o decréscimo acentuado de I_{cc} também diminui a taxa de geração de fumos (TGF), mas não significativamente (também o efeito é mais significativo quanto mais alta for I_{cc} , pois o efeito de I_{cc} é quadrático). Sendo assim, assumindo que o objetivo de isolar o efeito da I_{cc} foi atingido, pode-se deduzir que I_{cc} (direta ou indiretamente) é um fator governante sobre a geração de fumos (quanto maior I_{cc} , maior a taxa de geração de fumos).

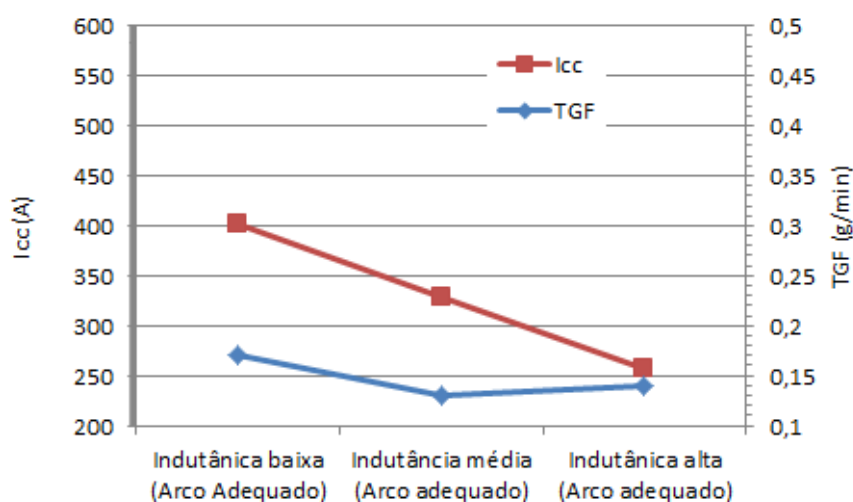


Figura 5.1 – Corrente de curto-circuito (I_{cc}) e a Taxa de geração de fumos (TGF) em função das Indutâncias de regulagens

Embora não significativamente, a corrente de curto-circuito (I_{cc}) geraria mais fumos devido as seguintes causas (ver Fig. 5.2):

- Na fase de contato gota-poça poderia haver ebulição do metal da poça-gota, em especial no minúsculo formado entre a gota e poça pouco antes do destacamento;
- Na fase arco aberto, o arco abre com maior corrente, evaporando o metal da gota em formação ou da poça sob o acoplamento do arco (a mais provável causa).

Mas deve-se lembrar que:

- Quando I_{cc} aumenta; para se manter a I_M (corrente média), o t_{ab} (tempo de arco aberto) pode diminuir caso o tempo que I_{cc} atuar for o mesmo;
- Se I_{cc} é maior, provavelmente o arco vai ser reaberto com comprimento mais longo (comprimentos longos tem sido apontado como gerador de fumos);
- Se I_{cc} é maior, no momento da abertura do arco a taxa de fusão é maior, que também por ser responsável pela geração de fumos.

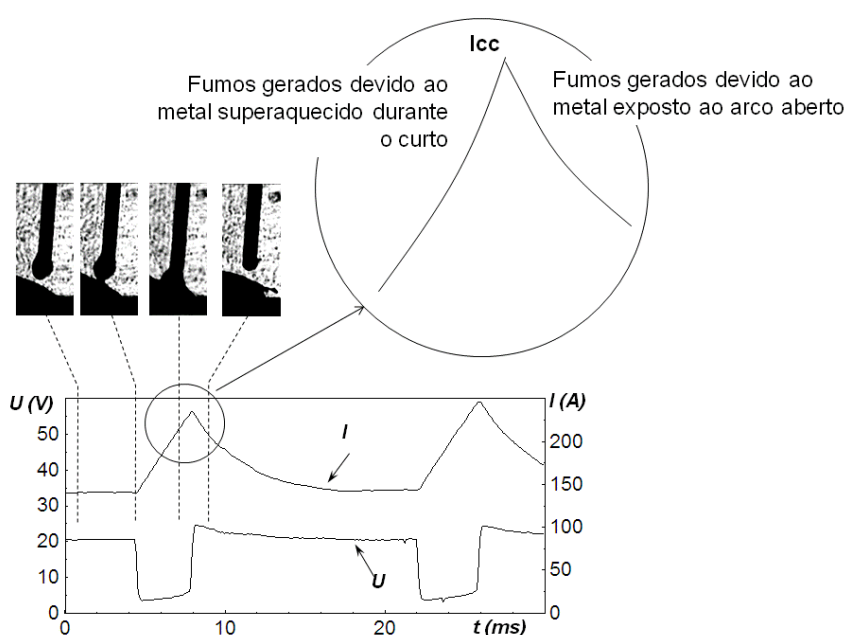


Figura 5.2 – Mecanismos de geração de fumos pela corrente de curto-circuito (I_{cc})

5.2 Estudo da influência do comprimento do arco sobre a geração de fumos

Analisando os resultados apresentados na Tab. 5.1, agora em relação aos três níveis (longo, adequado e curto) de comprimentos de arco em duas regulagens de indutância (indutâncias baixa e média), a relação entre o comprimento do arco e a taxa de geração de fumos (TGF) pode ser feita, tal como ilustrada na Fig. 5.3. Como visto na Fig. 5.4, a corrente de curto-circuito (I_{cc}) aumenta notavelmente à medida que o arco fica mais longo, acompanhada de um aumento significativo da taxa de geração de fumos (TGF). Entretanto, observando as Fig. de 5.5 a 5.7, que ilustram outras tendências da Tab. 5.1, pode-se dizer que o tempo de curto-circuito (t_{cc}) não apresenta nenhuma tendência de aumento estatístico à medida que o arco fica mais longo, apesar do aumento na taxa de geração de fumos (TGF), como mostra a Fig. 5.5. No entanto, tanto o tempo de arco aberto (t_{ab}) e diâmetro de gota (ϕ_{gota}) apresentaram tendências claras de crescimento à medida que o arco fica mais longo, como vistos nas Fig. 5.6 e 5.7, respectivamente. E, nestes casos, a taxa de geração de fumos também aumentou. Isto significa que existem outros parâmetros que atuam simultaneamente com o comprimento do arco em adição à corrente de curto-circuito (I_{cc}).

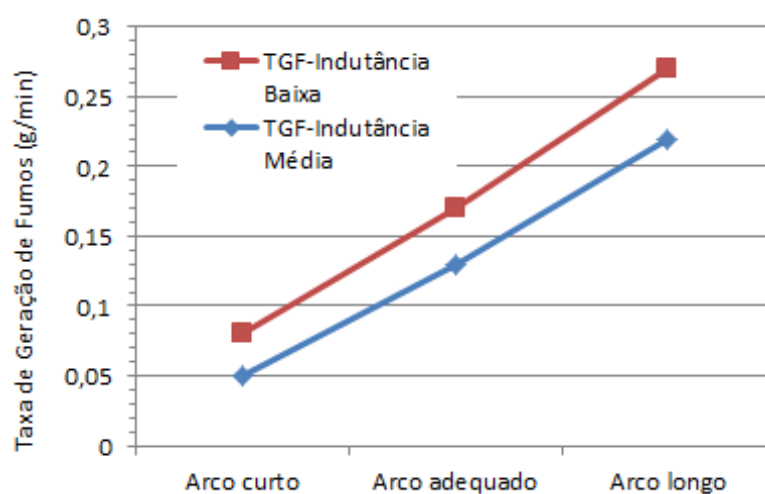


Figura 5.3 – Relação entre o comprimento do arco e a taxa de geração de fumos (TGF) usando os dados apresentados na Tab. 5.1

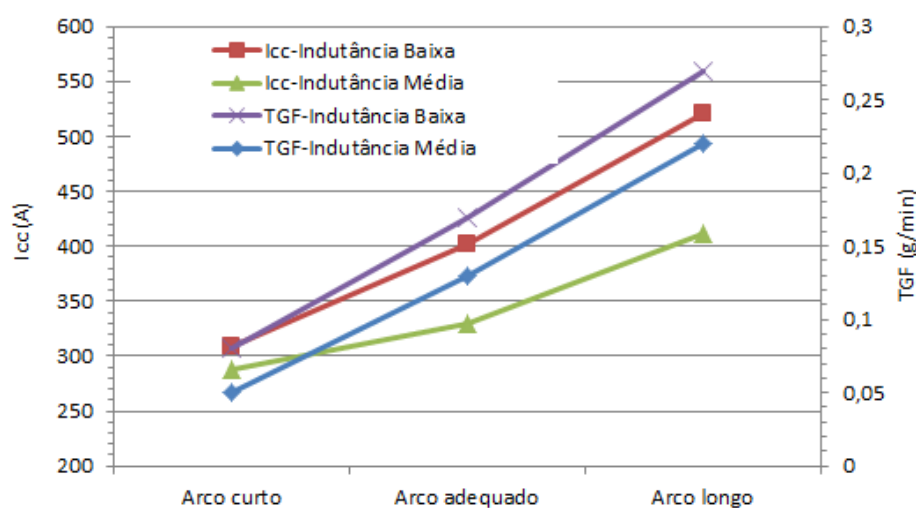


Figura 5.4 – Corrente de curto-circuito (I_{cc}) e taxa de geração de fumos em função do comprimento do arco

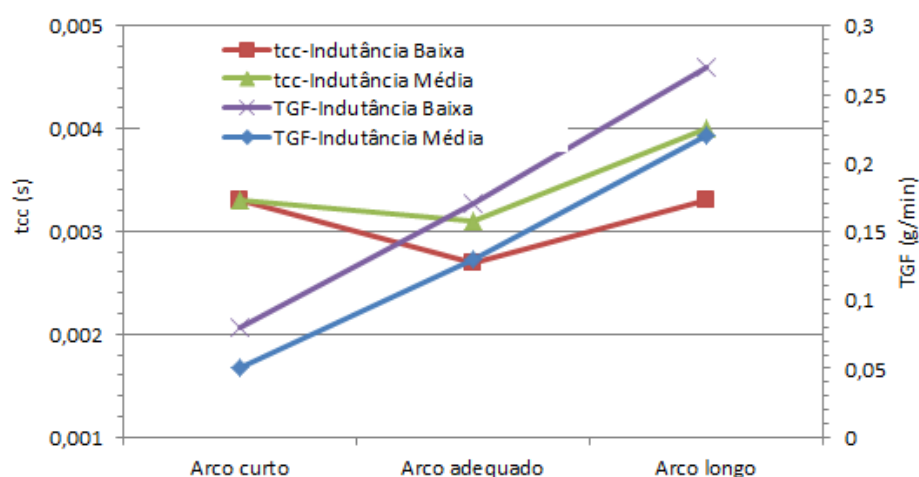


Figura 5.5 – Tempo médio de curto- circuito (t_{cc}) e a taxa de geração de fumos (TGF) em função do comprimento do arco

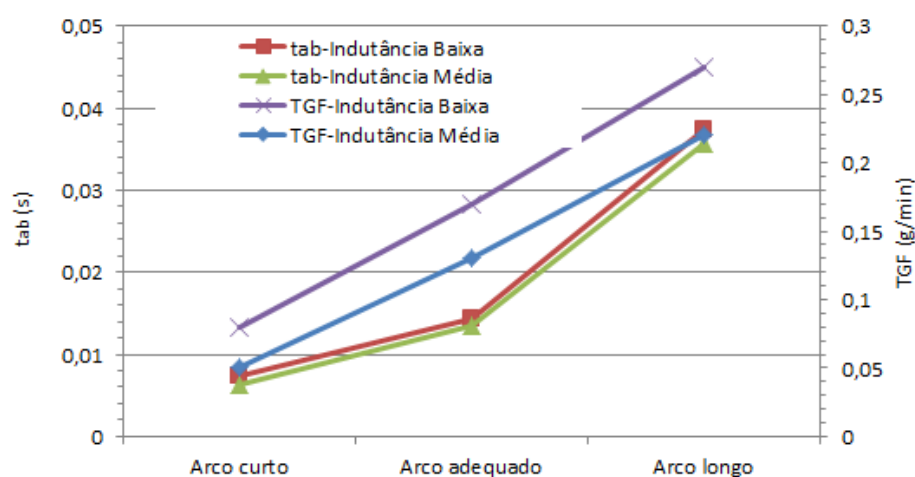


Figura 5.6 – Tempo médio de arco aberto (t_{ab}) e a taxa de geração de fumos (TGF) em função do comprimento do arco

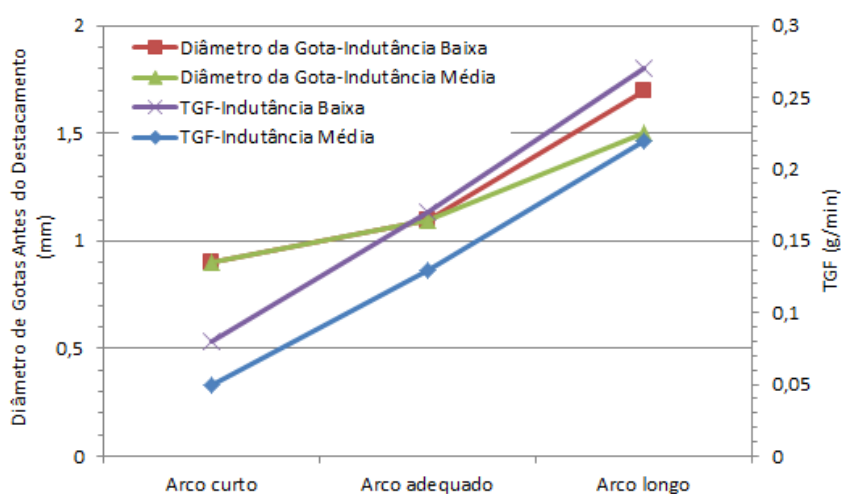


Figura 5.7 – Diâmetro de gotas antes do destacamento (ϕ_{gota}) e a taxa de geração de fumos (TGF) em função do comprimento do arco

Na tentativa de isolar o efeito do comprimento do arco na geração de fumos, uma nova série de testes foi feita usando uma função especial do equipamento Fronius CMT como fonte de energia (item 3.1 do capítulo III). Dois gases de proteção, uma mistura de Ar+15%CO₂ e CO₂ puro foram usados para verificar a repetitividade das tendências. Ao utilizar o equipamento definido para trabalhar no modo sinérgico pulsado, foi possível variar o comprimento do arco através da variação do ajuste fino (“trimmer”, o que, de fato, define a velocidade de alimentação do arame (V_{alim}), para a obtenção de diferentes comprimentos de arco, na mesma corrente média), mantendo-se os restantes dos parâmetros invariáveis. Como foi operado no modo pulsado, o tempo de arco aberto (t_{ab}) e o diâmetro de gotas antes do destacamento (ϕ_{gota}) são definidos pelos parâmetros de pulsação, como mostrados na Tab. 5.2. Assim, pode-se considerar que apenas o comprimento do arco foi alterado entre os experimentos (o propósito de isolar o comprimento do arco foi atingido).

Tabela 5.2 - Matriz experimental para determinar o efeito do comprimento do arco sobre a geração de fumos (dois valores repetidos para cada condição – Fonte de energia 2)

Exp	Modo Operacional	Regulados		Monitorados (Ar+15%CO ₂)								Determinados	
		Trim/ Ind	I_{reg} (A)	I_p (A)	I_b (A)	t_p (ms)	t_b (ms)	I_m (A)	I_{RMS} (A)	U_m (V)	V_{alim} (m/min)	ϕ_{gota} (mm)	TGF (g/min)
PULS1 & 2	Pulsado (arco longo)	22/0	177	509/ 512	33.8/ 30.0	1.45/ 1.45	6.18/ 6.33	152/ 150	227/ 227	27.4/ 27.3	5.55/ 5.54	1.0/ 1.0	0.05/ 0.05
PULS3 & 4	Pulsado (arco curto)	17/0	178	525/ 515	29.2/ 32.6	1.45/ 1.45	6.52/ 6.32	148/ 150	228/ 226	25.8/ 25.9	5.63/ 5.67	1.0/ 1.0	0.01/ 0.01

Nota: Exp = Experimento; Trim – Ajuste fino; Ind – Indutância; I_{reg} – Corrente de regulagem; I_p – Corrente de pulso; I_b – Corrente de base; t_p – tempo de pulso; t_b – tempo de base; I_m – Corrente média; I_{RMS} – Corrente eficaz; U_m – Tensão média; V_{alim} – Velocidade de alimentação do arame; ϕ_{gota} – Diâmetro de gota; TGF – Taxa de geração de fumos

Como pode ser visto na Fig. 5.8, o arco longo (confirmado pela mais alta tensão média monitorada) leva a maior taxa de geração de fumos (TGF). Este resultado confirma o conhecimento comum apontado na literatura atual, mas agora, com a garantia da não dependência de outros fatores. Por exemplo, Quimby e Ulrich (1999) demonstraram que para aproximadamente uma mesma corrente, arame e gás de proteção, que a taxa de geração de fumos (TGF) aumenta à medida em que a tensão aumenta no modo da transferência metálica por curto-circuito. No entanto, esses autores não mencionaram uma potencial mudança em outros fatores governantes à medida que a tensão foi aumentada.

É importante salientar que para uma mesma velocidade de alimentação o efeito do comprimento do arco na (TGF) seria ainda mais notável, considerando-se que a velocidade de alimentação do arame (V_{alim}) é ligeiramente maior para a condição de arco curto, o que significa mais material fundido por unidade de tempo, por conseguinte menos fumos

gerados por unidade de tempo.

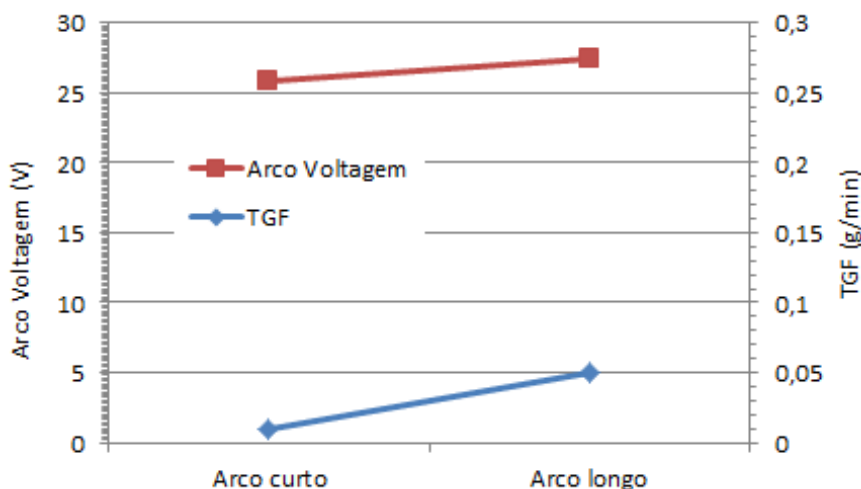


Figura 5.8 - Arco voltagem e taxa de geração de fumos (TGF) em função do comprimento do arco

Também é importante mencionar que os valores muito baixos determinados da taxa de geração de fumos (TGF) estão em pleno acordo com os dados de outros autores, entre eles Rosado, Pires e Quintino (1999) e Wallace, Fischbach e Kovein (2001). De acordo com este último, os níveis de emissão de fumos foram significativamente menores para o pulsado do que o processo MIG/MAG convencional em medições também em instalações fabris, e não apenas em determinações laboratoriais. Os autores citam que esta redução na geração de fumos é devido à capacidade da corrente pulsada de transferir gotas metálicas a partir do arame, através do arco, para o metal de base, com o mínimo de calor. Mendez, Jenkins e Eagar (2000), por outro lado, sugere que menos fumos são produzidos por causa do tamanho pequeno das gotas (menos metal é vaporizado), desde que os cálculos indiquem que a temperatura da superfície da ponta do eletrodo aumenta com o tamanho da gota (mas eles afirmam que a gota destacamento, uma vez que ela fica em regime de calor durante a transferência globular por um tempo relativamente longo, não é esperado melhorias significativas).

5.3 Estudo da influência do tempo de arco aberto sobre a geração de fumos

Na tentativa de isolar o efeito do tempo de arco aberto (t_{ab}) sobre a geração de fumos, uma nova série de testes foram feitos usando-se uma função especial da fonte de soldagem Fronius CMT, item 3.1 do capítulo III (sinergismo em tensão constante convencional com transferência metálica por curto-circuito e “transferência de metal frio”, CMT) e dois gases de proteção, uma mistura de Ar+15%CO₂ e CO₂ puro. Em ambos os

casos, espera-se a partir da fonte de energia a manutenção do mesmo comprimento do arco para os diferentes gases de proteção. No entanto, os aumentos médios de tensão (para um dado arame, um maior teor de CO₂ exige uma maior tensão média, U_m , e uma menor velocidade de alimentação do arame, V_{alim} , para um mesmo comprimento do arco).

A Tab. 5.3 apresenta os resultados dos testes de soldagem. O modo de fonte CMT fornece um arco sempre curto, como evidenciado pelas medidas de tensão (13,9 V para a mistura Ar + 15%CO₂ e 16,3 V para 100%CO₂) e uma transferência metálica muito boa (IV_{cc} variando de 0,10 a 0,16), em contraste com o modo sinérgico. Pode-se dizer que a partir do gás de proteção CO₂ puro é esperado mais respingos (maior IV_{cc}), mas como mostrado em um trabalho anterior (Meneses et al., 2013), não há uma correlação direta entre respingos e a taxa de geração de fumos (TGF). Como pode ser visto, para ambos os modos de soldagem (sinergismo e CMT), o tempo de arco aberto (t_{ab}) tornou-se maior para o gás de proteção CO₂ puro. A taxa de geração de fumos é menor para o CMT.

Tabela 5.3 – Matriz experimental para determinar o efeito do tempo de arco aberto (t_{ab}) sobre a geração de fumos (valores para duas repetições para cada condição – fonte de energia CMT)

Exp	Modo de Operação / Gás de proteção em % CO ₂	Regulados		Monitorados				Determinados					
		Trim/ Ind	I_{reg} (A)	I_m (A)	I_{RMS} (A)	U_m (V)	V_{alim} (m/min)	IV_{cc}	I_{cc} (A)	t_{cc} (ms)	t_{ab} (ms)	$\varnothing_{gota}$ (mm)	TGF (g/min)
SYN 1 & 2	Sinérgico/ 15% CO ₂	0/0	153	148/ 152	153/ 157	18.4/ 17.7	3.71/ 3.68	0.67/ 0.70	228/ 227	3.3262/ 3.3631	7.6918/ 7.3599	1.2/ 1.2	0.09/ 0.07
SYN 3 & 4	Sinérgico / 100% CO ₂	8/0	148	148/ 148	155/ 154	20.8/ 21.1	3.31/ 3.39	0.99/ 0.95	263/ 261	2.8156/ 2.7610	16.6322/ 16.9273	1.3/ 1.3	0.20/ 0.19
CMT 1 & 2	CMT/ 15% CO ₂	0/0	155	152/ 152	173/ 171	13.9/ 13.9	4.30/ 4.36	0.10/ 0.11	307/ 299	6.0778/ 5.8585	6.3389/ 6.1326	1.1/ 1.1	0.02/ 0.02
CMT 3 & 4	CMT/ 100% CO ₂	0/0	176	151/ 152	172/ 172	15.8/ 16.7	4.26/ 4.28	0.16/ 0.13	313/ 298	7.6218/ 6.4598	7.6721/ 6.8335	1.2/ 1.2	0.05/ 0.05

Nota: SYN = sinérgico; CMT = transferência de metal frio

A Fig. 5.9 mostra que quanto maior o tempo de arco aberto (t_{ab}) maior a taxa de geração de fumos (TGF). E que a diferença no (t_{ab}) para os dois gases de proteção foi mais significativa para o modo sinérgico, assim como o efeito sobre a TGF. É importante lembrar que, considerando-se que as velocidades de alimentação do arame (V_{alim}) são mais baixas para as condições 100%CO₂, o que significa que menos material é fundido por unidade de tempo, consequentemente menos fumos são gerados por unidade de tempo. Portanto, pode-se considerar que para uma mesma velocidade de alimentação do arame o efeito do (t_{ab}) seria ainda mais distinto.

Quando o modo CMT foi usado, pode-se observar que a corrente de curto-circuito (I_{cc}) e o diâmetro de gotas antes do destacamento (ϕ_{gota}) foram aproximadamente os mesmos, independente do gás de proteção. O tempo de curto-circuito (t_{cc}) tornou-se menor para 100%CO₂, mas como mostrado anteriormente, não se espera que a geração de fumos cresça em função do tempo de curto-circuito (t_{cc}). Assim, o propósito de se isolar o tempo de arco aberto (t_{ab}) para avaliar o seu efeito sobre a geração de fumos foi conseguido quando utilizando o modo CMT. No entanto, no modo sinérgico o propósito de se isolar o (t_{ab}) não foi totalmente bem sucedido, uma vez que, apesar do mesmo diâmetro de gota (ϕ_{gota}) e baixo tempo de curto-circuito (t_{cc}), a corrente de curto-circuito (I_{cc}) foi também maior quando o gás de proteção 100%CO₂ foi utilizado. Como visto, no item 5.1, uma maior (I_{cc}), tende também aumentar a taxa de geração de fumos (TGF). Este efeito combinado (maior t_{ab} e maior I_{cc}) pode justificar a maior importância do efeito de tempo de arco aberto (t_{ab}) sobre a taxa de geração de fumos quando o modo sinérgico foi usado. Não obstante, pode-se dizer que o (t_{ab}) também é um parâmetro que rege a geração de fumos (quanto maior t_{ab} , maior a geração de fumos).

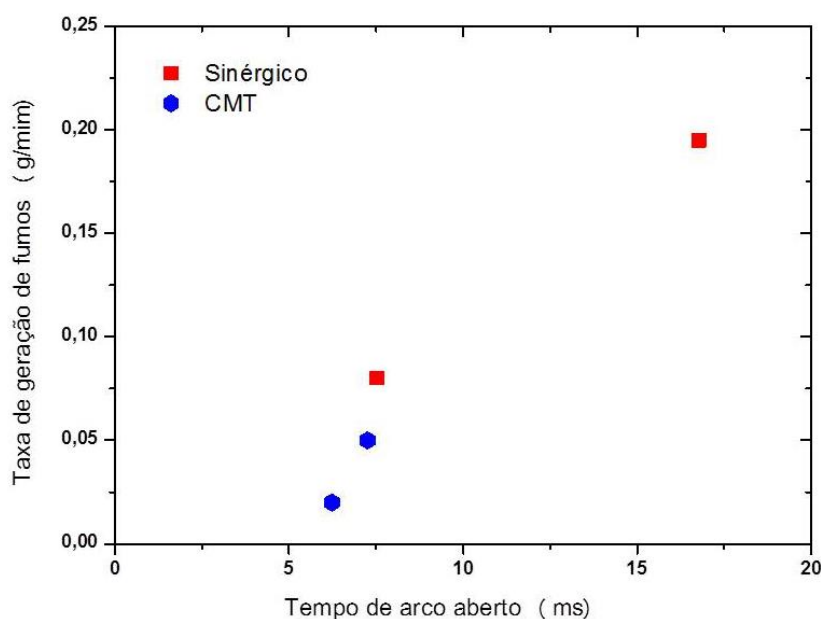


Figura 5.9 – Tempo de arco aberto (t_{ab}) e a taxa de geração de fumos (TGF) em função da composição do gás de proteção (assumindo um mesmo comprimento de arco) para dois diferentes modos operacionais (sinérgico e CMT): os pontos do lado esquerdo foram obtidos com Ar+15%CO₂, enquanto os da direita com 100%CO₂

E deve-se ser tomada em conta nesta análise que nos processos de soldagem com interrupção do arco, tal como com o modo de transferência metálica por curto-circuito (e, de certa forma, transferência com o modo pulsado), o efeito do calor do arco na superfície da

gota é dependente do tempo (é necessário um tempo para aquecer a superfície da gota após reacender o arco). Assim, é altamente justificado o efeito do tempo de arco aberto (t_{ab}) sobre a taxa de geração de fumos (TGF) e a baixa influência deste fator quando o modo CMT foi aplicado.

Agora, comparando os resultados dos modos Sinérgico e CMT, utilizando um mesmo gás de proteção e corrente média (I_m), observa-se uma menor (TGF) para o modo CMT. De fato, os menores valores alcançados com o CMT (Tab. 5.3), são muito semelhantes aos alcançados com o modo pulsado (Tab. 5.2), mas ainda menores quando o modo pulsado foi usado, que está de acordo com os resultados da TGF relatados por Pires et al. (2006). Também para uma menor tensão (presumidamente comprimento de arco curto), o t_{ab} foi menor, independentemente de uma maior corrente de curto-circuito (I_{cc}) obtida com o modo CMT. Este fato, sugere que os efeitos do comprimento do arco e do t_{ab} prevaleçam sobre o efeito da I_{cc} .

5.4 Influência do diâmetro de gotas antes do destacamento (ϕ_{gota}) sobre a geração de fumos

Na tentativa de analisar o efeito do diâmetro de gotas antes do destacamento (ϕ_{gota}) na geração de fumos, os dados criados para compor a Tab. 5.1 são novamente utilizados. Como visto na Fig. 5.7, quanto maior o diâmetro de gotas antes do destacamento (ϕ_{gota}), maior a taxa de geração de fumos (TGF). Esse resultado é consistentemente para as duas condições, indutâncias baixa e média, de forma sensível. No entanto, as condições (comprimento do arco) que tiveram o maior crescimento do diâmetro das gotas antes do destacamento (ϕ_{gota}) também tenderam à uma maior taxa de geração de fumos (TGF), como pode ser visto na Tab. 5.1. Além disso, o ϕ_{gota} se torna maior ao mesmo tempo em que a corrente de curto-circuito (I_{cc}) e o tempo de arco aberto (t_{ab}) também aumentam. Assim, o efeito do ϕ_{gota} não foi isolado. Os quatro fatores (I_{cc} , comprimento do arco, t_{ab} e ϕ_{gota}) em conjunto apresentaram evidências de que os maiores valores favorecem à emissão de fumos. Assim, a busca para a influência do ϕ_{gota} sobre a taxa de geração de fumos não foi totalmente bem sucedido, embora nenhuma tendência na relação inversa entre ϕ_{gota} e TGF é improvável com base nos dados atuais. Mendez, Jenkins e Eagar (2000), apresentaram interessantes modelos para explicar a transferência de calor através da gota (transferência de calor mais rápida implica em menores temperaturas na gota e menos evaporação). Seguindo o raciocínio dos autores e estendendo-o à transferência por curto-circuito, é razoável afirmar que o efeito do tamanho de gota na taxa de geração de fumos iria acontecer apenas durante o tempo de arco aberto (t_{ab}) em uma transferência por curto-

circuito (a razão para correlação entre esses dois fatores) quando o regime de gota seria semelhante de uma transferência globular (maior TGF).

5.5 Considerações finais

Considerando as condições experimentais (processo de soldagem MIG/MAG por curto-circuito, com arame AWS ER70S – 6, diâmetro 1,2 mm protegido com a mistura Ar + 25%CO₂ ou 100%CO₂, mantendo-se fixos a corrente média ($I_m = 150 \pm 2$ A), e a velocidade de soldagem ($V_s = 17,4$ cm/min, soldagens foram realizadas em chapas de aço carbono comum em posição plana) e o método aplicado para isolar o efeito da corrente de curto-circuito (I_{cc}), comprimento do arco (tensão de soldagem), tempo de arco aberto (t_{ab}) e diâmetro de gotas antes do destacamento (ϕ_{gota}) sobre a taxa de geração de fumos (TGF), concluiu-se que I_{cc} mais elevadas, maiores comprimentos de arco e maiores t_{ab} favorecem individualmente o aumento da TGF (massa de fumos por unidade de tempo), mas se eles agirem em conjunto na mesma direção, o que é normal em consequência de um curto-circuito no processo MIG/MAG, a contribuição deles sobre a emissão de fumos é mais significativa. No entanto, o isolamento do ϕ_{gota} sobre a TGF não pôde ser determinada, uma vez que não foi possível separar os efeitos dos outros três fatores. Entretanto, não há qualquer evidência de que um maior ϕ_{gota} poderia diminuir a TGF.

CAPÍTULO VI

INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO GÁS DE PROTEÇÃO E DA REGULARIDADE DE TRANSFERÊNCIA METALICA SOBRE A EMISSÃO DE CO e CO₂ EM SOLDAGEM MIG/MAG POR CURTO-CIRCUITO

6.1 Metodologia básica

Para verificar a influência da composição de gases de proteção sobre a emissão de gases tóxicos/asfixiantes pelo processo de soldagem MIG/MAG por curto-circuito na zona de respiração do soldador/ambiente de trabalho, foi proposto o seguinte planejamento:

- a) Determinar o efeito da composição do gás de proteção sobre a emissão de CO e CO₂ sob as mesmas condições de soldagem;
- b) Determinar o efeito da regularidade de transferência metálica sobre a emissão de CO e CO₂ sob as mesmas condições de soldagem;
- c) Determinar a concentração dos gases CO e CO₂ em diferentes regiões de exposição para o soldador em soldagem semi-automática e ambiente não confinado;
- d) Determinar a concentração dos gases CO e CO₂ em diferentes regiões de exposição para o operador em soldagem em ambiente confinado.

Nos itens a seguir são descritos com mais detalhes os experimentos para atender cada alínea do planejamento. Mas de uma forma comum a todas alíneas, as medições de CO e CO₂ foram feitas com o equipamento e metodologia descritos no item 3.4 do capítulo III. Para evitar o efeito de outros parâmetros, todas as soldagens foram feitas com os mesmos consumíveis (arame-eletrodo classe AWS ER70S-6, com 1,2 mm de diâmetro) e uma dada corrente média, usando-se as melhores condições de regularidades de transferência para cada gás de proteção. As soldagens foram realizadas como simples deposição sobre chapas de aço carbono ABNT 1020. A tocha de soldagem em relação ao cordão de solda foi mantida em um ângulo de ataque de $10 \pm 1^\circ$, puxando no sentido longitudinal do cordão. Foi procurado fazer cordões de solda similares (mesmo comprimento, mesmo volume e em um mesmo tempo), ou seja, pela óptica de exposição do

soldador/operador. Para se manter o mesmo volume de cordão e mesmo tempo de soldagem, aplicou-se as mesmas velocidades de soldagem e de alimentação para todas combinações gás de proteção-arame eletrodo, variando-se a DBCP (distância bico de contato-peça) para corrigir a corrente sob o efeito de diferentes gases de proteção.

6.2 Determinação do efeito da composição do gás de proteção sobre a emissão de CO e CO₂ sob as mesmas condições de soldagem

Para se determinar o efeito da composição dos gases de proteção sobre a emissão dos gases CO e CO₂, as soldagens foram feitas utilizando-se uma coifa especial, conforme item 3.5.3 do capítulo III, com a sonda posicionada a uma distância de 70 mm em relação à tocha no plano médio do arco. Foram feitas soldagens com 4 diferentes gases de proteção, a saber, Ar+8%CO₂, Ar + 25%CO₂, Ar + 5%O₂ e 100%CO₂. Porém, para evitar o efeito do comprimento de arco sobre o comportamento de cada gás, ao invés de se manter a mesma regulagem de tensão para todas as misturas, que levaria a comprimentos de arcos diferentes, procurou-se a condição de maior estabilidade de transferência metálica por curto-circuito para cada mistura e se fez a comparação nestas condições (que poderia levar a tensões de regulagem diferenciadas, mas pelo menos a uma condição mais similar em termos de comprimento de arco). A fonte de soldagem utilizada nesta etapa do trabalho foi um equipamento de soldagem de uso comercial (Lincoln Power Wave 455 STT), já descrita no item 3.1 do capítulo III.

Para achar a condição de maior estabilidade de transferência, foram feitas soldagens variando-se a regulagem de tensão de soldagem para todas as misturas, conforme a faixa de tensão refinada proposta por Souza (2010), de modo a se obter comprimentos de arcos desde muito curtos a longos para esse tipo de transferência. As condições de maiores estabilidades de transferência foram determinadas para uma dada corrente média almejada de soldagem, arbitrariamente escolhida como $I_m = 175 \pm 2$ A (mantendo-se a regulagem do fator indutivo na posição média, zero). Das soldagens com cada uma das tensões de regulagem, foram medidos e/ou calculados o índice de regularidade (IV_{cc}) já descrito no item 4.1.1 do capítulo IV, com a finalidade de se determinar as condições de maiores estabilidades da transferência metálica por curto-circuito, usando-se o Critério Laprosolda de Estabilidade de Transferência Metálica.

A Tab. 6.1 apresenta os resultados dos experimentos da etapa para se achar as condições de maiores estabilidades. Em destaque as condições paramétricas de um valor mínimo de IV_{cc} para cada mistura, as quais correspondem à regulagens de tensão que leva à condição de maior estabilidade de transferência.

Tabela 6.1 – Parâmetros de regulação e monitoramento dos testes para definição das condições de melhores estabilidades de transferência ($I_m = 175 \pm 2$ A)

Gás de proteção	Exp	Regulados				Monitorados		IV _{cc}
		U (V)	V _{alim} (m/min)	Vs (cm/min)	DBCP (mm)	U _{média} (V)	I _{média} (A)	
Ar+8%CO ₂	1	18	3,60	20,81	12	17,3	174,0	0,87
	2	19	3,60	20,81	12	18,0	174,3	0,67
	3	20	3,60	20,81	13	18,9	173,0	0,70
100%CO ₂	1	21	3,60	20,81	10	19,9	175,0	1,68
	2	22	3,60	20,81	10	20,7	176,4	1,49
	3	23	3,60	20,81	10	21,6	173,9	1,39
	4	24	3,60	20,81	9	22,5	177,0	1,24
	5	25	3,60	20,81	5	23,6	175,5	1,33
Ar + 25%CO ₂	1	19	3,60	20,81	12	18,0	174,0	1,84
	2	20	3,60	20,81	14	18,9	172,7	1,03
	3	21	3,60	20,81	13	19,7	175,0	1,22
	4	22	3,60	20,81	12	20,6	177,0	1,24
Ar + 5%O ₂	1	17	3,60	20,81	11	16,4	175,5	0,72
	2	18	3,60	20,81	11	17,3	177,0	0,68
	3	19	3,60	20,81	12	18,1	177,0	0,64
	4	20	3,60	20,81	13	19,2	174,0	0,98

Nota: Exp = experimento; U = Tensão de regulação; V_{alim} = velocidade de alimentação; Vs = velocidade de soldagem; DBCP = distância bico de contato-peça; U_{média} = tensão média; I_{média} = corrente média; IV_{cc} = índice Vilarinho de regularidade de transferência metálica por curto-circuito.

A Tab. 6.2 apresenta os parâmetros regulados e monitorados para os testes com as condições de maior estabilidade de transferência para cada gás de proteção, conforme Tab. 6.1. Cada condição foi repetida 3 vezes. Já a Tab. 6.3 apresenta os valores dos teores de CO e CO₂ medidos para cada condição da Tab. 6.2, assim como da concentração de O₂. As medições das concentrações dos gases foram feitas após duas parcelas de tempo (20 e 25 s), para verificar a continuidade das tendências dos valores das concentrações. A medição de O₂ foi também feita tanto por que o aparelho mede os 3 gases ao mesmo tempo assim como para se ter uma noção da diluição dos gases gerados pelo arco com a atmosfera.

Tabela 6.2 - Parâmetros de regulação e monitoramento dos testes para determinação das concentrações de CO_2 e CO , utilizando diferentes gases de proteção e uma vazão de 14 l/min

Gás de proteção	Exp	Regulados				Monitorados		IV_{cc}
		U (V)	V_{alim} (m/min)	Vs (cm/min)	DBCP (mm)	$U_{\text{média}}$ (V)	$I_{\text{média}}$ (A)	
Ar + 8% CO_2	A1	19	3,60	20,81	12	18,3	174,4	0,93
	A2	19	3,60	20,81	12	18,3	174,1	0,89
	A3	19	3,60	20,81	12	18,3	173,9	0,87
Ar + 25% CO_2	B1	20	3,60	20,81	14	19,0	174,9	1,18
	B2	20	3,60	20,81	14	19,0	173,0	1,01
	B3	20	3,60	20,81	14	19,0	173,0	1,08
100% CO_2	C1	24	3,60	20,81	9	23,0	175,4	1,39
	C2	24	3,60	20,81	9	23,2	175,7	1,39
	C3	24	3,60	20,81	9	23,1	176,2	1,41
Ar + 5% O_2	D1	19	3,60	20,81	13	18,2	173,0	0,80
	D2	19	3,60	20,81	13	18,2	175,7	0,94
	D3	19	3,60	20,81	13	18,2	176,8	1,03

Tabela 6.3 – Concentrações de CO , CO_2 e O_2 medido na sonda em função do tempo para se fazer a coleta e diferentes gases de proteção

Gás de proteção	Tensão (V)	Exp	Tempo (s) / Concentração (% Vol.)					
			20			25		
			CO_2	CO	O_2	CO_2	CO	O_2
100% CO_2	24	A1	39,2	1,03	11,5	42,2	1,17	10,9
	24	A2	40,1	1,05	11,5	44,7	1,37	9,9
	24	A3	37,3	0,99	12,3	36,5	1,06	11,9
Ar+25% CO_2	20	B1	7,80	0,50	13,5	7,3	0,49	13,4
	20	B2	7,30	0,53	13,8	7,6	0,56	13,6
	20	B3	6,40	0,44	14,8	6,9	0,46	14,3
Ar+8% CO_2	19	C1	2,80	0,30	14,1	2,9	0,29	13,6
	19	C2	2,60	0,30	14,8	2,7	0,28	14,2
	19	C3	2,70	0,29	14,7	2,8	0,29	14,2
Ar+5% O_2	19	D1	0,00	0,00	19,7	0,0	0,01	18,5
	19	D2	0,00	0,00	19,0	0,0	0,02	17,5
	19	D3	0,00	0,00	19,7	0,0	0,01	17,5

As Fig. 6.1 e 6.2 mostram as relações entre as concentrações de CO_2 (Dióxido de carbono) e CO (Monóxido de carbono), respectivamente, em função do gás de proteção para os tempos de 20 s e 25 s. Verifica-se que o aumento do tempo para se fazer a coleta não interfere nas tendências, apesar de que, naturalmente, quanto maior o tempo maiores os teores de CO e CO_2 na região do sensor. Como esperado, quanto mais rico de CO_2 a composição do gás de proteção, mais CO e CO_2 são gerados no arco. No caso do CO_2 , a proteção com 100% CO_2 gera 5,7 vezes mais CO_2 para o ambiente e, possivelmente, para a

região de respiração do soldador do que a mistura Ar+25%CO₂, apesar do gás de proteção ter apenas 4 vezes mais CO₂ na sua composição. Esta relação também existe quando se compara a geração do 100%CO₂ em relação ao Ar+8%CO₂, gerando 14,7 vezes mais CO₂, quando se tem uma proporção de apenas 12,5 vezes maior na composição do gás de proteção. Já em relação à geração de CO, a maior proporção de CO₂ do gás de proteção 100%CO₂ é apenas 2,4 maior do que com a proteção com Ar+25%CO₂ e de 4,2 vezes maior do que com a proteção com Ar+8%CO₂.

O fato de se gerar menor concentração volumétrica de CO em relação ao CO₂ mostra que apenas uma pequena parcela do gás de proteção se transforma no arco em CO e se mantém nesta combinação fora do arco. Porém, o valor de CO₂ alcançado na região de medição chega a 40% de CO₂ na atmosfera ao se usar como proteção 100% de CO₂, valor bastante alto (gás asfixiante), considerando haver apenas cerca de 11% de O₂ na mesma região. Naturalmente o restante é o ar arrastado pelo arco para o meio (o que inclui nitrogênio). Também como esperado, o uso de um gás de proteção sem presença ou baixos teores de CO₂ é, do ponto de vista de geração de gases para a atmosfera, menos prejudicial à saúde e meio ambiente.

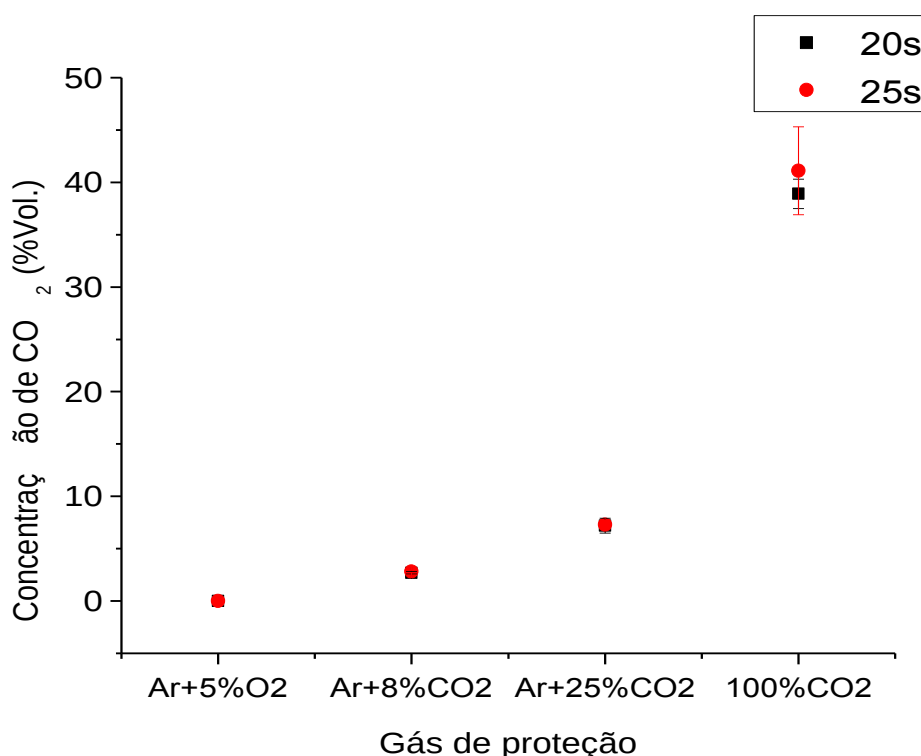


Figura 6.1 – Concentração de CO₂ em função do gás de proteção para diferentes gases de proteção

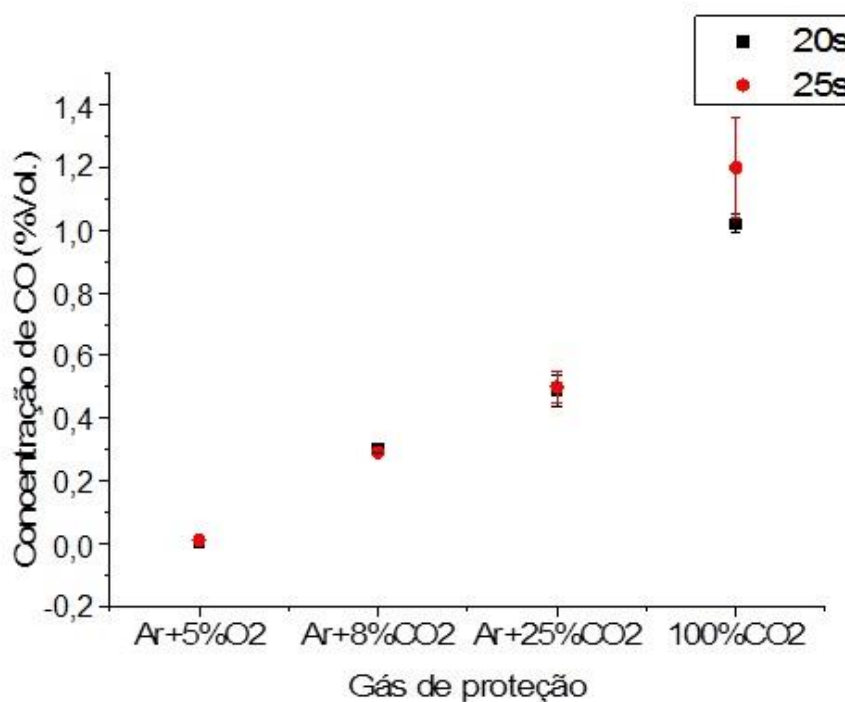


Figura 6.2 - Concentração de CO em função do gás de proteção para diferentes gases de proteção

6.3 Determinação do efeito da regularidade de transferência metálica sobre a emissão de CO e CO₂ sob as mesmas condições de soldagem

É importante ressaltar de que os resultados no item 6.2 são comparativos, considerando que para cada gás de proteção as soldagens foram feitas a um mesmo nível de corrente e com regulagem da tensão e de DBCP que dessem a maior estabilidade de transferência, ou seja, condições ideais de trabalho. Fica, então, a dúvida se ao se trabalhar com condições diferentes da de maior estabilidade de transferência, haveria diferentes níveis de geração de CO e CO₂ para o ambiente.

Para se determinar o efeito da regularidade de transferência metálica por curto-circuito sobre a emissão dos gases CO e CO₂, foram feitas soldagens utilizando-se a proteção 100%CO₂ (a que produz mais CO e CO₂, portanto a de maior sensibilidade para o estudo). As soldagens foram feitas para as condições de maior (24V) e menor (21V) regularidades de transferência (Tab. 6.1), de modo a se obter comprimentos de arcos desde muito curtos a longos para esse tipo de transferência. A fonte de soldagem utilizada nesta etapa do trabalho foi novamente o equipamento de soldagem comercial Lincoln Power Wave 455 STT.

De forma similar ao item 6.2, as medições das concentrações de CO e CO₂ foram feitas utilizando-se a coifa especial e as coletas após duas parcelas de tempo (20 e 25 s). A

Tab. 6.4 mostra os parâmetros regulados e monitorados de testes (cada condição foi repetida 3 vezes). Pode-se perceber pelo IV_{cc} que com 24 V obteve-se maior estabilidade de transferência (IV_{cc} médio de 1,40) do que em 21 V (IV_{cc} médio de 1,82). Já a Tab. 6.5 apresenta os valores dos teores de CO e CO₂ medidos para cada condição da Tab. 6.4.

Tabela 6.4 - Parâmetros de regulação e monitoramento dos testes para determinação das concentrações de CO₂, CO e O₂ em função da estabilidade de transferência utilizando como gases de proteção 100%CO₂ a uma vazão de 14 l/min

Gás de proteção	Exp	Regulados				Monitorados		IV_{cc}
		U (V)	V_{alim} (m/min)	V_s (cm/min)	DBCP (mm)	$U_{média}$ (V)	$I_{média}$ (A)	
100%CO ₂	1A	21	3,60	20,81	9	20,0	177,0	1,81
	2A	21	3,60	20,81	9	20,0	173,8	1,70
	3A	21	3,60	20,81	9	20,4	176,7	1,96
	1B	24	3,60	20,81	9	23,0	175,4	1,39
	2B	24	3,60	20,81	9	23,2	175,7	1,39
	3B	24	3,60	20,81	9	23,1	176,2	1,41

Tabela 6.5 – Concentrações de CO, CO₂ e O₂ medidas na sonda em função do tempo nas soldagens com proteção de 100%CO₂ em dois níveis de estabilidade de transferência

Gás de proteção	Tensão (V)	Exp	Tempo (s) / Concentração (% Vol.)					
			20			25		
			CO ₂	CO	O ₂	CO ₂	CO	O ₂
100%CO ₂	24	1A	39,2	1,03	11,5	42,2	1,17	10,9
	24	2A	40,1	1,05	11,5	44,7	1,37	9,9
	24	3A	37,3	0,99	12,3	36,5	1,06	11,9
	21	1B	40,5	0,88	11,6	43,0	1,03	10,4
	21	2B	35,8	0,81	13,2	40,2	1,11	11,4
	21	3B	38,9	0,88	11,9	40,9	1,09	11,1

As Fig. 6.3 e 6.4 mostram as relações entre as concentrações de CO₂ (Dióxido de carbono) e CO (Monóxido de carbono), respectivamente, em função da tensão. Como se pode ver, não há efeito da tensão (ou do comprimento de arco ou da estabilidade de transferência) na geração dos gases CO e CO₂.

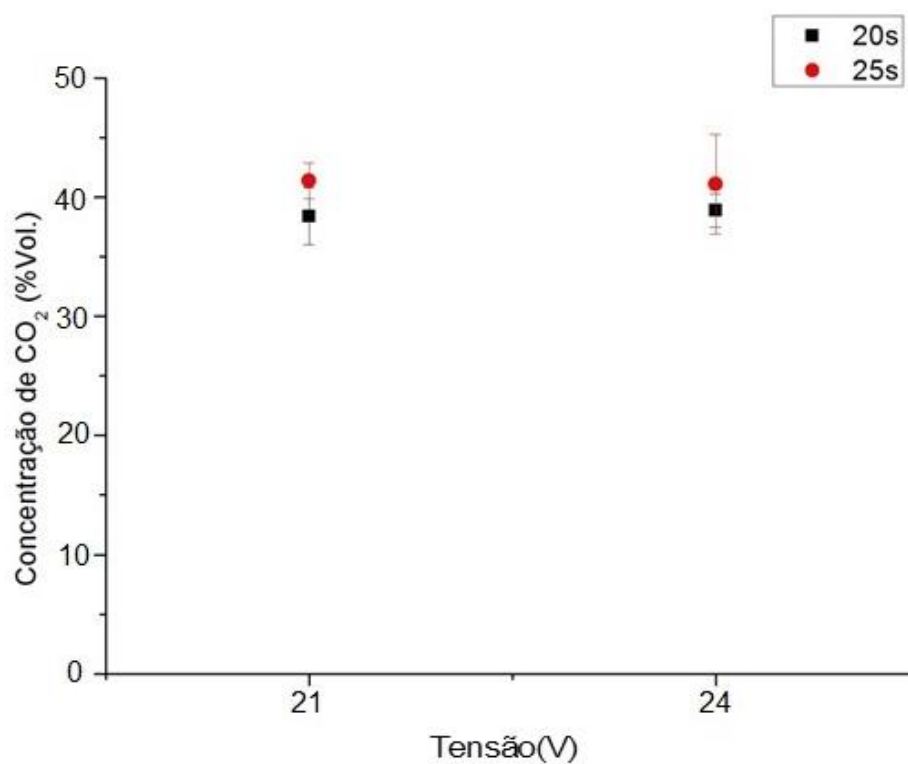


Figura 6.3 – Concentração de CO₂ em função da tensão (diretamente proporcional ao comprimento de arco e à estabilidade de transferência) na soldagem protegida com 100% CO₂

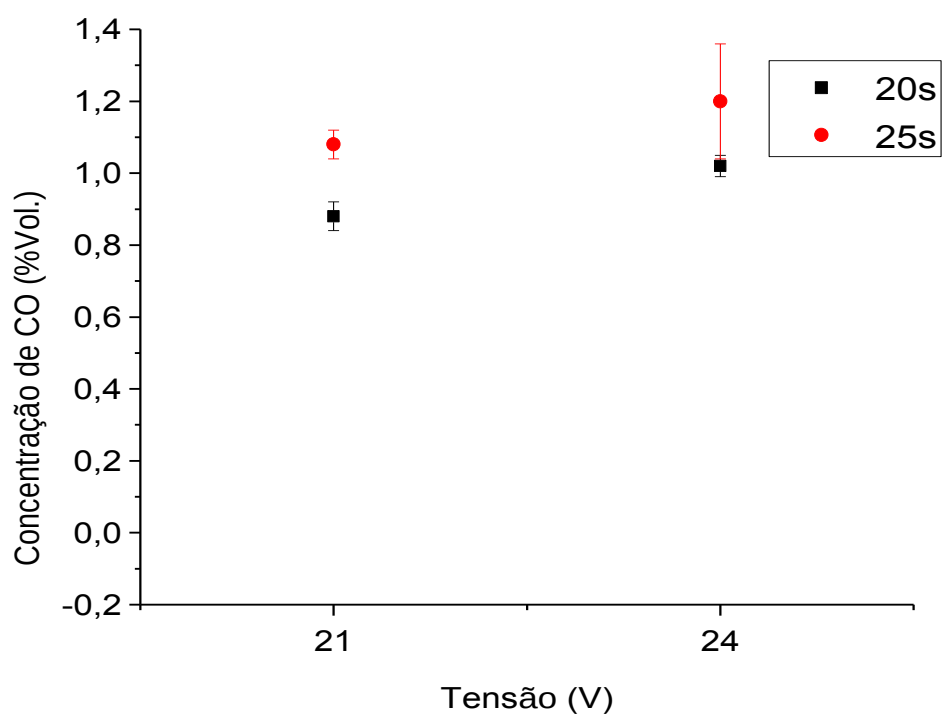


Figura 6.4 – Concentração de CO em função da tensão (diretamente proporcional ao comprimento de arco e à estabilidade de transferência) na soldagem protegida com 100% CO₂

Mas no experimento mostrado só foi possível regular duas tensões, já que para uma tensão maior se demandaria uma DBCP muito pequena para se manter a mesma corrente média almejada. Assim, procurou uma alternativa de se aumentar a corrente e tentar se conseguir três valores de estabilidade. Ao mesmo tempo, se poderia verificar também o efeito da intensidade de corrente na geração dos gases CO e CO₂.

Assim, condições de estabilidades de transferência foram determinadas também para uma dada corrente média almejada de soldagem arbitrariamente escolhida como $I_m = 192 \pm 2$ A (mantendo-se a regulação do fator indutivo na posição média, zero). Das soldagens com cada uma das tensões de regulação, foram medidos e/ou calculados o índice de regularidade (IV_{cc}) já descrito no item 4.1.1 do capítulo IV. As Tab. 6.6 e 6.7 apresentam, respectivamente, a parametrização e resultados da monitoração para os novos experimentos e os valores de gases gerados. Como se vê, o menor valor de tensão (arco muito curto) levou a um IV_{cc} maior (menor regularidade) e o de maior tensão (arcos mais longos) levou a um índice IV_{cc} menor ainda do que a tensão média. O fato de a maior estabilidade não ter se dado para 24 V, como nos demais experimentos é justificável pela maior corrente.

Tabela 6.6 - Parâmetros de regulação e monitoramento dos testes para determinação das concentrações de CO₂, CO e O₂ em função da estabilidade de transferência utilizando como gás de proteção 100%CO₂ a uma vazão de 14 l/min

Gás de proteção	Exp	Regulados				Monitorados		IV_{cc}
		U (V)	V_{alim} (m/min)	Vs (cm/min)	DBCP (mm)	$U_{média}$ (V)	$I_{média}$ (A)	
100%CO ₂	A1	22	4,5	26	12	21,1	190,9	1,77
	A2	22	4,5	26	12	21,2	194,0	1,67
	A3	22	4,5	26	12	20,9	193,3	1,65
	B1	24	4,5	26	13	23,0	190,0	1,59
	B2	24	4,5	26	13	23,0	191,0	1,61
	B3	24	4,5	26	13	23,1	190,0	1,56
	C1	26	4,5	26	10	24,5	194,0	1,16
	C2	26	4,5	26	10	24,8	190,0	1,12
	C3	26	4,5	26	10	24,4	194,0	1,22

Tabela 6.7 - Concentrações de CO, CO₂ e O₂ medidas na sonda em função do tempo, com o gás de proteção 100%CO₂, com arco mais curto (22 V), médio (24 V) e mais longo (26 V)

Gás de proteção	Tensão (V)	Exp	Tempo (s) / Concentração (% Vol.)					
			20s			25s		
			CO ₂	CO	O ₂	CO ₂	CO	O ₂
100%CO ₂	22	A1	35,9	0,85	12,7	40,8	1,02	11,5
	22	A2	20,9	0,51	15,7	26,3	0,57	15,6
	22	A3	39,3	1,06	12,0	44,2	1,20	10,1
	24	B1	40,1	1,31	11,6	44,1	1,49	10,1
	24	B2	34,1	1,04	13,2	36,7	1,20	12,0
	24	B3	29,8	0,94	14,0	29,2	0,93	13,8
	26	C1	37,0	1,15	12,2	36,6	1,12	12,2
	26	C2	32,5	0,98	13,3	29,8	0,97	13,6
	26	C3	29,4	0,89	13,5	27,2	0,86	14,4

As Fig. 6.5 e 6.6 mostram que as relações entre as concentrações de CO₂ (dióxido de carbono) e CO (monóxido de carbono) em função da tensão não mudam, como verificado anteriormente, ou seja, a tensão (ou do comprimento de arco ou da estabilidade de transferência) não afeta significativamente a geração dos gases CO e CO₂ pelo arco, pelo menos no modo de transferência por curto-circuito. Um fato interessante também a observar é de que também o valor de corrente média parece não influenciar na geração de gases, comparando-se as Tab. 6.5 e 6.7. Assim, ao contrário da emissão de fumos, não há efeito da tensão (ou do comprimento de arco ou da estabilidade de transferência) e da corrente média sobre a geração dos gases CO e CO₂.

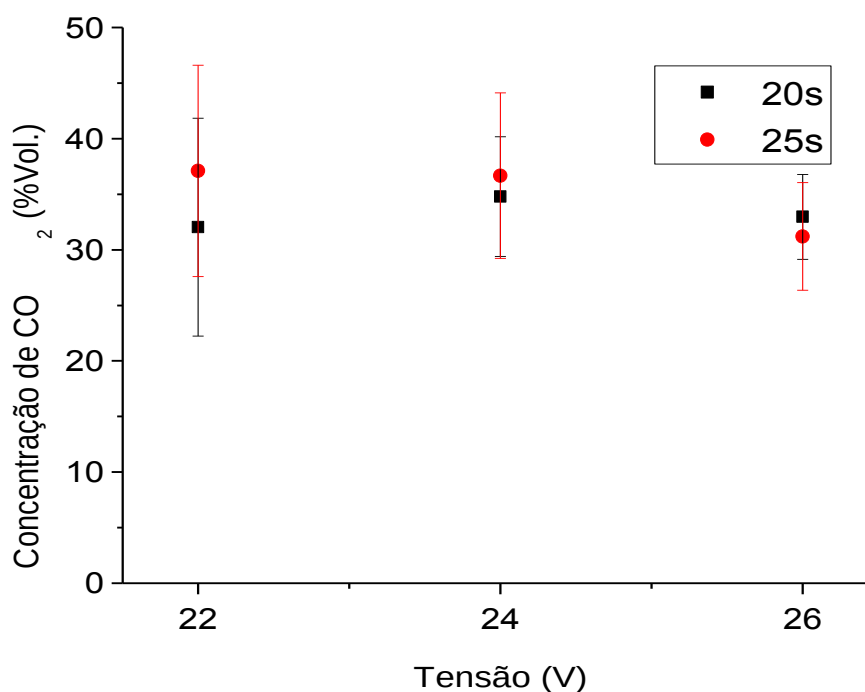


Figura 6.5 – Concentração de CO₂ em função da tensão (diretamente proporcional ao comprimento de arco e à regularidade de transferência) na soldagem protegida com 100% CO₂

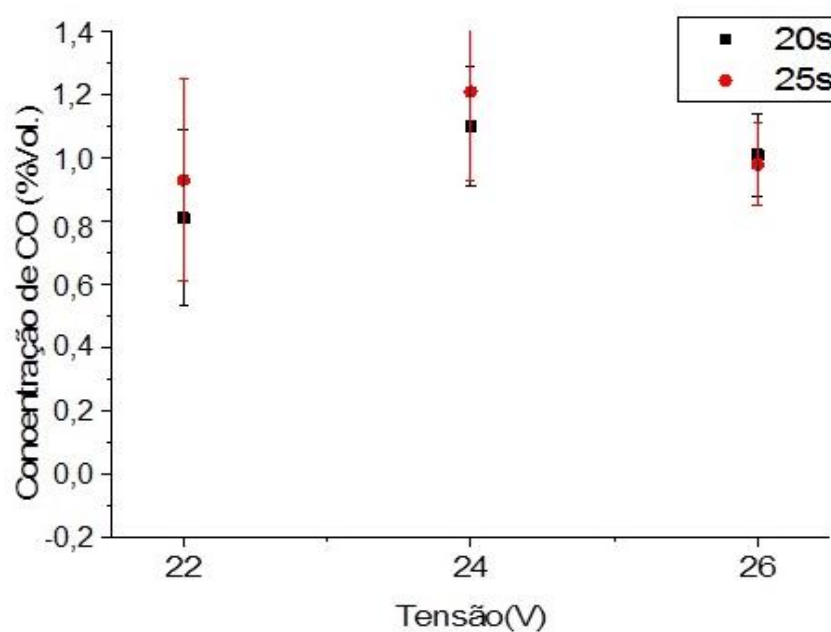


Figura 6.6 – Concentração de CO em função da tensão (diretamente proporcional ao comprimento de arco e à regularidade de transferência) na soldagem protegida com 100% CO₂

6.4 Determinações da concentração dos gases CO e CO₂ em diferentes regiões de exposição para o soldador em soldagem semi-automática e ambiente não confinado

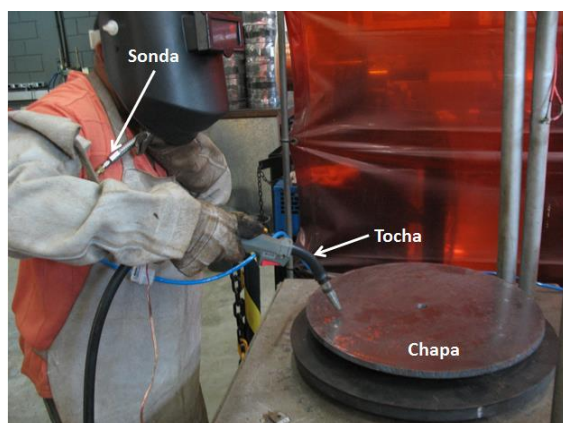
Antes de iniciar o uso do sistema para medição de gases, no caso o PC – Multigás foi feita uma nova aferição do mesmo, usando como referência o Oxybaby 6, item 3.4 do capítulo III. Houve pouca diferença dos valores de concentração de CO₂ em relação à aferição anterior, como mostra a Tabela 6.8.

Tabela 6.8 - Aferição do PC-MULTIGÁS usando como referência o Oxybaby 6 com a mistura Ar+15%CO₂

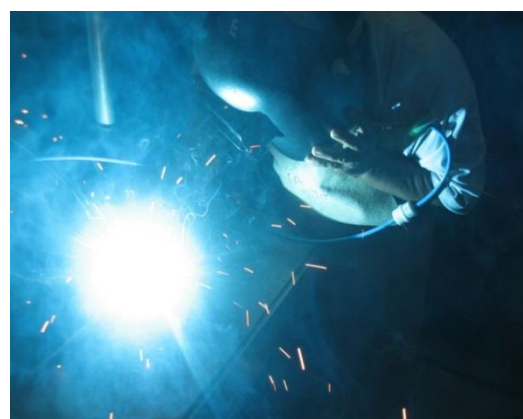
Medições	OXYBABY		PC- Multigás		
	O ₂	CO ₂	O ₂	CO ₂	CO
1	0,0	14,8	0,0	13,4	0,00
2	0,0	14,8	0,0	13,4	0,01
3	0,0	14,6	0,0	13,4	0,00
4	0,0	14,8	0,0	13,4	0,01
Média	0,0	14,7	0,0	13,4	0,005
Desvio Padrão	0,0	0,1	0,0	0,0	0,00577

Para se fazer a determinação em questão, foi usado um soldador e foram feitas coletas dos gases em três posições, a saber, com a sonda dentro da máscara na região de respiração do soldador, Fig. 6.7 (a) e (b), com sonda colocada a uma distância de ± 30 cm acima da chapa e sobre o arco, Fig. 6.8 (a) e (b), e com a sonda posicionada sobre a chapa ± 30 cm da tocha, Fig. 6.9 (a) e (b). As medições das concentrações de CO e CO₂ foram feitas durante um período de tempo de 0,5 e 1 minuto.

As soldagens foram feitas na condição de maior estabilidade (24 V) de transferência para o gás de proteção 100%CO₂ (a que produz mais gases, portanto a de maior sensibilidade para o estudo), com $I_m = 175 \pm 2$ A (mantendo-se a regulagem do fator indutivo na posição média, zero). A fonte de soldagem utilizada nesta etapa do trabalho foi a Lincoln Power Wave 455 STT. Durante as soldagens, foram medidos e/ou calculados o índice de regularidade (IV_{cc}).



(a)



(b)

Figura 6.7 - Sonda dentro da máscara na região de respiração do soldador: (a) sem arco; (b) com arco

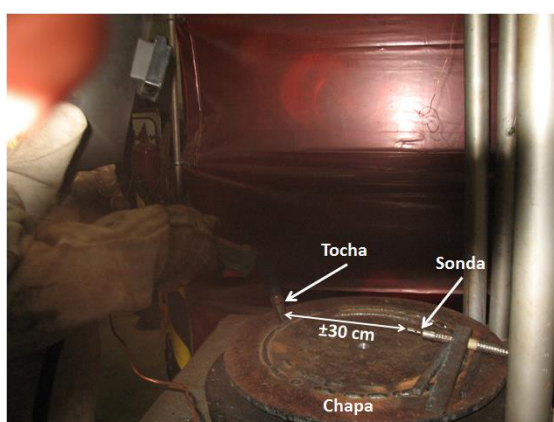


(a)



(b)

Figura 6.8 - Sonda colocada ± 30 cm acima da chapa e sobre o arco: (a) sem arco; (b) com arco



(a)



(b)

Figura 6.9 - Sonda colocada sobre a chapa (mesmo plano do arco) a ± 30 cm da tocha: (a) sem arco; (b) com arco

A Tab. 6.9 apresenta os parâmetros regulados e monitorados para os testes. Cada condição foi repetida duas vezes, com corrente almejada de 175 ± 2 A. A Tab. 6.10 apresenta os valores dos teores de CO e CO₂ medidos para cada condição da Tab. 6.9. Já as Fig. 6.10, 6.11 e 6.12 apresentam os valores dos teores de CO e CO₂ residuais para os dois tempos de coleta, cada condição da Tab. 6.9.

Tabela 6.9 - Parâmetros de regulação e monitoramento dos testes para determinação das concentrações de CO₂ e CO em função do tempo, utilizando o gás de proteção 100%CO₂ a uma vazão de 14l/min

Exp	Regulados				Monitorados		IV _{cc}	PS
	U (V)	V _{alim} (m/min)	Vs (cm/min)	DBCP (mm)	U _{média} (V)	I _{média} (A)		
A1	24	3,60	20,81	9	22,5	173,7	1,04	DM
A2	24	3,60	20,81	9	22,4	174,7	1,04	DM
B1	24	3,60	20,81	9	22,4	175,3	1,08	SA±30 cm
B2	24	3,60	20,81	9	22,5	176,4	1,10	SA±30 cm
C1	24	3,60	20,81	9	22,4	174,4	1,21	AA±30 cm
C2	24	3,60	20,81	9	22,4	174,7	1,15	AA±30 cm

Nota: Exp = Experimento; U = Tensão de regulação; V_{alim} = Velocidade de alimentação; Vs = Velocidade de soldagem; DBCP = Distância bico de contato-peça; U_{média} = Tensão média; I_{média} = Corrente média, IV_{cc} = Índice Vilarinho de regularidade de transferência por curto-circuito; PS = posição da sonda; DM = Dentro da máscara; SA = sobre o arco; AA = afastado do sensor em relação ao arco

Tabela 6.10 – Concentração de CO (monóxido de carbono), CO₂ (dióxido de carbono) e O₂ (oxigênio) medido na sonda em função do tempo, com o gás de proteção 100%CO₂

Exp	PS	Tempo (s) / Concentração (% Vol.)					
		30 s			1 min		
		CO ₂	CO	O ₂	CO ₂	CO	O ₂
A1	DM	0,6	0,0	20,9	1,0	0,0	20,9
A2	DM	0,0	0,0	20,9	0,0	0,0	20,9
B1	SA±30 cm	0,0	0,0	20,9	0,0	0,01	20,9
B2	SA±30 cm	0,0	0,0	20,9	0,0	0,0	20,9
C1	AA±30 cm	0,0	0,0	20,9	0,0	0,0	20,9
C2	AA±30 cm	0,0	0,0	20,9	0,0	0,0	20,9

Nota: PS = posição da sonda; DM = Dentro da máscara; SA = sobre o arco; AA = afastado do sensor em relação ao arco

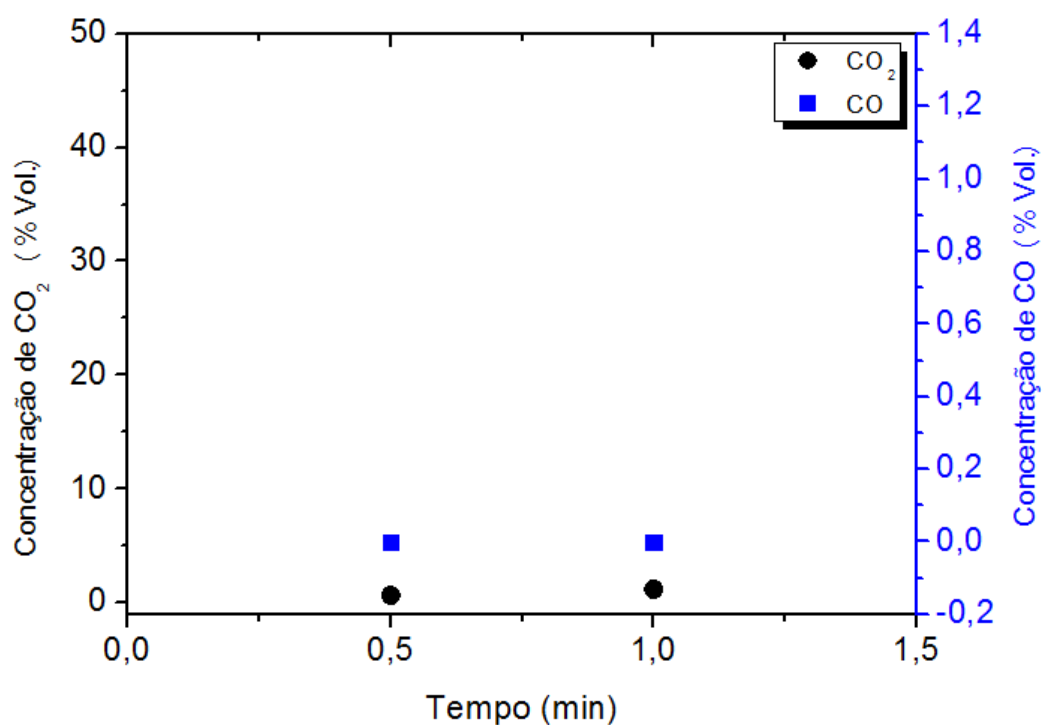


Figura 6.10 – Concentrações de CO e CO₂ em dois tempos de medição na soldagem protegida com 100% CO₂, com a sonda colocada dentro da máscara do soldador

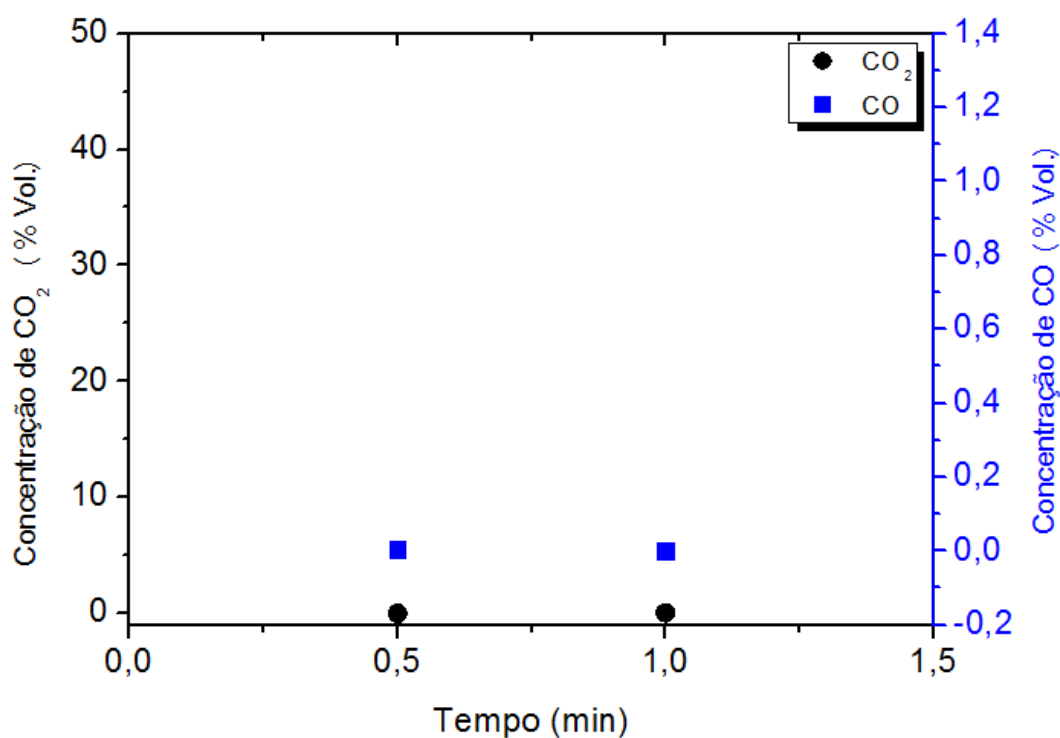


Figura 6.11 - Concentrações de CO e CO₂ em dois tempos de medição na soldagem protegida com 100% CO₂, com a sonda colocada sobre o arco a ± 30 cm da tocha

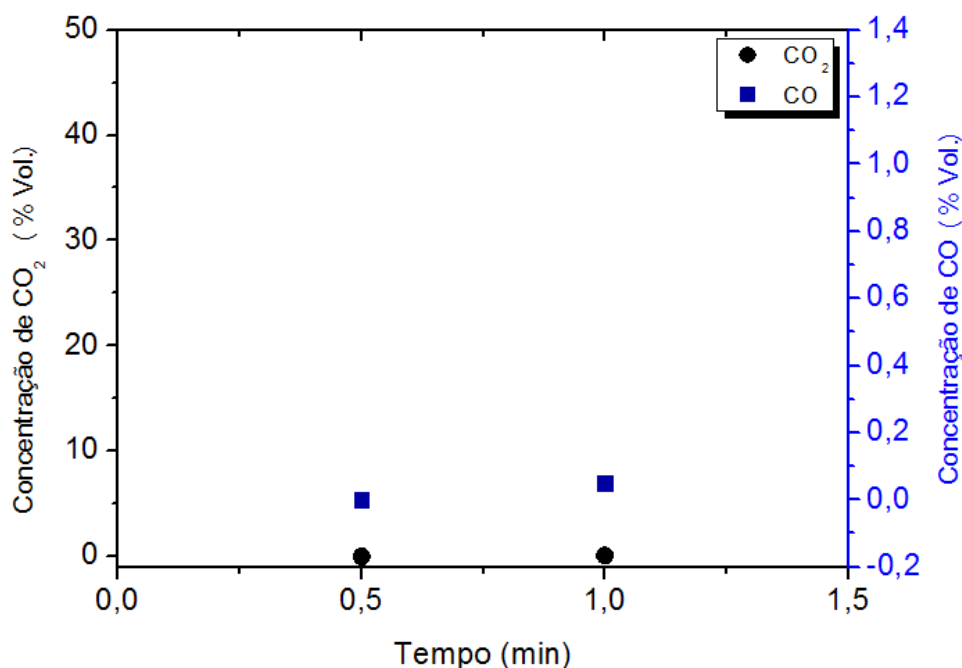


Figura 6.12 - Concentrações de CO e CO₂ em dois tempos de medição na soldagem protegida com 100% CO₂, com a sonda colocada a ± 30 cm de distância da tocha

Através das Fig. 6.10, 6.11 e 6.12, observa-se que não houve concentrações de CO e CO₂ seja na região de aspiração ou próximos da soldagem em ambientes não confinados. Os gases quando aquecidos ficam menos densos do que o ar atmosférico e sobem e se dispersam no ambiente, não se acumulando nas áreas se medidas, apesar de já ter sido demonstrado (itens 6.2 e 6.3) que geram esses gases. Ou seja, apesar da geração de grande quantidade de gases CO e CO₂ pelo arco quando se utiliza a proteção com CO₂ puro, não houve concentrações de CO e CO₂ detectável com segurança pelo equipamento utilizado nas zonas de respiração do soldador ou próxima.

6.5 Determinações da concentração dos gases CO e CO₂ em diferentes regiões de exposição para o operador em soldagem em ambiente confinado

6.5.1 Célula de soldagem automatizada

Para as medições dos gases CO₂ e CO utilizando-se uma adaptação do coletor de fumos, verificou-se que a concentração de CO₂ e CO captadas eram valores insignificantes. Em função disso, resolveu-se fazer uma tentativa de verificar se em um ambiente confinado haveria captação dos gases CO₂ e CO, com a sonda de captação dos gases situada numa posição abaixo da chapa (uma vez que a densidade do CO₂ é maior do que a do ar, ao contrário da do CO, e mesmo dispersando, poderia-se acumular nesta região após longo

tempo de soldagem). Então, pensou-se em fazer soldagem em um ambiente mais confinado, típico de soldagem, como uma célula automatizada. Para isto, utilizou-se uma cortina que se fechava em volta de uma unidade automatizada de soldagem, como ilustra a Fig. 6.13 (não totalmente confinado, pois o teto e o fundo são abertos, só as laterais protegidas). As medições foram feitas após 2 minutos sem arco (só o gás de proteção saindo do bocal), após 10 minutos de arco aberto e após 8 minutos após a soldagem.

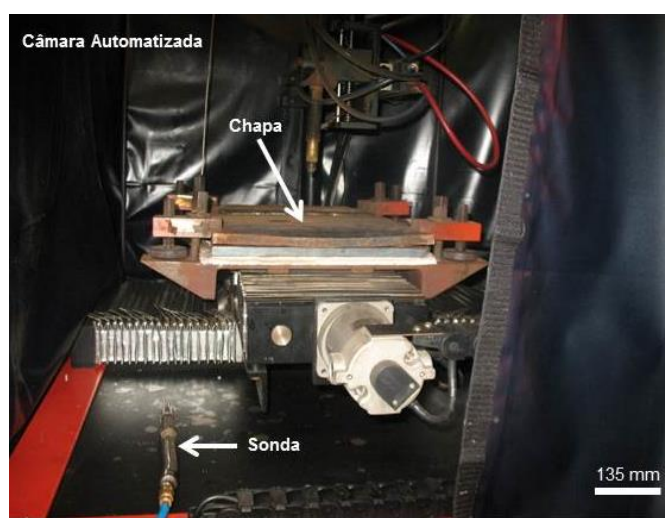


Figura 6.13 – Posição da sonda sobre a mesa na célula automatizada

Utilizando-se as mesmas condições de soldagem do item 6.4, tensão regulada a 24 V, proteção com 100%CO₂ e $I_m = 175 + 2 A$ (mantendo-se a regulagem do fator indutivo na posição média, zero), mas mudando-se o equipamento de soldagem para o modelo U 5000 IW, fabricada pela ESAB, foram feitas soldagens de longa duração (10 minutos de soldagem), sobre uma mesa de coordenadas XYZ na qual fixada a chapa. Durante as soldagens foram medidos os parâmetros de soldagem e calculados o índice de regularidade (IV_{cc}), ou seja:

Parâmetros regulados:

Tensão de regulagem (U) = 24 V

Velocidade de alimentação (V_{alim}) = 3,60 m/min

Distância bico de contato-peça (DBCP) = 10 mm

Velocidade de soldagem (V_s) = 20,81 cm/min

Parâmetros monitorados:

Tensão média ($U_{média}$) = 23,1 V

Corrente média ($I_{média}$) = 173,3

Índice Vilarinho de regularidade de transferência por curto-circuito: $IV_{cc} = 1,06$

As Fig. 6.14 e 6.15 mostram, respectivamente, as relações entre as concentrações de CO_2 e CO residuais em função do tempo utilizando a célula automatizada.

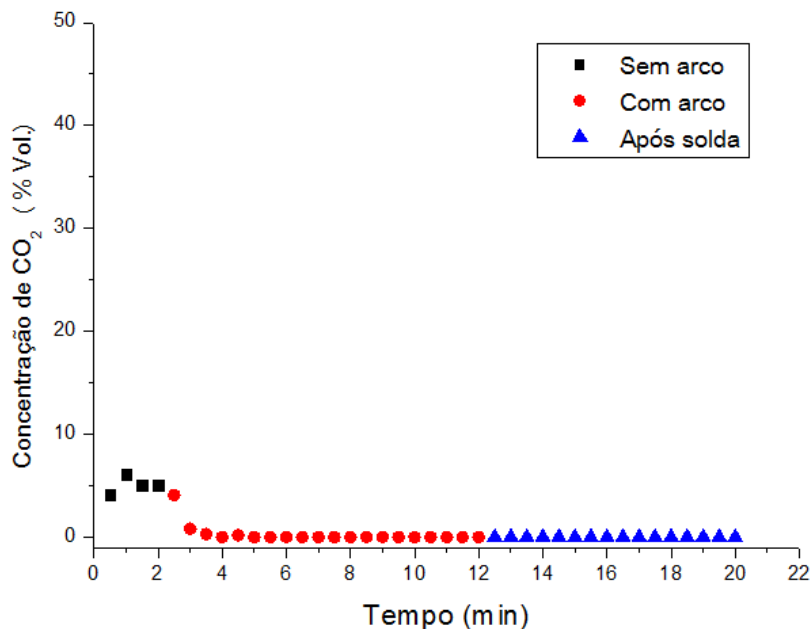


Figura 6.14 – Concentração de CO_2 em função do tempo na soldagem protegida com 100% CO_2

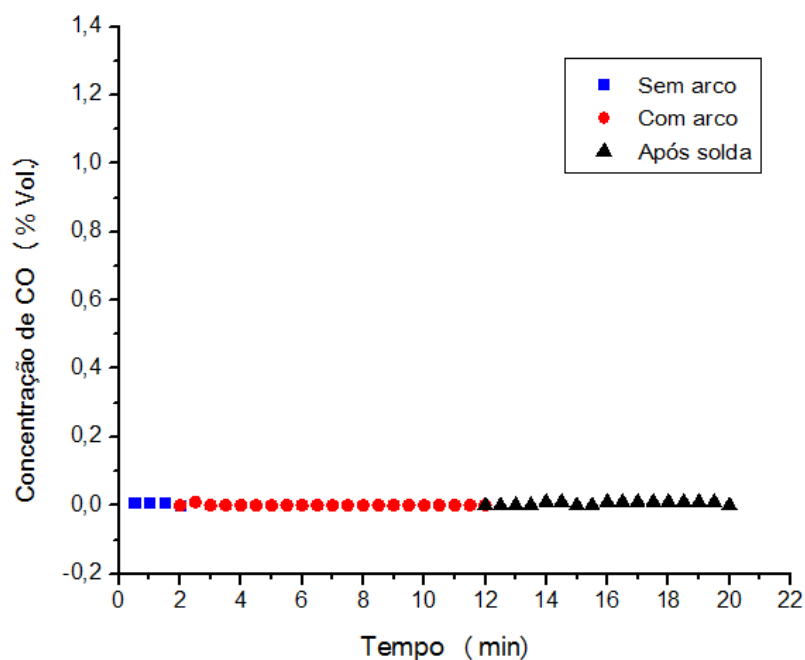


Figura 6.15 – Concentração de CO em função do tempo na soldagem protegida com 100% CO_2

Observa-se pelas Fig. 6.14 e 6.15 que no intervalo de tempo sem arco, os valores das concentrações dos gases CO_2 na região de medição chegam a 6,1% antes de o arco abrir, mas se tornaram desprezíveis, tanto CO_2 e CO quando ao arco se abre ou após a soldagem,

mesmo após 10 minutos de soldagem interrompida. Ou seja, apesar da geração de grande quantidade de gases CO e CO₂ pelo arco quando se utiliza a proteção com CO₂ puro, não houve concentrações de CO e CO₂ significantes. Os gases CO e CO₂, quando aquecidos ficam menos densos e sobem e se dispersam no ambiente com facilidade.

6.5.2 Simulação do local de trabalho confinado

Durante as medições das concentrações dos gases CO e CO₂ na célula automatizada, novamente verificou-se não haver concentrações significativas dos mesmos. Procurando-se, assim, obter uma condição de maior confinamento (em que não poderia haver dispersão de gases pela parte de baixo). Para tal, novas soldagens foram feitas de forma simulada dentro de um tambor de 56 cm de diâmetro e 87 cm de altura, através de um robô, com o braço do mesmo colocado dentro do tambor sobre a chapa a ser soldada, que se encontrava afixada numa posição a 24 cm da base inferior e 60 cm da base superior do referido tambor (como ilustra a Fig. 6.16).

Utilizou-se as mesmas condições dos itens anteriores (tensão regulada a 24 V, proteção com 100%CO₂ e $I_m = 175 + 2 A$ e mantendo-se a regulagem do fator indutivo na posição média, zero), com a fonte Lincoln Power Wave 455 STT. As coletas dos gases na simulação foram feitas com o tambor aberto e com a sonda de captação dos gases situada numa posição abaixo da chapa, como ilustra a Fig. 6.17, sendo durante 2 minutos com arco aberto e durante 11 minutos após a soldagem.

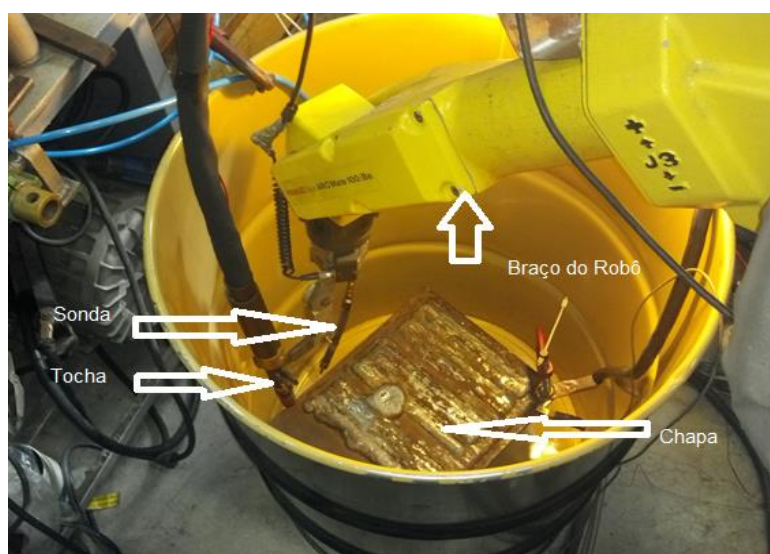


Figura 6.16 – Posições da sonda e da chapa colocadas dentro do tambor

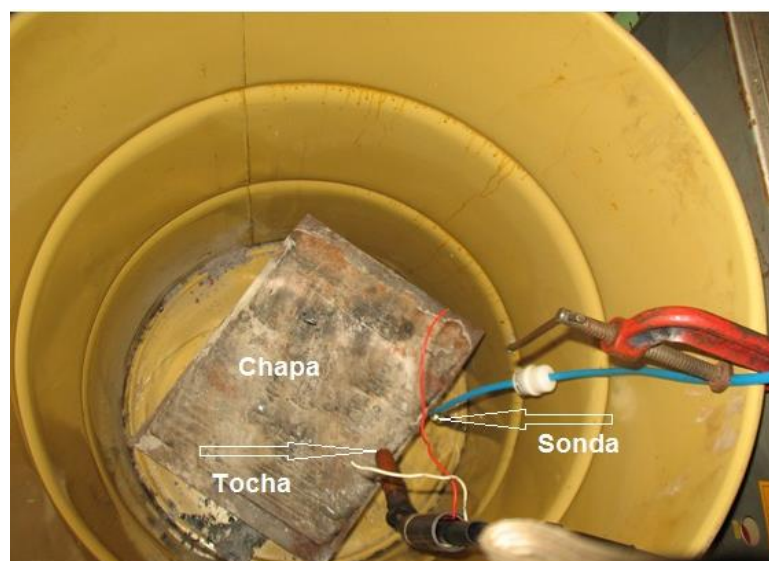


Figura 6.17 - Posições da sonda e da chapa colocadas dentro do tambor

Durante as soldagens foram medidos os parâmetros de soldagem e calculados o índice de regularidade (IV_{cc}), ou seja:

Parâmetros regulados:

Tensão de regulagem (U) = 24 V

Velocidade de alimentação (V_{alim}) = 3,60 m/min

Distância bico de contato-peça (DBCP) = 10 mm

Velocidade de soldagem (V_s) = 20,81 cm/min

Parâmetros monitorados:

Tensão média ($U_{média}$) = 21,6 V

Corrente média ($I_{média}$) = 173,8 A

Índice Vilarinho de regularidade de transferência por curto-circuito: (IV_{cc}) = 1,2

As Fig. 6.18 e 6.19 mostram as relações entre a concentração de CO_2 e CO residuais em função do tempo utilizando o tambor aberto, durante 13 minutos de coleta. Observa-se pelas figuras que os gases sobem e se dispersam no ambiente, não sendo praticamente captados pela sonda, seja durante ou após a soldagem.

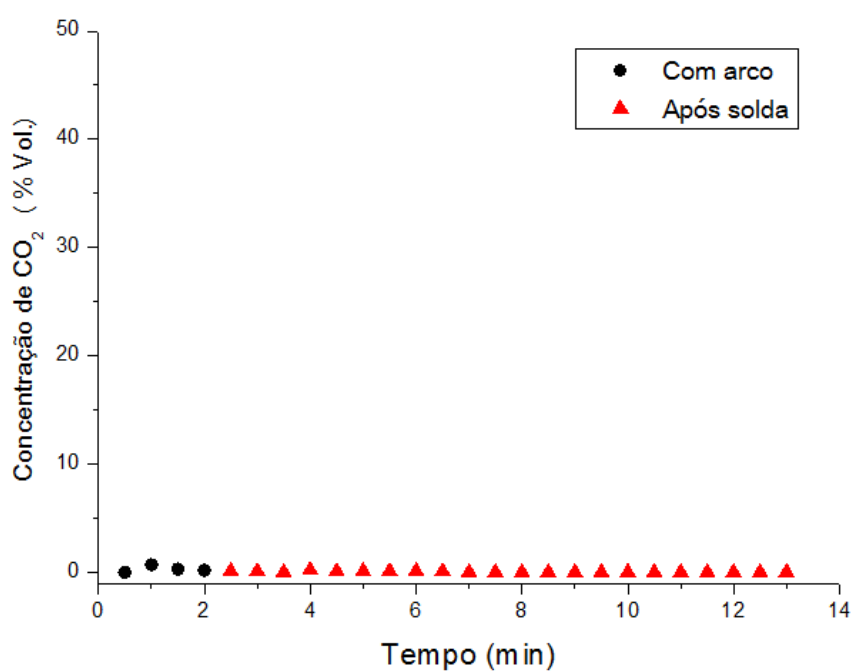


Figura 6.18 - Concentração de CO_2 em função do tempo na soldagem protegida com 100% CO_2 nos testes dentro de tambor aberto

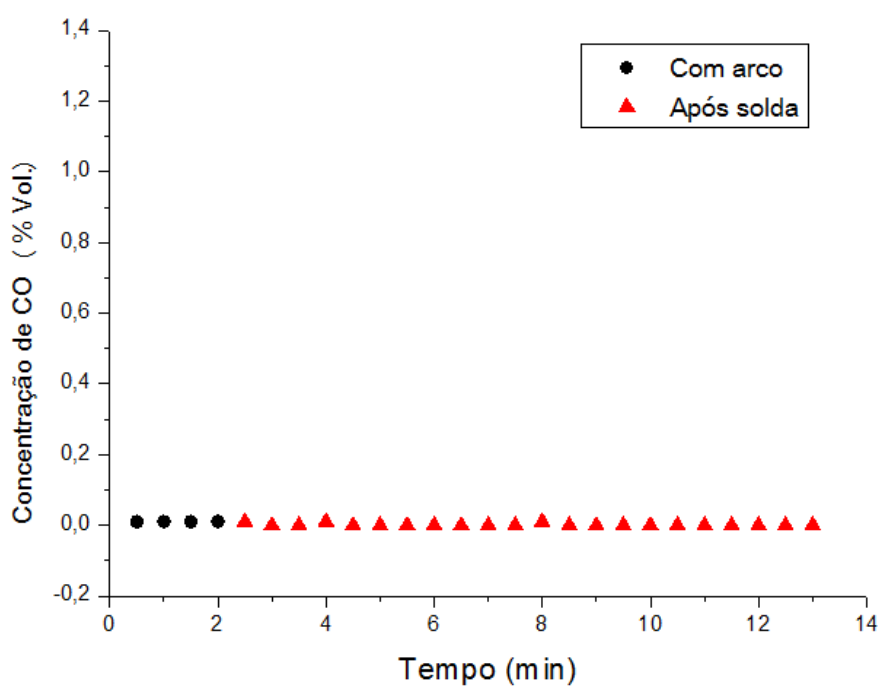


Figura 6.19 - Concentração de CO em função do tempo na soldagem protegida com 100% CO_2 nos testes dentro de tambor aberto

Frente aos resultados, novas medições foram realizadas, mas tampando-se imediatamente o tambor após a soldagem, como ilustram a Fig. 6.20. Mesmos parâmetros dos testes anteriores foram empregados. As Fig. 6.21 e 6.22 mostram as relações entre as

concentrações de CO_2 e CO residuais medidas nestas condições. Verifica-se a mesma tendência, de não se acumular gases residuais dentro do tambor durante ou após a soldagem.



Figura 6.20 – Ilustração do tambor fechado após a soldagem

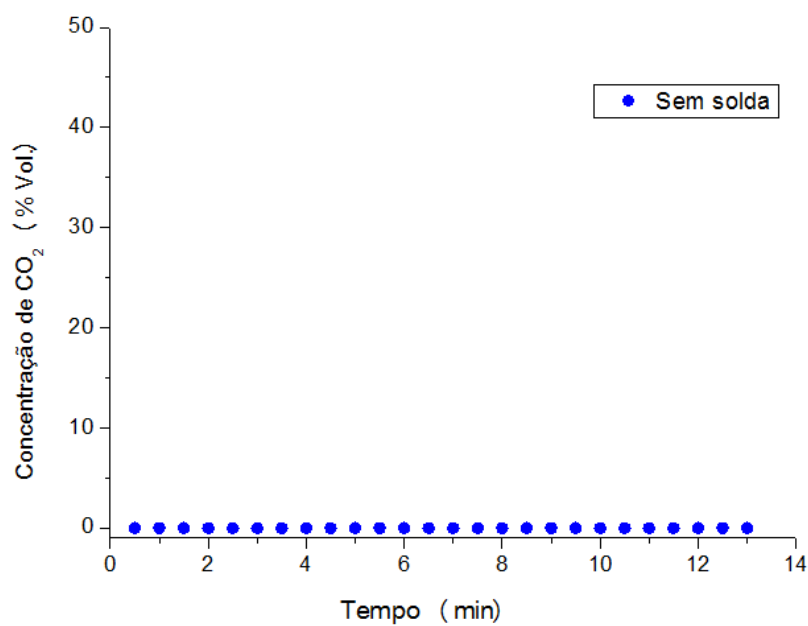


Figura 6.21 - Concentração de CO_2 em função do tempo na soldagem protegida com 100% CO_2 nos testes dentro de tambor que foi fechado ao terminar a soldagem

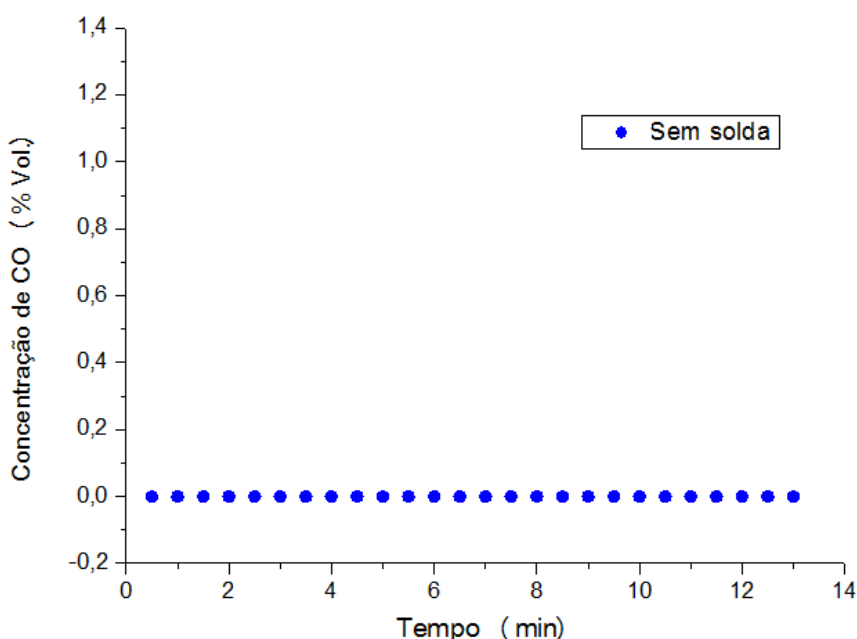


Figura 6.22 - Concentração de CO em função do tempo na soldagem protegida com 100% CO₂ nos testes dentro de tambor que foi fechado ao terminar a soldagem

Para tirar dúvida sobre a presença do gás de proteção no ambiente, uma simulação foi feita em com o tambor aberto, mas sem arco, por um período de 10 minutos com liberação do gás de proteção e por 5 minutos após o gás ser fechado, com a sonda de captação dos gases posicionada abaixo da chapa. As Fig. 6.23 e 6.24 mostram as relações entre as concentrações de CO₂ e CO residuais em função do tempo. Observa-se pelas figuras que no intervalo de tempo em que o gás de proteção foi liberado, sem arco, os valores das concentrações dos gases CO₂ na região de medição chegam a aproximadamente a 44,5%, indicando a presença marcante do gás de proteção. Naturalmente não era de se esperar a presença de CO, sendo medido e apresentado apenas para efeito de confiabilidade das medidas. Quando se fecha a introdução do gás de proteção, o valor da concentração de CO₂ decresce progressivamente até um valor de aproximadamente 15,7% em volume, mostrando que mesmo teoricamente mais denso do que o ar atmosférico, há uma diluição do mesmo e não um acúmulo nas regiões mais baixas.

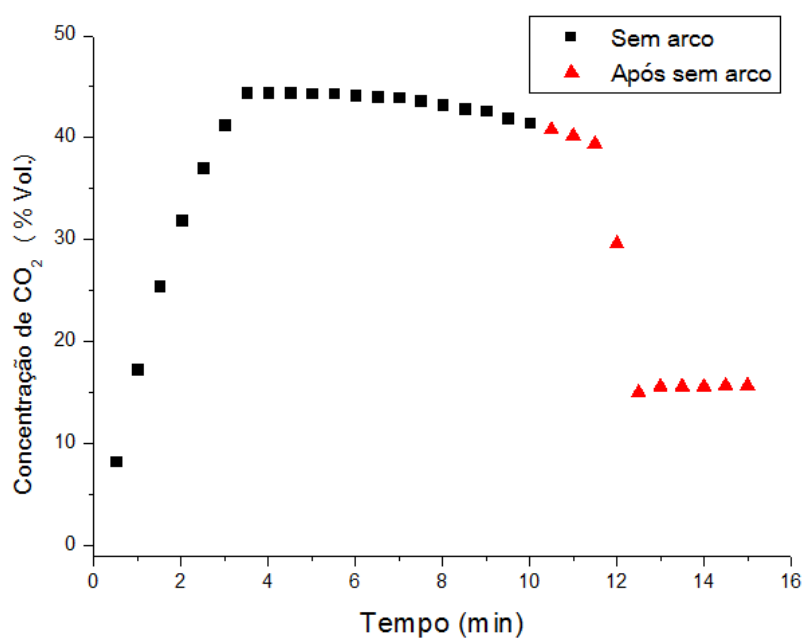


Figura 6.23 - Concentração de CO_2 em função do tempo nos testes dentro de tambor sem arco

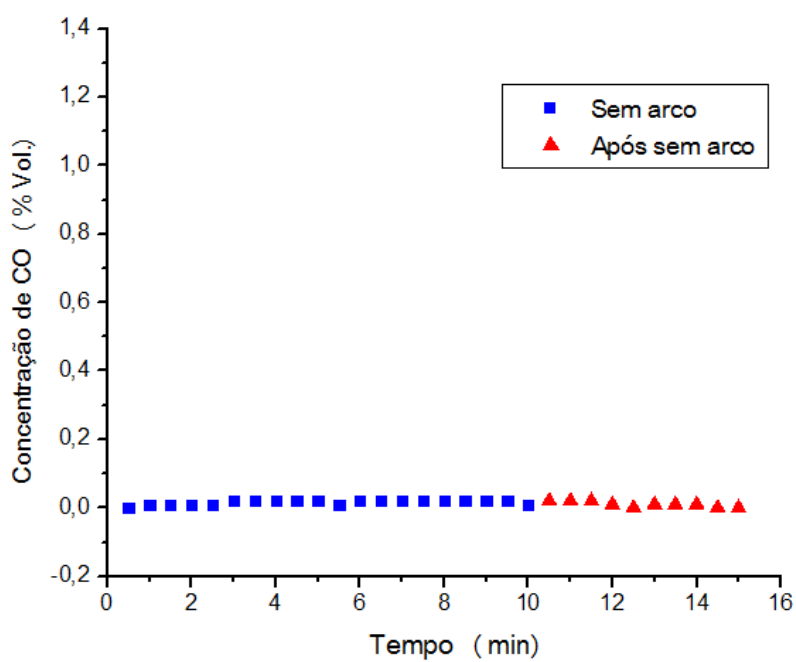


Figura 6.24 - Concentração de CO em função do tempo nos testes dentro de tambor sem arco

6.6 Determinações da concentração dos gases CO e CO₂ em diferentes regiões de exposição para o operador em soldagem no coletor de fumos sem vazão de sucção

Uma ultima simulação foi feita para avaliar o potencial da presença de gases tóxicos/asfixiantes num ambiente confinado. Para isto, novas soldagens foram feitas utilizando-se o coletor de fumos sem sucção, com uma vedação colocada entre a coifa e a câmara de sucção, como ilustra a Fig. 6.25. Ou seja, confinando, mas não forçando (como nos itens 6.2 e 6.3), os gases pela parte de cima da câmara. A sonda de captação dos gases foi colocada numa posição afixada ± 30 cm acima da chapa utilizada para soldagem dentro do coletor. A fonte de soldagem utilizada nesta etapa do trabalho foi um equipamento de soldagem de uso comercial (Lincoln Power Wave 455 STT).



Figura 6.25 – Vista da montagem do coletor de fumos adaptado para medição dos gases CO e CO₂ residuais

Utilizando-se as mesmas condições de soldagem do item anterior, as soldagens foram realizadas com proteção de 100% de CO₂ e os parâmetros seguintes:

Parâmetros regulados:

Tensão de regulação (U) = 24 V

Velocidade de alimentação (V_{alim}) = 3,60 m/min

Distância bico de contato-peça (DBCP) = 10 mm

Velocidade de soldagem (V_s) = 20,81 cm/min

Parâmetros monitorados:

Tensão média ($U_{\text{média}}$) = 22,1 V

Corrente média ($I_{\text{média}}$) = 173,2 A

Índice Vilarinho de regularidade de transferência por curto-circuito: (IV_{cc}) = 1,13

As Fig. 6.26 e 6.27 mostram as relações entre as concentrações de CO_2 e CO residuais, respectivamente, em função do tempo. Observa-se pelas figuras que no intervalo de tempo com arco, os valores das concentrações dos gases CO_2 e CO chegam a aproximadamente 9% e 0,36%, respectivamente. Após a soldagem, o valor da concentração de CO_2 cai abruptamente a praticamente zero, o mesmo acontecendo com a concentração de CO. Isto demonstra que durante a soldagem, se o confinamento se der pelo teto (como em tanques fechados), a presença de CO e CO_2 podem ser significativas, mas que após o termino da soldagem, haverá diluição de seus valores no ar ambiente natural.

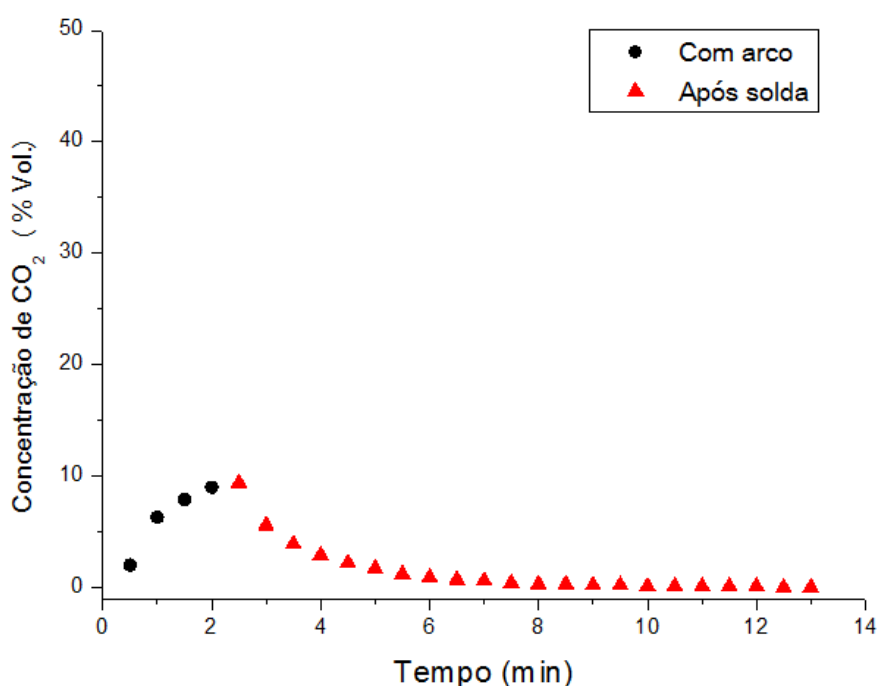


Figura 6.26 - Concentração de CO_2 em função do tempo na soldagem protegida com 100% CO_2 no ensaio com o coletor de fumo sem sucção

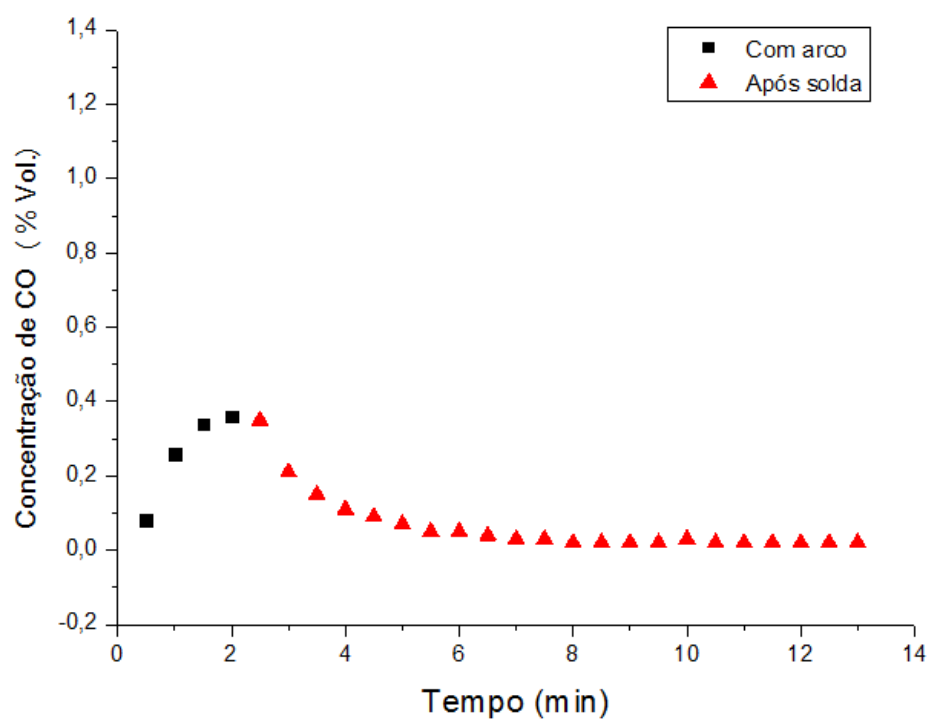


Figura 6.27 - Concentração de CO em função do tempo na soldagem protegida com 100% CO₂ no ensaio com o coletor de fumo sem sucção

CAPÍTULO VII

INFLUÊNCIA DA EMISSÃO DE RESPINGOS SOBRE A COMPOSIÇÃO E TAMANHO DE PARTÍCULAS DE FUMOS NO PROCESSO MIG/MAG

7.1 Metodologia

O objetivo desta etapa do trabalho foi avaliar se uma maior geração de respingos teria influência sobre a composição química e tamanho de partículas dos fumos de soldagem gerados, já que este parâmetro não mostrou afetar a taxa de geração de fumos (capítulo IV). O que influenciou mais a geração de fumos foi a corrente de curto-circuito e o comprimento do arco.

Para tal, foi proposto realizar soldagens com arames AWS ER70S-6 (1,2 mm) protegidos com $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$, em uma dada corrente média de soldagem (arbitrariamente escolhida como $I_M = 150 \pm 2 \text{ A}$), usando-se as condições de maior regularidade (21 V) e menores regularidades (17 e 25 V) para esta condição de soldagem, consequentemente menor e maiores geração de respingos, respectivamente. A fonte de soldagem utilizada nesta etapa do trabalho foi um equipamento de soldagem de uso comercial (Lincoln Power Wave 455 STT), já descrita no item 3.1 do capítulo III. Para a realização desta etapa do trabalho, foi selecionado o programa de número cinco (MIG/MAG convencional com proteção gasosa e com polaridade positiva). As soldagens foram realizadas como simples deposição sobre chapas circulares de aço carbono ABNT 1020, com diâmetro externo máximo de $460 \pm 5 \text{ mm}$. A tocha de soldagem em relação ao cordão de solda foi mantida em um ângulo de ataque puxando no sentido longitudinal do cordão a ser realizado de $10 \pm 1^\circ$.

As soldas foram feitas a partir de uma regulagem de velocidade de alimentação do arame que, para o arame-eletrodo (classe ER70S-6 da AWS, com 1,2 mm de diâmetro), uma distância bico de contato-peça definida (DBCP de 12 mm) e o gás de proteção selecionado para o estudo ($\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$), foi variada até se encontrar a corrente média almejada ($150 \pm 2 \text{ A}$), mantendo-se a regulagem do fator indutivo na posição média, zero. Variou-se a regulagem da tensão de soldagem para a mistura, de modo a se obter comprimentos de arcos desde muito curtos a longos para esse tipo de transferência.

Assim, durante a realização das soldagens dos experimentos para coleta dos fumos foram mantidos fixos a corrente média de soldagem (I_m), a velocidade de alimentação do arame (V_{alim}), a velocidade de soldagem (V_s) e a vazão e tipo do gás de proteção. Mas, ao se variar a regulagem da tensão, a corrente média (I_m) mudava de valor. Assim, a mesma foi ajustada para o valor desejado, sem alterar a velocidade de arame (importante neste ensaio se ter o volume depositado invariável) através da regulagem da distância bico de contato-peça (DBCP). A Tab. 7.1 sumariza a parametrização do processo.

Das soldagens com cada uma das tensões de regulagem, foram medidos e/ou calculados o índice de regularidade (IV_{cc}) já descrito no item 4.1.1 do capítulo IV. A Tab. 7.1 apresenta também os valores do índice de regularidade (IV_{cc}) desta etapa, mostrando que o objetivo de se obter na tensão intermediária uma maior regularidade de transferência foi obtida.

Tabela 7.1 - Parâmetros de regulagem e monitoramento dos testes para definição das condições de regularidade de transferência (a corrente média almejada de $150 \pm 2A$)

Exp	Regulados				Monitorados		IV_{cc}
	U (V)	DBCP (mm)	V_{alim} (m/min)	V_s (cm/min)	$U_{média}$ (V)	$I_{média}$ (A)	
1	17	13	3,0	17,36	15,8	151,2	1,58
2	21	12	3,0	17,36	19,4	148,7	1,27
3	25	9	3,0	17,36	23,2	149,3	1,72

Nota: Exp = experimento; U= tensão de regulagem; DBCP = distância bico de contato-peça; V_{alim} = velocidade de alimentação; V_s = velocidade de soldagem; $U_{média}$ = tensão média; $I_{média}$ = corrente média; IV_{cc} = Índice Vilarinho de regularidade de transferência por curto-circuito

A coleta de fumos se deu através da modificação do equipamento para medição de fumos, conforme já descrito no item 3.6 do capítulo III. O fumo de cada condição de soldagem foi coletado nos cartuchos plásticos com membranas de PVC, como ilustram as Fig. 7.1, 7.2 e 7.3. Não era objetivo desta etapa medir a massa de partículas emitidas. Contudo, detectou-se, visualmente, que as amostras recolhidas para soldagem com maiores tensão apresentavam progressivamente consideravelmente maior massa de partículas que as amostras recolhidas com menor tensão (maior tensão representa maior comprimento de arco).



Figura 7.1 - Coletores de fumos sobre a chapa de acrílico para a condição de (17 V)

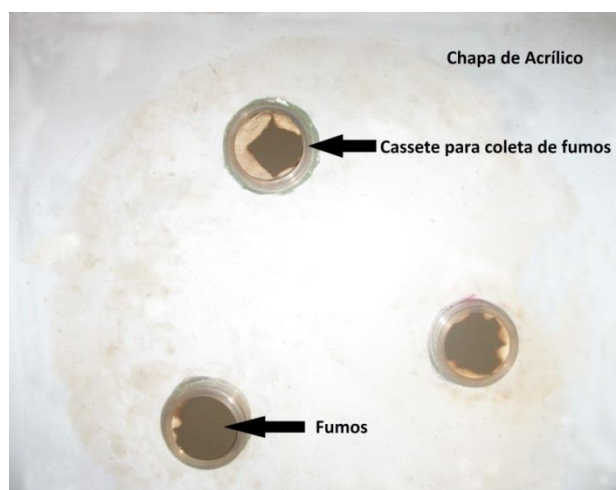


Figura 7.2 - Coletores de fumos sobre a chapa de acrílico para a condição de 21 V

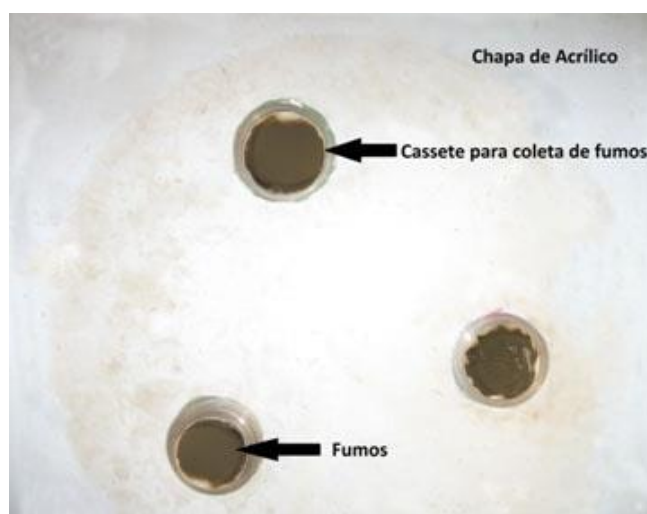


Figura 7.3 - Coletores de fumos sobre a chapa de acrílico para a condição de 25 V

Para se fazer as análises com as amostras recolhidas nas membranas, foram inicialmente removidas as partículas com álcool etílico e depositadas em grelhas de cobre com um diâmetro de 3 mm, revestidas com Formvar. Posteriormente, estas amostras foram observadas em microscópio eletrônico de transmissão (TEM), Hitachi, modelo H-8100 II, equipado com sonda Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) para determinação da composição química elementar e avaliação da morfologia e tamanho dos particulados.

7.2 Resultados

As Fig. 7.4 a 7.6 (tensão de 17 V), 7.7 e 7.8 (tensão 21 V), 7.9 a 7.11 (tensão de 25 V), ilustram as partículas de fumos de soldagem depositadas sobre a grelha de cobre. Em todas as situações para as quais foram efetuadas fotografias em TEM e análise química por EDS, foram detectadas grandes concentrações de partículas ultrafinas, na gama nanométrica (< 100 nm), de forma aproximadamente esférica, sob a forma de agregados, por vezes densos, com dimensões de cerca de 20 nm. Detectam-se, ainda, partículas de maiores dimensões, na gama micrométrica, algumas negras, correspondendo a material projetado como incandescente (note-se que os alvéolos detectados nas fotos correspondem à estrutura das grelhas utilizadas). Assim, pelas amostras observadas, pode-se concluir que tanto a morfologia como as dimensões das partículas não parecem alterar-se com a diferença da estabilidade da transferência metálica (variação de tensão) utilizada nos ensaios.

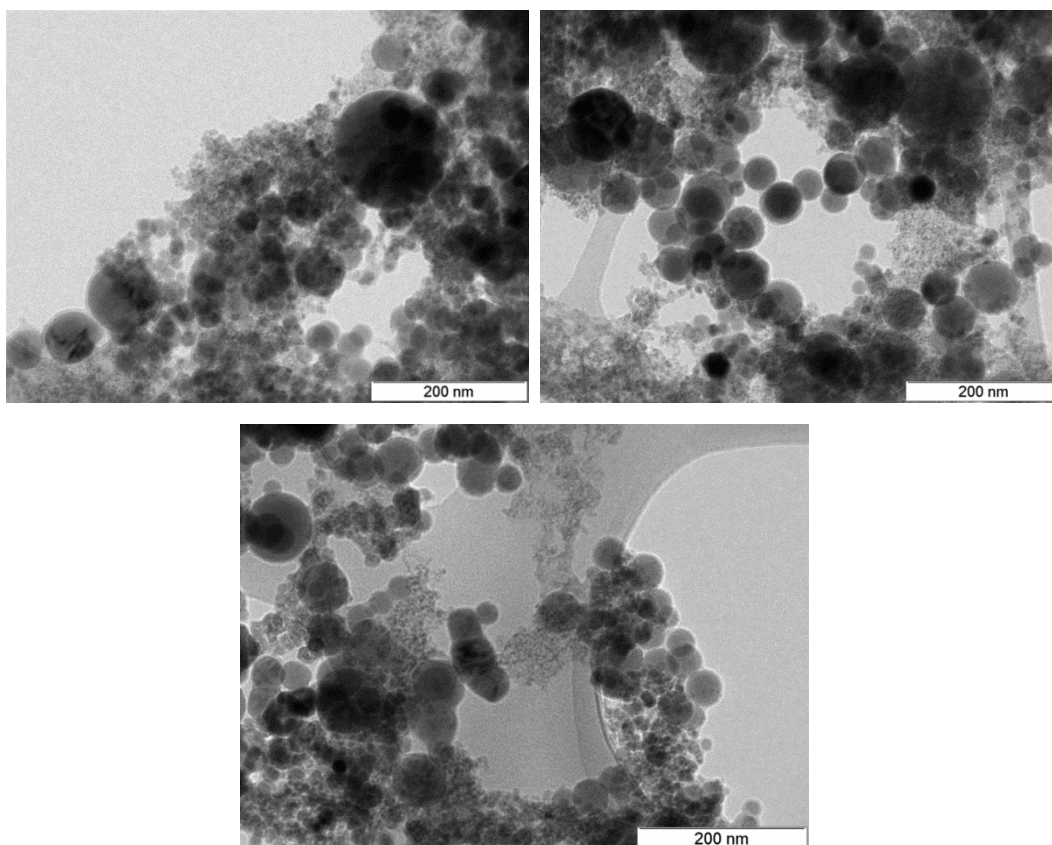


Figura 7.4 - Vista típica das partículas de fumos de soldagem obtidas a 17 V, depositadas sobre grelhas de cobre, revestidas com Formvar, com um diâmetro de 3 mm (gás de proteção Ar +25%CO₂ e arame ER70S-6 com diâmetro de 1,2 mm)

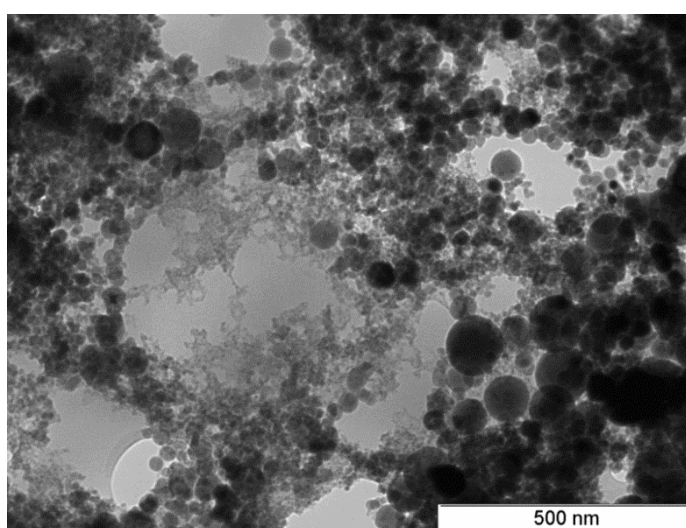


Figura 7.5 – Vista típica das partículas de fumos de soldagem obtidas a 17 V, depositadas sobre grelhas de cobre, revestidas com Formvar, com um diâmetro de 3 mm, (gás de proteção Ar + 25%CO₂ e arame ER70S-6 com diâmetro de 1,2 mm)

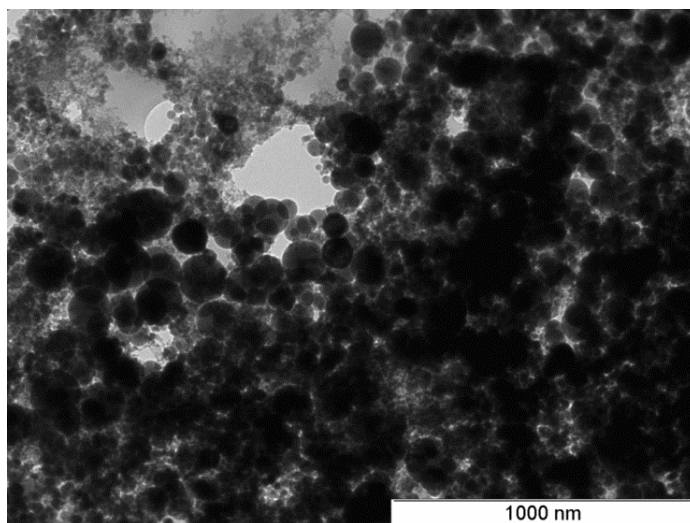


Figura 7.6 – Vista típica das partículas de fumos de soldagem obtidas a 17 V, depositadas sobre grelhas de cobre, revestidas com Formvar, com um diâmetro de 3 mm, (gás de proteção $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e arame ER70S-6 com diâmetro de 1,2 mm)

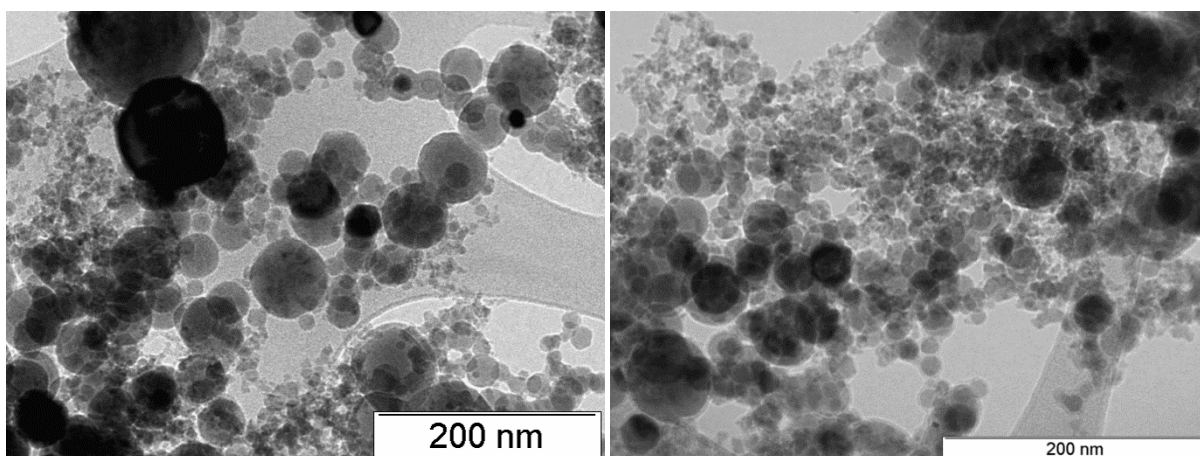


Figura 7.7 - Vista típica das partículas de fumos de soldagem obtidas a 21 V, depositadas sobre grelhas de cobre, revestidas com Formvar, com um diâmetro de 3 mm, (gás de proteção $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ e arame ER70S-6 com diâmetro de 1,2 mm)

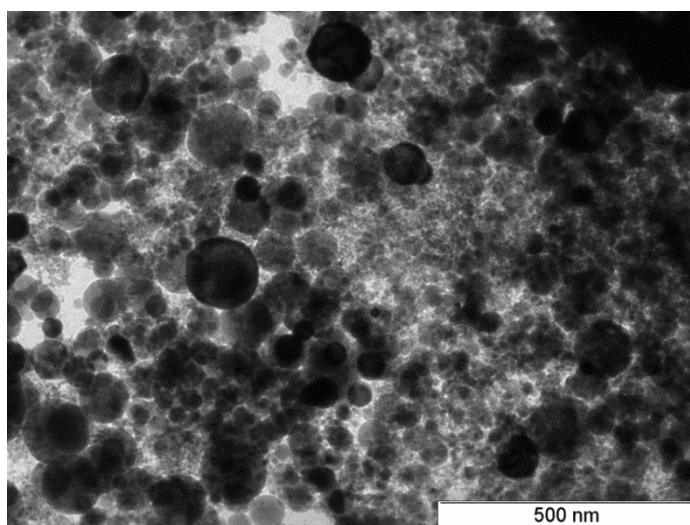


Figura 7.8 - Vista típica das partículas de fumos de soldagem obtidas a 21 V, depositadas sobre grelhas de cobre, revestidas com Formvar, com um diâmetro de 3 mm, (gás de proteção Ar+25%CO₂ e arame ER70S-6 com diâmetro de 1,2 mm)

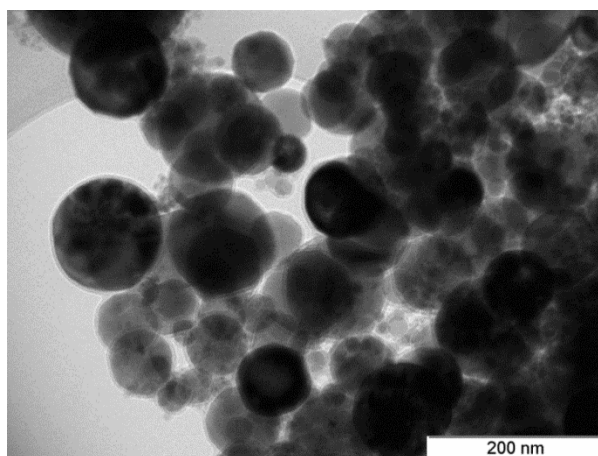
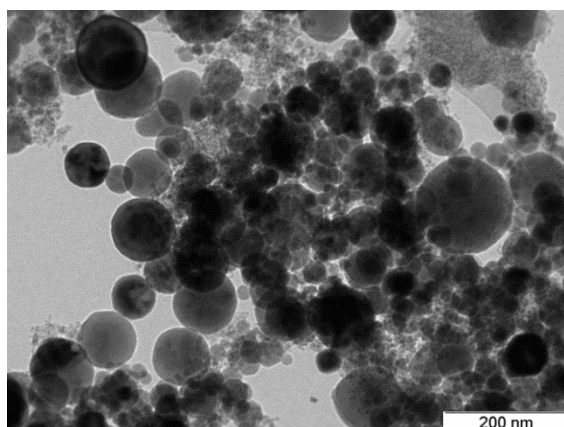
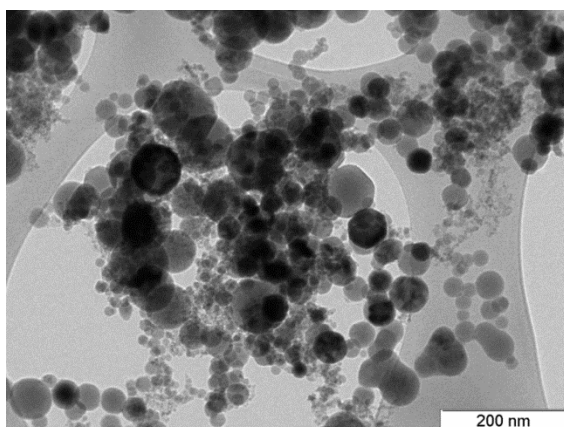


Figura 7.9 - Vista típica das partículas de fumos de soldagem obtidas a 25 V, depositadas sobre grelhas de cobre, revestidas com Formvar, com um diâmetro de 3 mm, (gás de proteção Ar+25%CO₂ e arame ER70S-6 com diâmetro de 1,2 mm)

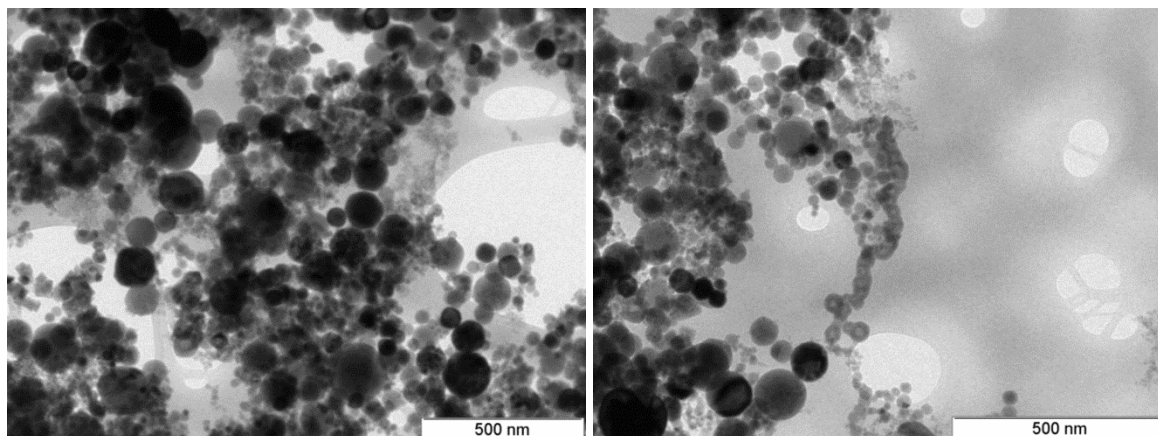


Figura 7.10 - Vista típica das partículas de fumos de soldagem obtidas a 25 V, depositadas sobre grelhas de cobre, revestidas com Formvar, com um diâmetro de 3 mm, (gás de proteção Ar+25%CO₂ e arame ER70S-6 com diâmetro de 1,2 mm)

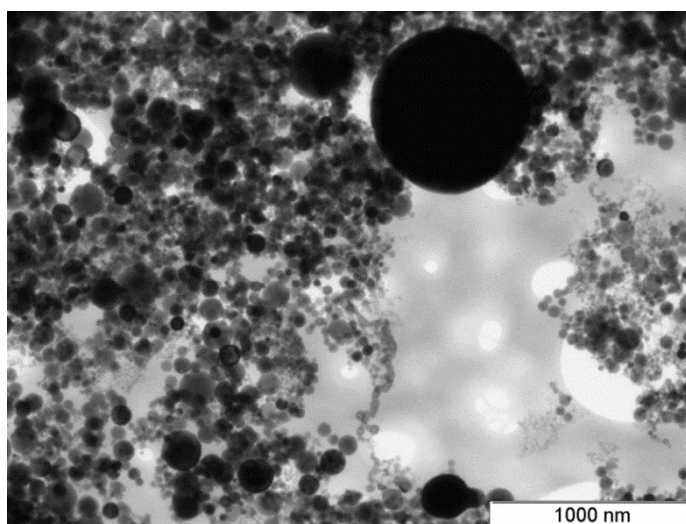


Figura 7.11 - Vista típica das partículas de fumos de soldagem obtidas a 25 V, depositadas sobre grelhas de cobre, revestidas com Formvar, com um diâmetro de 3 mm, (gás de proteção Ar+25%CO₂ e arame ER70S-6 com diâmetro de 1,2 mm)

Em sua revisão, Sowards (2006) afirma que as partículas ultrafinas (< de 100 nm) depositam-se nos pulmões dos soldadores e, além disso, dissolvem na corrente sanguínea. Tem sido debatido que a maioria das partículas de diâmetros <100 nm são possivelmente até mesmo exaladas.

As Fig. 7.12 (tensão de 17 V), 7.13 (tensão de 21 V) e 7.14 (tensão de 25 V), mostram o espectro de difração de raios – X dos fumos coletados. No que diz respeito à análise da composição química, tem-se que as partículas analisadas correspondem a óxidos com a presença dos elementos Fe, Mn e Si, além de C e O (note-se que o pico detectado

como Cu corresponde ao material das grelhas utilizadas). Segundo Achebo e Ogboore (2011), o manganês pode levar ao manganismo (encefalopatia de manganês semelhante à doença de parkinson). Os sintomas são irritabilidade, dificuldade em andar, distúrbios da fala, comportamentos compulsivos e cirrose hepática.

Percebe-se que a composição química detectada, assim como a granulometria e morfologia, não se altera com a diferença de tensão utilizada nos ensaios. Nestas condições, as análises efetuadas permitem concluir que a estabilidade da transferência metálica (ou o aumento da tensão do arco) não conduzem alterações significativas também na composição química das partículas emitidas.

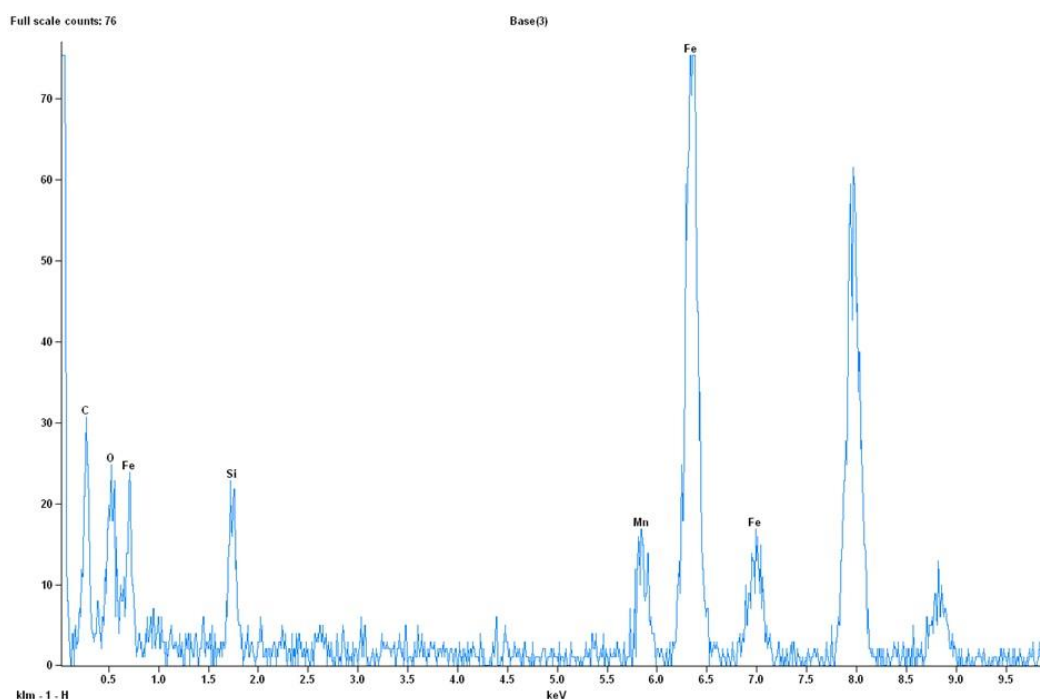


Figura 7.12 – Espectro de difração de raios – X de fumos obtidos na soldagem com tensão de 17 V (gás de proteção Ar+25%CO₂ e arame ER70S–6, diâmetro de 1,2 mm)

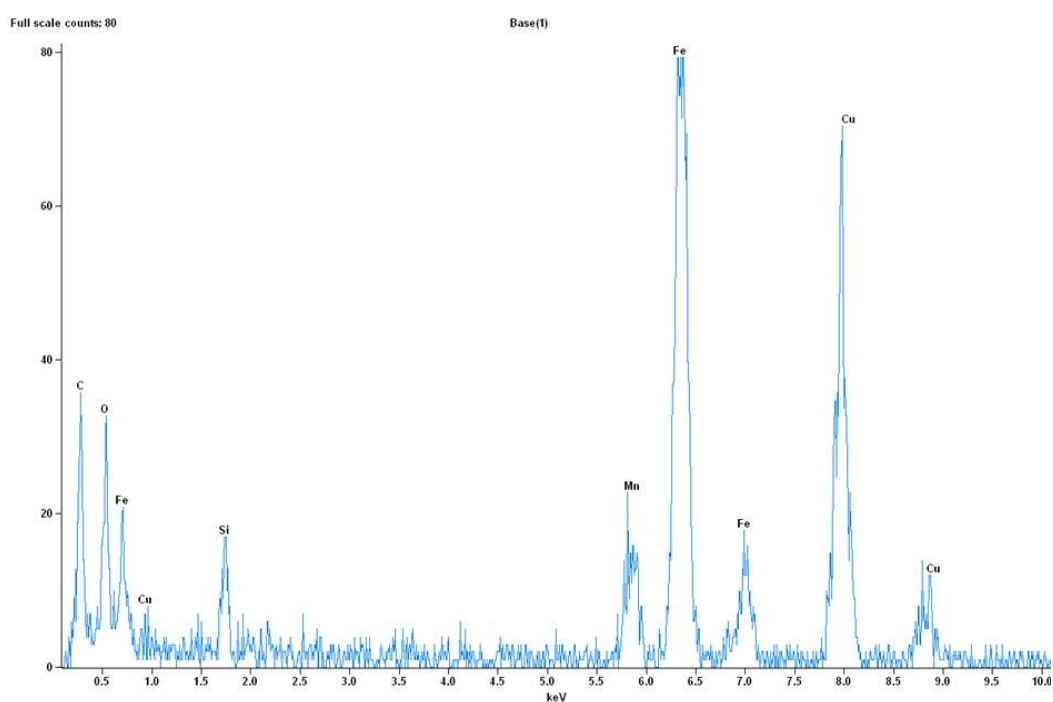


Figura 7.13 - Espectro de difração de raios –X de fumos obtidos na soldagem com tensão de 21 V (gás de proteção 25%CO₂ e arame ER70S–6, diâmetro de 1,2 mm)

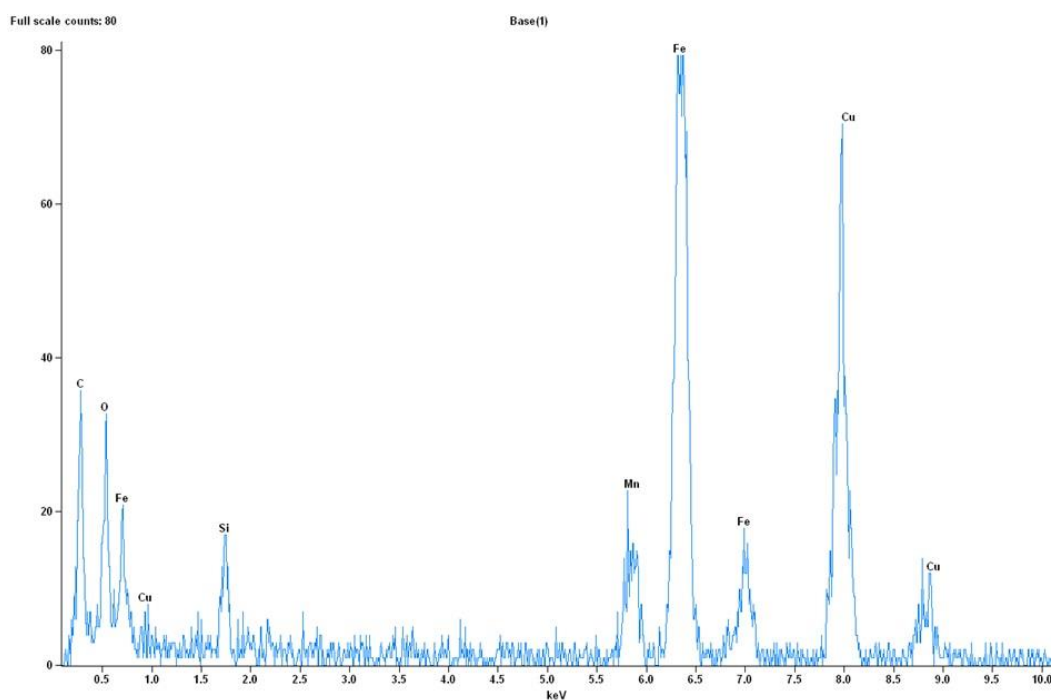


Figura 7.14 - Espectro de difração de raios – X de fumos obtidos na soldagem com tensão de 25 V (gás de proteção 25%CO₂ e arame ER70S–6, diâmetro de 1,2 mm)

7.3 Discussão geral

Observou-se, portanto, que o aumento da geração de respingos provocado pela menor estabilidade de arco, ou o aumento do comprimento do arco, consequência da maior tensão, não afetam nem as dimensões (majoritariamente < 100 nm), morfologia (arredondadas) e nem a composição dos fumos (Fe, Mn e Si, C e O).

CAPÍTULO VIII

CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo principal analisar e avaliar o efeito da estabilidade de transferência metálica por curto-circuito no processo de soldagem MIG/MAG sobre os níveis de emissão de fumos metálicos e gases. Para atingir esse alvo, alguns objetivos específicos foram traçados e dos quais as seguintes conclusões foram obtidas:

- a) o Critério Laprosolda de Estabilidade de Transferência por Curto-circuito mostrou-se preciso e ser uma ferramenta importante para permitir comparar o efeito da regularidade de transferência sobre a geração de fumos e de gases, mesmo sob diferentes gases de proteção e parâmetros;
- b) maior estabilidade de transferência metálica não apresentou, como esperado, menor taxa de geração de fumos, apesar de levar a menos respingos (portanto, a hipótese de que quanto maior a estabilidade, menos respingos, consequentemente, quanto menos respingos, menos fumos, não é verdadeira);
- c) a estabilidade de transferência metálica e/ou nível de geração de respingos e/ou a taxa de geração de fumos não interferem nem no tamanho (que apresentam uma grande concentração de partículas ultrafinas, na gama manométrica, < 100 nm) ou forma dos particulados de fumos (aproximadamente esférica, sob a forma de agregados, por vezes densos, com dimensões de cerca de 20 nm) e nem na sua composição (Fe, Mn e Si, C e O);
- d) os fatores razão tempo médio de arco aberto/tempo médio dos curtos circuitos (t_{ab}/t_{cc}), tempo médio de arco aberto (t_{ab}), média das correntes de pico (I_{cc}) e diâmetro de gotas (ϕ_g) proporcionam em conjunto aumento na taxa de geração de fumos;
- e) a metodologia desenvolvida e aplicada para separar individualmente os efeitos dos fatores t_{ab}/t_{cc} , t_{ab} , I_{cc} , ϕ_g e comprimento do arco sobre a taxa de geração de fumos mostrou-se eficaz, exceto para o efeito do ϕ_g sobre a TGF, fator do qual não foi possível separar o efeito dos outros três fatores;
- f) quanto ao efeito individual que os fatores t_{ab}/t_{cc} , t_{ab} , I_{cc} , ϕ_g e comprimento do arco têm sobre a taxa de geração de fumos, I_{cc} mais elevadas, maiores comprimentos de arco e maiores t_{ab} favorecem individualmente a TGF (massa de fumos por unidade de tempo), mas se eles agirem em conjunto na mesma direção, o que é normal em consequência da transferência por curto-circuito no processo MIG/MAG, a

- contribuição deles sobre a emissão de fumos é significativa (entretanto, mas não há qualquer evidência de que um maior ϕ gota poderia diminuir à TGF);
- g) quanto à influência do gás de proteção sobre a geração de CO e CO₂, conclui-se que quanto mais rico de CO₂ a composição do gás de proteção, mais CO e CO₂ são gerados pelo arco;
 - h) o potencial relativo da geração volumétrica de CO₂ é maior entre duas composições de teores diferentes de CO₂ do que a relação de CO₂ na composição do gás, ou seja, o CO₂ puro como gás de proteção gera 5,7 vezes mais CO₂ em volume para o ambiente e, potencialmente, para a região de respiração do soldador do que a mistura Ar+25%CO₂, apesar do gás de proteção ter apenas 4 vezes mais CO₂ na sua composição, relação também existente quando se compara a geração do 100%CO₂ em relação ao Ar+8%CO₂, gerando 14,7 vezes mais CO₂, quando se tem uma proporção de apenas 12,5 vezes maior na composição do gás de proteção;
 - i) já o potencial relativo da geração volumétrica de CO é menor entre duas composições de teores diferentes de CO₂ do que a relação de CO₂ na composição do gás, ou seja, a maior proporção de CO₂ do gás de proteção 100%CO₂ do que com do Ar+25%CO₂ leva a apenas 2,4 maior geração de CO e de 4,2 vezes maior do que com a proteção com Ar+8%CO₂;
 - j) ao contrário da emissão de fumos, não há efeito significativo da tensão (ou do comprimento de arco ou da estabilidade de transferência) e da corrente média sobre a geração dos gases CO e CO₂;
 - k) apesar da geração de grande quantidade de gases CO e CO₂ pelo arco quando se utiliza a proteção com CO₂ puro, não houve concentrações de CO e CO₂ significantes nas zonas de respiração do soldador ou próxima, mesmo em células de trabalho confinadas ou não (os gases CO e CO₂, o primeiro menos denso e o segundo mais denso na temperatura ambiente do que o ar atmosférico, quando aquecidos sobem e se dispersam no ambiente com facilidade).

CAPÍTULO IX

PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Apesar de demonstrado haver emissão de gases tóxicos (CO) e asfixiantes (CO₂) em soldagem MIG/MAG, os resultados mostraram que esses gases se dispersam da região da solda (convecção natural) para regiões além da de exposição do soldador ou operador. Assim, propõe-se:

- a) tentar simular uma área realmente confinada de dimensões maiores (como uma sala, mas simulando um tanque ou esfera), em que os gases dispersos ainda possam ficar contidos (pois não teriam como sair deste ambiente), e fazer um mapeamento após a soldagem em diferentes posições, tanto nos eixos X e Y como no eixo Z (para ver se a diferença de densidade relativa dos gases faria que alguns ficassem mais próximos do chão e outra do teto), comparando-se o resultado com o da introdução de gases CO e CO₂ gerados por outra forma;
- b) avaliar se o percentual de CO gerado no arco continua estável nesta forma ao adentrar uma região mais fria (mais longe do arco);
- c) avaliar se a quantidade de CO₂ gerado em soldagem seria significativa para gerar créditos de carbono caso houvesse a troca do gás de proteção por gases menos ricos em CO₂ (foi demonstrado que estes gases geram menos CO₂);

Em relação à geração de fumos, houve evidência da geração maior de fumos em função de alguns parâmetros de regulação governantes, mas que pouca influência tem esses parâmetros sobre o tamanho e composição das partículas. Além disto, neste trabalho não foi verificado a influência da dimensão e composição dos particulados sobre a saúde do trabalhador. Assim, propõe-se;

- a) estudar metodologias de medir de forma mais quantitativa tamanhos, composição química e composição cristalográfica dos particulados, como por difração a laser, difratômetro de raio-X e microscopia de força atômica (AFM);
- b) verificar se modos de transferência diferentes do curto-circuito, que demandam maiores correntes médias, como o goticular (“spray”), manteria a mesma tendência sobre ao tamanho e morfologia dos fumos;
- c) fazer um estudo mais detalhado sobre o efeito do tamanho, morfologia e composições químicas e cristlográficas dos particulados, sobre tudo dos

manométricos, sobre a saúde do trabalhador, utilizando-se os limites de exposição ocupacional das normas de segurança OSHA, NIOSH, ACGHI e a norma regulamentadora NR 15 do Ministério do Trabalho e Emprego.

- d) fazer um estudo do efeito do tamanho, morfologia e composições químicas e cristalográficas dos particulados, nos modos de transferências metálicas por curto-circuito, spray e globular, sobre a saúde do trabalhador, utilizando-se os limites de exposição ocupacional das normas de segurança OSHA, NIOSH, ACGHI e a norma regulamentadora NR 15 do Ministério do Trabalho e Emprego.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHEBO, J. I.; OGHOORE, O. Toxicokinetic analysis of asymptomatic hazard profile of welding fumes and gases. 06/2011; DOI:10.1007/978-94-007-1192-1_38 In. **Electrical Engineering and applied computing: lecture notes in electrical engineering**; Springer Netherlands, Vol 90, 2011, cap. 38, pp 473-485,

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS. **Nomination of Welding Fumes for Toxicity Studies**. Cincinnati, Ohio, USA Feb 2002.

ANTONINI, J. M.; SANTAMARIA, A. B.; JENKINS, N. T.; ALBINI, E.; LUCCHINI, R. Fate of manganese associated with the inhalation of welding: Potential neurological effects. **Neurotoxicology**, Little Rock, v. 27, n. 3, p. 304-310, May 2006.

ANTONINI, J. M.; KRISHNA MURTHY, G. G.; ROGERS, R. A.; ALBERT, R.; EAGAR, T. W.; ULRICH, G. D.; BRIAN, J. D. How welding fumes affect the welder. **Welding Journal**, Miami v. 77, n. 10, p. 55-59, 1998.

ASCENCO, C. G.; GOMES, J. F. P.; COSME, N. M.; MIRANDA, R. M. Analyses of welding fumes: a short note on the comparison between two sampling techniques. **Toxicological & Environmental Chemistry**, Lisboa, v. 87, n. 3, p. 345-349, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C800-08**: Standard Specification for Fibrous Glass Blanket Insulation (Aircraft Type). West Conshohocken, 2008.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **F1.2:2006**: Laboratory Method For Measuring Fume Generation Rates and Total Fume Emission of Welding and Allied Processes. Opa-Locka, 2006.

BOSWORTH, M. R.; DEAM, R. T. Influence of GMAW droplet size on fume formation. **Journal of Physics D: Applied Physics**, London, v. 33, n. 20, p. 2.605-2.1610, 2000.

Ministério do Trabalho e Emprego. Secretaria de Segurança e Medicina do Trabalho.

Portaria nº 3.214, de 8 de junho de 1978. Normas Regulamentadoras relativas à Segurança e Medicina do Trabalho. In: SEGURANÇA e medicina do trabalho. 64. ed. São Paulo: Atlas, 2009. p. 63-67. (Manuais de Legislação Atlas).

CARPENTER, K. R.; MONAGHAN, B. J.; NORRISH, J. Influence of Shielding Gas on Fume Formation Rate for Gas Metal Arc Welding (GMAW) of Plain Carbon Steel. In: VII INTERNATIONAL CONFERENCE, 2008, Pine Mountain. **Trends in welding research: proceedings...** Washington: ASM, 2009. p. 436-442.

CASTNER, H. R. Gas metal arc welding fume generation using pulsed current. **Welding Journal**, Miami, v. 74, n. 2, p. 59-s-68-s, 1995.

DENNIS, J.; MORTAZAVI, S. B. **The mechanism of fume and spatter formation in MIG welding.** Yorkshire: University of Bradford, 1997. Occasional Technical Report for Metal Fume Research Unit.

DENNIS, J. H.; HEWITT, P. J.; REDDING, C. A.; WORKMAN, A. D. A Model for Prediction of Fume Formation Rate in Gas Metal Arc Welding (GMAW), Globular and Spray Modes, DC Electrode Positive. **Annals of Occupational Hygiene**, v. 45, n. 2, p. 105-113, Mar. 2001.

FERNANDES, D. B.; SCOTTI, A.; VILARINHO, L. O. **Procedimento para o ensaio laprosolda de geração de fumos em soldagem MIG/MAG versão 9-1.** Uberlândia: UFU, 2009. Relatório Interno LAPROSOLDA/UFU 14/2009.

GARCIA, R. P. **Uma avaliação comparativa dos processos MIG/ MAG e eletrodo tubular em termos de capacidade produtiva, geração de fumos e de respingos, usando consumível para aço estrutural.** 2010. 130 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

GARCIA, R. P.; SCOTTI, A. Análise Comparativa da Geração de Fumos entre Arames Maciços (GMAW) e Tubulares (FCAW). **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 103-111, 2010.

GEOFFREY, R. S. **Welding fume plume dispersion. School of Mechanical, Materials and Mechatronic Engineering, Faculty of Engineering.** 2004. These (Doctoral of Philosophy) – University of Wollongong, Wollongong, 2004.

HAIDAR, J.; LOWKE, J. J. **Electronic Library of Construction Occupational Safety and Health (ELCOSH).** Hazard Alert: Welding Fumes and Gases, 1997. Disponível em: <<http://www.cdc.gov/niosh/elcosh/docs/d0100/d000026/d000026.html>>. Acesso em: 17 nov. 2010.

INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION. **ISO 10882-1:** Sampling of airborne particles of Welding and allied Processes. Geneva, 2008.

JENKINS, N. **Welding Fume Formation.** 1999. Dissertation (Doctoral of Materials Science and Engineering) – Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 1999.

JENKINS, N. T.; EAGAR, T. W. Chemical analysis of welding fume particles. **Welding Journal**, Miami, p. 87-93, June 2005.

JENKINS, N. T.; MENDEZ, P. F.; EAGAR, T. W. **Effect of Arc Welding Electrode Temperature on Vapor and Fume Composition.** Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2005.

MENDEZ, P. F.; JENKINS, N. T.; EAGAR, T. W. Effect of electrode droplet size on evaporation and fume generation in GMAW. In: GAS METAL ARC WELDING FOR THE 21ST CENTURY CONFERENCE, 2000, Orlando. **Proceedings...** Miami: American Welding Society, 2000. p. 1-8.

MENESES, V. A.; GOMES, J. F. P.; SCOTTI, A. The Effect of the Metal Transfer Stability (Spattering) on Fume Generation, Morphology and Composition in Short-Circuit MAG Welding. In: IIW ANNUAL ASSEMBLY, 2013, Essen. **[Proceedings...]**. [S.l.:s.n.], 2013. Doc. XII-2107-13, 212-1261-13.

NAKHLA, H.; SHEN, J. Y.; BETHEA, M. Environmental impacts of using welding gas. **The Journal of Technology, Management, and Applied Engineering**, Ann Arbor, v. 28, n. 3, p. 1-11. July/Sept. 2012.

NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH. NIOSH Method 0500: Particulates Not Otherwise Regulated, Total. In: SCHLECHT, P. C.; O'CONNOR, P. F. (Ed.). **NIOSH Manual of Analytical Methods**. Washington, DC: NIOSH, 1994. p. 1-3.

NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH. NIOSH Method 7300: Elements by ICP. In: SCHLECHT, P. C.; O'CONNOR, P. F. (Ed.). **NIOSH Manual of Analytical Methods**. 4th ed. Washington, DC: NIOSH, 2003. p. 6-8. (Analysis of welding fume 349).

NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH (NIOSH). **Nomination of Welding Fumes for Toxicity Studies**. Washington, 2002.

OCCUPATIONAL SAFETY & HEALTH ADMINISTRATION. **Welding Fumes (Total Particulate)**. Washington, 2002. Disponível em:
<https://www.osha.gov/dts/chemicalsampling/data/CH_276100.html>. Acesso em: 17 nov. 2010.

PIRES, L. Q.; MIRANDA, R. M.; GOMES, J. F. P. Fume emissions during gas metal arc welding. **Toxicological and Environmental Chemistry**, New York, v. 88, n. 3, p. 385-394, 2006.

PONOMAREV, V.; AL-ERHAYEM, O.; APPS, R. L.; LINDBERG, B. **Arc welding process statistical analysis**: methodical approaches, analysis conceptions, experiences. Manual-guide. Helsingor: JOM-Institute, DTU-Helsingor, 1997.

QUIMBY, J. B.; ULRICH, G. D. Fume formation rates in gas-shielded metal arc welding. **Welding Journal**, Miami, v. 78, n. 4, p. 142-149, 1999.

REIS, R. P. **Riscos de fumos e gases devidos a processos de soldagem**. 2003. 62f. Monografia (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2003.

REZENDE, G. M. C. de; LISKEVYCH, O.; VILARINHO, L. O.; SCOTTI, A. Um critério para determinar a regulagem da tensão em soldagem MIG/MAG por curto-circuito. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 16, n. 2, p. 98-103, abr./jun. 2011.

ROESLER, J. A.; WOITOWILTZ, H. J. Welder's siderosis progressing to interstitial pulmonary fibrosis after ongoing exposure to welding fumes. **European Respiratory Journal**, Copenhagen, Suppl. 9, p. 220S, 1996.

ROSADO, T. M. V. B. **Inovação do processo MIG/MAG**: análise de produtividade e emissão de fumos. 2008. 63 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008.

ROSADO, T.; PIRES, I.; QUINTINO, L. **Opportunities to Reduce Fume Emissions in Gas Metal Arc Welding**. Lisboa: [s.n.], 2009.

SAITO, H.; OJIMA, J.; TAKAYA, M.; IWASAKI, T.; HISANAGA, N.; TANAKA, S.; ARITO, H. Laboratory Measurement of Hazardous Fumes and Gases at a Point Corresponding to Breathing Zone of Welder during a CO₂ Arc Welding. **Industrial Health**, Kawasaki, v. 38, n. 1, p. 69-78, Jan. 2000.

SAMPAIO, J. M. **Seleção de equipamentos para captação localizada de poluentes no meio ambiente de trabalho**. São Paulo: Nederman do Brasil. 1998. Artigo técnico.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG**. São Paulo: Artliber, 2008.

SCOTTI, A.; REZENDE, G. M. C.; LISKÉVYCH, O. Measurement of Metal Transfer Regularity as a means of Selecting Parameters in GMAW with Short-Circuiting. In: IIIW COMMISSION - XII - SG 212 INTERMEDIATE MEETING, 2011, Trollhättan. **[Proceedings...]**. [S.l.: s.n.], 2011. Doc XII-2008-11.

SFERLAZZA, S. J.; BECKETT, W. S. The respiratory health of welders. **American Review of Respiratory Disease**, Baltimore, v. 143, n. 5, pt. 1, p. 1.134-1.148, May 1991.

SHINICHI, T.; MANABU, T. Modeling of Fume Formation Process in Arc Welding. **Transactions of JWRI**, Osaka, v. 40, n. 2, p. 21-27, 2011.

SOUZA, D. **Levantamento de mapas operacionais de transferência metálica para soldagem MIG/MAG de aço ao carbono na posição plana**. 2010.169 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

SOUZA, D.; ROSSI, M. L.; KEOCHEGUERIAN, F.; NASCIMENTO, V. C. do; VILARINHO, L. O.; SCOTTI, A. A influência da tensão de soldagem e do gás de proteção sobre a correlação entre indutância e regularidade da transferência metálica na soldagem MIG/MAG por curto-circuito. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 22-32, jan./mar. 2011.

SOWARDS, J. W. **Method for samplinp and characterizing arc welding fume particles**. Columbus: The Ohio State University, 2006.

STERJOVSKI, Z.; BROSSIER, J.; THOISY, E. de; CUIURI, D.; NORRISH, J.; MONAGHAN, B. J. Investigation of particulate weld fume generated from the GMAW of plain carbon steel. **Australasian Welding Journal**, Penrith, v. 51, n. 1, p. 34-40, 2006.

WALLACE, M. E.; FISCHBACH, T.; KOVEIN, R. J. **In-Depth Survey Report: Control Technology Assessment for the Welding Operations at Boilermaker's National Apprenticeship Training School Kansas City, Kansas**. Cincinnati: US Departament of Health and Human Services, June 1997. Report no. ECTB 214-13a. Disponível em: <http://www.industrialairsolutions.com/fume-smoke-collectors/fume-collection-PDF/OSHA-Welding-Control-Technology.pdf>.> Acesso em: 16 jun. 2010.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. International Agency for Research on Cancer. Chromium and Chromium Compounds: Chromium Metal (Group 3), Trivalent Chromium Compounds (Group 3), Hexavalent Chromium Compounds (Group 1*). In: _____. **Overall Evaluations of Carcinogenicity: An Updating of IARC Monographs Volumes 1 to 42** Lyon, 1987. p. 165-168. (IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risks to Humans. Monographs. Supplement 7).

YAMAZAKI, K.; YAMAMOTO, E.; SUZUKI, K.; KOSHIISHI, F. Effects of Welding Process Parameters on Fume Emission in Gas Metal Arc Welding. In: LX ANNUAL ASSEMBLY OF INTERNATIONAL INSTITUTE WELDING, 2007, Dubrovnik and Cavtat (Croatia). **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2007. Doc. n. XII-1922-07.

ANEXO A - Relatório NAPRO

RELATÓRIO DE ANÁLISE
PC-MULTIGÁS

7.5.1

RQN-41-03

01/01

IDENTIFICAÇÃO

Cliente:

Kelli Carlos Ribeiro Marchins

Equipamento:

Pc-Multigás

Hardlock:

M14598

Número de Série:

12E2521

P.E.F.:

0,507

Número de Série Banco Ótico:

82953

Versão:

11,82

VERIFICAÇÃO VISUAL - Montagem

- ☒ Mangueiras internas e externas e corpo de filtro
☒ Conectores terminais e fixação
☒ Fusível existência e valor (3A)
☒ Número de série, dados e colocação
☒ Montagem externa, fixação tampas, espigões, porta fusível e policarbonato

Selo INMETRO:

11.540.160-0

D1959342-6

Lacre:

D1959341-3

ACESSÓRIOS

- ☒ Sonda de captação de gás completa
☒ Mangueira de purga
☒ Cabo de alimentação jacaré
☒ Fonte de Alimentação
☒ Cabo Comunicação serial
☒ CD Rom de Instalação
☒ Manual de Operação
☒ Mangueira para vedação da sonda

- ☒ Certificado de garantia
☒ Adaptador DB25/DB09
☒ Sonda de Temperatura 7004
☒ Cabo RPM
☒ Rhotophon com cabo
☒ Decibelímetro com acessórios
☒ Anemômetro com acessórios
☒ Cabo AVL

Interf. IM/USB nº:

Cabo USB 2.0

Cabo Desumidificador

TESTES

- ☒ Estanqueidade Valor de Vácuo: 250 mmHg
☒ Calibração com gás padrão Padrão med. Instantânea temp. ambiente: 23 °C
CO: 3,52 CO: 3,52 CO: 3,55
CO₂: 6 CO₂: 6 CO₂: 6 temp. à 80°C: 80 °C
HC: 400 HC: 400 HC: 407
NOx: 886 NOx: 886 NOx: 885

☒ Acionamento da válvula zero☒ Vazão das bombas LPM 3,5☒ Tempo resposta do equipamento 4 segundos

valor padrão

1000 RPM

3000 RPM

valor medido

1000 RPM

3000 RPM

OBSERVAÇÃO AO CLIENTE

Este Relatório de Análise, assegura o perfeito funcionamento do seu equipamento.

Devido ao Analisador de Gases ter um método de calibração relativa onde é necessário um gás para o ponto zero e outro de span para o final de escala e também sua indicação ser dependente de fatores de temperatura ambiente e pressão, somando-se a isso a sensibilidade do Banco Ótico infravermelho vibrações e transporte a NAPRO NÃO pode garantir a calibração fora de seu laboratório para efeitos de Verificação Inicial ou Periódica junto ao INMETRO / IPEM, ou seja quando já instalados no Cliente.

Recomendamos aos Clientes adquirirem seus próprios gases de calibração como é feito no Estados Unidos e Europa para uma perfeita calibração semelhante a de fábrica.

RESPONSÁVEIS

Produção:

FERNANDO REGIS FLORES

Data: 05/06/2012

Expedição:

Vandenberg

Data: 12/06/12



NAPRO ELETRÔNICA INDUSTRIAL LTDA

PC MULTIGAS

TÉC: FERNANDO REGIS FLORES

05/06/12

Número de Série

82953

Versão Software

5.129

Versão do Hardware

5.4

Valor P.E.F.

0,507

RPM (Rotação do Motor)	:	1000	rpm
Temperatura do Óleo	:	250	°C
CO (Monóxido de Carbono)	:	3,55	% vol
CO2 (Dióxido de Carbono)	:	6,0	% vol
O2 (Oxigênio)	:	0,2	% vol
HC (Hidrocarbonetos)	:	407	ppm vol
NOx (Óxido de Nitrogênio)	:	0	ppm vol
COc (Monóxido de Carbono Corrigido)	:	5,57	% vol
HCc (Hidrocarbonetos Corrigido)	:	639	ppm vol
Fator de Diluição	:	1,57	
Diluição	:	9,55	% vol
λ Lambda	:	0,818	
Relação Ar Combustível A.F.R.	:	11,27	

Data : 05/06/12

Napro Eletrônica Industrial Ltda

10.02/10J



PC-Multigás

NAPRO ELETRÔNICA INDUSTRIAL LTDA

PC MULTIGAS

TÉC: FERNANDO REGIS FLORES

05/06/12

Número de Série

82953

Versão Software

5.129

Versão do Hardware

5.4

Valor P.E.F.

0,507

RPM (Rotação do Motor)	:	0	rpm
Temperatura do Óleo	:	250	°C
CO (Monóxido de Carbono)	:	0,00	% vol
CO2 (Dióxido de Carbono)	:	0,0	% vol
O2 (Oxigênio)	:	0,2	% vol
HC (Hidrocarbonetos)	:	1	ppm vol
NOx (Óxido de Nitrogênio)	:	885	ppm vol
COc (Monóxido de Carbono Corrigido)	:	0,00	% vol
HCc (Hidrocarbonetos Corrigido)	:	1	ppm vol
Fator de Diluição	:	0,00	
Diluição	:	0,00	% vol
λ Lambda	:	0,000	
Relação Ar Combustível A.F.R.	:	0,00	

Data : 05/06/12

Napro Eletrônica Industrial Ltda

10.02/10J