

EDMUNDO BENEDETTI FILHO

**INFLUÊNCIA DA CORRENTE, TAXA DE FUSÃO E
TEMPO DE ARCO ABERTO NA GERAÇÃO DE
FUMOS NO PROCESSO GMAW CURTO-CIRCUITO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2018

EDMUNDO BENEDETTI FILHO

**INFLUÊNCIA DA CORRENTE, TAXA DE FUSÃO E TEMPO DE ARCO
ABERTO NA GERAÇÃO DE FUMOS NO PROCESSO GMAW CURTO-
CIRCUITO**

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho

UBERLÂNDIA

2018

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

B462 Benedetti Filho, Edmundo, 1989-
2021 INFLUÊNCIA DA CORRENTE, TAXA DE FUSÃO E TEMPO DE ARCO
ABERTO NA GERAÇÃO DE FUMOS NO PROCESSO GMAW CURTO-
CIRCUITO [recurso eletrônico] / Edmundo Benedetti Filho.
- 2021.

Orientador: Louriel Oliveira Vilarinho.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.533>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica. I. Vilarinho, Louriel
Oliveira, 1975-, (Orient.). II. Universidade Federal de
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Mecânica. III.
Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4282 - www.posgrad.mecanica.ufu.br - secposmec@mecanica.ufu.br



ATA

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

NÚMERO DE ORDEM: 518

DATA: 25/07/2018

Às oito horas e trinta minutos do dia vinte e cinco de julho do ano de dois mil e dezoito, na sala de reuniões do LTAD, Bloco 5F, Campus Santa Mônica, reuniu-se a Banca Examinadora composta pelos Professores Dr. Louriel Oliveira Vilarinho (Orientador), Dr. Sinésio Domingues Franco da Universidade Federal de Uberlândia, e Dr. Mateus Barancelli Schwedersky da Universidade Federal de Santa Catarina para, sob a presidência do primeiro, desenvolver o processo de avaliação da dissertação intitulada ***“Influência da Corrente, Taxa de Fusão e Tempo de Arco Aberto na Geração de Fumos no Processo GMAW Curto-Circuito”***, apresentada pelo aluno **EDMUNDO BENEDETTI FILHO** matrícula número **11622EMC020**, em complementação aos requisitos determinados pelo Regimento do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica para obtenção do título de Mestre. Após discorrer sobre seu trabalho, o candidato foi arguido pelos membros da Banca, diante das comunidades universitária e externa. Em seguida, a dissertação foi avaliada em seção privada pelos membros da Banca que, ao encerrar o processo, consideraram-na:

- () Aprovada
- (x) Aprovada com modificações a serem submetidas para a aprovação do orientador.
- () Aprovada com modificações a serem submetidas para a aprovação da banca.
- () Reprovada

conferindo ao aluno, em caso de aprovação, o título de Mestre em Engenharia Mecânica, Área de Concentração: **Materiais e Processos de Fabricação**, Linha de Pesquisa: **Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)**. As demandas complementares observadas pelos examinadores deverão ser satisfeitas no prazo máximo de 45 dias, para dar validade a esta aprovação. Para constar, lavrou-se a presente ata, que vai assinada pelo presidente e demais membros da Banca.

Membros:

Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho (Orientador) - UFU

Prof. Dr. Sinésio Domingues Franco - UFU

Prof. Dr. Mateus Barancelli Schwedersky - UFSC

Uberlândia, 25 de julho de 2018.



Documento assinado eletronicamente por **Louriel Oliveira Vilarinho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 25/07/2018, às 11:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mateus Barancelli Schwedersky, Usuário Externo**, em 25/07/2018, às 11:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sinesio Domingues Franco, Professor(a) do Magistério Superior**, em 25/07/2018, às 11:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0595054** e o código CRC **C09F35FA**.

*À minha esposa, Paula, pelo amor, paciência, compreensão e companheirismo,
sempre me apoiando e incentivando meu trabalho.*

*À minha filha, Joana, pelo amor e por ser inspiração para que eu
tenha ainda mais forças para seguir em frente.*

*Aos meus pais, Gilberta e Edmundo, por terem investido seu tempo e dedicação
para que eu pudesse estudar e me formar, criando oportunidades que me
possibilitaram chegar onde estou.*

À minha saudosa avó, Josélia, pelo amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Louriel Oliveira Vilarinho, pela orientação, paciência, ajuda e amizade;

Ao Programa de Pós-Graduação da FEMEC;

Ao CNPq, pelo suporte financeiro concedido;

Ao Laprosolda/UFU – Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem – pela concessão dos recursos técnicos e materiais;

Aos demais professores do Laprosolda: Prof. Valtair A. Ferraresi, pelos conselhos, tanto pessoais como profissionais; Prof. Américo Scotti, pelos ensinamentos e discussões científicas, sempre muito frutíferas; e Prof. Volodmir Ponomarov, pelas anedotas, curiosidades e experiências de vida compartilhadas.

Aos amigos e colegas de trabalho, Diandro Bailoni Fernandes (Chefe), Victor Alves (Kaki), Lucas Alves (Cabeça), Douglas Araújo (Japa), Marcus Vinícius Machado (Bin), Douglas Mazer (Batuta), Leandro João da Silva (Gaúcho) e Lucas Lannes, pela direta e indispensável colaboração na execução deste trabalho.

Aos membros da Banca Examinadora, por se disporem a avaliar este trabalho.

À minha família pelo incentivo e apoio;

Aos demais amigos e colegas de trabalho pelo incentivo e momentos de descontração.

BENEDETTI FILHO, E. **Influência da Corrente, Taxa de Fusão e Tempo de Arco Aberto na Geração de Fumos no Processo GMAW Curto-Circuito**. 2018. 119p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

Quando se trata da geração e emissão de fumos, muito já se conhece acerca da influência exercida pelos parâmetros de regulação, tais como corrente de soldagem, tensão e gás de proteção. Sabe-se que, via de regra, o aumento da corrente de soldagem ocasiona o aumento na taxa de geração de fumos (TGF). Identificou-se nos trabalhos revisados a oportunidade que avançar na elucidação das causas raiz do efeito da corrente na TGF. Para isso, o presente trabalho busca o aumentar o entendimento deste fenômeno. Assim, propôs-se uma metodologia pela qual fosse possível se desvincular a influência da corrente de soldagem, propriamente dita, da influência da taxa de fusão na geração e emissão de fumos metálicos. É sabido, porém, que, em soldagem GMAW, há restrições óbvias em se alterar a corrente de soldagem sem que seja alterada a taxa de fusão, fazendo necessária uma abordagem que permitisse a análise dos efeitos isolados dessas variáveis na taxa de geração de fumos. Com o presente trabalho, pois almejou-se contribuir com o entendimento sobre os mecanismos de formação de fumos, estabelecendo critérios práticos a fim de proporcionar, no limite, o controle, dentro dos limiares atingíveis, da emissão de fumos por meio da manipulação dos parâmetros de soldagem. Nesse sentido, foram realizados ensaios de coleta de fumos sob diferentes condições de soldagem, variando a corrente de soldagem, mantendo-se a taxa de fusão constante, e vice-versa, para três condições de tempo médio de arco aberto. A inserção desta última, permitiu analisar a influência da corrente e da taxa de fusão sob diferentes regimes de transferência metálica por curto-circuito. É possível admitir que, dentro dos limites admitidos para as variáveis de entrada, os resultados mostraram que a corrente de soldagem exerce maior influência na geração de fumos do que a taxa de fusão. Observa-se ainda que, em todas as condições testadas, o tempo médio de arco aberto, mostrou ter a influência mais significativa dentre as variáveis investigadas.

Palavras-chave: Geração de Fumos; GMAW; MIG/MAG; Curto-Circuito; Taxa de Fusão; Corrente de Soldagem; Tempo médio de Arco Aberto.

BENEDETTI FILHO, E., **Influence of Current, Melting Rate and Open-Arc Time in Fume Generation of Short-Circuit GMAW**. 2018. 119p. MSc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

ABSTRACT

When it comes to the generation and emission of welding fumes, much is already known about the influence exerted by the regulation parameters, such as welding current, voltage and shielding gas. It is known that, as a rule, the increase in welding current causes an increase in the fume generation rate (FGR). It was identified in the reviewed works the opportunity to advance in the elucidation of the root causes of the current effect on FGR. For that, the present work seeks to increase the understanding of this phenomenon. Therefore, a methodology was proposed through which it would be possible to decouple the influence of the welding current, itself, from the influence of the melting rate on the generation and emission of metallic fumes. It is known, however, that, in GMAW welding, there are obvious restrictions on changing the welding current without changing the melt rate, making necessary an approach that would allow the analysis of the isolated effects of these variables on the generation rate of fumes. With this work, the aim was to contribute to the understanding of the mechanisms of fume formation, establishing practical criteria to provide, eventually, the control, within achievable limits, of the fume generation through the manipulation of welding parameters. In this sense, fume collection tests were carried out under different welding conditions, varying the welding current, keeping the fusion rate constant, and vice versa, for three conditions of average open-arc (arcing) time. The addition of this last variable, allowed to analyze the influence of current and melting rate under different short-circuit transfer regimes. It is possible to admit that, within the appreciable limits of the input variables, the results showed that the welding current exerts a greater influence on the FGR than the melting rate. It is also observed that, in all conditions tested, among the investigated input variables, the average arcing time showed to have the most significant influence on FGR.

Palavras-chave: Fume Generation; GMAW; MIG/MAG; Short-Circuit; Melting Rate; Welding Current; Average Arcing Time.

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Constante do modelo simplificado da equação do consumo
β	Constante do modelo simplificado da equação do consumo
Φ	Diâmetro real do arame eletrodo
ρ	Densidade do arame-eletrodo
$\sigma_{t_{mAA}}$	Desvio padrão do tempo médio de arco aberto
$\sigma_{t_{mCC}}$	Desvio padrão do tempo médio de curto-circuito
ANOVA	Análise de variância
DBCP	Distância bico de contato peça
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
I	Corrente (equação do consumo)
I_M	Corrente média (variável de entrada, planejamento experimental)
IV_{CC}	Índice Laprosolda de regularidade de transferência metálica em modo curto-circuito
L	Comprimento energizado de eletrodo (equação do consumo)
$L_{amostra-i}$	Comprimento da amostra i, utilizada para cálculo de ρ
Laprosolda	Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem
$m_{amostra-i}$	Massa da amostra i (de três), utilizada para cálculo de ρ
m_i	Massa inicial do filtro de coleta de fumos (antes do ensaio)
m_f	Massa final do filtro de coleta de fumos (após o ensaio)
MIG/MAG	Metal Inert Gas / Metal Active Gas
MLG	Modelo Linear Generalizado
p	Nível de significância estatística das variáveis analisadas
t_{AA}	Período de arco aberto na transferência por curto-circuito
t_{mAA}	Tempo médio de arco aberto na transferência por curto-circuito
$t_{arco\ aberto}$	Tempo total de duração da solda
t_{AS}	Tempo de aquisição dos sinais elétricos
t_{CC}	Período de curto-circuito na transferência por curto-circuito
T_D	Taxa de Deposição (teórica, desconsiderando-se o rendimento de deposição)

T_F	Taxa de Fusão (variável de entrada, planejamento experimental)
TGF	Taxa de Geração de Fumos
TGF_t	Taxa de Geração de Fumos [g/h]
TGF_m	Taxa de Geração de Fumos em g/kg
t_{mAA}	Tempo médio de arco aberto
t_{mCC}	Tempo médio de curto-circuito
V_M	Tensão média
V_a	Velocidade de alimentação do arame
V_s	Velocidade de soldagem

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Processo GMAW em modo de transferência por curto-circuito	4
2.2. Fumos de soldagem	8
2.3. Composição dos Fumos de Soldagem	9
2.4. Mecanismos de formação dos fumos	10
2.5. Influência dos parâmetros e condições de soldagem na geração de fumos ...	14
2.5.1. Modos de transferência	15
2.5.2. Gás de Proteção	17
2.5.3. Tensão	21
2.5.4. Comprimento de Arco	24
2.5.5. Corrente	25
2.5.6. Taxa de Fusão	27
METODOLOGIA EXPERIMENTAL	32
3.1. Bancada Experimental	32
3.1.1. Fonte e alimentador de arame	32
3.1.2. Coletor de Fumos	33
3.1.3. Balança de Precisão	35
3.1.4. Forno	36
3.1.5. Sistema de monitoramento e aquisição de dados	37
3.1.6. Bancada de testes preliminares	40
3.2. Materiais	42
3.2.1. Metal de adição	42
3.2.2. Metal de base	43
3.2.3. Gás de proteção	44
3.2.4. Filtro de coleta de fumos	44
3.3. Planejamento experimental	44
3.3.1. 1ª Fase de parametrização: variação de I_M a T_F constante	47
3.3.2. 2ª Fase de parametrização: variação de T_F a I_M constante	48

3.3.3. Agrupamento dos níveis de I_M e T_F e levantamento do envelope operacional final	50
3.3.4. Ensaio de coleta de fumos	52
3.4. Realização das análises de comportamento e análises estatísticas	55
TESTES PRELIMINARES	56
4.1. Concepção do experimento	56
4.1.1. Obtenção dos envelopes operacionais preliminares	56
4.1.2. Critérios para ajuste de tensão de soldagem	58
4.1.3. Metodologia empregada no levantamento do envelope operacional na fase de testes preliminares	61
4.1.4. Anomalia nos valores de corrente na bancada de coleta de fumos	63
4.2. Reparação, manutenção e melhoria dos equipamentos	65
4.2.1. Fonte de soldagem	65
4.2.2. Coletor de fumos	70
RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
5.1. Resultados dos ensaios de coleta de fumos	77
5.2. Análise gráfica	79
5.3. Análise estatística	85
CONCLUSÕES	91
PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
APÊNDICE I – SINAIS ELÉTRICOS E DE VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO DOS ENSAIOS VÁLIDOS	100

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A soldagem é o método mais utilizado para se realizar a união permanente de metais. Utilizando-se processos de soldagem e brasagem, é possível unir quase todos os tipos de metais e ligas comerciais, sendo esses processos de grande importância na fabricação e no reparo de máquinas, tubulações e estruturas, permitindo flexibilidade de projeto, redução de custos e alta produtividade.

Por outro lado, a soldagem, como muitos processos metalúrgicos, emite fumos para a atmosfera. Segundo a NBR 12543, fumos são “[...] aerodispersóides gerados termicamente, constituídos por partículas sólidas formadas por condensação de vapores, geralmente após volatilização de substância fundida [...], frequentemente acompanhada de reação química, tal como a oxidação”.

Existem diversas normas de segurança do trabalho que determinam o tempo máximo em que o soldador pode ficar exposto aos fumos de soldagem. Segundo Antonini *et al.* (1998), estes óxidos que ficam em suspensão no ar são os responsáveis pelo alto índice de doenças respiratórias e pulmonares que atingem os soldadores.

Segundo Thornton e Stares (1994), apud Zimmer e Biswas (2001), as partículas de fumos de soldagem configuram-se como um dos maiores causadores de risco para a saúde dos soldadores. Por ocasião do trabalho com processos de soldagem, estas partículas ficam concentradas na zona respiratória do soldador, representando potencial perigo para a sua integridade respiratória. Possivelmente, muitos soldadores podem estar sofrendo de problemas respiratórios, mas desconhecem o fato.

Dessa forma é fundamental investigar os mecanismos de formação e emissão de fumos metálicos, bem como a determinação dos fatores que influenciam a Taxa de Geração de Fumos (TGF), a fim de se tentar minimizá-la a níveis menos prejudiciais aos soldadores, assim como às pessoas que compartilham dos mesmos

ambientes de trabalho onde há atividades de soldagem a arco, já que também são expostos aos riscos inerentes da exposição a essas substâncias.

Um dos principais mecanismos a serem investigados se refere ao efeito da corrente de soldagem sobre a taxa de geração de fumos. Sabe-se que o aumento da corrente acarreta maiores emissões de particulados pela soldagem. Entretanto, a literatura técnica discute quais seriam as possíveis razões para isso ocorrer, porém são praticamente unânimes ao declarar duas hipóteses principais.

A primeira hipótese alega que o aumento da geração de fumos decorrente do aumento da corrente de soldagem se dá devido ao aumento na taxa de fusão do eletrodo. Sendo assim, mais material sendo fundido por unidade de tempo, acarretaria uma maior taxa de evaporação e, portanto, mais fumos (CASTNER, 1995 e YAMAZAKI *et al.*, 2007).

Outra possível hipótese seria o aumento da temperatura das gotas em transferência com o aumento da corrente. Assim, um maior superaquecimento na superfície do metal líquido contribuiria para maiores taxas de evaporação de metais e, assim, haveria maior formação de fumos (CASTNER, 1995 e HAIDAR, 1999).

Ambas as hipóteses são, de fato, plausíveis, como será discutido no presente trabalho. Contudo, não há na literatura um trabalho no qual se investigue qual destas duas explicações teria maior significância (maior peso) sobre a geração de fumos, algo que contribuiria para uma maior clareza sobre os mecanismos de geração de fumos no processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*).

Isto posto, o objetivo deste trabalho é avaliar a influência exercida pela corrente de soldagem, como fator independente da taxa de fusão e pela taxa de fusão, como fator independente da corrente de soldagem, variando-se o tempo médio de arco aberto para cada condição testada, na taxa de geração de fumos do processo GMAW com transferência por curto-circuito.

Sobre isso, é amplamente sabido na comunidade de soldagem que, diferentemente de processos como GTAM (*Gas Tungsten Arc Welding*) e PAW (*Plasma Arc Welding*) não autógenos, no processo GMAW há dificuldades (pouca flexibilidade) de se obter variação independente entre níveis de corrente e a taxa de fusão do material de adição.

Para isso, foi proposta uma metodologia na qual, em determinados intervalos de variação, fez-se possível realizar soldagens com pelos menos dois níveis de taxa de fusão à corrente constante e vice-versa, como será exposto adiante.

Com os dados obtidos com tal metodologia, procederam-se análises a partir de duas perspectivas sobre a geração de fumos do processo GMAW com transferência por curto-circuito. A primeira, sobre a capacidade de um dado envelope operacional gerar mais ou menos fumos por unidade de tempo [g/h] (taxa de geração de fumos temporal). A segunda, sob a perspectiva da capacidade deste mesmo envelope operacional gerar mais ou menos fumos por massa de eletrodo consumida [g/kg] (taxa de geração de fumos mássica).

Por fim, propõe-se a realização de análises estatísticas, objetivando quantificar as possíveis influências que cada variável investigada exerceria sobre a geração de fumos, sob as condições propostas na metodologia.

De maneira geral, o que se espera deste trabalho é a proposição de uma nova abordagem para investigação do tema, permitindo que se aclarem aspectos específicos, especialmente, sobre os mecanismos de geração de fumos do processo GMAW com transferência por curto-circuito.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Processo GMAW em modo de transferência por curto-circuito

A forma como ocorre a transferência metálica no processo GMAW exerce forte influência sobre suas características operacionais, estabilidade do processo, geração de respingos e fumos, capacidade posicional (soldas fora da posição plana) e aspecto visual da solda (NORRISH, 1992).

A transição entre os modos de transferência metálica é função de diferentes fatores, sendo os mais influentes a tensão, corrente, diâmetro do eletrodo e gás de proteção. Com relação aos modos existentes, o Instituto Internacional de Soldagem (IIW) propôs classificações abarcando variações, como as apresentadas por Lucas, Iordachescu e Ponomarev (2005), resultando no conceito denominado de Modos Fundamentais de Transferência Metálica. A Figura 2.1 representa a classificação dos modos de transferência metálica proposto pelo IIW, conforme Vilarinho (2007).

A transferência por curto-circuito é caracterizada por apresentar grande variação no comprimento de arco, decorrentes dos sucessivos apagamentos e reignições do arco elétrico. Segundo Scotti e Ponomarev (2008), este modo consiste na transferência da gota de metal líquido em crescimento na ponta do arame-eletrodo, quando esta toca a poça de fusão (curto-circuito). Nesse instante, a transferência da gota para a poça de fusão ocorre devido principalmente ao efeito da tensão superficial (maior na poça de fusão que na gota fundida na extremidade do eletrodo e, daí, o sentido da transferência).

O fato de ocorrer o contato entre gota fundida e poça de fusão, configura um curto-circuito e, conseqüentemente, há a extinção momentânea do arco elétrico, ocorrendo sua reignição instantaneamente após a transferência da gota para a poça. Todo o fenômeno pode se repetir de 20 a 200 vezes por segundo. A Figura 2.2

apresenta o comportamento dos sinais elétricos, ilustrando os principais momentos da formação da gota e sua transferência para a poça de fusão.


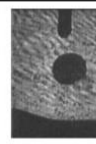
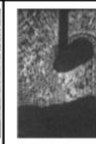

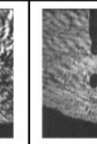
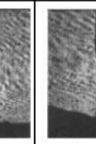
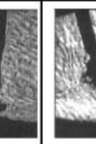
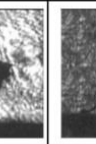
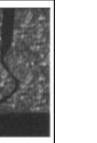
Proposta de Classificação Pelo IIW	Fundamental		A		B		C	D		E
	Curto - Circuito		Globular		Pulsada		Goticular (Spray)		Rotacional	
	An	Ac	B1	B2		D1	D2			
Modo	Curto - Circuito	Curto - Circuito Controlado	Globular em Gotas	Globular repelida	Pulsada	Goticular	Elongamento (streaming)	Explosiva	Rotacional	
Tipo Fundamental	Natural	Controlado	Natural	Natural	Controlado	Natural	Natural	Natural	Natural	
Transferência										

Figura 2.1 – Classificação dos modos fundamentais de transferência metálica proposto pelo IIW (adaptado de Vilarinho, 2007)

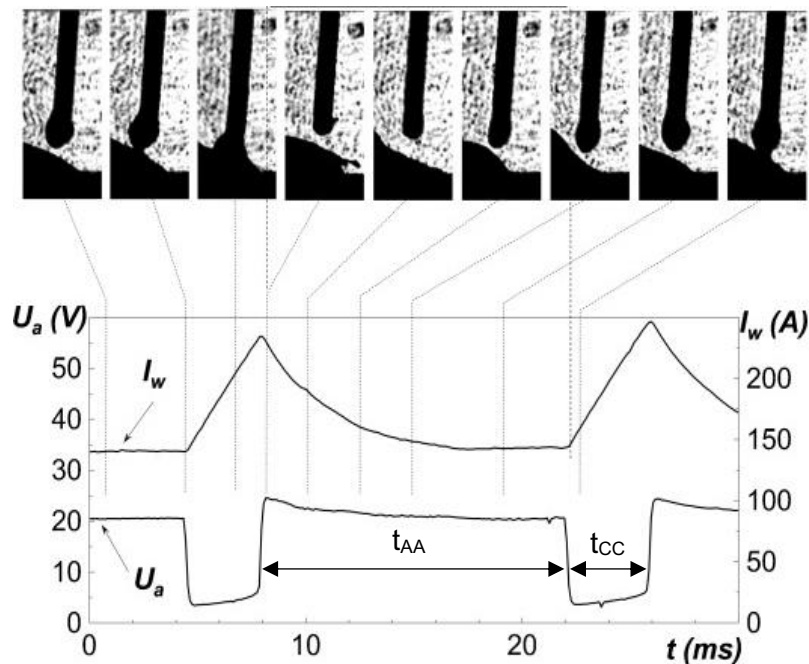


Figura 2.2 – Oscilograma típico de tensão e corrente durante soldagem GMAW com transferência por curto-circuito, onde t_{AA} representa o tempo de arco aberto e t_{cc} o tempo de curto-circuito (modificado de Scotti e Ponomarev, 2008)

Como a transferência da gota, da ponta do eletrodo para a poça de fusão se dá de forma periódica, a regularidade com a qual esse ciclo se repete é um fator importante no processo. Assim, há a necessidade de que essa regularidade da transferência seja mensurável, possibilitando que se compreenda os efeitos da regulagem dos parâmetros e demais variáveis na estabilidade do processo, possibilitando a determinação de critérios de regulagem dos parâmetros de soldagem.

Para efeito do presente trabalho, a regularidade da transferência metálica será mensurada por meio da adoção do *Índice de Laprosolda de Regularidade da Transferência Metálica em Modo Curto-Circuito* (IV_{CC}), servindo como critério para a regulagem da tensão, inicialmente, e, posteriormente como objeto de análise. Este índice foi proposto no trabalho de Souza (2010), e tem o objetivo de quantificar a regularidade da transferência metálica por curto-circuito, considerando para o cálculo os desvios padrão e as médias do tempo de arco aberto e do tempo de curto-circuito, como mostrado na Equação 2.1.

$$IV_{CC} = \frac{\sigma_{t_{mAA}}}{t_{mAA}} + \frac{\sigma_{t_{mCC}}}{t_{mCC}} \quad (2.1)$$

onde $\sigma_{t_{mAA}}$ é o desvio padrão do tempo médio de arco aberto; $\sigma_{t_{mCC}}$ é o desvio padrão do tempo médio de curto-circuito; t_{mAA} é o tempo médio de arco aberto e t_{mCC} é o tempo médio de curto-circuito.

Dessa forma, quanto menor for este valor, mais regular é a transferência metálica, uma vez que os desvios padrão seriam menores em relação às médias, o que se traduz em melhor cadência da transferência das gotas da ponta do eletrodo para a poça de fusão.

De forma a fornecer ao leitor maior noção sobre essa mensuração, tem-se que os valores de IV_{CC} , grosso modo, variam entre 0,6 e 1,5. Contudo, não existe um ponto ótimo absoluto, uma vez que sua utilização se dá com o fim de comparar, para determinado conjunto de parâmetros, a tensão regulada na qual a transferência se dá de forma mais regular, cadenciada.

Outro importante parâmetro para caracterização da transferência por curto-circuito, amplamente discutido e estudado neste trabalho, é o tempo médio de arco

aberto (t_{mAA}), que é parte do cálculo do IV_{CC} e que, sabidamente, possui influência na geração de fumos. O tempo médio de arco aberto consiste na média dos períodos nos quais existe arco elétrico ardendo entre o eletrodo e a peça. A Figura 2.3 traz um oscilograma real da tensão de soldagem, na qual é apresentado o conceito deste parâmetro. A Equação 2.2 apresenta como é feito o cálculo dessa variável.

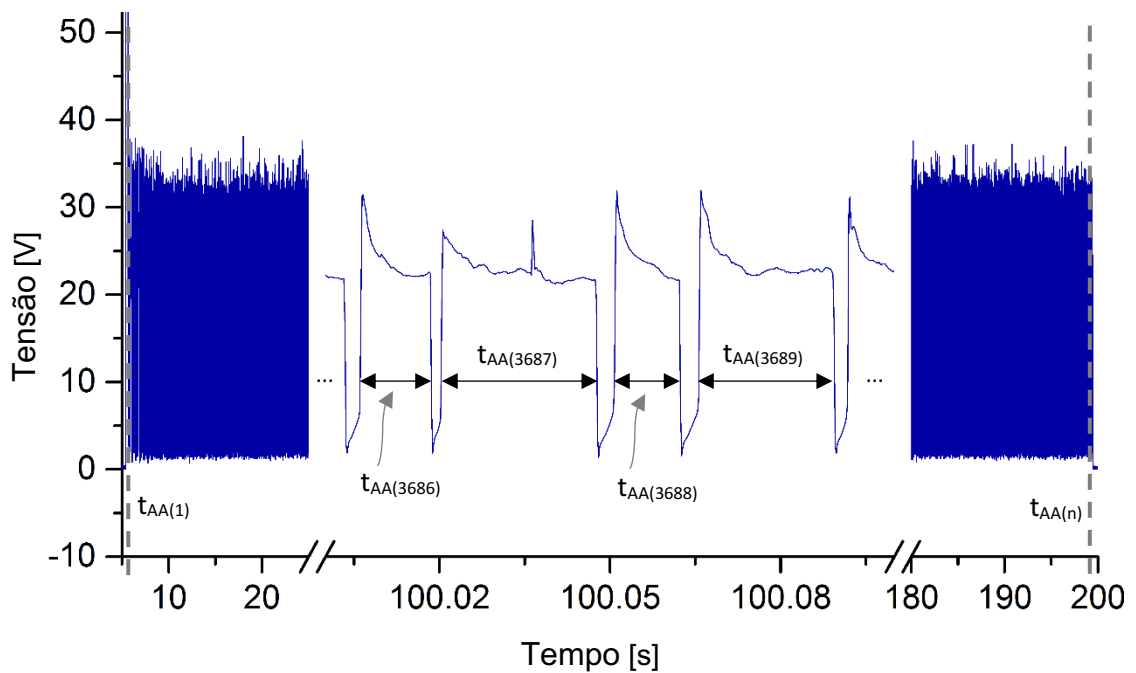


Figura 2.3 – Oscilograma de tensão, exemplificando a forma como é realizado o cálculo do tempo médio de arco aberto, destacando quatro períodos de arco aberto intermediários ($t_{AA(3686)}$, $t_{AA(3687)}$, $t_{AA(3688)}$ e $t_{AA(3689)}$), o primeiro ($t_{AA(1)}$) e o último ($t_{AA(n)}$)

$$t_{mAA} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{AA(i)}}{n} \quad (2.2)$$

onde $t_{AA(i)}$ é o tempo de arco aberto de número i ; e n é o número total de curtos-circuitos compreendidos no intervalo que vai de 1 até n , do sinal de tensão analisado.

De maneira geral, esta grandeza está associada à frequência de curto-circuito, sendo governada fundamentalmente pela tensão de soldagem, de forma que, quanto maior for a tensão regulada, com todos os outros parâmetros fixos,

maior será o comprimento médio do arco, o que fará com que o tempo médio entre curtos-circuitos subsequentes seja maior.

2.2. Fumos de soldagem

Os fumos gerados a partir da soldagem a arco têm sido alvo de estudos desde a segunda metade dos anos 70 (JENKINS, 1999), década em que foi publicado um importante e abrangente trabalho realizado por Heile e Hill (1975). Utilizando-se o aparato da Fig. 2.4, Esses autores investigaram a Taxa de Geração de Fumos (TGF) inerente a quatro processos de soldagem a arco: Eletrodo Revestido (SMAW), Arame-Tubular (FCAW), *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) e *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW). Eles notaram que a geração de fumos na soldagem GTAW autógena é irrisória, quando comparada com os demais processos com eletrodos consumíveis.

Este fenômeno levou esses pesquisadores a concluir que a formação dos fumos se dá principalmente a partir da gota fundida, desde sua formação até sua completa transferência, e não do metal de base, poça de fusão ou cordão, como se acreditava na época. Eles então propuseram que a geração de fumos na soldagem a arco seria função:

- da área superficial da gota;
- da temperatura da superfície da gota;
- do tempo de permanência da gota na região de alta temperatura (arco elétrico) e
- da eficiência de adsorção de energia pela sua superfície.

A hipótese de que exista baixa contribuição da poça de fusão para a geração de fumos, justificada por Heile e Hill (1975) pela baixa geração de fumos do processo GTAW autógeno é cabível, mas sugere questionamentos. Isso porque o fenômeno físico do processo GTAW autógeno difere bastante do processo GMAW, uma vez que não há transporte de massa através do arco elétrico, tornando contestável (quando não, inapropriada) a comparação entre a geração de fumos destes dois processos.

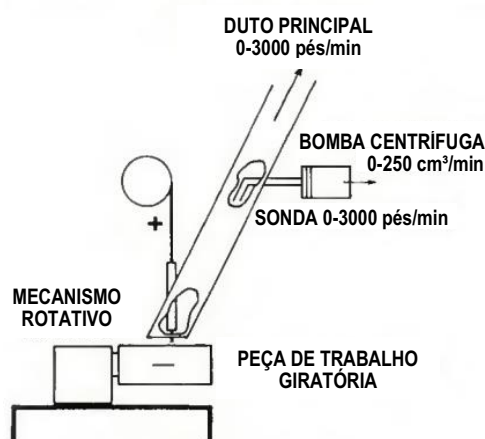


Figura 2.4 – Diagrama esquemático do aparato de amostragem de fumos utilizado por Heile e Hill (1975) (modificado de Heile e Hill, 1975)

Contudo, em um trabalho mais recente, Haidar (1999) também sugere que a geração de fumos a partir da poça de fusão seja pequena, devido a uma combinação de efeitos, incluindo a baixa temperatura superficial do metal líquido da poça de fusão e a direção do fluxo de plasma, que por sua vez limita a evaporação nessa região, havendo o efeito de condensação de metal vaporizado a partir da poça, como levantado por Bosworth e Deam (2000).

2.3. Composição dos Fumos de Soldagem

Segundo a NBR 12543, fumos são “[...] aerodispersóides gerados termicamente, constituídos por partículas sólidas formadas por condensação de vapores, geralmente após volatilização de substância fundida [...], frequentemente acompanhada de reação química, tal como a oxidação”.

Esses particulados são constituídos por vários metais como Al, Fe, Mg, Mn, Ni, Zr, Cr, Cu, Be, Cd e Pb (na forma metálica e/ou na forma de óxidos), a depender da composição do metal de adição, segundo revisão feita por Rosado (2008). Ainda segundo esta revisão, a dimensão dessas partículas pode variar de poucos nanômetros até quase 100 μm .

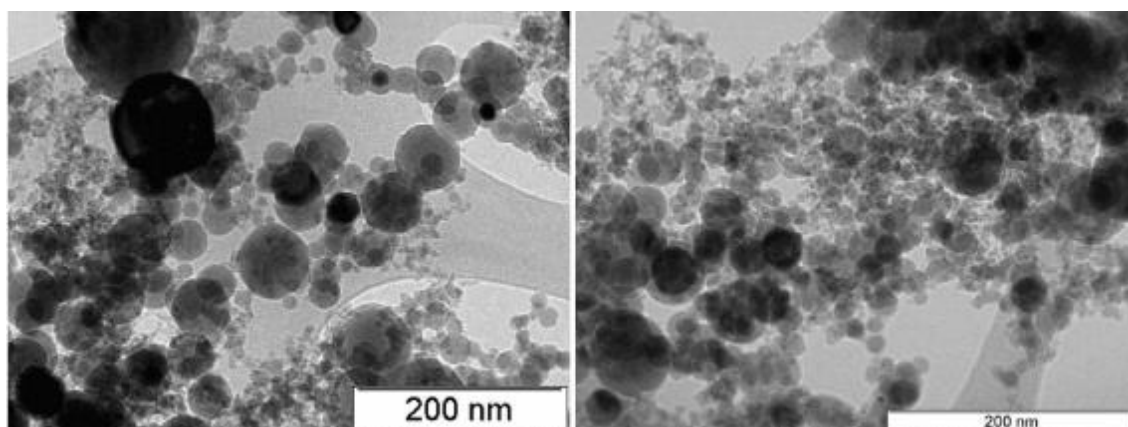


Figura 2.5 – Morfologia dos fumos de soldagem; (retirado de Meneses, 2014)

O tamanho dessas partículas é importante, pois determinará quão facilmente e/ou profundamente essas partículas poderão adentrar ao organismo dos soldadores e demais trabalhadores que compartilham o mesmo espaço onde há atividades de soldagem e/ou afins.

Sabe-se também que, quanto menores forem essas partículas, menores serão as chances de que sejam eventualmente retidas nos filtros de sistemas de extração de fumos ou máscaras PFF2, aumentando a exposição dos trabalhadores. Para além da exposição, sabe-se que partículas muito finas têm maior chance de serem aprisionadas nos sistemas respiratório e circulatório.

2.4. Mecanismos de formação dos fumos

Diferentes trabalhos na literatura técnica buscam compreender os mecanismos de formação dos fumos na soldagem GMAW. Heile e Hill (1975), já citados, e Gray, Hewitt e Dare (1982) propuseram alguns destes mecanismos e buscaram prová-los por meio de experimentos. Esses primeiros autores acreditaram que os resultados obtidos em seu trabalho indicavam a existência de dois mecanismos de formação de fumos.

Análises da composição química dos fumos gerados pelos processos de soldagem a arco investigados por Heile e Hill (1975), os levaram a concluir que os fumos são formados por dois principais mecanismos e os descrevem brevemente em seu artigo como sendo:

1. Vaporização do metal (ou composto) para fora da vizinhança do arco e subsequente condensação desse espécime, seguida ou não por oxidação e
2. Vaporização acentuada (intensificada) devido à formação de um óxido mais volátil na superfície do eletrodo fundido seguido de condensação e, talvez, de uma oxidação adicional.

Já Gray, Hewitt e Dare (1982) *apud* Jenkins (1999) foram além e, numa análise mais profunda, propuseram diferentes mecanismos de formação de fumos. Esses autores propõem sete principais mecanismos de formação de fumos, que serão brevemente descritos adiante.

Antes que sejam apresentados os sete mecanismos propostos por Gray, Hewitt e Dare (1982), é importante que salientar que, neste mesmo trabalho, foram introduzidos por estes autores os conceitos de “fumos fracionados” e “não-fracionados”, classificação utilizada por vários autores em trabalhos posteriores que, de certa forma, corroboram os mecanismos propostos por Heili e Hill (1975).

Segundo Xin et al. (2001), estes termos foram introduzidos objetivando explicar por que alguns fumos coletados foram preferencialmente enriquecidos em elementos voláteis, como o cromo, o manganês e o ferro. Segundo estes autores os fumos fracionados contêm maiores teores de elementos voláteis (elementos que se vaporizam durante a transferência metálica), enquanto os fumos não fracionados são produzidos pela combustão de gotículas e pequenos respingos expulsos da coluna de plasma.

Como mostra a Fig. 2.6, Jenkins (1999) mostra os sete mecanismos propostos pelos autores Gray, Hewitt e Dare (1982) como sendo:

1. Evaporação a partir da gota fundida na extremidade do eletrodo:
 - Para uma dada situação (mesmos consumíveis, mesmo modo de transferência e mesmos parâmetros de ajuste), este mecanismo é função da vazão do gás de proteção – quanto maior, maior será a TGF;
 - Evaporação é limitada pelo fluxo de gás através e nas vizinhanças do arco;
 - Altas vazões sequestram ar atmosférico aumentando o potencial de oxidação do gás;
 - Mecanismo presente em todos os modos de transferência metálica e
 - Produz fumos fracionados.

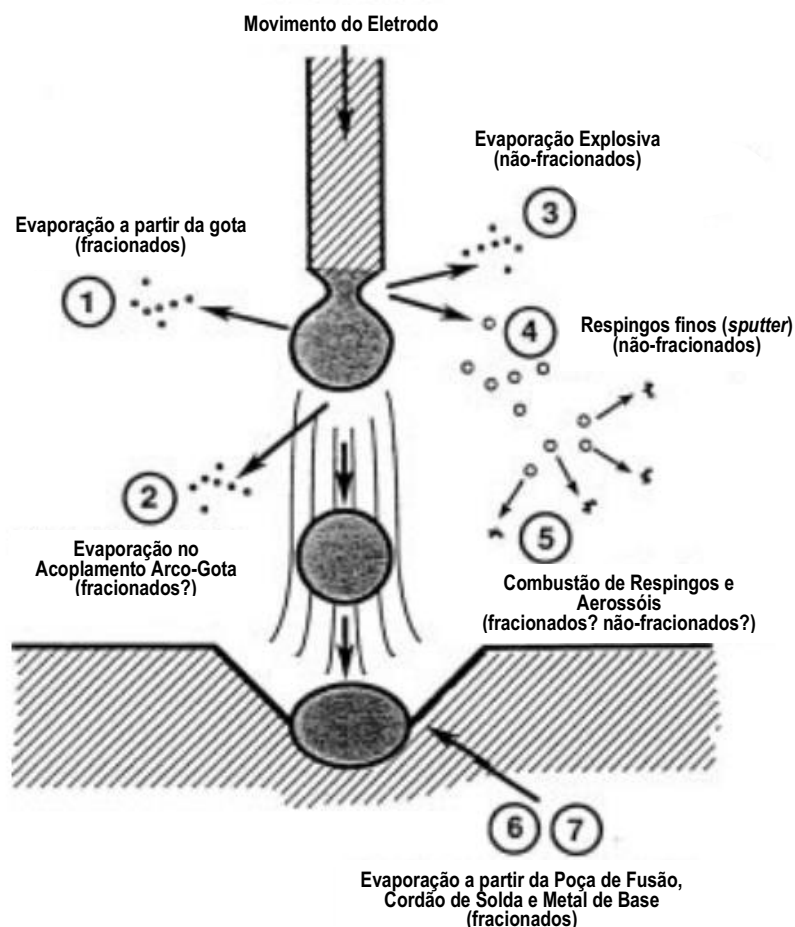


Figura 2.6 – Mecanismos de formação de fumos propostos por Gray; Hewitt e Dare (1982) (modificado de Quimby, 1997)

2. Evaporação a partir dos pontos catódicos (ou anódicos) no acoplamento do arco-gota:

- A vaporização nesses pontos pode ser suficientemente intensa a ponto de causar erosão;
- A taxa de vaporização ocasionada por este mecanismo seria maior que no mecanismo anterior e
- Produz fumos não-fracionados (os autores não justificaram o porquê, mas Jenkins (1999) supôs que isso ocorreria devido às altíssimas taxas de evaporação nesses pontos, impossibilitando a “reposição” - por difusão - de elementos voláteis na superfície da gota, agora empobrecida destes elementos, favorecendo a expulsão e a combustão de gotículas e pequenos respingos).

3. Evaporação explosiva a partir do empescoçamento na região do destacamento da gota:
 - Ocorre nas transferências por curto-circuito ou globulares, quando há o estrangulamento entre a gota e o eletrodo;
 - Nessa região há alta densidade de corrente, o que provoca uma rápida vaporização e
 - Produz fumos não-fracionados.

4. Geração de fumos a partir de minúsculas gotas ejetadas pela “explosão” causada pelo destacamento da gota:
 - Minúsculas gotículas são ejetadas no destacamento da gota e, ao solidificarem-se, diretamente se tornam fumos;
 - Esse mecanismo contribui bastante para a geração de fumos (em peso), pois essas gotículas são bem maiores que as partículas de fumo geradas por vaporização;
 - Produz fumos não-fracionados e
 - Como o mecanismo descrito no item anterior, esse também é característico das transferências por curto-circuito e globular.

5. Formação de fumos a partir da geração de respingos:
 - Formação de fumos a partir da combustão e vaporização-assistidas-por-oxidação (tradução livre do termo “*oxidation-assisted-vaporization and combustion*”, retirado de Jenkins, 1999) dos respingos ejetados para fora da região protegida;
 - Produz fumos não-fracionados.

6. Evaporação a partir da poça de fusão:
 - Ocorre em todos os processos de soldagem a arco, em todos os modos de transferência;
 - Forma fumos fracionados e
 - Possui contribuição insignificante na geração de fumos, confirmando a constatação feita anteriormente por Heile e Hill (1975).

7. Evaporação do cordão ainda fundido:

- Também ocorre em todos os processos de soldagem a arco e em todos os modos de transferência;
- Forma fumos fracionados; e
- Analogamente ao mecanismo anterior, possui contribuição pouco significativa na geração de fumos.

2.5. Influência dos parâmetros e condições de soldagem na geração de fumos

É possível encontrar na literatura técnica diferentes trabalhos objetivando determinar a influência de parâmetros de ajuste e condições de soldagem na TGF. Pode-se destacar entre eles, trabalhos como o de Gray, Hewitt e Dare (1982), citado anteriormente, onde esses pesquisadores concluíram que o modo de transferência, e, portanto, o gás de proteção e a tensão, são os fatores de maior influência na TGF.

Destacam-se também uma revisão de literatura feita pela AWS (1986), bem como os trabalhos de Suga e Kobayashi (1984), Castner (1995) e Quimby e Ulrich (1999).

Como comentado anteriormente, segundo a revisão de Jenkins (1999), Gray, Hewitt e Dare (1982) definiram os modos de transferência metálica como sendo o fator de maior influência sobre a taxa de geração de fumos. Segundo essa revisão, em uma publicação pouco anterior, mas ainda neste ano, Gray e Hewitt (1982) fizeram o levantamento de uma curva da TGF em função da tensão de soldagem do processo GMAW com adição de arame de 0,8 mm de aço inoxidável austenítico AISI 316 (Fig. 2.7).

Nessa ocasião, como o objetivo do trabalho era a categorização de diferentes fontes de fumos (poça de fusão, metal de adição e fluxo dos consumíveis), os autores não se preocuparam em explicar o comportamento do gráfico obtido. Mas no trabalho posterior (Gray, Hewitt e Dare, 1982), estes pesquisadores reproduziram o mesmo gráfico, explicando sua natureza e fazendo observações sobre os modos de transferência e sua influência na TGF, as quais serão apresentadas e discutidas adiante.

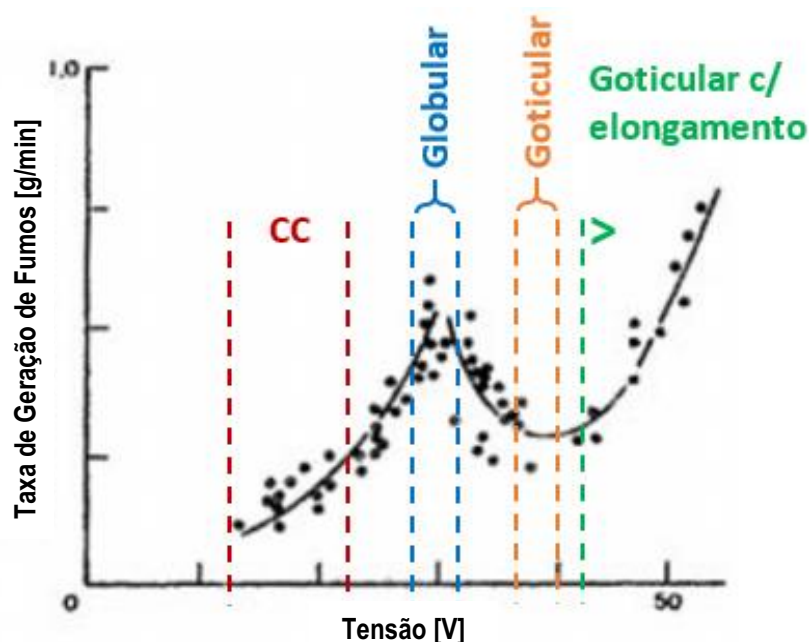


Figura 2.7 – Efeito da tensão na taxa de geração de fumos em soldagem GMAW de aço inoxidável AISI 316 (modificado de Gray e Hewitt, 1982)

2.5.1. Modos de transferência

Segundo Gray, Hewitt e Dare (1982), na transferência por curto-circuito operando entre 12-22 V (Fig. 2.7), o arco é intermitente a baixas tensões, o que leva à baixa geração de fumos. Conforme a tensão aumenta, o arco aumenta, acarretando um aumento na TGF. Gray, Hewitt e Dare (1982) apud Jenkins (1999) também comentam que um aumento na indutância reduziria picos de corrente durante os curtos-circuitos e, portanto, a TGF.

Foi identificado também que os fumos gerados pela soldagem por curto-circuito são mais enriquecidos em elementos menos voláteis (Ni e Fe) à medida que o número de “quebras do arco” aumenta, ocorrendo evaporação explosiva. Os autores também atribuem o aumento da TGF ao aumento da geração de respingos devido às tensões mais altas.

Quando na transferência globular (≈ 30 V), segundo Jenkins (1999), Gray, Hewitt e Dare (1982) não justificam com clareza o pico de TGF. Jenkins apenas relata que estes autores observaram que os fumos coletados nessas condições (gás de proteção oxidante) são enriquecidos em sílica, “[...] mas não o suficiente para

que a vaporização assistida por oxidação possa explicar a maior formação de fumos inerente a esse modo de transferência.”.

Zhou et al. (1988) e Castner (1995) atribuíram a alta TGF da transferência globular (proteção por CO_2) à grande dimensão das gotas e ao longo tempo em que estas permanecem ligadas ao eletrodo expostas às altas temperaturas do arco, fazendo com que a taxa de vaporização aumente de forma significativa.

A observação destes autores, de que o tamanho da gota possuiria forte influência sobre a geração de fumos, é corroborada pelo trabalho de Bosworth e Deam (2000). Eles trabalharam com corrente pulsada e, variando-se o diâmetro das gotas através da variação da frequência de pulsos, comprovaram experimentalmente a tese de que o aumento do diâmetro das gotas acarretaria maiores TGF, como mostrado na Fig. 2.8.

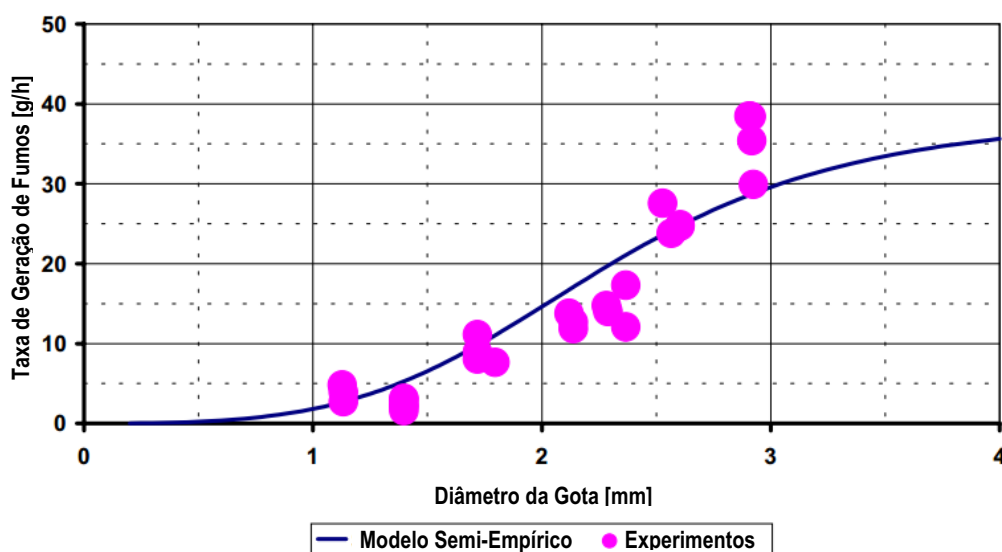


Figura 2.8 – Efeito do diâmetro da gota fundida na TGF em soldagem GMAW com corrente pulsada (modificado de Bosworth e Deam, 2000)

Já na transferência goticular (37-40 V), nota-se que a mínima TGF ocorre a 37 V. Segundo Jenkins (1999), os autores sugerem que há uma diminuição na geração de fumos não-fracionados nessas condições, fato atribuído à menor turbulência do arco durante o destacamento das gotas (destacamento gentil). Ma e Apps (1982) alegam que nesse tipo de transferência é imposta uma quantidade mínima de energia a cada gota fundida e por isso, são gerados menos fumos. Porém, nota-se pela Fig. 2.7, que à medida que se aumenta a tensão há também o

aumento da TGF, pois há nessa região uma nova transição de modo de transferência metálica, o goticular com alongamento.

Quando na região de transferência goticular com alongamento (> 40 V), há o fenômeno em que o arco “escala” o eletrodo, fundindo uma maior área deste e, portanto, aumentando a taxa de vaporização de metal. Assim, com este tipo de transferência metálica, há formação de fumos não-fracionados, devido à ocorrência de superfícies de evaporação rápida no acoplamento arco-eletrodo. Além disso, os autores acreditam que a TGF aumenta, à medida que se aumenta a tensão, porque o arco se torna mais quente e turbulento.

2.5.2. Gás de Proteção

A composição do gás de proteção é um fator que exerce forte influência na TGF. Como foi apresentado na introdução no início desta revisão, o modo de transferência metálica talvez seja o fator de maior influência na geração de fumos, o qual é fortemente influenciado pela composição do gás de proteção.

Yamazaki et al. (2007) investigaram a influência da composição do gás de proteção na TGF ($\text{mg}_{\text{fumos}}/\text{g}_{\text{arame consumido}}$) para soldagem GMAW de aço carbono a 280 ± 2 A, variando-se o teor de CO_2 em mistura com Ar, conforme mostrado na Fig. 2.9.

Observando os dados coletados por estes autores, nota-se que a geração de fumos tem seu maior aumento quando o teor de CO_2 se eleva acima de 25%, justamente na zona de transição goticular-globular. A partir de 40% de CO_2 (quando a transferência se torna exclusivamente globular) a TGF se mantém constante em níveis substancialmente superiores aos encontrados quando com teores menores que 25% (transferência goticular), corroborando os resultados obtidos por Gray e Hewitt (1982).

Além da influência exercida de forma indireta pela composição do gás de proteção na TGF (composição do gás \rightarrow modo de transferência \rightarrow TGF) há de se notar que, isoladamente, quando na região de transferência goticular, a variação do teor de CO_2 implicou diretamente em alterações na geração de fumos.

Da Figura 2.9 observa-se que no intervalo entre 25 e 30% de CO_2 o modo de transferência se encontra na zona de transição entre globular e goticular e, à medida

que o teor de CO_2 diminui, diminui também a TGF. Já para valores abaixo de 20%, há a diminuição progressiva da TGF, até que se atinge o mínimo quando a porcentagem de CO_2 fica próxima de 10%. Com 5% de CO_2 há um leve aumento na TGF, atribuído pelos autores a uma aproximação da transferência goticular com alongamento e à ocorrência de curtos-circuitos. Quando com argônio puro, houve uma flutuação nos valores de TGF obtidos, atribuída pelos autores a um arco instável.

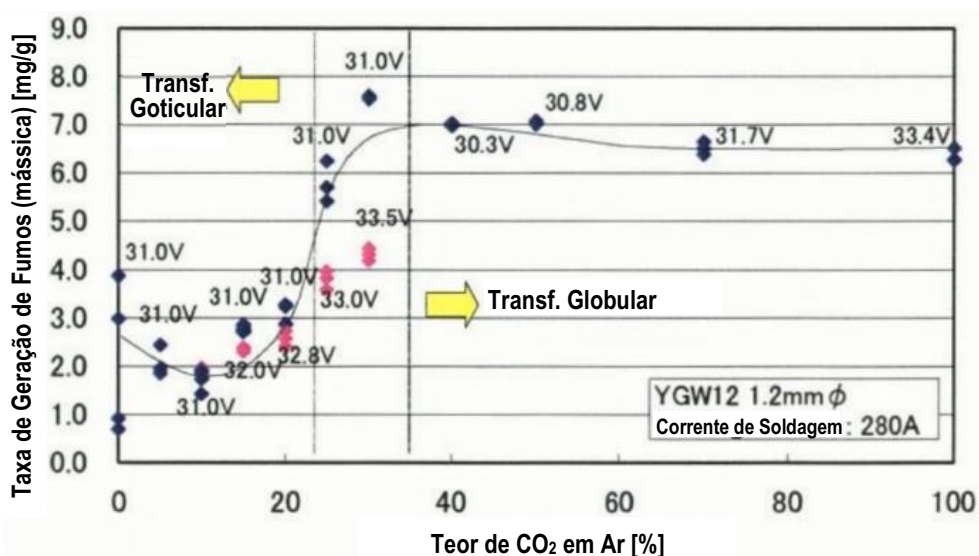


Figura 2.9 - Efeito da composição do gás de proteção (sistema Ar- CO_2) na TGF (modificado de Yamazaki et al., 2007)

Yamazaki et al. (2007), embora tenham verificado a influência da composição do gás de proteção na TGF, justificam a variação da geração de fumos apenas pela influência que o gás exerce no modo de transferência ou no quão estável (ou instável) é a transferência da gota. Contudo, é possível notar que, apesar do modo e estabilidade da transferência metálica, o simples fato de existir, dentro da atmosfera local (região protegida), elementos oxidantes (provindos do ar atmosférico ou do próprio gás de proteção) e gases capazes de aumentar a temperatura do arco (He, por exemplo), poderiam acarretar em maior formação e emissão de fumos.

Ainda em 1975, os pesquisadores Heile e Hill, citados no início desta revisão, já compreendiam os efeitos que um maior potencial de oxidação teria sobre a TGF. Variando-se o teor de O_2 em mistura binária do gás de proteção (Ar+ O_2) até valores acima de 40% (Fig. 2.10), eles verificaram que a TGF é aproximadamente

proporcional a $(\%O_2)^{3/4}$. Segundo Jenkins (1999), essa dependência foi explicada devido à presença de oxigênio monoatômico no arco, juntamente à vaporização de monóxidos, como o SiO.

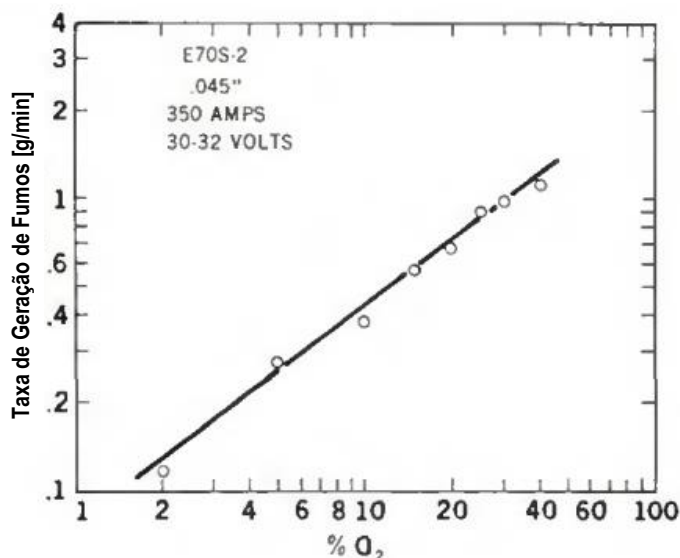


Figura 2.10 – Efeito do potencial de oxidação na TGF em soldagem GMAW (modificado de Heile e Hill, 1975)

Gray, Hewitt e Hicks (1980) também observaram a dependência da TGF em relação ao potencial de oxidação da atmosfera que cerca o arco elétrico, inclusive da sua vizinhança (Fig. 2.11). Eles notaram que há difusão de ar atmosférico através do gás de proteção quando num ensaio onde o aumento da concentração de O₂ na atmosfera externa à região protegida resultou em um aumento marcante na TGF.

Hilton e Plumridge (1991) apud Castner (1995) verificaram forte dependência entre a TGF e o tipo de proteção gasosa utilizada na soldagem GMAW. Nota-se pelo gráfico da Fig. 2.12 que o comportamento das curvas referentes aos gases de proteção a base de argônio é semelhante, dada a transição entre os modos de transferência.

Em contrapartida, observa-se que na curva referente à proteção utilizando 100% CO₂, este comportamento não se repete, devido à incapacidade de se obter transferência goticular utilizando tal gás como proteção. Porém, em toda extensão do gráfico, ou seja, em toda faixa de corrente investigada, é fácil perceber o efeito que a concentração de CO₂ causa na TGF.

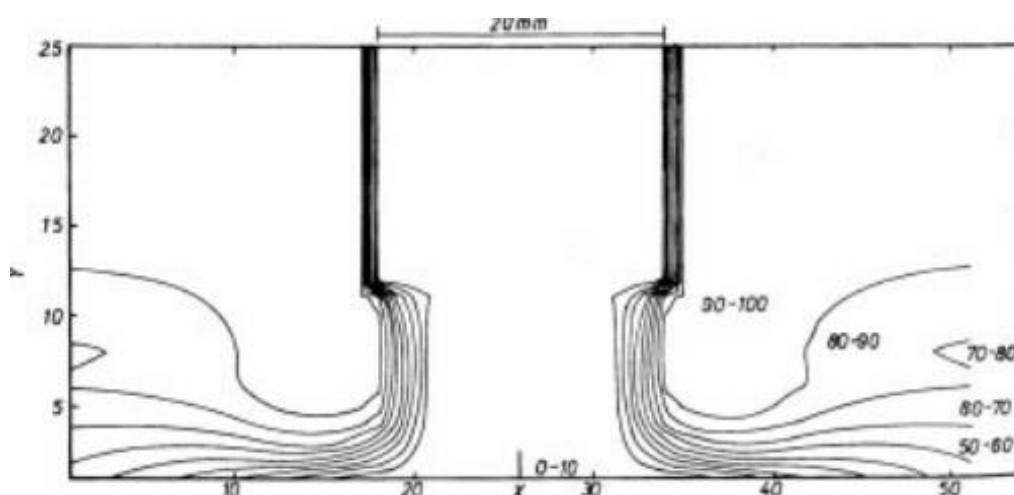


Figura 2.11 – Contornos de concentração de oxigênio (% ar) na vizinhança de uma tocha GMAW usando Ar puro como proteção a 15 L/min, 150 A CC+, segundo Gray, Hewitt e Dare, 1980 (retirado de Gray, Hewitt e Hicks, 1980)

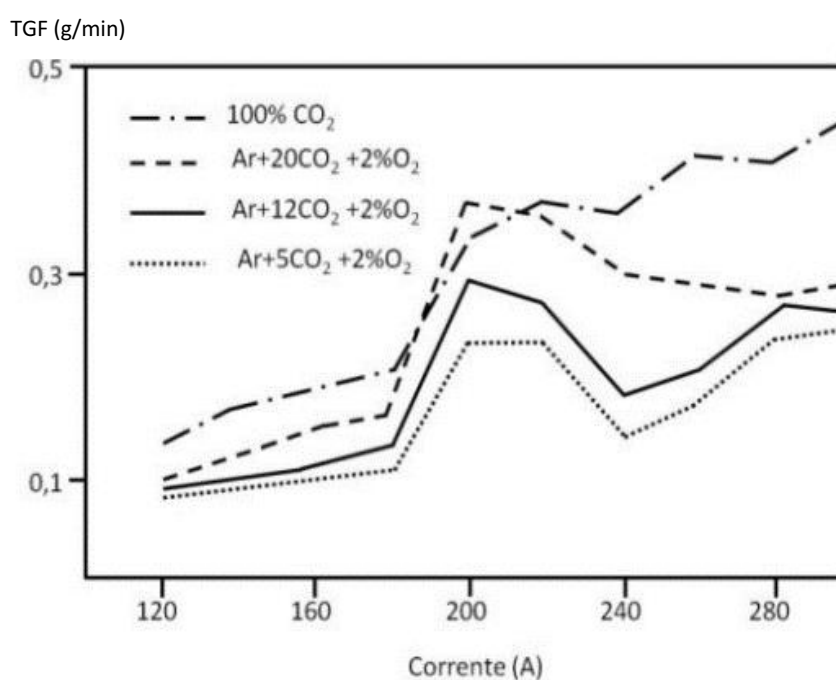


Figura 2.12 – TGF para soldagem GMAW, segundo Hilton e Plumridge, 1991 (modificado de Castner, 1995)

Mais recentemente, Pires, Quintino e Miranda (2007) compararam sete gases de proteção (Fig. 2.13) incluindo misturas binárias (Ar+O₂ e Ar+CO₂) e ternárias (Ar+O₂+CO₂). Além de confirmarem o que já havia sido constatado por outros autores em trabalhos anteriores, estes pesquisadores descobriram que, nas

misturas contendo CO_2 , em relação às que contendo O_2 (tendo o mesmo potencial de oxidação), houve maior geração de fumos, porém não explicam os motivos de isso ter ocorrido.

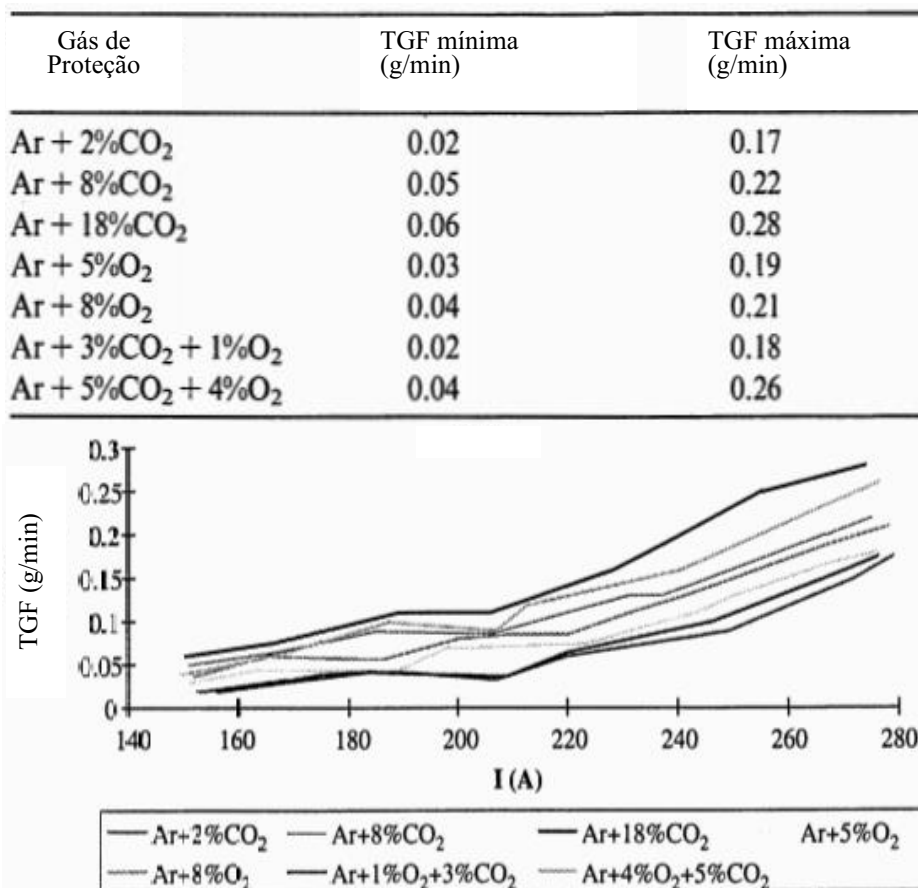


Figura 2.13 – Variação na TGF com a intensidade de corrente para os diferentes gases de proteção estudados (modificado de Pires, Quintino e Miranda, 2007)

Uma possível explicação poderia se basear na elevada difusividade térmica do CO_2 , bem como na reação de dissociação dessa molécula (exotérmica). Essas características contribuiriam para maiores temperaturas de superaquecimento das gotas e, portanto, maior taxa de vaporização.

2.5.3. Tensão

O efeito da tensão talvez tenha sido o mais amplamente estudado e, portanto o mais claro, de todos os outros fatores que influenciam a geração de fumos. Ainda

nos anos 70, Heile e Hill (1975) fizeram o levantamento de curvas da TGF em função da tensão de soldagem, onde foi observado, em dado intervalo, um comportamento quasi-linear entre essa variável e a geração de fumos, quando se utilizando Ar+5%O₂ (Fig. 2.14 (a)).

Essa linearidade fica ainda mais clara quando se observa o comportamento dessas curvas, porém utilizando CO₂ como proteção (Fig. 2.14 (b)), porém a uma taxa duas vezes menor que quando se utilizando Ar+5%O₂. Estes autores atribuíram o aumento da TGF ao aumento do comprimento de arco, decorrente do aumento da tensão, efeito mais evidente em misturas a base de Ar do que quando utilizando o CO₂. Este efeito aumentaria o tempo de transferência e, portanto, levaria a uma maior taxa de vaporização por aumentar o tempo de permanência das gotas na região do arco.

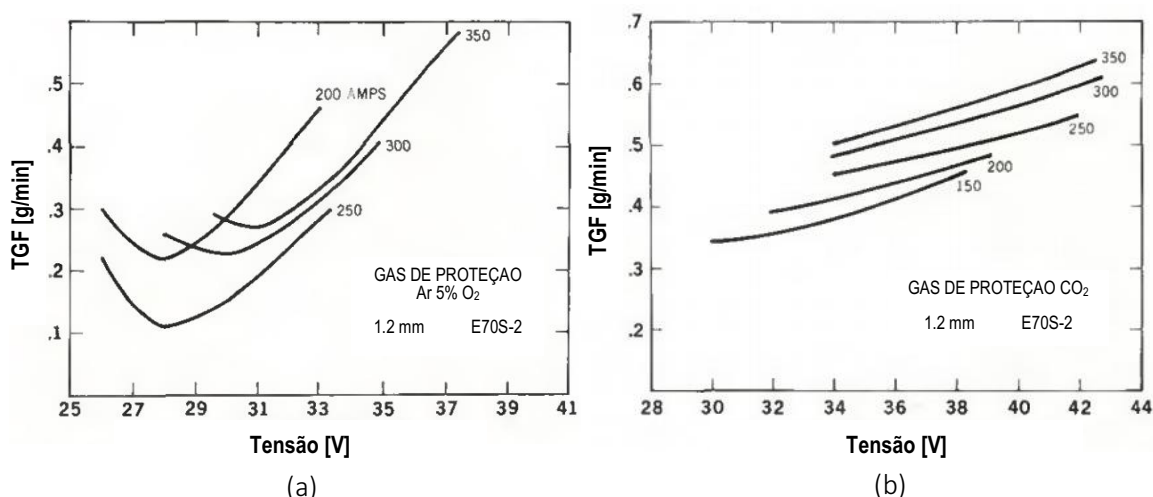


Figura 2.14 – Efeito da tensão e corrente na TGF em soldagem GMAW com Ar-5%O₂ (a) e com CO₂ (b) (modificado de Heile e Hill, 1975)

Além do efeito do aumento do comprimento de arco, autores como Castner (1995), concordando com Gray, Hewitt e Dare (1982), atribuem o aumento da TGF, ao aumento da temperatura do arco devido ao aumento da tensão, contribuindo para uma maior evaporação.

Porém, em um trabalho anterior, Kobayashi e Suga (1981) não encontraram relação entre tensão e temperatura do arco, o que torna mais plausível ainda o efeito

do comprimento de arco, e abre caminho para mais uma possível causa para o aumento da TGF com a tensão: o efeito da turbulência.

Segundo Jenkins (1999), outra abordagem para explicar o aumento da TGF devido ao aumento da tensão foi proposta por Johansson et al. (1981). Em sua revisão, Jenkins (1999) ressalta que, a essa altura, a literatura técnica já concordava que maiores tensões gerariam mais turbulência, o que facilitaria maior penetração de oxigênio através do gás de proteção e, portanto, maior taxa de formação de óxidos metálicos, gerando mais fumos.

Por fim, e mais especificamente, a geração de fumos, quando no modo de transferência por curto-circuito, apresenta algumas particularidades em relação aos demais modos de transferência, uma vez que nesse primeiro o arco é intermitente, sujeito a sucessivos apagamentos e reignições. Sabe-se ainda, que a tensão de soldagem é um fator governante da transferência por curto-circuito, interferindo na frequência de curto, particularmente nos tempos de arco aberto, de maneira que aumentando-se a tensão, há diminuição na frequência de curto-circuito e a ampliação dos tempos de arco aberto.

Chae et al. (2006), levantaram a questão da interdependência entre o tempo de arco aberto (*open-arc* ou *arcing*) e a geração de fumos. Ao realizarem filmagens de alta velocidade com filtros adequados e uma iluminação especial da transferência por curto-circuito, estes autores constataram que a geração de fumos neste modo de transferência se dá essencialmente no tempo de arco aberto.

Estes autores afirmam notar a presença de fumos de soldagem em todas as fases da transferência da gota metálica (Fig. 2.15). Entretanto, eles avaliam que a pluma de fumos apresenta-se maior e mais densa nos quadros de (b) a (i), instantes nos quais há o crescimento da gota na ponta do eletrodo (período de arco aberto), do que nos quadros (a) e (j), os quais representam o período de curto-circuito.

Estes autores argumentam que a extremidade do eletrodo é superaquecida durante o período de arco aberto, induzindo a vaporização de metal nessa fase, enquanto no período de curto-circuito o calor do arco não mais existe, atribuindo uma maior geração de fumos ao período de arco aberto em comparação com o período de curto-circuito.

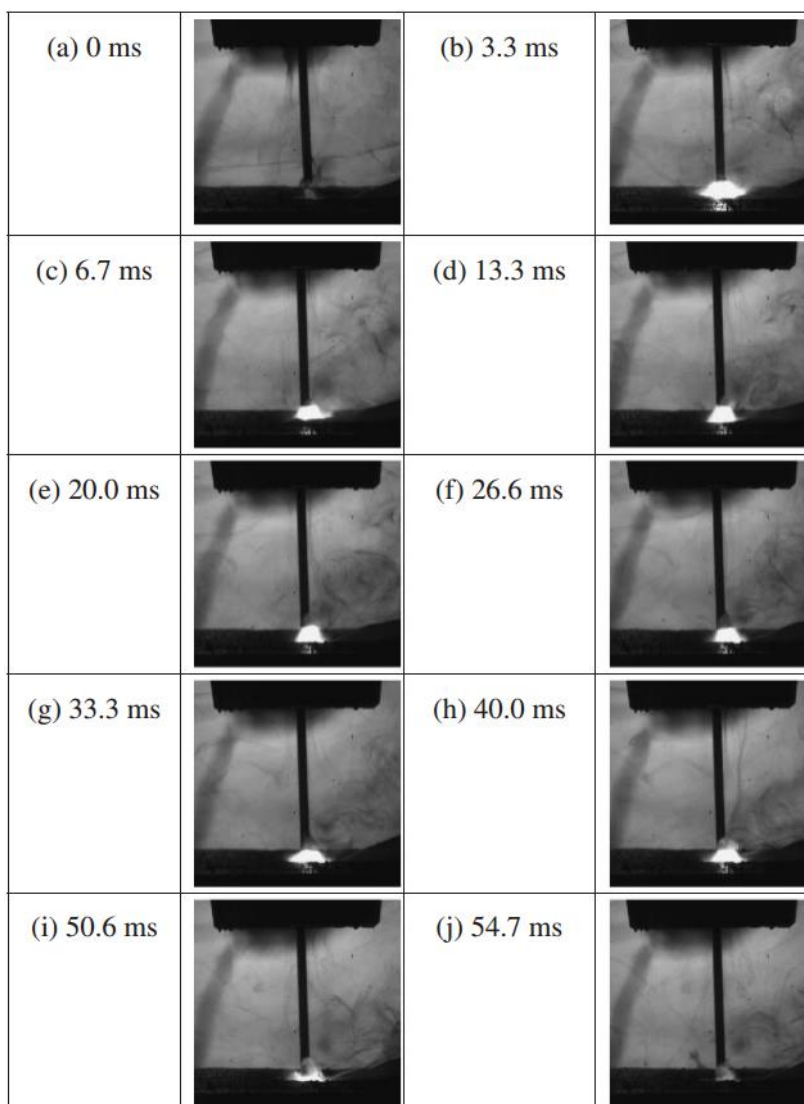


Figura 2.15 – Imagens sequenciais da geração de fumos do processo GMAW com transferência por curto-circuito; $I_M = 240$ A; $V = 25$ V; 3000 quadros/s (retirado de Chae, 2006)

2.5.4. Comprimento de Arco

Mais do que o efeito da tensão, o efeito provocado pelo comprimento do arco elétrico sobre a geração de fumos é certo e bem discutido, uma vez que é, inclusive, utilizado por vários autores para justificar o aumento da TGF em função do aumento da tensão.

É possível visualizar, pela Fig. 2.16, que o aumento do comprimento de arco acarreta um aumento considerável na TGF. Em seu trabalho, Benedetti Filho, Fernandes e Vilarinho (2017), realizaram uma ANOVA (análise de variância) para

verificar se, de fato, há influência do comprimento de arco sobre a TGF e, como se observa na Fig. 2.15, essa influência existe e, tendo como coeficiente de correlação $p=0,02$, o comprimento de arco mostrou-se uma variável com influência significativa na geração de fumos do processo GMAW.

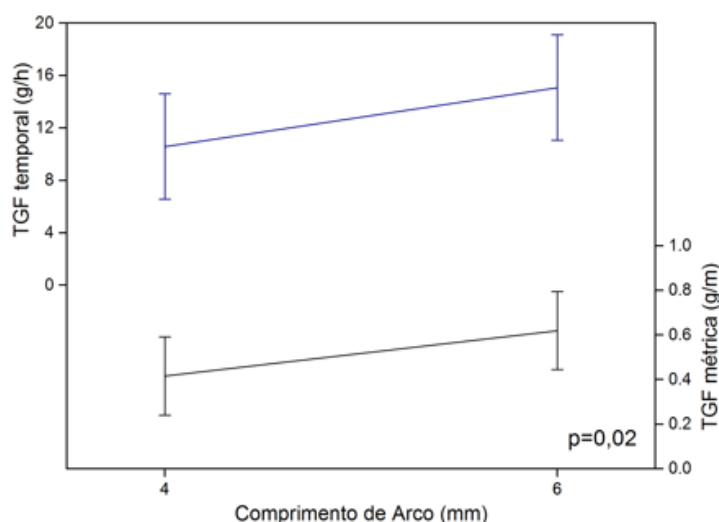


Figura 2.16 - Comportamento da TGF (g/h e g/m) em função do comprimento de arco (Benedetti Filho, Fernandes e Vilarinho, 2017)

2.5.5. Corrente

Ao contrário do que se observa sobre os efeitos da tensão na TGF, há certo desacordo entre os autores estudados sobre a influência que a corrente de soldagem exerce na geração de fumos.

De imediato, é intuitivo que a corrente exerce influência sobre a TGF, uma vez que este parâmetro está associado à taxa de fusão, de modo que, pela equação do consumo (Eq. 2.3), quanto maior a corrente, maior a taxa de fusão (expressa na equação como consumo (C)), o que significa que mais material “atravessa” o arco elétrico por unidade de tempo, sujeito a suas altas temperaturas e, logo, havendo maior taxa de vaporização.

$$C = \alpha I + \beta LI^2 \quad (2.3)$$

onde C é o consumo (equivalente à taxa de fusão), I a corrente instantânea do processo, L o comprimento energizado de eletrodo, α a constante relacionada

essencialmente com o gás de proteção, polaridade e modo de transferência, e β a constante relacionada com as características resistivas do metal de adição.

Além disso, frisa-se que a corrente configura um fator governante quanto aos modos de transferência metálica que, como anteriormente discutido, é um dos fatores mais influentes na geração de fumos.

Heile e Hill (1975) constataram que o aumento da corrente acarretou aumento na TGF, porém não se preocuparam em explicar esse comportamento, uma vez que, como exposto, esse parâmetro seria uma função da taxa de fusão (processo GMAW).

Kobayashi et al. (1978), apud Jenkins (1999), sugerem que a corrente controla a temperatura da superfície da gota, influenciando na quantidade de fumos gerada.

Posteriormente, Gray Hewitt e Dare (1982) afirmaram que a TGF é quase independente da corrente “se a DBCP (distância do bico de contato à peça) for mantida constante” (Fig. 2.17, à esquerda) e, com o aumento da DBCP (com tudo mais, constante), haveria uma redução na TGF (Fig. 2.17, à direita). A justificativa dada por estes autores a este último efeito parte do pressuposto que o comprimento energizado do eletrodo configura uma resistência elétrica em série com o arco elétrico, sendo que, quanto maior for o comprimento do eletrodo, menor será a tensão do arco, resultando em menor formação de fumos.

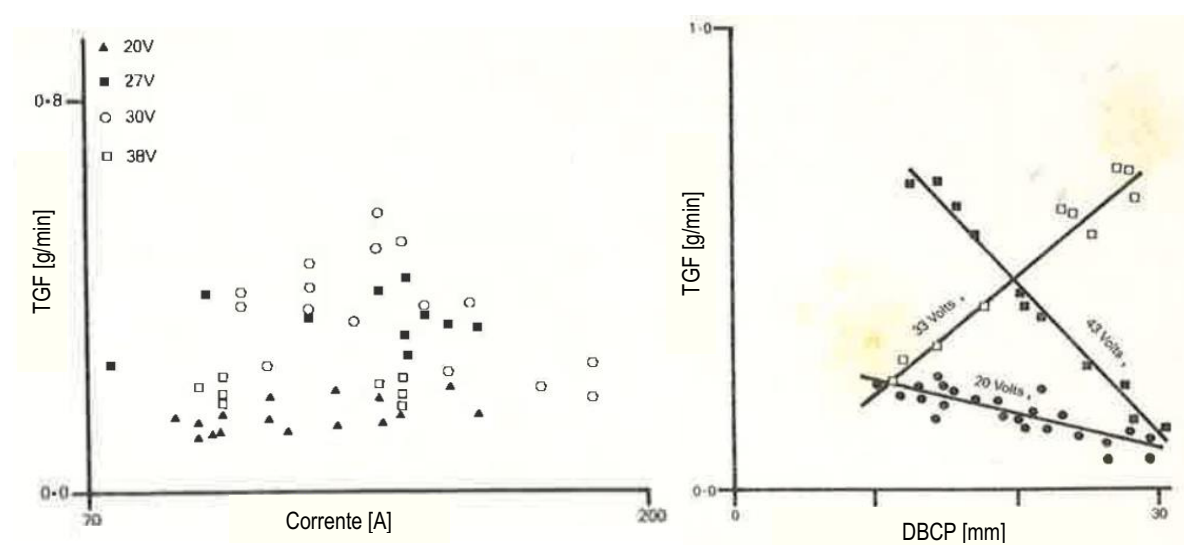


Figura 2.17 – TGF em função da corrente de soldagem (à esquerda) e da DBCP (à direita) (modificado de Gray, Hewitt e Dare, 1982)

Porém, neste trabalho, não há detalhamento sobre a forma como foram feitas as alterações de corrente e DBCP (incluindo o tipo de característica estática da fonte), ou seja, se foi alterada a taxa de fusão na primeira e/ou se foram alterados os níveis de corrente na segunda, não sendo possível a asserção sobre qual dessas variáveis possui influência mais significativa na TGF.

Castner (1995) ressalta que há dois principais motivos para que haja o aumento da TGF em função do aumento da corrente. O primeiro motivo reforça a tese de que maiores correntes acarretariam maiores temperaturas do arco, vaporizando mais material; enquanto o segundo motivo, já discutido, baseia-se na maior taxa de fusão do eletrodo, aumentando a quantidade de material que passa através do arco por unidade de tempo.

De fato, há de se admitir que ambas as explicações são plausíveis. Para Haidar (1999), o aumento da corrente de soldagem provoca o aumento da temperatura das gotas, principalmente quando à taxa de fusão constante, se traduzindo, portanto, em uma maior taxa de vaporização.

Tais efeitos, do aumento da temperatura das gotas com o aumento da corrente, e do aumento do volume de material fundido (portanto, vaporizado) por unidade de tempo, provavelmente coexistem, porém não se sabe o quão significativo seria cada um deles na geração de fumos do processo GMAW.

Dessa forma, para efeito deste trabalho, não foram encontradas referências onde tivessem sido investigados os efeitos que a corrente poderia causar na TGF, independentemente da taxa de fusão.

2.5.6. Taxa de Fusão

A influência que a taxa de fusão exerce na geração de fumos, embora pareça algo óbvio, observando-se as justificativas dadas anteriormente para o comportamento da TGF em função da corrente, por exemplo, pode gerar entendimentos não consistentes. Exemplo disso é encontrado no artigo de Suga e Kobayashi (1984), onde estes autores, dentre vários fatores, investigaram, para um dado nível de corrente (150 A), a influência da DBCP na TGF (Fig. 2.18).

Uma vez que estes autores utilizaram uma fonte tensão constante, a variação da DBCP (de 10 a 35 mm) à corrente constante (150 A) somente seria possível se

tivesse sido alterada (de modo a aumentar) a velocidade de alimentação (entende-se por taxa de fusão). Contudo, não foram explicitados no trabalho os níveis de taxas de fusão que foram utilizados para o levantamento deste gráfico, apenas apresentam o diâmetro nominal do arame-eletrodo a corrente e o gás utilizados.

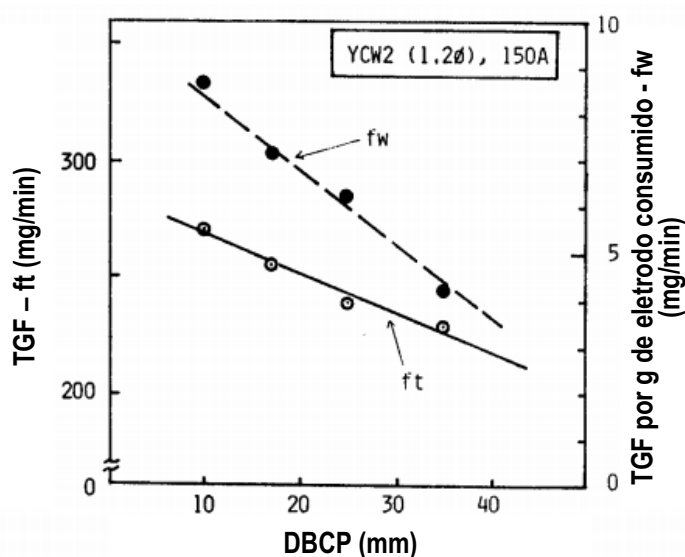


Figura 2.18 - Relação entre DBCP e TGF (modificado de Suga e Kobayashi, 1984)

Assim, interpreta-se que, se opondo aos dados obtidos no trabalho de Benedetti Filho, Fernandes e Vilarinho (2017) (Fig. 2.19), o aumento na taxa de fusão acarretou diminuição da TGF.

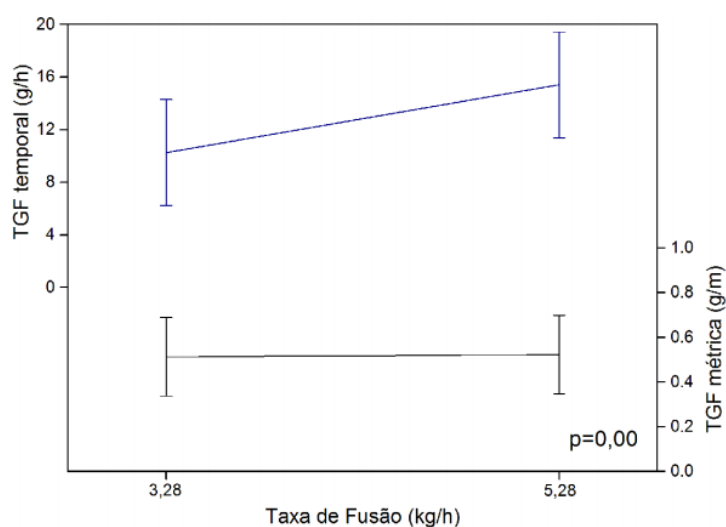


Figura 2.19 - Comportamento da TGF (g/h e g/m) em função da taxa de fusão (retirado de Benedetti Filho, Fernandes e Vilarinho, 2017)

Suga e Kobayashi (1984) justificam este comportamento com base em uma constatação de Ando, Nishiguchi e Fukuda (1967), onde estes últimos afirmam que o aumento do comprimento livre do eletrodo, implica na diminuição da temperatura da gota, porém não foram levantadas as condições em que foram realizados os testes que levaram estes autores a tal conclusão.

Sabe-se que, em Benedetti Filho, Fernandes e Vilarinho (2017), o modo de transferência utilizado para realizar as medições foi o goticular, enquanto no trabalho de Suga e Kobayashi (1984), foi utilizado o curto-circuito. Sabendo que os mecanismos que governam a geração de fumos em cada um destes modos de transferência metálica são diferentes em essência, são suscitadas dúvidas as quais contribuem com a motivação para a realização do presente trabalho.

2.5.7. Regularidade da Transferência por Curto-Circuito (IV_{cc})

Antes de dar início à questão, é importante que seja definido o que se entende por regularidade. É consenso, embora ainda haja espaço para discussões, como tudo na ciência, que existe diferença nos conceitos de estabilidade e regularidade da transferência por curto-circuito.

Em termos práticos, o termo regularidade trata especificamente sobre cadência com a qual ocorre a transferência das gotas, da extremidade do eletrodo para a poça de fusão. Quanto mais cadenciada a transferência, mais regular é o processo.

Já a estabilidade seria um conceito de maior abrangência. Para que a transferência por curto-circuito seja considerada estável, há de ser levado em conta um conjunto de aspectos, incluindo geração de respingos, estabilidade do arco, o comportamento do processo de soldagem em si e a própria regularidade da transferência, conforme amplamente discutido por Fernandes (2013).

Isto posto, é colocado aqui, que se deve ter cautela na tentativa de se relacionar a taxa de geração de fumos com a regularidade do processo GMAW curto-circuito. Isso por que, em termos de regularidade, mais especificamente sobre o IVCC, foi registrado por Souza (2010) que maiores os níveis de corrente, inevitavelmente, acarretariam transferências menos regulares, mesmo para uma faixa de tensão otimizada. Como mostra a Fig. 2.20, este autor buscou otimizar o

IVCC para quatro níveis distintos de corrente (109, 148, 181 e 213 A) e pelos dados coletados por ele é possível concluir que, à medida que se aumentam os níveis de corrente, tem-se o aumento do IVCC.

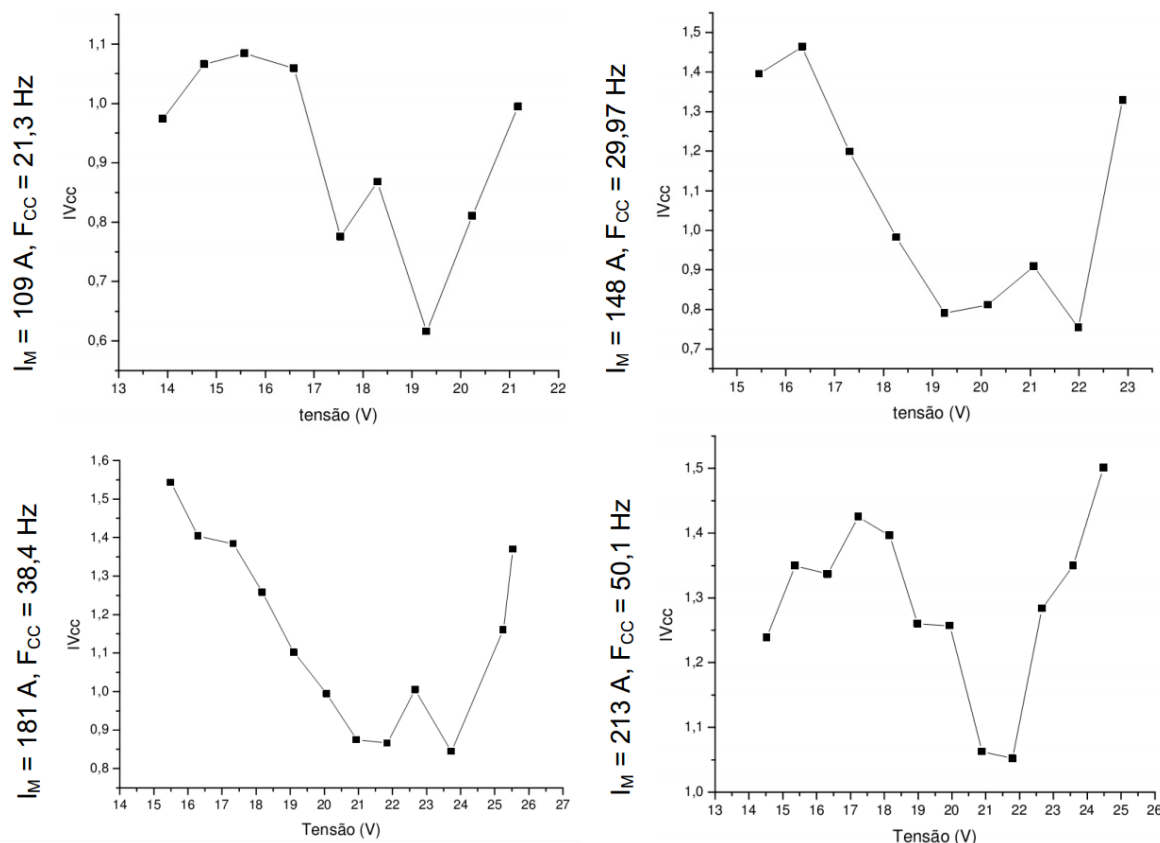


Figura 2.20 – Influência da tensão de ajuste no IVCC para quatro níveis de corrente (modificado de Souza, 2010)

Aqui, observa-se que os valores otimizados de IVCC (os menores) aumentam à medida que se tem o aumento da corrente, sendo de aproximadamente 0,6 na condição de 109 A (canto superior esquerdo); $\approx 0,75$ na condição de 148 A (canto superior direito); $\approx 0,85$ na condição de 181 A (canto inferior esquerdo) e de aproximadamente 1,05 na condição de 213 A (canto inferior direito).

Assim, tendo consolidado na literatura que maiores níveis de corrente implicam em maiores TGF's, há de se ponderar qual dos efeitos (aumento da corrente ou diminuição da regularidade) exercem maior influência sobre um eventual aumento da geração de fumos neste processo.

Conforme discutido no item 2.4, no trabalho realizado por Meneses et al. (2014), buscou-se correlacionar a estabilidade da transferência metálica por curto-circuito com a TGF. Neste trabalho, propuseram um conceito no qual a estabilidade da transferência seria mensurável por meio da geração de respingos do processo, de forma que, quanto maior a geração de respingos, menor seria a estabilidade. Na ocasião, estes autores mostraram que a relação entre a estabilidade da transferência por curto-circuito e a TGF era inconsistente.

Seria coerente tal constatação, tendo em vista que o 5º mecanismo de formação de fumos proposto por Gray, Hewitt e Dare (1982), o qual considerava que fumos poderiam ser formados por meio da “combustão e vaporização-assistidas-por-oxidação dos respingos ejetados para fora da região protegida”, se daria, conforme Jenkins e Eagar (2005), essencialmente a partir de respingos maiores que “alguns milímetros”. Assim, tendo em vista que apenas uma porcentagem muito pequena de respingos possui mais que 2 mm de diâmetro, estes últimos concluíram que este mecanismo não possui influência significativa na formação de fumos.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1. Bancada Experimental

3.1.1. Fonte e alimentador de arame

A fonte de soldagem utilizada durante todo desenvolvimento deste trabalho é uma Miller PipePro 450 RFC (Fig. 3.1). Trata-se de uma fonte eletrônica multiprocessos que, neste trabalho, foi utilizada operando em curto-circuito convencional, com característica estática de tensão constante. As demais características técnicas são mostradas na Tabela 3.1. Foi utilizado um alimentador de arame um PipePro Dual DX, apresentado na Figura 3.2.



Figura 3.1 – Fonte de soldagem Miller PipePro 450 RFC

Tabela 3.1 – Especificações técnicas da fonte utilizada (retirado de MILLER, 2007)

Potência consumida	Saída Nominal de Soldagem	Faixa da Tensão	Tensão em vazio máxima - cc	Corrente primária na carga nominal em 60 Hz, Trifásico					Alimentação - kVA	Alimentação - KW
				208 V	230 V	400V	460 V	575 V		
Trifásico	450 A @ 44 Vcc, Fator de Trabalho 100%	10-44	80	67,0 (0-1A*)	59,0 (0-1A*)	34,0 (0-1A*)	2,0 (0-1A*)	23,0 (0-1A*)	23,8 (0,8*)	22,9 (0,17*)

*Funcionamento em vazio; a corrente consumida em vazio varia e é sempre menor que um ampère. Considere um ampère para cálculos de rendimento.



Figura 3.2 – Alimentador de arame PipePro Dual DX

3.1.2. Coletor de Fumos

O principal equipamento utilizado neste trabalho foi o coletor de fumos, desenvolvido em conformidade com a AWS F1.2 (2006). Este equipamento é apresentado na Fig. 3.3, sendo composto por uma estrutura principal, onde se encontram:

- O sistema de sucção, responsável por succionar os gases e fumos gerados no interior da coifa (Fig. 3.3 (1 e 2));
- A mesa giratória (Fig. 3.3 (6)), onde é apoiada a placa de teste. Esta é responsável por rotacionar a placa de testes, permitindo o ajuste de sua velocidade angular. Assim, sabendo-se a distância entre a ponta do

eletrodo, na extremidade da tocha, e o centro da mesa (raio de posicionamento), realiza-se o ajuste de velocidade de soldagem (V_s) e

- O suporte da tocha (Fig. 3.3 (3)), que permite o ajuste de DBCP, além de permitir o ajuste de posição da tocha na direção radial à placa de testes, aumentando o espaço útil do corpo de prova.

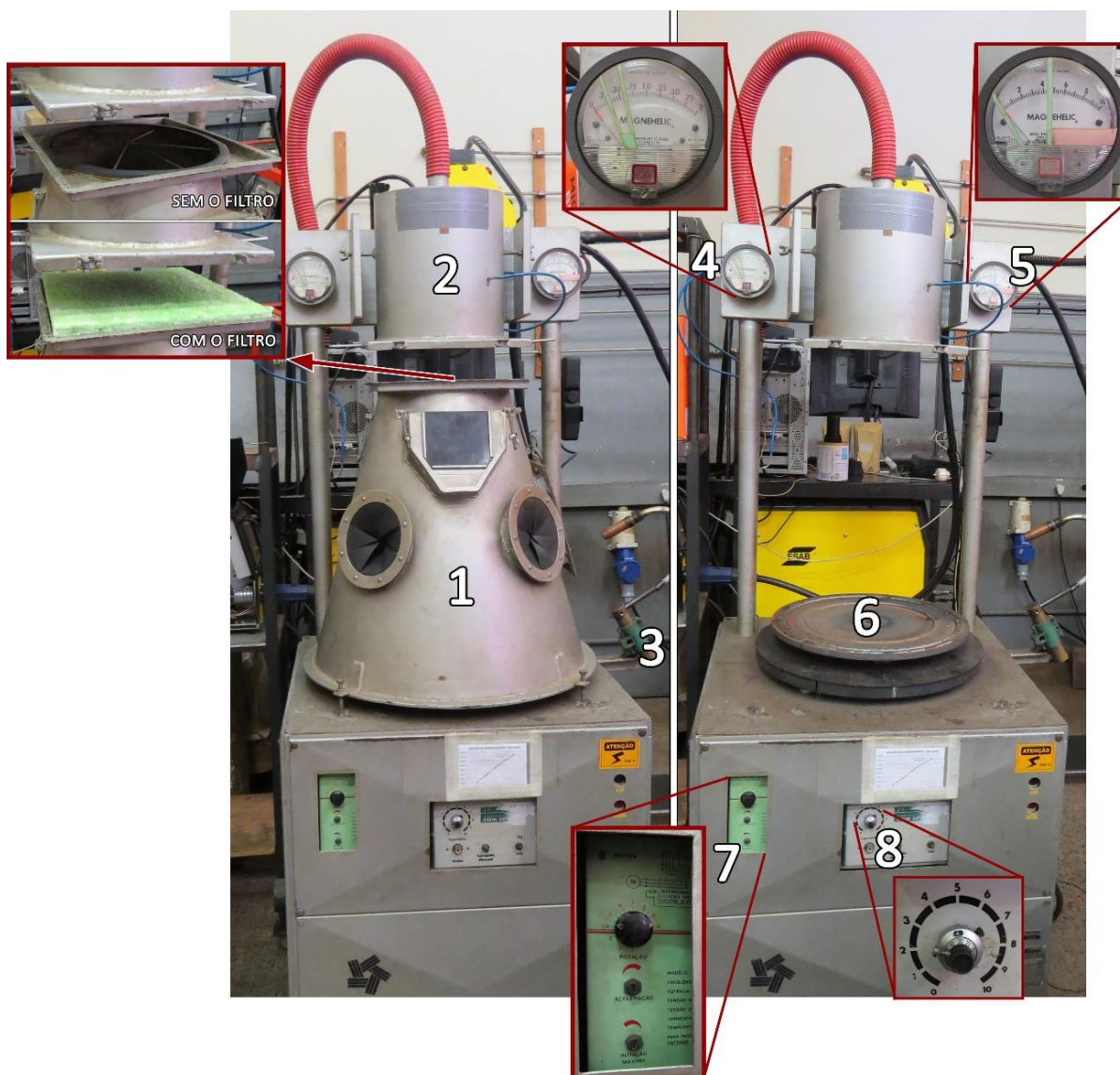


Figura 3.3 – Visão detalhada do coletor de fumos; com a coifa (à esquerda) e sem a coifa (à direita); (1) coifa para direcionamento dos fumos; (2) câmara de sucção; (3) suporte da tocha; (4) manômetro que mede a vazão de sucção; (5) manômetro que mede a perda de carga no filtro; (6) chapa de teste; (7) potenciômetro do inversor de frequência; (8) potenciômetro de várias voltas do controlador da mesa giratória

Situada logo acima da estrutura principal, a coifa (Fig. 3.3 (1)), em formato de tronco de cone, permite o direcionamento dos gases de solda, os fazendo passar através do filtro até a câmara de sucção (Fig. 3.3 (2)), onde são canalizados e expelidos para atmosfera por um tubo de escape situado na parte inferior da estrutura principal.

O coletor de fumos possui também, um manômetro para monitoramento da vazão de sucção (Fig. 3.3 (4)) e outro manômetro responsável por indicar a queda de pressão no filtro (Fig. 3.3 (5)), ambos com escala em polegadas de água (in_{H_2O}).

3.1.3. Balança de Precisão

Para efetuar a medição da massa dos filtros (antes e depois da realização do teste), e conseqüente medição da massa de fumos retida nos mesmos, utilizou-se uma balança de precisão SHIMADZU modelo UX6200H com resolução de 0,01 g e capacidade máxima de 6.200 g (Fig. 3.4).

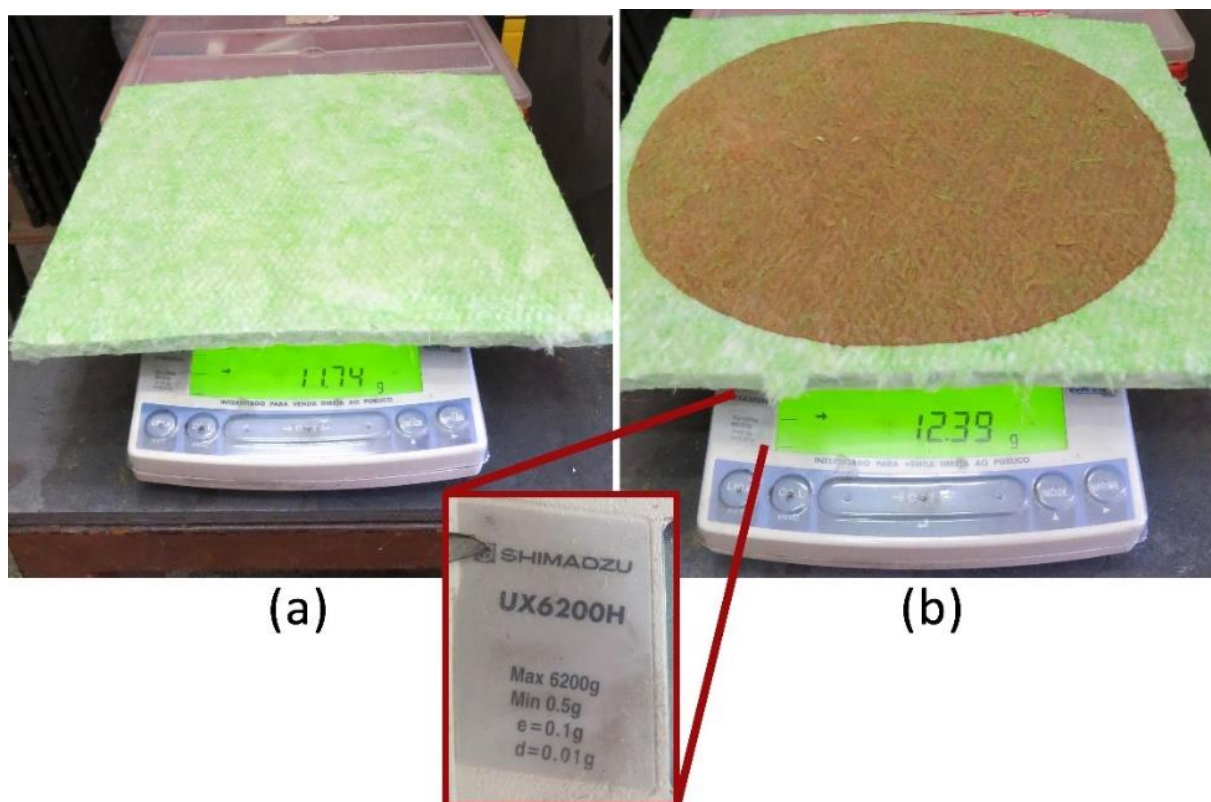


Figura 3.4 – Balança de precisão modelo UX6200H realizando medição da massa do filtro antes do teste (a) e após o teste (b)

3.1.4. Forno

Para a realização dos ensaios de coleta de fumos, segundo procedimento interno (Fernandes, Scotti e Vilarinho, 2009), o filtro utilizado para fazer a coleta deve ser ressecado em um forno (ou estufa) a uma temperatura de 100 ± 7 °C por no mínimo 1 hora, a fim de eliminar qualquer umidade absorvida por ele.

Para tanto, utilizou-se um forno elétrico de ressecamento de eletrodos com faixa de trabalho de 0 a 400 °C, regulado para 100 °C. O forno, contendo os filtros, e seu controlador são apresentados nas Fig. 3.5 e 3.6.



Figura 3.5 – Painel de operação do forno e detalhe do visor onde são mostradas a temperatura regulada (verde) e a temperatura em seu interior (vermelho)



Figura 3.6 – Forno contendo os filtros em processo de secagem

3.1.5. Sistema de monitoramento e aquisição de dados

Para o monitoramento dos parâmetros regulados, assim como para posterior análise dos dados, foi utilizado um sistema de aquisição dos sinais de tensão, corrente e velocidade de alimentação.

Optou-se pela utilização de uma placa de aquisição da *National Instruments* modelo NI USB-6009 (Fig. 3.7) e um programa desenvolvido em *LabView*[®] (Fig. 3.8), responsáveis por adquirir, gravar e plotar os dados, bem como exibir médias e RMS ao término do tempo de aquisição. Durante toda a fase experimental, os dados foram adquiridos em uma frequência de amostragem de 5 kHz.

Para medição e aquisição dos dados de tensão (e também tratar e amplificar os sinais provenientes dos sensores e enviá-los para a placa de aquisição) foi utilizado um condicionador de sinais fabricado no Laprosolda (Fig. 3.9), em conjunto com um tacômetro de 50 pulsos por volta (Fig. 3.10), para medição de velocidade de alimentação do arame eletrodo, e um sensor de efeito hall LEM HTA 600-s (Fig. 3.11), para medição da corrente de soldagem.



Figura 3.7 – Placa de aquisição modelo NI USB-6009

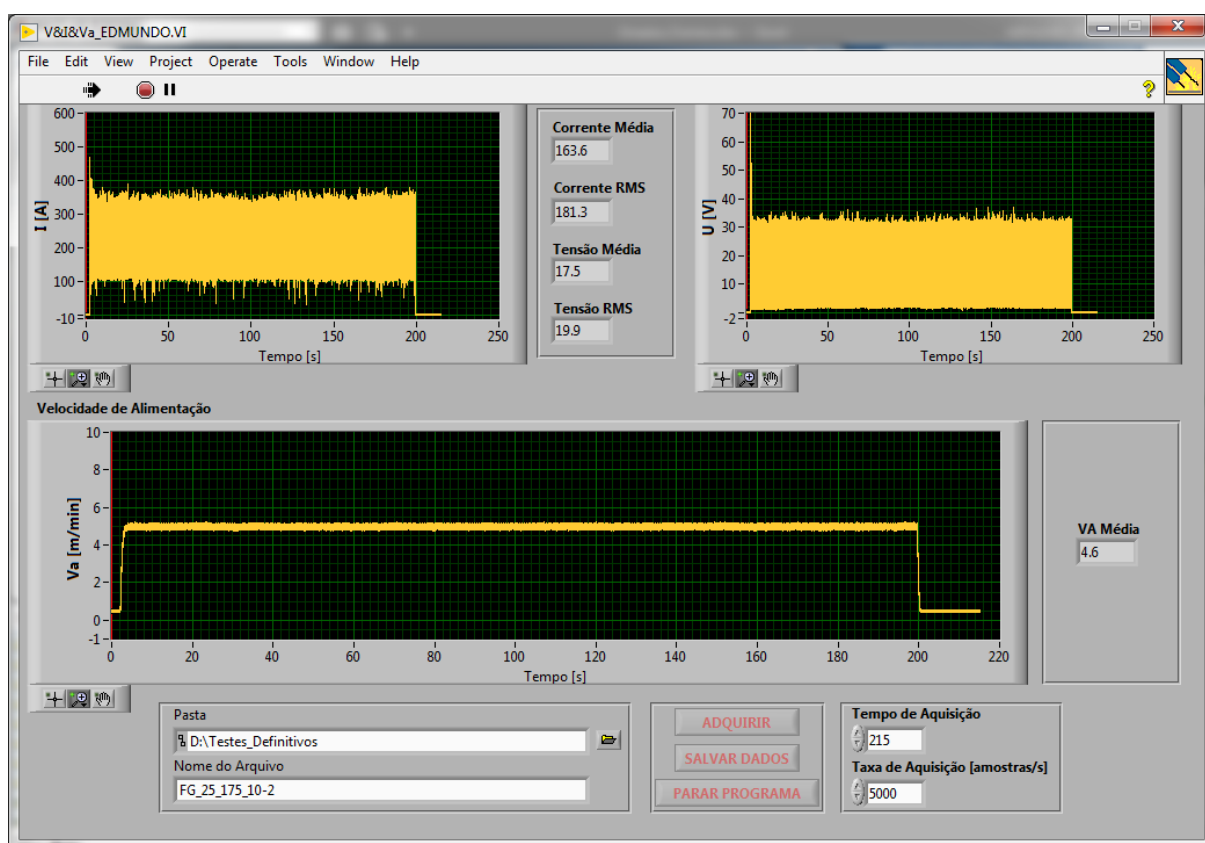


Figura 3.8 – Interface gráfica do programa desenvolvido em *LabView*[®]



Figura 3.9 – Condicionador de sinais para medição e tratamento dos sinais de tensão (U), corrente (I) e velocidade de alimentação (V_a)

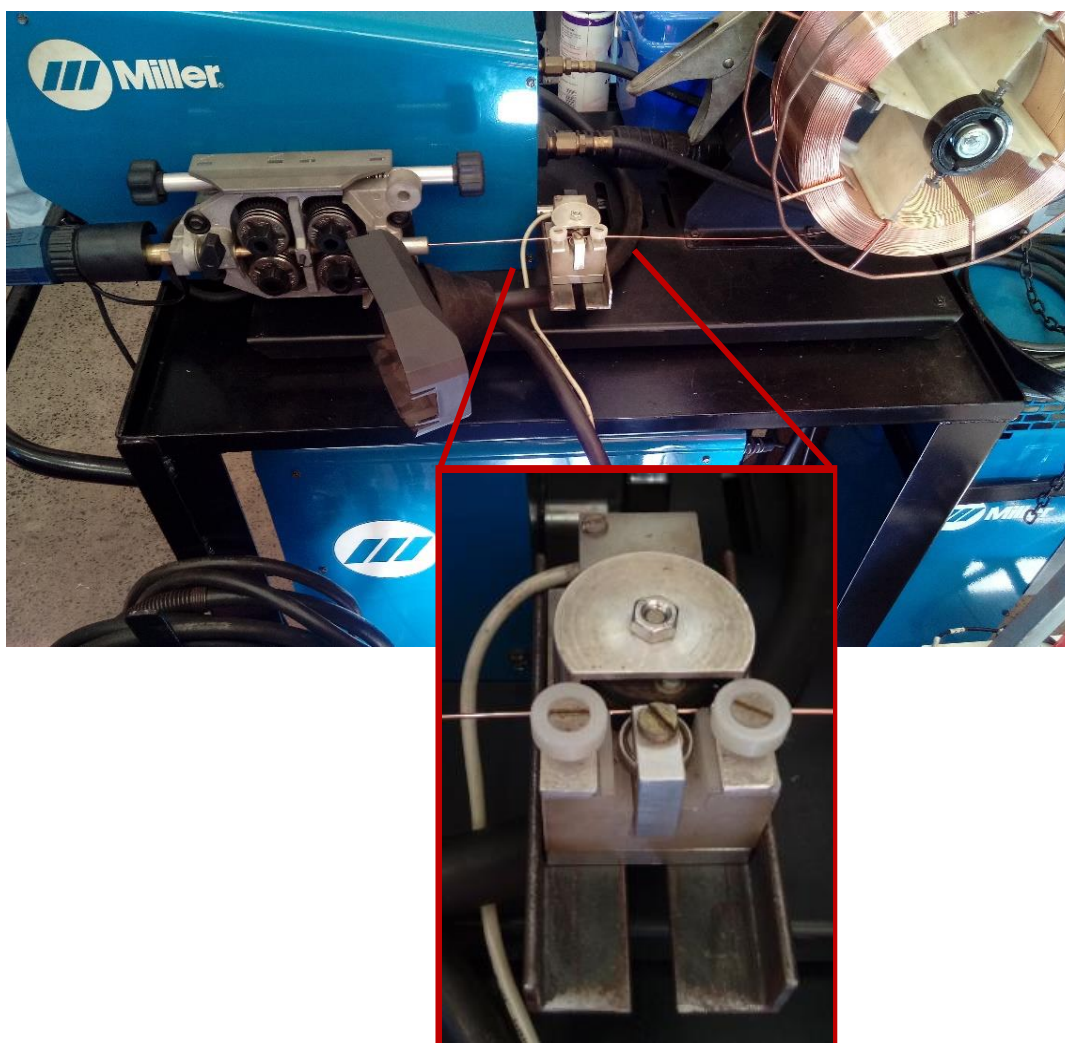


Figura 3.10 – Tacômetro para medição da velocidade de alimentação; fixado a montante do tracionador de arame



Figura 3.11 – Sensor de efeito hall LEM HTA 600-s

3.1.6. Bancada de testes preliminares

A fim de facilitar a execução dos testes preliminares e o levantamento do envelope operacional, optou-se por realizá-los em uma mesa de coordenadas xy (Fig. 3.12), utilizando os mesmos equipamentos (fonte, alimentador de arame, tocha e sistema de aquisição - Fig. 3.13), que foram, posteriormente, utilizados nos ensaios de geração de fumos.

Como metal de base, foram utilizadas placas de aço ASTM A36 de dimensões aproximadas daquela utilizada nos ensaios de coleta de fumos, com 300 mm de largura por 400 mm de comprimento e 12,7 mm de espessura (Fig. 3.14). Tal semelhança dimensional se fez necessária para que as condições de soldagem obtidas nos testes preliminares fossem replicadas quando executados os testes definitivos na bancada de coleta de fumos.

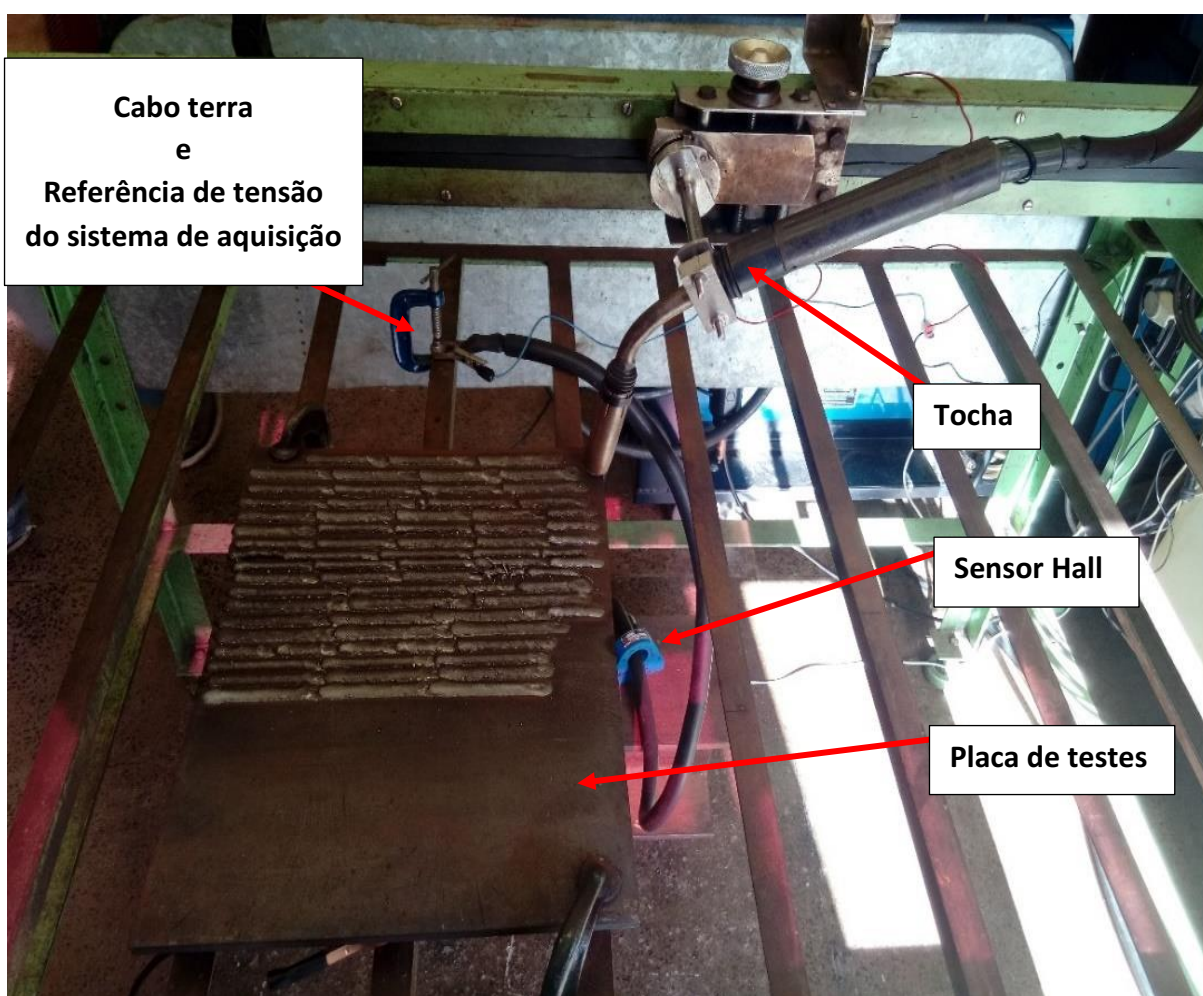


Figura 3.12 – Bancada de testes preliminares

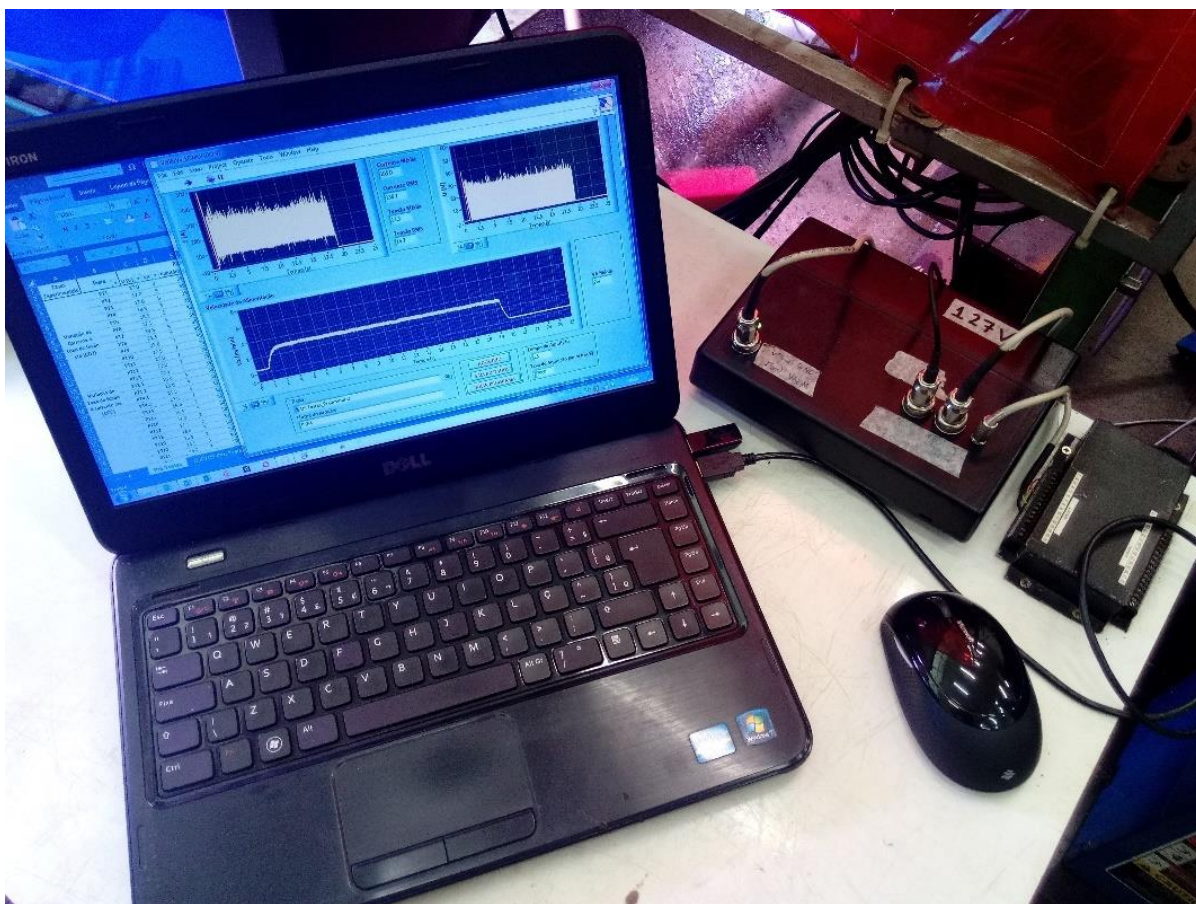


Figura 3.13 – Sistema de aquisição de dados



Figura 3.14 – Placa de testes utilizada para execução dos testes preliminares

3.2. Materiais

3.2.1. Metal de adição

Os ensaios foram realizados com a utilização do arame-eletrodo AWS ER70S-6 não cobreado de 1,20 mm de diâmetro nominal. A composição química e as propriedades mecânicas do arame-eletrodo, de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante, são apresentadas na Tab. 3.2.

Tabela 3.2 – Composição química e propriedades mecânicas do arame-eletrodo de acordo com o fabricante (nominais)

Arame-Eletrodo AWS ER70S-6			
Composição Química [%]			
C – 0,10	Mn – 1,5	Si – 0,9	
Propriedades Mecânicas			
L. E. [MPa]	L. R. [MPa]	Alongamento [%]	Charpy [J] (20/-20 °C)
440	540	25	130/90

No presente trabalho, foi também quantificada e avaliada a TGF sob a perspectiva de massa de fumos gerada por massa de arame-eletrodo consumida [g/kg]. Para isso fez-se necessária a medição da taxa de fusão real em cada ensaio de coleta de fumos válido. Assim, foi necessário realizar a medição do diâmetro real do arame-eletrodo (Φ), para se calcular a área de secção transversal real do consumível (A_{real}), e de sua densidade (ρ), calculada pela Eq. 3.1, além da medição e aquisição da velocidade de alimentação de cada ensaio (por meio do sistema de monitoramento apresentado no Item 3.1.5), que será utilizada adiante. As medições de Φ , $L_{amostra-i}$ e $m_{amostra-i}$, são apresentadas na Tab. 3.3.

$$\rho = \frac{\sum_i m_{amostra-i}}{\sum_i L_{amostra-i} \cdot A_{real}} \quad (3.1)$$

Onde i varia de 1 até 3 (três amostras de arame-eletrodo)

Tabela 3.3 – Medições do diâmetro real e da massa das amostras e da densidade calculada do arame-eletrodo

Amostra	$L_{amostra}$ [m]	$m_{amostra}$ [kg]*	Média [kg]	DP [kg]	ρ [kg/m ³]
1	0,947	0.00786	0,0078567	0,0000058	7850,23
		0.00785			
		0.00786			
2	0,947	0.00786	0,0078533	0,0000058	7846,90
		0.00785			
		0.00785			
3	0,945	0.00784	0,0078333	0,0000058	7843,48
		0.00783			
		0.00783			
Φ [m]**		0,00116	0,00116	0,00000	-
		0,00116			
		0,00116			
$\rho_{MÉDIO}$ [kg/m ³]			7846,87		

*Foram feitas três medições de massa para cada amostra, por meio da utilização da balança de precisão descrita no Item 3.1.3, calculando-se a média e desvio padrão.

**Foram feitas três medições, uma em cada amostra, por meio da utilização de um micrômetro de 0,05 mm de resolução, calculando-se a média e desvio padrão.

3.2.2. Metal de base

Como metal de base foram utilizadas chapas de aço ASTM A36 circulares de 12,7 mm de espessura e 450 mm de diâmetro, especificada em procedimento interno (Fernandes, Scotti e Vilarinho, 2009), para execução de ensaios de coleta de fumos. Uma representação esquemática da chapa utilizada é apresentada na Figura (3.15).

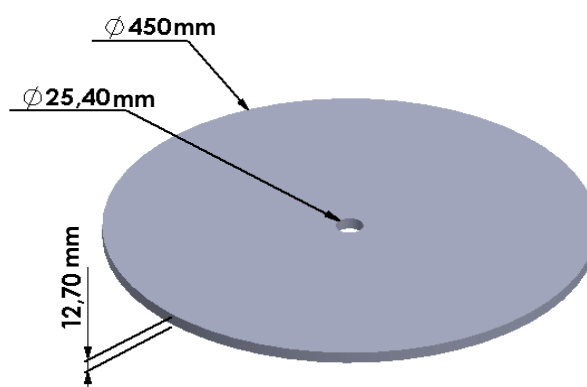


Figura 3.15 – Representação esquemática da chapa de teste

3.2.3. Gás de proteção

No presente trabalho foi utilizado como gás de proteção Ar+25%CO₂, com vazão de 16 l/min, conforme sugestão do procedimento interno para realização de ensaios de coleta de fumos (Fernandes, Scotti e Vilarinho, 2009).

3.2.4. Filtro de coleta de fumos

Para efetuar a coleta de fumos foram utilizados filtros de fibra de vidro seguindo as especificações da ASTM C 800 (1994), de $\approx 13 \pm 3$ mm de espessura, (Fig. 3.16), para possibilitar sua montagem no equipamento.

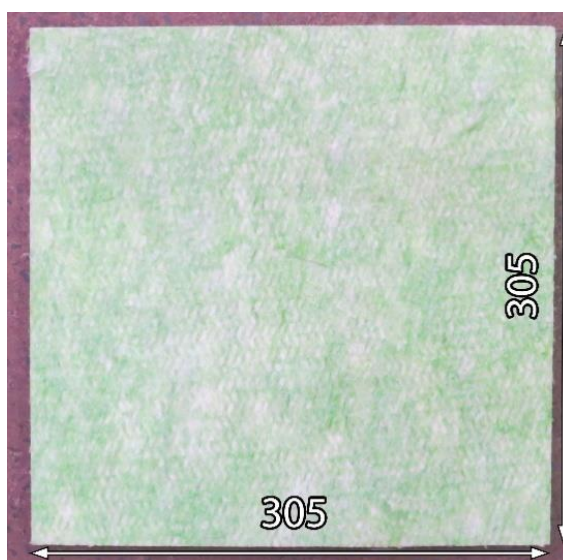


Figura 3.16 – Dimensões do filtro de coleta de fumos

3.3. Planejamento experimental

Os experimentos deste trabalho foram realizados de acordo com um planejamento dividido em quatro fases:

1. Testes preliminares para definição de dois níveis de corrente média, o menor possível e o maior possível, alterando-se apenas a distância bico de contato-peça (DBCP), para três condições de velocidade de alimentação (V_a) – consequentemente, três níveis de taxa de fusão (T_F);

2. Testes preliminares para definição de dois níveis de T_F , o menor possível e o maior possível, os quais impliquem em níveis de corrente média (I_M) similares, também por meio da manipulação da DBCP – isso, também, para três níveis distintos de;
3. Agrupamento dos níveis de I_M e T_F obtidos nos itens 1 e 2 (a fim de reduzir o número total de testes) e levantamento do envelope operacional final;
4. Execução dos ensaios de coleta de fumos inerentes às condições estabelecidas no Item 3.

A primeira e segunda fases do planejamento experimental foram de significativa importância no presente trabalho, pois nelas foi verificada a viabilidade da investigação aqui proposta, onde foi determinada a possível variação de corrente à taxa de fusão constante para quatro níveis de taxa de fusão e três níveis de tempo médio de arco aberto, para cada condição de I_M e T_F .

Devido a essa importância, a metodologia utilizada para realizar os testes preliminares e o consequente levantamento do envelope operacional será discutida com detalhes no Capítulo IV (Testes Preliminares), onde serão apresentados todos os obstáculos encontrados, bem como as técnicas e métodos adotados para superá-los/contorná-los.

Antes que seja discutido o planejamento experimental, é necessário que sejam apresentadas as variáveis fixas de processo. São elas a taxa de deposição (T_D), o efeito indutivo da fonte de soldagem e as técnicas de soldagem.

a) Taxa de Deposição (T_D)

Como comentado anteriormente, o procedimento utilizado para execução dos ensaios de coleta de fumos foi embasado, com algumas particularidades, no procedimento desenvolvido por Fernandes, Scotti e Vilarinho (2009), por sua vez, baseado na norma AWS F1.2 (2006).

Uma dessas particularidades está no fato de que os parâmetros de soldagem recomendados por esta norma são fixos, uma vez que é utilizada para efeito de

comparação de TGF entre consumíveis (arames-eletrodos), fazendo-se necessário testar diferentes consumíveis sob, é claro, as mesmas condições de soldagem (Tab. 3.4).

Tabela 3.4 – Parâmetros de soldagem recomendados pela AWS F1.2 (2006)

Parâmetros de Soldagem	DBCP	19 mm
	Ângulo de ataque	10° puxando
	Velocidade de alimentação	7,6 m/min
	Tensão	26 V
	Velocidade de Soldagem	35 cm/min

Entretanto, como o escopo do presente trabalho é a avaliação da influência das variáveis supracitadas, entre elas a taxa de fusão (entende-se por V_a), faz-se necessária uma adaptação quanto ao procedimento da norma.

Sendo assim, optou-se por fixar a relação V_a/V_s para todos os testes, embasada nos valores recomendados pela norma para essas variáveis, de 7,6 m/min e 35,6 cm/min, respectivamente, resultando em um fator de relação de 21,7, levando a uma taxa de deposição de aproximadamente 180 g/m.

Além disso, é interessante que a taxa de deposição (assumida como sendo a realação V_a/V_s , uma vez que não foi alterado o diâmetro do arame) seja mantida constante, pois dessa forma, mantém-se o volume de material depositado por comprimento de cordão de solda, tendendo-se a manter o volume da poça constante, minimizando sua influência na TGF, mesmo esta não sendo de contribuição pronunciada na geração de fumos, como discutido no Capítulo II. Dessa forma, permite-se uma melhor comparabilidade entre os resultados obtidos.

b) Efeito Indutivo

O ajuste do efeito indutivo, foi mantido constante, em valor intermediário e igual a 50, em uma escala de ajuste que vai de 1 a 99 na fonte de soldagem, durante toda a execução deste trabalho.

c) Técnicas de soldagem

As técnicas de soldagem utilizadas para a realização de ensaios de coleta de fumos foram determinadas com base no procedimento interno (Fernandes, Scotti e Vilarinho, 2009), que sugere que o ângulo de trabalho seja de 90° e o ângulo de ataque de 10° , puxando.

Uma vez definidos os parâmetros fixos de processo, a seguir são apresentadas e discutidas as condições levantadas e a metodologia adotada para realização dos ensaios de coleta de fumos.

3.3.1. 1ª Fase de parametrização: variação de I_M a T_F constante

Neste item são discutidos os critérios adotados para escolha dos parâmetros utilizados para realizar os testes de coleta de fumos.

Foram propostos três níveis de T_F , que seriam consequência do ajuste de quatro níveis de V_a , onde seriam testados, para cada um, dois ajustes de DBCP, acarretando soldagens com diferentes níveis de corrente, para uma mesma T_F , como ilustrado na Fig. 3.17.

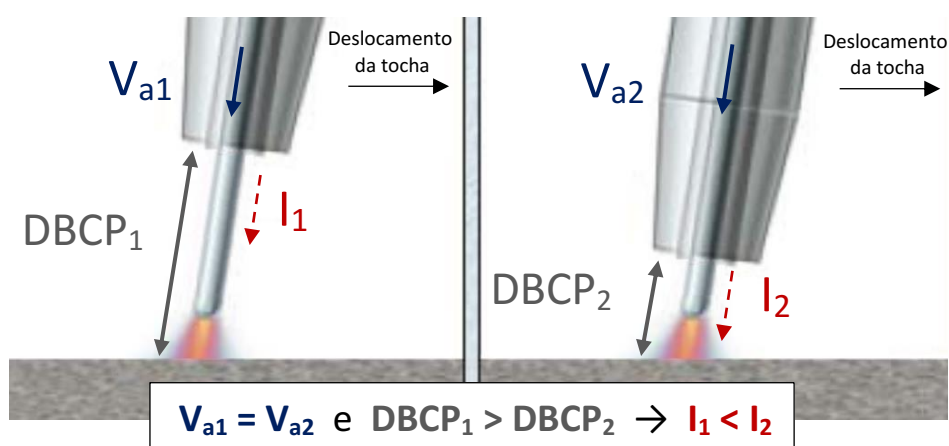


Figura 3.17 – Esquema representando a obtenção de dois níveis de corrente média a taxa de fusão constante

Além dessas duas variáveis, foi proposto variar o tempo médio de arco aberto (t_{mAA}) em três níveis: 10, 20 e 30 ms (variando-se o ajuste de tensão na fonte de soldagem), para cada condição de corrente média e taxa de fusão, permitindo

avaliar a influência de I_M e T_F na geração de fumos sob diferentes regimes de transferência por curto-circuito. Os valores de regulação e os valores obtidos (a partir do processamento dos dados de aquisição de sinais) nessa fase experimental são apresentados na Tab. 3.5.

Tabela 3.5 – Valores de ajuste e valores monitorados durante a primeira fase de parametrização

Pré testes selecionados	Valores ajustados			Valores monitorados			
	V_a [m/min]	DBCP [mm]	V [V]	I_M [A]	Níveis de I_M [A]	t_{mcc} [ms]	t_{mAA} [ms]
1	3	19	15,0	121,6	≈ 120	4,0	10,7
2		19	19,0	123,1		3,1	20,2
3		19	21,0	121,6		3,3	31,9
4		11	15,0	140,2	≈ 140	4,0	10,8
5		10	19,0	139,9		3,4	20,5
6		10	21,0	138,2		3,0	29,7
7	4	20	18,5	149,1	≈ 150	3,0	10,3
8		21	21,5	150,3		3,3	20,1
9		22	23,5	149,0		3,2	30,4
10		10	17,0	176,7	≈ 175	3,5	9,5
11		11	22,5	177,8		2,7	20,8
12		12	25,5	178,8		2,0	31,7
13	5	21	19,5	174,3	≈ 175	2,7	10,2
14		22	23,0	173,2		3,0	20,1
15		23	25,0	173,2		2,8	30,2
16		10	17,5	202,7	≈ 205	3,2	10,1
17		12	23,5	206,2		2,3	19,6
18		13	26,5	206,4		1,8	30,5

3.3.2. 2ª Fase de parametrização: variação de T_F a I_M constante

Como o presente trabalho objetiva avaliar a influência da taxa de fusão e da corrente média como fatores independentes na TGF, fez-se necessário também buscar formas de se variar a T_F mantendo-se constante a corrente média.

Para tanto, propôs-se levantar parâmetros que contemplassem dois níveis de taxa de fusão, para cada um de dois níveis médios de corrente, como ilustrado na Fig. 3.18.

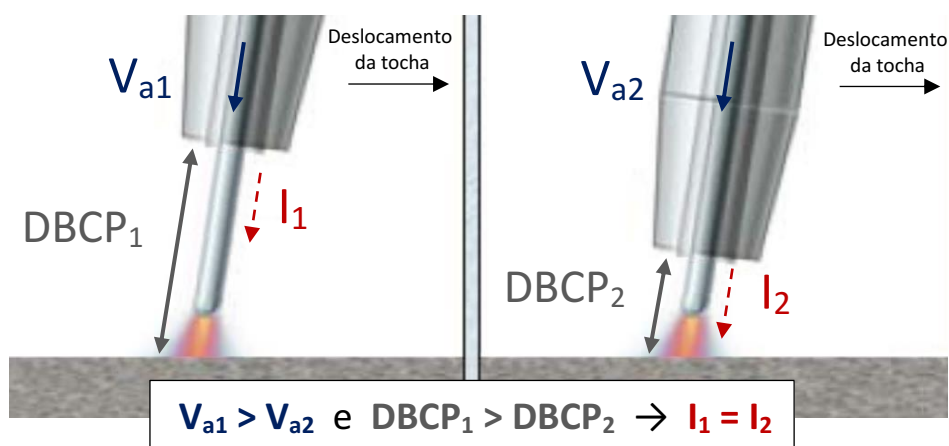


Figura 3.18 – Esquema representando a obtenção de dois níveis de taxa de fusão a corrente média constante

Assim como no item anterior variou-se o tempo médio de arco aberto (t_{mAA}) em três níveis: 10, 20 e 30 ms. Na sequência, a Tab. 3.6 traz os valores de regulagem e os valores obtidos (a partir do processamento dos dados de aquisição de sinais) nessa fase experimental.

Tabela 3.6 – Valores de ajuste e valores monitorados durante a segunda fase de parametrização

Pré testes selecionados	Níveis de Corrente [A]	Valores ajustados			Valores monitorados		
		Va [m/min]	DBCP [mm]	V [V]	Im [A]	tmAA [ms]	
1	≈ 140	3	11	15,0	140,2	10,8	
2			10	19,0	139,9	20,5	
3			10	21,0	138,2	29,7	
4		4	23	23	18,0	143,1	9,5
5				23	21,5	146,1	21,4
6				23	23,0	145,8	29,1
7	≈ 205	5	10	17,5	202,7	10,1	
8					7	22	21,0

Como se observa na Tab. 3.5, foi possível variar a taxa de fusão de 1,49 para 1,99 kg/h (equivalentes aos ajustes de V_a de 3 e 4 m/min, respectivamente) a corrente média constante (≈ 140 A), para três condições de tempo médio de arco aberto. Para o nível mais alto de corrente (≈ 205 A), foi variada a taxa de fusão de 2,49 para 3,48 kg/h (equivalentes aos ajustes de V_a de 5 e 7 m/min, respectivamente).

Todavia, nessa fase experimental, para esse último nível de corrente, foram levantados os parâmetros apenas para a condição de 10 ms de tempo médio de arco aberto, a fim de reduzir o número de condições e, conseqüentemente, o número de ensaios de coleta de fumos a serem realizados. Fato que será reconsiderado adiante, devido ao agrupamento das variáveis e conseqüente diminuição no número de testes.

3.3.3. Agrupamento dos níveis de I_M e T_F e levantamento do envelope operacional final

Após o levantamento das condições apresentadas nos Itens 3.3.1 e 3.3.2, percebeu-se que, em alguns testes, os níveis de corrente praticamente coincidiam, como nota-se nos testes de 4 a 6 (≈ 140 A) e 7 a 9 (≈ 150 A), da Tab. 3.3.

Além disso, como se observa nos Testes 7 e 8 da Tab. 3.6, houve dificuldades em se aproximar os valores de corrente média para as condições de 5 e 7 m/min, já que a DBCP encontrada para o Teste 7 foi muito baixa (10 mm) e para o Teste 8 foi muito alta (22 mm).

Assim, foi proposto o agrupamento destas variáveis, de forma que se igualasse os níveis de corrente que estavam próximos (Tab. 3.5), de 140 e 150 A para 145 A, por meio do reajuste das DBCP's, e fosse substituído o maior nível de taxa de fusão (Tab. 3.5), de 3,48 kg/h (equivalente ao ajuste de 7 m/min) por um nível imediatamente inferior, de 2,99 kg/h (equivalente ao ajuste de 6 m/min).

Esse reajuste das variáveis possibilitou ainda o levantamento das condições inerentes aos tempos médios de arco aberto que foram descartados na segunda fase de parametrização. E mesmo assim, conforme apresentado na Tab. 3.7, conseguiu-se reduzir o número de condições de soldagem de 26 para 21, permitindo

abrangendo todas as propostas de investigação, em uma larga faixa de ajustes para o processo GMAW com transferência por curto-circuito:

- Variação de corrente a taxa de fusão constante, para três níveis distintos de taxa de fusão. Ex: Testes de 1 a 3 e de 4 a 5, assim por diante;
- Variação de taxa de fusão a corrente constante, para três níveis de corrente média distintos e. Ex: Testes de 4 a 5 e de 6 a 8, assim por diante;
- Variação do tempo médio de arco aberto, em três níveis, para todas as condições de taxa de fusão e corrente média abrangidas.

O gerenciamento das condições propostas, para obtenção do envelope operacional final, também permitiu que os parâmetros fossem refinados, de forma que se conseguiram baixíssimas variações de I_M ($\pm 3,8$ A) e de t_{mAA} ($\pm 2,2$ ms), as quais se mantiveram nos ensaios de coleta de fumos.

Tabela 3.7 – Envelope operacional final

Condições de	T_F [kg/h]	Níveis de I_M	t_{mAA} [ms]	Valores regulados			Valores monitorados		
				V_a	V	DBCP	I_M	V_M	t_{mAA}
1	1,49	120	10	3	15,0	19	121,6	14,8	10,7
2			3	20,0	19	123,1	19,7	22,2	
3			3	21,0	19	121,6	20,7	31,9	
4		145	10	3	15,0	10	143,6	15,0	10,1
5			3	20,0	10	143,0	19,8	19,8	
6			3	21,6	9	142,1	21,4	31,0	
7	1,99	145	10	4	18,0	23	143,1	17,7	9,5
8			4	21,5	23	146,1	21,3	21,4	
9			4	23,0	23	145,8	22,7	29,1	
10		175	10	4	17,0	10	176,7	16,7	9,5
11			4	22,5	11	177,8	22,3	20,8	
12			4	25,5	12	178,8	25,0	31,7	
13	2,49	175	10	5	19,5	21	178,0	19,1	9,2
14			5	23,0	22	173,2	22,6	20,1	
15			5	25,0	23	173,2	24,7	30,2	
16		210	10	5	17,5	9	209,7	17,3	10,3
17			5	23,5	12	206,2	23,1	19,6	
18			5	26,5	13	206,4	26,1	30,5	
19	2,99	210	10	6	19,8	16	208,8	19,6	9,3
20			6	24,2	18	208,3	23,9	22,1	
21			6	27,2	19	212,0	26,7	29,3	

3.3.4. Ensaios de coleta de fumos

Após o levantamento do envelope operacional final, passou-se para a fase de realização dos ensaios de coleta de fumos.

O procedimento utilizado para realizar os ensaios de coleta de fumos foi parcialmente baseado em procedimento interno (Fernandes, Scotti e Vilarinho, 2009), contendo algumas particularidades, já apresentadas no Item 3.3.

Para efeito de esclarecimento, segue uma breve descrição em tópicos do procedimento adotado para execução dos ensaios de coleta de fumos:

1. No coletor de fumos, já com a coifa (Fig. 3.3 (1)), posiciona-se a tocha no local onde será realizada a soldagem e regula-se a velocidade de soldagem¹ na controladora da mesa giratória (Fig. 3.3 (8));
2. Em seguida, regula-se uma “pré-vazão” de ar, em vazio, por meio do inversor de frequência (Fig. 3.3 (7)) - este controla a rotação do ventilador centrífugo, responsável por realizar a sucção dos fumos - de forma que o manômetro (Fig. 3.3 (4)) registre a pressão de 15 mm_{H2O} (ligeiramente acima da pressão de 14 mm_{H2O}, para compensar a perda de carga do filtro, quando este for colocado), desligando-se a chave geral do equipamento na sequência;
3. Retira-se um filtro do forno (Fig. 3.6), o qual deve ter passado no mínimo uma hora em processo de secagem a 100° C, e realiza-se a medição de sua massa inicial (m_i), registrando-a;
4. Coloca-se o filtro no receptáculo no topo da coifa e acopla-se a câmara de sucção (Fig. 3.3 (2)) à coifa, aprisionando o filtro entre as partes;
5. Dispara-se o sistema de aquisição e, em seguida, a fonte de soldagem, o cronômetro (para monitorar o tempo de ensaio), e, por fim, o coletor de fumos (rotação da mesa giratória e sucção);
6. Com o ensaio em andamento, monitora-se a pressão no manômetro (Fig. 3.3 (4)), mantendo-a constante em 14 mm_{H2O};
7. O fim do ensaio será determinado por dois critérios de parada (o que ocorrer primeiro):

¹ Será descrito com detalhes no Capítulo IV o procedimento para se regular V_s na mesa giratória do coletor de fumos, bem como o método de calibração da velocidade de rotação da mesa.

- I. Quando o manômetro (5) (Fig. 3.3 (5)) acusar uma perda de carga no filtro igual a 5 pol_{H₂O} (polegadas d'água) ou;
 - II. Quando o tempo de ensaio atingir 3 min (monitorado pelo cronômetro).
8. Em qualquer um dos dois casos, ao final do teste, desliga-se a fonte de soldagem e a mesa giratória, mantendo o exaustor ligado por mais 30 s, a fim de que seja succionado o restante dos fumos presentes no interior da coifa;
 9. Em seguida, desliga-se o coletor, retiram-se as travas da câmara de sucção, desacoplando o conjunto e
 10. Remove-se o filtro do receptáculo, realizando-se, em seguida, a medição de sua massa final (m_f), registrando-a.

Após a realização do ensaio de coleta de fumos e uma vez conhecidas as massas inicial e final do filtro, basta subtrair-las para se encontrar a massa de fumos que ficou retida no filtro. Ainda é necessário determinar o tempo exato de soldagem (tempo de arco aberto) para se calcular a TGF em g/h.

Para isso, é utilizado um programa em Matlab[®], denominado *arco_aberto* (Fig. 3.19), o qual calcula, com base no arquivo de aquisição, o tempo total de solda subtraindo o ponto inicial da soldagem (quando o programa identifica a primeira ascensão da corrente acima de 20 A)² do ponto final (a última queda abaixo de 10 A*)³.

De posse dessas duas informações calcula-se a TGF inerente à condição ensaiada, pela Eq. 3.2.

$$TGF_t = \frac{m_f - m_i}{t_{arco\ aberto}/3600} \quad (3.2)$$

Onde:

TGF_t é a taxa de geração de fumos, em [g/h], m_i e m_f são as massas inicial e final do filtro, em [g] e *arco aberto* é o tempo total de duração da soldagem, em [s].

² Critério estabelecido pelo autor

³ Idem

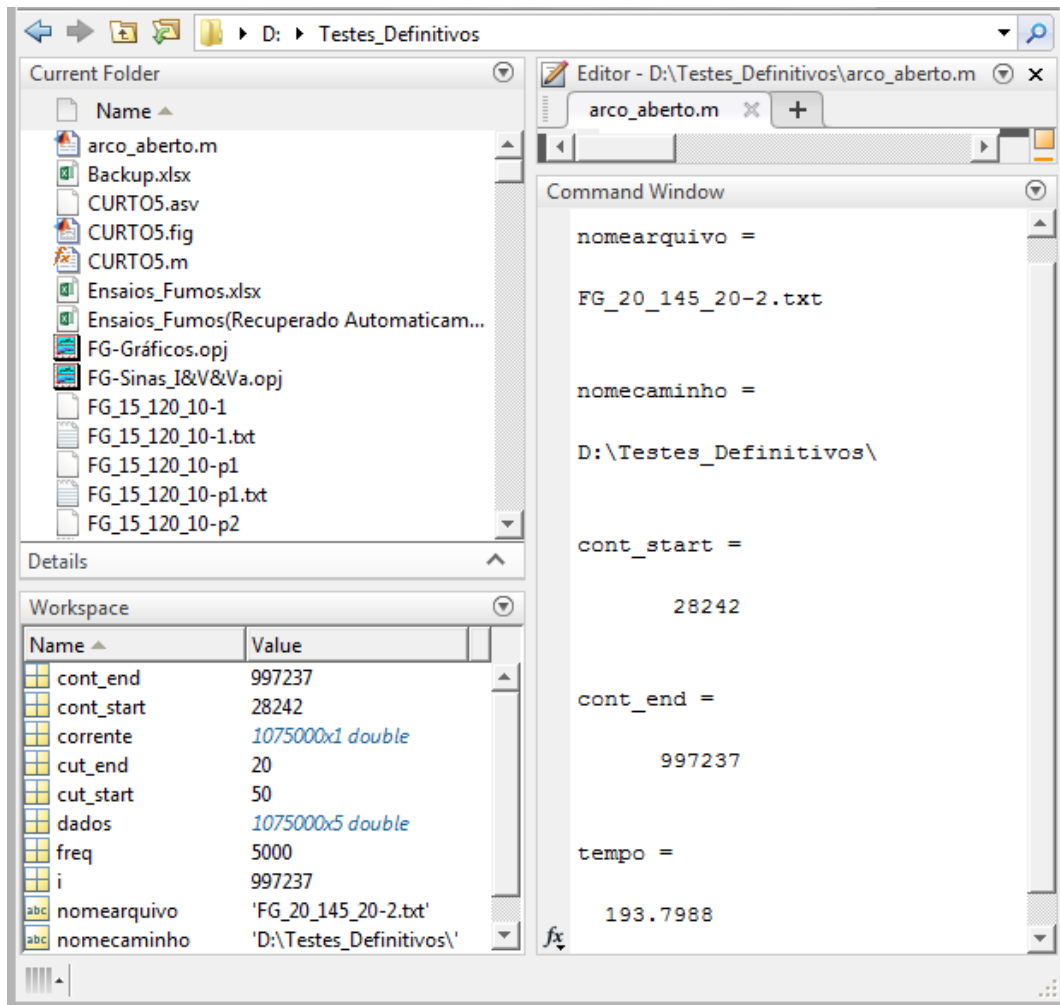


Figura 3.19 – Interface do programa *arco_aberto*, em Matlab®

Outra forma de se expressar a taxa de geração de fumos, se dá pela razão entre a massa de fumos gerada e massa de arame-eletrodo consumida durante o ensaio, como mostrado na Eq. 3.3.

$$TGF_m = \frac{60 \cdot (m_f - m_i)}{t_{\text{arco aberto}} \cdot V_a^{DAq} \cdot \rho \cdot A_{\text{real}}} \quad (3.3)$$

Onde:

- TGF_m é a taxa de geração de fumos, em [g/kg];
- m_i e m_f são as massas inicial e final do filtro, em [g];
- $t_{\text{arco aberto}}$ é o tempo total de duração da soldagem, em [s];

- V_a^{DAq} é a velocidade de alimentação média, calculada por meio do arquivo de aquisição do ensaio, em [m/min];
- P é a massa específica do arame-eletrodo, em [kg/m³] e
- A_{real} é a secção transversal real do arame-eletrodo, em [m²].

Para efeito de análise, no presente trabalho, será utilizada apenas a perspectiva temporal da TGF, ou seja, as medições quantificadas em [g/h], a fim de facilitar a relação desta grandeza com a taxa de fusão, expressa em [kg/h]. Contudo, serão apresentados no Capítulo V, os resultados em ambas as formas de apresentação.

3.4. Realização das análises de comportamento e análises estatísticas

Após concluída a fase de realização dos ensaios de coleta de fumos e calculadas as TGF inerentes a cada condição estabelecida no Item 3.3, faz-se necessária a análise destes dados.

Aqui, optou-se por analisar, inicialmente, as curvas de TGF em função de I_M , T_F e t_{mAA} , para identificar possíveis tendências de comportamento.

Posteriormente, foram realizadas análises estatísticas (ANOVA e LS Means), com objetivo de verificar e quantificar a significância estatística das possíveis influências que as variáveis investigadas exercem sobre a taxa de geração de fumos.

CAPÍTULO IV

TESTES PRELIMINARES

4.1. Concepção do experimento

A fim de detalhar o desenvolvimento experimental do trabalho e esclarecer questões sobre a escolha do envelope operacional e concepção final do experimento, este capítulo trará justificativas e apresentará alguns contratempos encontrados durante a execução tanto dos testes preliminares como dos ensaios de coleta de fumos.

4.1.1. Obtenção dos envelopes operacionais preliminares

A motivação inicial para a execução deste trabalho foi investigar a TGF do processo GMAW com transferência por curto-circuito variando-se a corrente de soldagem sem que fosse necessária a variação da taxa de fusão e vice-versa. Essa investigação seria realizada para dois tipos de proteção gasosa: CO₂ puro e mistura Ar+25%CO₂.

A partir desse objetivo, iniciaram-se os testes preliminares, para levantamento do envelope operacional, utilizando primeiramente o CO₂ puro como gás de proteção, buscando variar a corrente de soldagem para três níveis de ajuste de velocidade de alimentação (3, 5 e 7 m/min). Aqui, para cada regulagem de V_a , foram testados dois ajustes de DBCP, suficientemente distantes, para que fossem obtidos dois níveis de I_M , como mostrado na Tab. 4.1.

Por meio destes testes, foi possível determinar a máxima⁴ variação de corrente possível, à taxa de fusão constante, sendo de aproximadamente 20 A, para

⁴ Diz-se da “máxima” variação de corrente, aquela proporcionada por dois ajustes de DBCP, um inferior, de aproximadamente 10 mm, e um superior, de aproximadamente 20 mm. Ajustes inferiores a 10 mm e superiores a 20 mm foram considerados pouco usuais para emprego no processo GMAW

o ajuste de $V_a = 3$ m/min, 30 A, para os ajustes de 5 m/min e 35 A, para o ajuste de 7 m/min, diferenças consideradas razoavelmente significativas para a investigação proposta.

Tabela 4.1 – Testes preliminares para obtenção de dois níveis de corrente média para cada ajuste de velocidade de alimentação para CO₂ puro

Pré-testes CO ₂	Valores ajustados			Valor monitorado	Valor calculados
	V _a [m/min]	DBCP [mm]	V [V]	I _M [A]	Δ I _M [A]
PT2	3	18	17,0	120,6	18,9
PT1	3	10	17,0	139,5	
PT7	5	18	19,5	174,8	32,1
PT4	5	10	18,5	207,1	
PT11	7	18	23,0	207,3	36,6
PT13	7	10	23,5	243,6	

Após a determinação dos parâmetros necessários para haver variação de corrente à taxa de fusão constante, restou realizar testes a fim de se buscar o inverso: a variação de taxa de fusão à corrente constante, uma vez que o objetivo do trabalho é avaliar os efeitos da taxa de fusão e da corrente “como fatores independentes” na TGF. Para este fim, foram tomados como referência os pré-testes PT1 e PT4 (Tab. 4.1), onde foi aumentada a velocidade de alimentação (V_a), juntamente com a DBCP, a fim de se manter o nível de corrente, porém, elevando o nível de taxa de fusão, como apresentado na Tab. 4.2.

Tabela 4.2 – Testes preliminares para obtenção de dois níveis de taxa de fusão para cada nível de corrente média para CO₂ puro

Pré-testes CO ₂	I _M de referência [A]	Valores ajustados			Valor monitorado
		V _a [m/min]	DBCP [mm]	V [V]	I _M [A]
PT1	140	3	10	17,0	139,5
PT1.2		4	20	18,0	141,4
PT4	200	5	10	18,5	207,1
PT4.2		7	20	22,5	199,6

com transferência por curto-circuito e, portanto, tentou-se evitá-los, embora tal intervalo tenha sido extrapolado, por necessidade, na definição do envelope operacional final.

Assim foi possível obter a variação da taxa de fusão de 1,49 para 1,99 kg/h (entende-se pela variação de V_a de 3 para 4 m/min) à corrente média constante (≈ 140 A) e de 2,49 para 3,48 kg/h (V_a de 5 para 7 m/min) à corrente média de aproximadamente 200 A, completando-se o envelope operacional para o CO_2 como gás de proteção, restando fazer o levantamento dos parâmetros para o $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$.

O levantamento deste segundo envelope operacional para a mistura $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$ foi realizado parcialmente, como mostra a Tab. 4.3, pois foi observada uma adversidade quanto aos ajustes de tensão, na fonte de soldagem, a qual será descrita à frente.

Assim, da mesma forma como ocorreu com os testes utilizando o CO_2 como gás de proteção, para a mistura $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$, foi possível variar aproximadamente 20 A para $V_a = 3$ m/min e 30 A para $V_a = 5$ m/min, ficando a condição de 7 m/min incompleta, ou seja, sem o levantamento de parâmetros para o nível inferior de corrente média. Isso se deveu ao fato de ter sido necessária uma pausa nos testes preliminares, pois o critério utilizado para seleção do ajuste de tensão na fonte teve de ser alterado, por motivos que serão apresentados a seguir.

Tabela 4.3 – Testes preliminares para obtenção de dois níveis de corrente média para cada ajuste de velocidade de alimentação para $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$

Pré-testes $\text{Ar}+25\%\text{CO}_2$	Valores ajustados			Valor monitorado	Valor calculado
	V_a	DBCP	V	I_M	ΔI_M
	[m/min]	[mm]	[V]	[A]	[A]
PT26	3	19	15,0	121,6	18,6
PT24	3	11	15,0	140,2	
PT30	5	21	19,5	174,3	28,4
PT27	5	10	17,5	202,7	
-	-	-	-	-	-
PT32	7	10	22,0	248,8	

4.1.2. Critérios para ajuste de tensão de soldagem

Conforme descrito no Item 3.1, foi utilizada para execução das soldagens uma fonte operando com característica estática de tensão constante, convencionalmente empregada para o processo GMAW. Nesse modo de operação, existem três

parâmetros básicos de ajuste: a velocidade de alimentação do arame-eletrodo, o efeito indutivo (quando em soldagens por curto-circuito) e a tensão de soldagem.

Para tanto, já que o efeito indutivo foi pré-fixado e que a velocidade de alimentação era uma das variáveis a serem investigadas (taxa de fusão), restou admitir um critério para selecionar a tensão de soldagem adequada para realização dos ensaios.

A priori, buscou-se um ajuste de tensão que proporcionasse a transferência metálica de melhor regularidade, por meio do cálculo e monitoramento do Índice de Regularidade da Transferência Metálica Laprosolda (IV_{CC}), calculado com o auxílio do software CURTO5, desenvolvido internamente em plataforma *Matlab*[®] (Fig. 4.1).

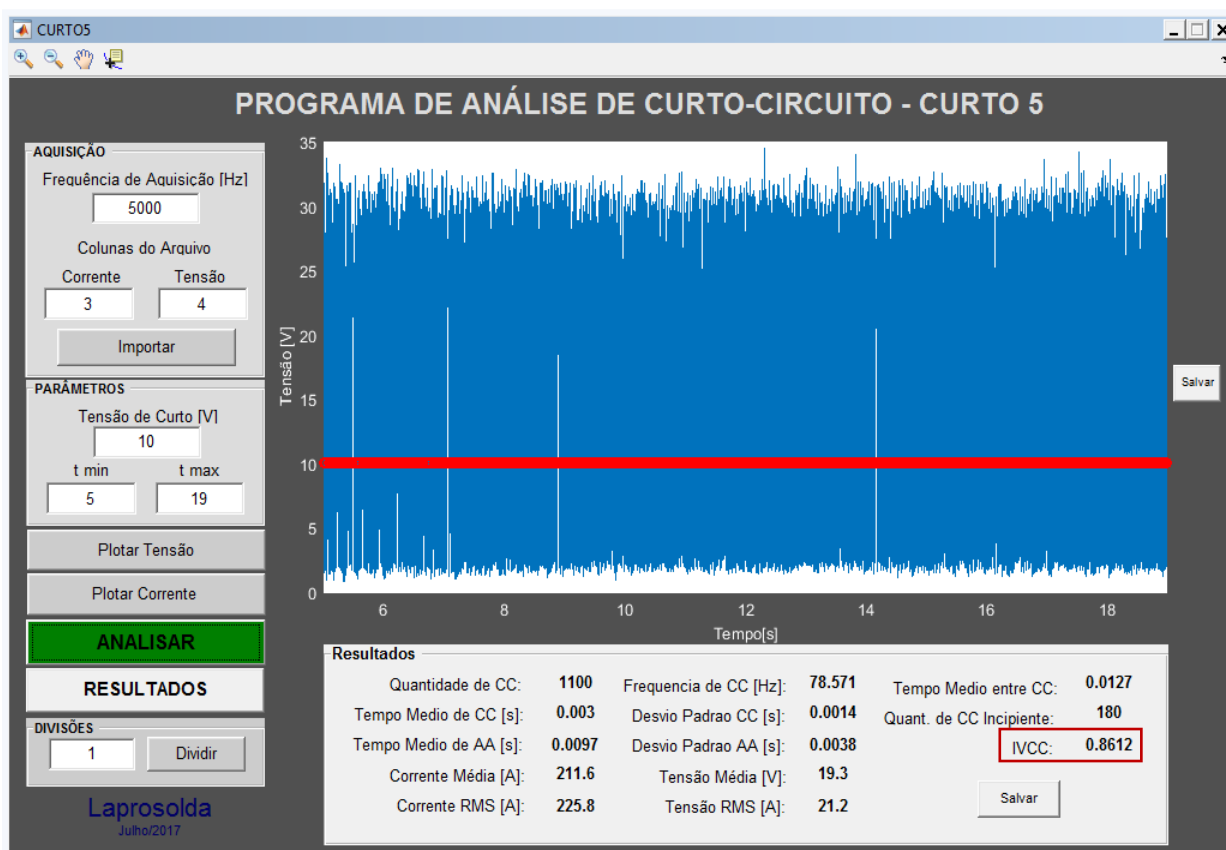


Figura 4.1 – Interface gráfica do software CURTO5 de análise de curto-circuito desenvolvido internamente em *Matlab*[®], tendo destacando-se o IV_{CC}

Este software se mostrou uma ferramenta importante para o levantamento do envelope operacional, visto que, por meio da análise do arquivo de aquisição, este retorna também os valores de corrente média, tensão média, tempo médio de arco

aberto, tempo médio de curto-circuito, entre vários outros parâmetros, de menor importância para o presente trabalho, mas que auxiliam na caracterização da transferência metálica por curto-circuito, permitindo uma análise criteriosa, facilitando a manipulação dos parâmetros de soldagem.

Todavia, após otimizado o IV_{CC} para cada condição, notou-se que havia divergências nos valores obtidos de tempo médio de arco aberto (t_{mAA}) entre os pré-testes (Tab. 4.4), período em que, segundo Chae et al. (2006), seria de maior contribuição na geração de fumos no processo GMAW com transferência por curto-circuito.

Tabela 4.4 – Valores de corrente média (I_M), IV_{CC} e t_{mAA} obtidos na fase inicial dos testes preliminares

Gás de Proteção	Pré-testes de menores IV_{CC}	Valores ajustados			Valores monitorado		
		Va [m/min]	DBCP [mm]	V [V]	I_M [A]	IV_{CC}	t_{mAA} [ms]
CO ₂	PT2	3	18	17,0	120,6	0,676	8,9
	PT1	3	10	17,0	139,5	0,804	8,8
	PT7	5	18	19,5	174,8	0,624	9,0
	PT4	5	10	18,5	207,1	0,905	10,6
	PT11	7	18	23,0	207,3	0,784	19,2
	PT13	7	10	23,5	243,6	1,194	23,1
	PT1.2	4	20	18,0	141,4	0,668	7,7
	PT4.2	7	20	22,5	199,6	0,602	18,1
Ar+25%CO ₂	PT26	3	19	15,0	121,6	0,990	10,7
	PT18	3	10	18,4	140,4	0,770	15,5
	PT25	5	19	17,5	121,7	0,434	7,2
	PT27	5	10	17,5	202,7	0,836	10,1
	PT32	7	10	22,0	248,8	1,322	14,6

Essas divergências poderiam causar alterações na geração de fumos, de forma que t_{mAA} maiores, implicariam em maiores TGF, interferindo nos resultados obtidos a posteriori e, dessa forma, dificultando a comparação entre os ensaios, nas condições de corrente e taxa de fusão levantadas.

Dando à devida importância para o fato exposto, optou-se por balizar os ajustes de tensão pelo tempo médio de arco aberto, e não mais pelo Índice de

Regularidade para Transferência Metálica por Curto-Circuito (IV_{CC}), por julgar este primeiro mais influente na geração de fumos, permitindo se obter maior comparabilidade entre os resultados finais.

No entanto, não se sabia ao certo em qual valor seria pré-fixado o tempo médio de arco aberto, o que exigiria a realização de ensaios preliminares de coleta de fumos em todas as condições de taxa de fusão, corrente e gases de proteção, buscando um valor ótimo onde se poderia obter uma quantidade sensível de fumos e, ao mesmo tempo, uma transferência metálica adequada, fato que exigiria um gasto superior de materiais (placas de teste, arame-eletrodo, filtros e gás de proteção).

Como os ensaios de coleta de fumos podem ter duração de um minuto e meio a três minutos em cada condição, tempo considerado relativamente longo em soldagem, defrontou-se o risco de não se ter material suficiente para varrer todas as condições propostas, principalmente de arame-eletrodo.

Uma vez que não seria viável a substituição do carretel de arame, sob pena de comprometer a comparabilidade dos resultados e, logo, a robustez do experimento, optou-se por levantar os parâmetros necessários para se obter três níveis distintos de t_{mAA} : 10, 20 e 30 ms, ainda nos testes preliminares (curta duração – 15 a 20 segundos cada). E então, nesse momento, optou-se por incluir mais esta variável ao envelope operacional a ser ensaiado no coletor de fumos.

Como consequência dessa escolha, foi necessário excluir um dos gases de proteção, com o fim de reduzir o número de ensaios de coleta de fumos, optando-se por realizá-los com a proteção gasosa de $Ar+25\%CO_2$. A partir daí, foi feito o levantamento do envelope operacional final em três fases de parametrização, conforme apresentado nos Itens de 3.3.1 a 3.3.3.

4.1.3. Metodologia empregada no levantamento do envelope operacional na fase de testes preliminares

Neste item, será sintetizada a metodologia utilizada para o levantamento do envelope operacional a ser utilizado nos ensaios de coleta de fumos. As variáveis-alvo deste levantamento são a corrente média (I_M), à taxa de fusão constante, a taxa de fusão (T_F) à corrente constante e o tempo médio de arco aberto (t_{mAA}).

Para tanto, foram propostos três níveis de t_{mAA} :

- 10, 20 e 30 ± 2 ms, alcançados por meio do ajuste da tensão de soldagem (V),

Além de quatro níveis de T_F à I_M constante:

- 1,49 e 1,99 kg/h à I_M de 145 ± 3 A;
- 1,99 e 2,49 kg/h à I_M de 175 ± 3 A e
- 2,49 e 2,99 kg/h à I_M de 210 ± 3 A,

Esses níveis foram alcançados por meio do ajuste da Velocidade de Alimentação (V_a), Distância Bico de Contato-Peça (DBCP) e V (Tensão), e, final e conseqüentemente, obtidos quatro níveis de I_M à T_F constante:

- 120 e 145 ± 3 A à T_F de 1,49 kg/h;
- 145 e 175 ± 3 A à T_F de 1,99 kg/h e
- 175 e 210 ± 3 A T_F de 2,49 kg/h.

Para que fosse possível a seleção destes parâmetros, em parte, pouco convencionais, foi utilizado um método iterativo de ajuste dos parâmetros: V_a , DBCP e V, devido à grande interdependência que há entre eles e, obviamente, também a I_M e o t_{mAA} .

Diz-se iterativo, pois, em síntese, o ajuste foi feito da seguinte maneira:

1. Ajustada a V_a (para se obter os níveis de T_F) e a DBCP (para se alcançar os níveis de I_M desejados), fazia-se o ajuste de V a fim de se obter os diferentes t_{mAA} ;
2. Porém, o ajuste deste último alterava os valores de corrente média obtidos anteriormente;
3. Para tanto, tais variações deveriam ser compensadas pelo reajuste da DBCP, que por sua vez alterava o comprimento de arco e, conseqüentemente, o t_{mAA} ;
4. Assim, fazia-se necessário o reajuste da tensão de soldagem, que novamente causaria alterações nos valores de I_M , e assim por diante.

A utilização de tal metodologia, apresentada em forma de fluxograma na Fig. 4.2, foi crucial e inesperadamente objetiva no levantamento do envelope operacional proposto, podendo ser utilizada posteriormente na obtenção de parâmetros com

forte interdependência na soldagem GMAW por curto-circuito, como, por exemplo, o índice de regularidade (IV_{cc}), ou comprimento de arco, atrelados à I_M e a T_F .

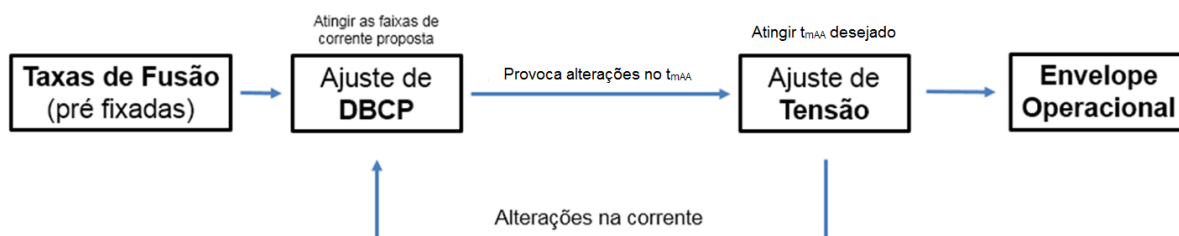


Figura 4.2 – Fluxograma ilustrando a metodologia iterativa empregada na busca dos parâmetros nos testes preliminares

4.1.4. Anomalia nos valores de corrente na bancada de coleta de fumos

Outro detalhe importante sobre a fase de levantamento dos parâmetros foi que, obtido o envelope operacional na bancada de testes preliminares, apresentada no Item 3.1.6, ao migrar-se para a bancada de coleta de fumos, notou-se uma divergência nos valores de corrente, principalmente quando nas condições de menores taxas de fusão, chegando a 10 A.

Em palavras mais objetivas, os testes realizados nas condições de 3 m/min de alimentação e 120 A de corrente média, na bancada de testes preliminares, apresentavam valores de corrente em torno de 130 A, quando na bancada de coleta de fumos, como mostra a Tab. 4.5. Isso exigiu que fossem sendo feitos reajustes de parâmetros (DBCP e tensão de soldagem), no próprio coletor, antes da realização dos ensaios de fumos.

Acredita-se que tal anomalia tenha ocorrido devido à diferença dimensional entre as placas de teste utilizadas nos testes preliminares e definitivos. Ambas as placas possuíam 12,7 mm de espessura, porém, a placa utilizada nos testes definitivos (coletor de fumos) tinha volume (e, portanto, massa) em torno de 30% maior que a utilizada nos testes preliminares, fato que pode ter alterado o regime térmico das soldagens.

Este aumento de massa da placa de teste, pode ter conferido maior capacidade de extração de calor da poça de fusão, reduzindo-se a penetração do cordão de solda e, portanto, aumentando a altura do seu reforço. Assim, com maior

altura do reforço do cordão de solda, há uma redução do comprimento energizado do eletrodo (considerando-se que o comprimento do arco fique constante em fonte do tipo tensão constante), o que levaria, portanto, ao aumento da corrente de soldagem para manter a fusão constante do arame.

Tabela 4.5 – Anomalias nos valores de corrente média obtidos no coletor de fumos

Bancada	Testes	Valores ajustados			Valores monitorado	
		V _a [m/min]	DBCP [mm]	V [V]	I _M [A]	t _{mAA} [ms]
Pré-testes	PT26	3	19	15,0	121,6	10,7
Coletor	PT26	3	19	15,0	130,6	8,6
Ajuste final	PT26	3	22	15,5	118,6	9,0
Pré-testes	PT41	3	19	20,0	123,1	22,2
Coletor	PT41	3	19	20,0	129,0	21,5
Ajuste final	PT41	3	23	20,0	120,0	20,8
Pré-testes	PT42	3	19	21,0	121,6	31,9
Coletor	PT42	3	19	21,0	131,2	28,6
Ajuste final	PT42	3	23	21,6	120,5	28,9

A Figura 4.3 mostra a placa de testes definitivos contendo pequenos cordões de solda (pré-testes de reajuste de parâmetros) posicionados imediatamente antes do cordão de solda definitivo do ensaio de coleta de fumos.

Esta divergência nos valores de corrente média foi mais pronunciada nas condições de menor taxa de fusão e de corrente média, de forma que se diminuía gradativamente a medida que se aumentavam estes valores, até que, nas condições mais severas de soldagem (V_a = 6 m/min e I_M = 210 A), tal efeito não foi notado, não necessitando de reajuste.



Figura 4.3 – Foto da placa de teste contendo dois cordões de solda realizados para ensaio de coleta de fumos e seus respectivos cordões realizados para o reajuste dos parâmetros momentos antes do ensaio.

4.2. Reparação, manutenção e melhoria dos equipamentos

Durante boa parte do percurso na fase experimental deste trabalho, foi necessário realizar manutenções, correções e melhorias nos equipamentos envolvidos. Este item apresenta de forma breve e objetiva algumas das intervenções necessárias para tornar possível a execução dos experimentos.

4.2.1. Fonte de soldagem

Para realização do experimento foi escolhida uma fonte de soldagem que estivesse em boa condição de operação, que proporcionasse a liberdade de ajuste de parâmetros exigida e que estivesse disponível para utilização durante o tempo necessário para execução dos testes preliminares e dos ensaios de fumos.

Assim, a única fonte que atendia essas exigências era a Miller® PipePro 450 RFC. Tal equipamento estava disponível, permitia se operar em modo convencional

(tensão constante) e se apresentava parcialmente pronta para operar, com exceção de dois detalhes.

O primeiro detalhe foi que esta fonte possui um padrão próprio para acoplamento da tocha no alimentador de arame (Fig. 4.4), aceitando apenas tochas do mesmo fabricante ou de fabricantes autorizados.



Figura 4.4 – Conector macho para tochas padrão Miller®

Contudo, a tocha utilizada no coletor de fumos, também utilizada na execução dos testes preliminares, é de padrão “euro-conector” (Fig. 4.5), exigindo-se a aquisição de um adaptador (Fig. 4.6) que possibilitasse sua utilização na fonte de soldagem empregada. A Figura 4.7 mostra a instalação do euro-conector no alimentador de arame, enquanto a Fig. 4.8 apresenta o acoplamento do conjunto tocha mais euro-conector.



Figura 4.5 – Conector macho para tochas padrão euro



Figura 4.6 – Adaptador euro-conector fêmea adquirido

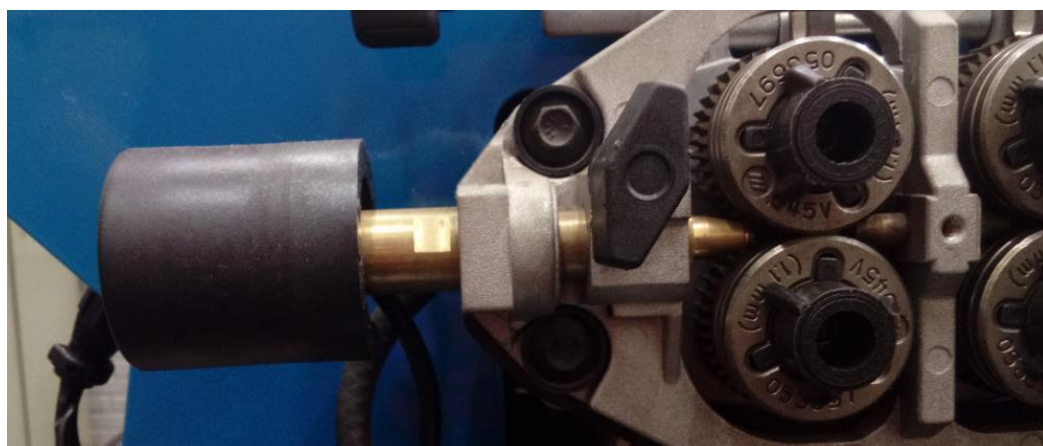


Figura 4.7 – Instalação do adaptador euro-conector ao alimentador de arame



Figura 4.8 – Acoplamento do conjunto (tocha + euro-conector + alimentador)

O segundo detalhe foi que esta fonte exige um cabo que, ao conectado à peça, fornece uma referência de tensão, denominado “*Volt Sense*” (Fig. 4.9), sem o qual a regulagem e manutenção dos parâmetros de soldagem durante a operação ficam comprometidas. O esquema de ligação do cabo, retirado do manual do usuário (MILLER, 2007), é apresentado na Fig. 4.10.



Figura 4.9 – Entrada do cabo Volt Sense (à esquerda) e conector do cabo (à direita)

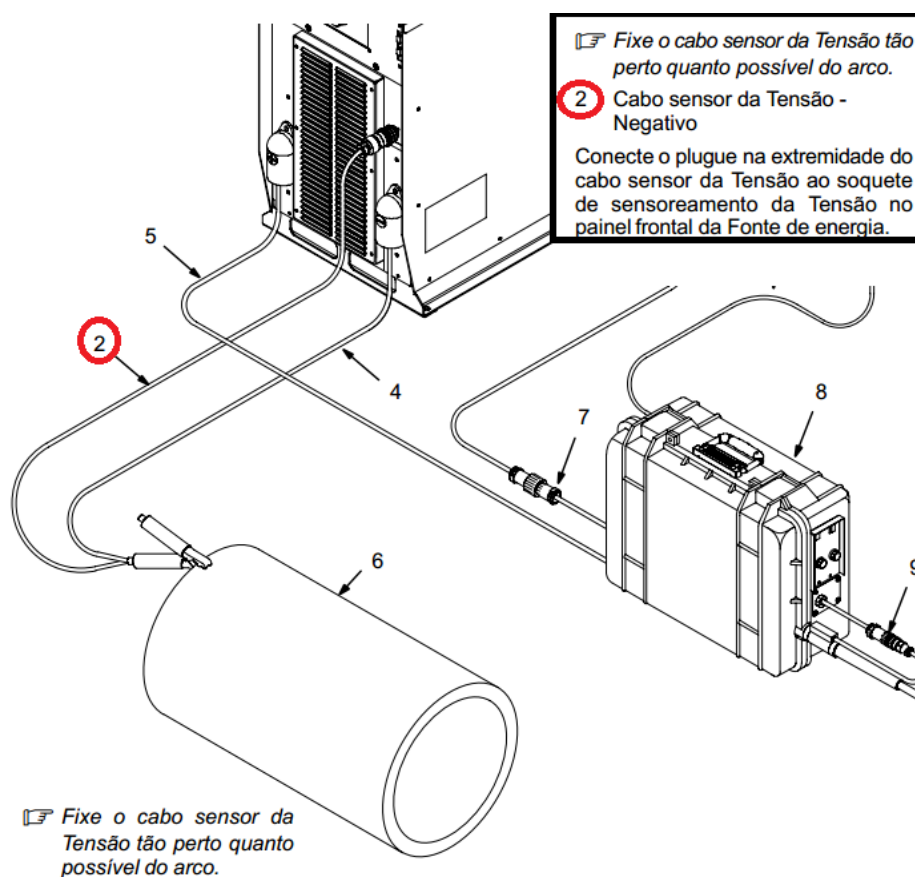


Figura 4.10 – Esquema de ligação do cabo *Volt Sense* (modificado de Miller, 2007)

Uma vez ausente o cabo do sensor de tensão e, em adição ao fato de que o processo de importação seria demorado, pondo em risco a finalização do trabalho, optou-se por intervir na máquina e construir um novo cabo.

Assim verificou-se como era feita a ligação do cabo no interior da fonte (Fig. 4.11), para possibilitar a substituição do conector macho (soquete da fonte) padrão Miller por um conector mais acessível (conector *speakon*), como mostra a Fig. 4.12. Para o cabo de referência de tensão, utilizou-se um cabo coaxial e uma garra de cobre (Fig. 4.13). A fonte foi testada com o novo cabo e considerada adequada para realização das soldagens.



Figura 4.11 – Ligação elétrica do soquete da fonte



Figura 4.12 – Conector *speakon* (fêmea, acima, instalada na fonte, e macho, abaixo, instalado no cabo)



Figura 4.13 – Cabo alternativo para referência de tensão da fonte

4.2.2. Coletor de fumos

Sendo o principal equipamento a ser utilizado no experimento, foi fundamental que o coletor de fumos estivesse em boas condições de uso.

O primeiro problema observado no coletor estava relacionado com o sistema de rotação da mesa (sistema responsável pela regulagem de velocidade de soldagem). Na primeira tentativa de calibrar a rotação da mesa, que apoia a placa de teste (Fig. 3.4 (6)), em função da posição do potenciômetro (Fig. 3.4 (8)), não se obteve boa repetibilidade dos resultados a baixas rotações, o que poderia comprometer o ajuste de velocidade de soldagem nas condições de menor taxa de fusão (entende-se por menores ajustes de V_a e, conseqüentemente, como adotou-se V_a/V_s constante, menores velocidades de soldagem).

Essa inconstância na velocidade de rotação da mesa se deveu à incapacidade de o motor de corrente contínua, empregado para acionar o sistema, trabalhar adequadamente nessa faixa de rotação, apresentando um movimento intermitente e irregular.

Uma das soluções possíveis para o problema encontrado seria aumentar a relação de transmissão do conjunto de rodas e correia dentadas, que inicialmente era de 8:1, tendo a menor roda dentada, 10 dentes, e a maior, 80 (Fig. 4.14).

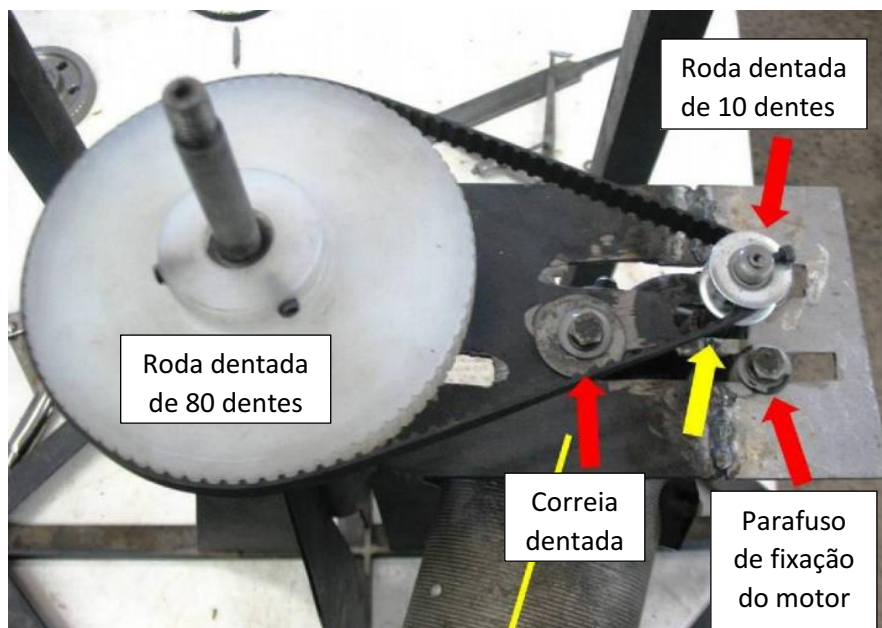


Figura 4.14 – Sistema de transmissão com relação 8:1

Para isso, foram projetadas, desenhadas e impressas em ABS, duas novas rodas dentadas, a maior possuindo 110 dentes (Fig. 4.15) e a menor, 8 (Fig. 4.16), elevando a relação de transmissão para 13,75:1, o que faria com que o motor pudesse trabalhar em uma faixa de rotação adequada, permitindo melhor uma calibração deste sistema.

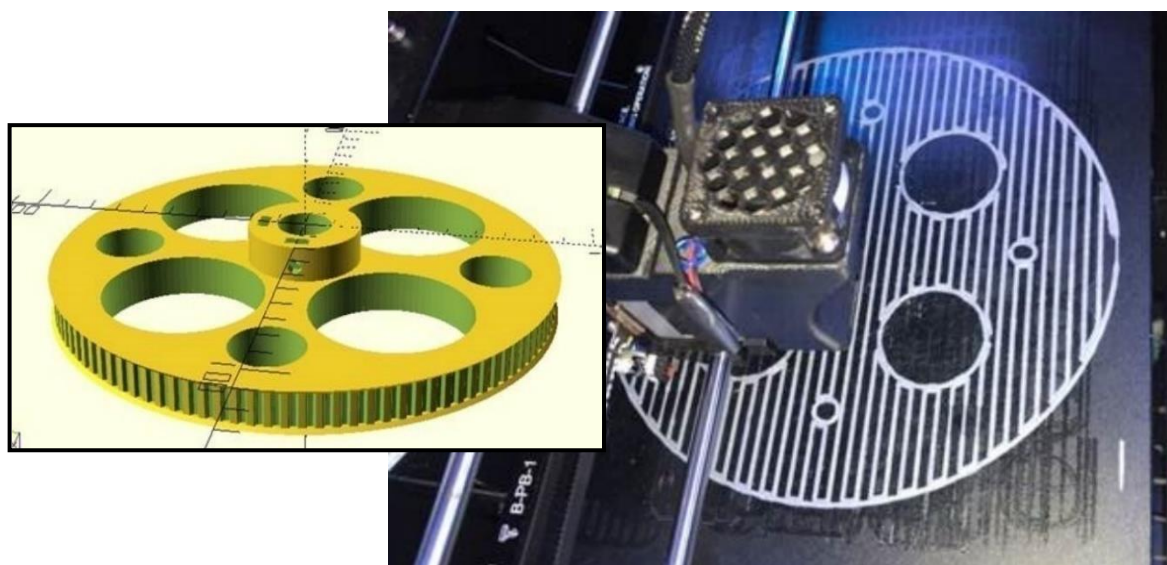


Figura 4.15 – Modelo da roda dentada de 110 dentes (esquerda) e em processo de impressão (direita)

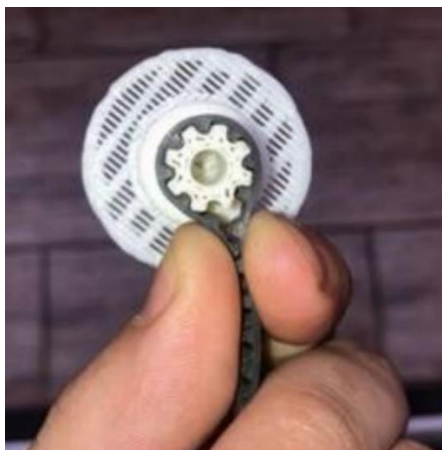


Figura 4.16 – Roda dentada menor (8 dentes) concluída (teste de acoplamento da correia dentada)

Para se acoplar as novas rodas dentadas foi necessária a aquisição de uma correia dentada mais longa. A Figura 4.17 mostra como se apresentou o novo sistema de transmissão após a montagem.

Todavia, ainda assim, mesmo tendo apresentado melhores resultados, não se conseguiu uma calibração razoável da mesa giratória. Dessa forma, sobraram duas possíveis causas para o mau funcionamento do conjunto: falha (ou defeito) no controlador PWM do motor ou o próprio motor estaria comprometido.



Figura 4.17 – Novo sistema de transmissão para acionamento da mesa giratória

Para tanto, se propôs substituir o controlador do motor (Fig. 3.4 (8)) e averiguar se haveria melhora. Utilizando-se um circuito PWM apropriado para este

tipo de aplicação, foi montado um circuito de alimentação para o circuito e adaptado a ele um potenciômetro de várias voltas, a fim de se obter melhor resolução no ajuste de rotação do motor (Figs. 4.18, 4.19 e 4.20).

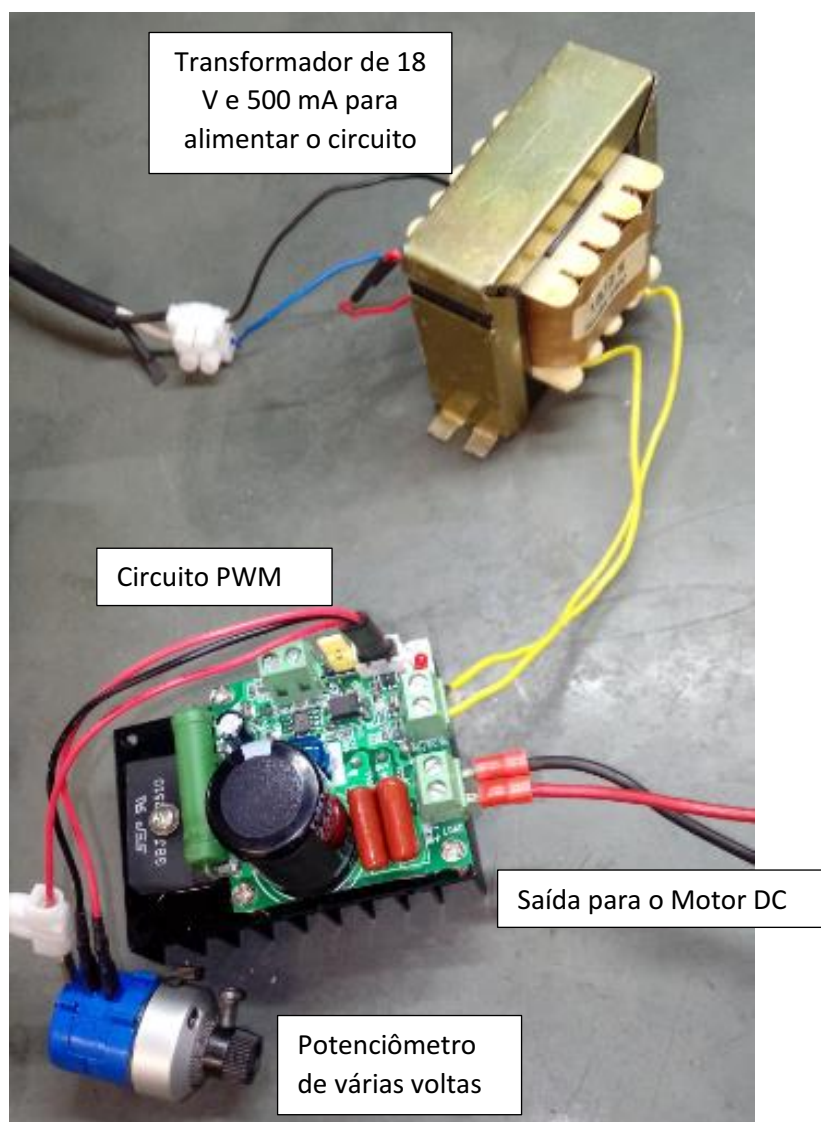


Figura 4.18 – Montagem do circuito controlador do motor de corrente contínua

Posteriormente, foi adicionado ao circuito, um voltímetro com mostrador (Fig. 4.21), em paralelo com a alimentação do motor (saída do PWM), a fim de aumentar a acurácia da calibração, uma vez que calibrar a rotação em função da posição do potenciômetro não oferecia a confiabilidade adequada. Desta forma, foi possível realizar a calibração da rotação da mesa em função da tensão de saída do controlador.

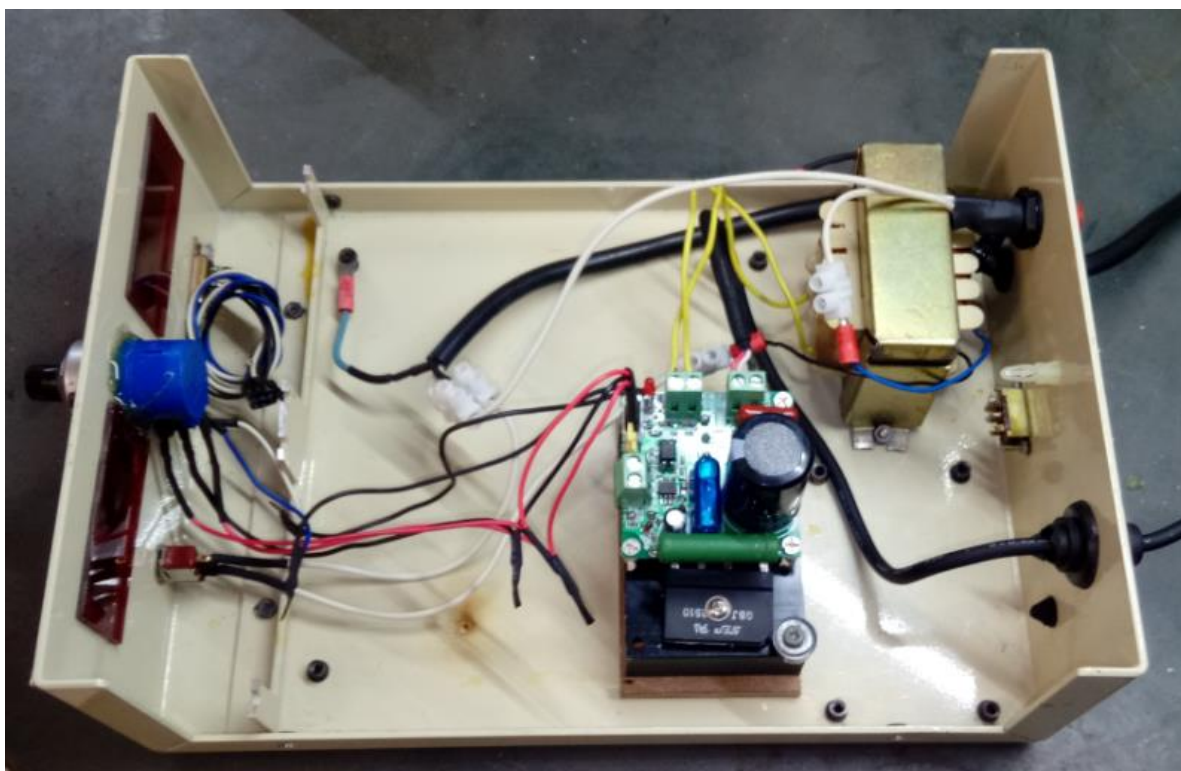


Figura 4.19 – Montagem do circuito em uma caixa metálica, para maior robustez

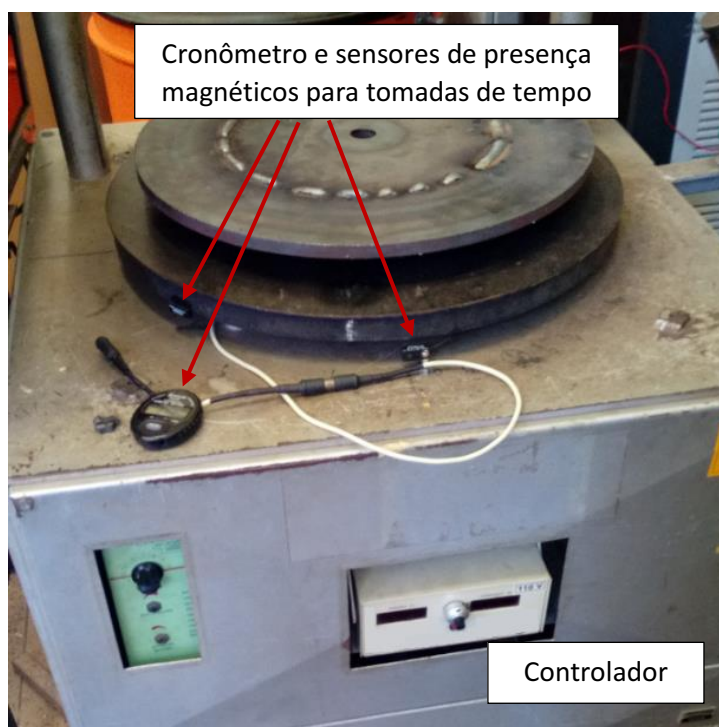


Figura 4.20 – Montagem do controlador no coletor de fumos e montagem do sistema de calibração



Figura 4.21 – Detalhe do controlador construído (voltímetro)

Após essas modificações no sistema de acionamento da mesa giratória do coletor de fumos, foi possível obter uma curva de calibração satisfatória, com melhor repetibilidade nas tomadas de tempo conforme apresentado na Fig. 4.22 e na Tab. 4.6.

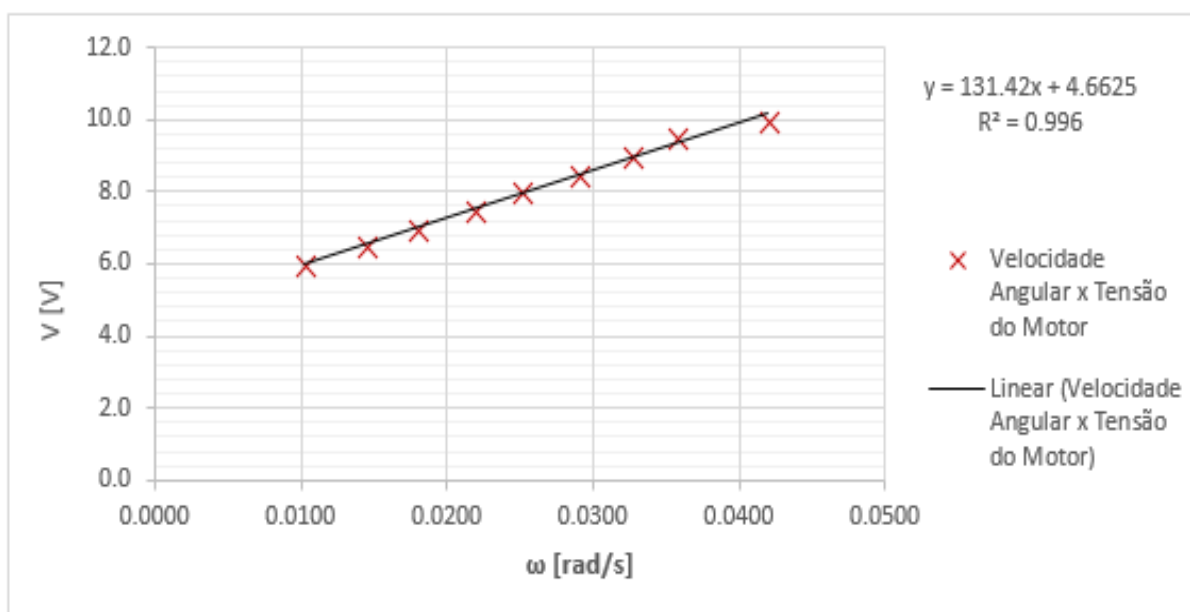


Figura 4.22 – Curva de calibração final da mesa giratória do coletor de fumos

Tabela 4.6 – Tomadas de tempo do cronômetro utilizado para calibração

V (volímetro) [V]	Medida	Tomadas de tempo [s]	Tempo Médio [s]	ω [rad/s]	n_{motor} [rpm]
6,0	1	629,79	617,71	0,0102	1,3356
	2	605,63			
6,5	1	416,10	435,75	0,0144	1,8933
	2	443,38			
7,0	1	339,44	351,42	0,0179	2,3476
	2	357,62			
7,5	1	281,19	287,15	0,0219	2,8731
	2	293,10			
8,0	1	251,72	251,10	0,0250	3,2856
	2	250,47			
8,5	1	218,22	216,99	0,0290	3,8021
	2	215,75			
9,0	1	194,66	192,78	0,0326	4,2795
	2	190,90			
9,5	1	172,22	175,78	0,0357	4,6934
	2	179,34			
10,0	1	151,40	149,97	0,0419	5,5013
	2	148,53			

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Resultados dos ensaios de coleta de fumos

A Tabela 5.1 apresenta os parâmetros de regulação e os valores médios monitorados para os testes válidos realizados. Os respectivos sinais elétricos para cada teste são mostrados no Apêndice I.

Tabela 5.1 – Níveis propostos, valores regulados e monitorados para todos os testes válidos

Identificação dos testes válidos	T _F [kg/h]	Níveis de I _M	t _{mAA} [ms]	Valores regulados			Valores monitorados					
				V _a	V	DBCP	V _{aM}	I _M	V _M	t _{mAA}	IV _{CC}	
FG_15_120_10-1	1,49	120	10	3	15,5	22	2,97	118,5	15,3	9,0	0,699	
FG_15_120_20-1			20	3	20,0	23	2,95	120,1	19,7	20,8	0,750	
FG_15_120_30-1			30	3	21,6	23	2,99	120,5	21,3	31,2	0,899	
FG_15_145_10-1		145	145	10	3	15,0	10	2,98	144,3	14,7	9,6	0,821
FG_15_145_20-1				20	3	20,4	10	2,98	142,0	20,2	22,2	0,785
FG_15_145_30-1				30	3	22,2	10	2,98	144,8	21,8	28,7	0,950
FG_20_145_10-3	1,99	145	10	4	18,4	23	3,99	143,7	18,1	9,6	0,565	
FG_20_145_20-2			20	4	21,6	24	3,98	147,9	21,2	19,7	0,780	
FG_20_145_30-1			30	4	23,0	23	4,00	146,0	22,6	29,0	0,885	
FG_20_175_10-2		175	175	10	4	17,5	10	3,97	173,0	16,8	8,8	0,694
FG_20_175_20-2				20	4	22,0	11	3,98	176,0	21,6	21,6	1,116
FG_20_175_30-4				30	4	24,2	13	3,97	171,6	23,7	29,9	1,252
FG_25_175_10-2	2,49	175	10	5	19,5	21	4,98	178,0	19,1	9,2	0,608	
FG_25_175_20-2			20	5	23,0	22	4,94	171,8	22,6	20,5	0,919	
FG_25_175_30-2			30	5	25,0	23	4,91	176,3	24,6	28,7	1,137	
FG_25_210_10-1		210	210	10	5	17,5	9	4,94	211,4	17,0	9,7	0,649
FG_25_210_20-2				20	5	23,7	11	4,92	211,8	23,1	18,4	1,418
FG_25_210_30-1				30	5	26,7	13	4,88	208,0	26,1	32,0	1,563
FG_30_210_10-2	2,99	210	10	6	20,0	17	5,87	209,2	19,5	9,3		
FG_30_210_20-1			20	6	24,3	18	6,00	210,0	23,7	22,1		
FG_30_210_30-1			30	6	27,2	20	5,92	207,9	26,6	29,3		

Esses ensaios foram considerados válidos uma vez que foram mantidas as condições desejadas ao longo de todo teste. Verifica-se que, tanto os níveis de corrente média, quanto de tempo médio de arco aberto, apresentaram baixas variações em torno dos níveis propostos (de ± 4 A e de $\pm 2,2$ ms, respectivamente).

A Tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de coleta de fumos válidos, inerente a todas as condições investigadas da taxa de geração de fumos, sob as perspectivas temporal e mássica.

Tabela 5.2 – Resultados de TGF para todas as condições ensaiadas

Identificação dos testes válidos	Variáveis investigadas			TGF _t	TGF _m
	T _F [kg/h]	I _M [A]	t _{mAA} [ms]	[g/h]	[g/kg]
FG_15_120_10-1	1,49	120	10	4,28	2,89
FG_15_120_20-1			20	7,92	5,39
FG_15_120_30-1			30	11,66	7,83
FG_15_145_10-1	1,49	145	10	6,88	4,64
FG_15_145_20-1			20	9,19	6,20
FG_15_145_30-1			30	13,24	8,92
FG_20_145_10-3	1,99	145	10	6,96	3,51
FG_20_145_20-2			20	11,89	6,00
FG_20_145_30-1			30	12,87	6,46
FG_20_175_10-3	1,99	175	10	8,75	4,43
FG_20_175_20-2			20	14,25	7,20
FG_20_175_30-4			30	16,17	8,18
FG_25_175_10-1	2,49	175	10	9,31	3,78
FG_25_175_20-2			20	13,26	5,39
FG_25_175_30-2			30	16,69	6,83
FG_25_210_10-1	2,49	210	10	7,42	3,02
FG_25_210_20-2			20	19,79	8,08
FG_25_210_30-1			30	26,01	10,72
FG_30_210_10-2	2,99	210	10	10,91	3,74
FG_30_210_20-1			20	18,54	6,21
FG_30_210_30-1			30	26,48	8,99

5.2. Análises dos resultados

As Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 trazem os gráficos de comportamento da TGF em função da corrente média, taxa de fusão e tempo médio de arco aberto, respectivamente.

Como se observa na Fig. 5.1, o comportamento da TGF em função da corrente média se mostrou bem definido e de maneira proporcional, ou seja, o aumento da corrente implica no aumento da TGF para todas as condições de taxa de fusão e tempo médio de arco aberto avaliadas, com exceção dos ensaios realizados com $T_F = 2,49 \text{ kg/h}$ ($V_a = 5 \text{ m/min}$) e $t_{mAA} = 10 \text{ ms}$, onde houve diminuição da TGF com o aumento de corrente.

Outro fato a se atentar a partir da análise deste gráfico é que, com exceção da condição de $T_F = 1,99 \text{ kg/h}$ ($V_a = 4 \text{ m/min}$) e $t_{mAA} = 20 \text{ ms}$, o fim de uma curva praticamente coincide com o início da próxima, para um mesmo nível de t_{mAA} . Interpreta-se, a partir disso, que em soldagens com o mesmo nível de corrente, porém com diferentes taxas de fusão, a TGF praticamente não se altera, fato que, visualmente, incita uma maior significância da influência da corrente de soldagem do que da taxa de fusão na TGF.

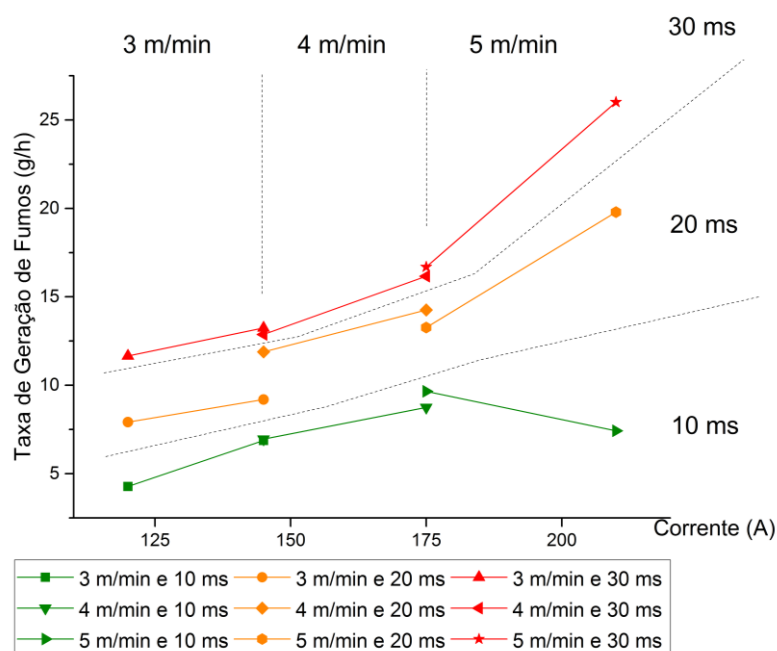


Figura 5.1 – Comportamento da TGF em função de I_m para diferentes condições de T_F e t_{mAA}

É também importante chamar a atenção para o efeito do tempo médio de arco aberto na geração de fumos do processo GMAW com transferência por curto-circuito, que pela Fig. 5.1 se torna clara sua significância, sendo que, para todas as condições ensaiadas, sem exceção, houve o aumento da TGF com o aumento do t_{mAA} . Este efeito se torna ainda mais evidente quando observado na Fig. 5.2, que mostra o comportamento da TGF em função da taxa de fusão (velocidade de alimentação).

Também, a partir do gráfico da Fig. 5.2, nota-se que não há como se ter clareza quanto à influência da taxa de fusão, sob mesma corrente de soldagem, na TGF, o que se opõe aos resultados encontrados por Suga e Kobayashi (1984), no qual constataram que maiores taxas de fusão resultaram em menor geração de fumos.

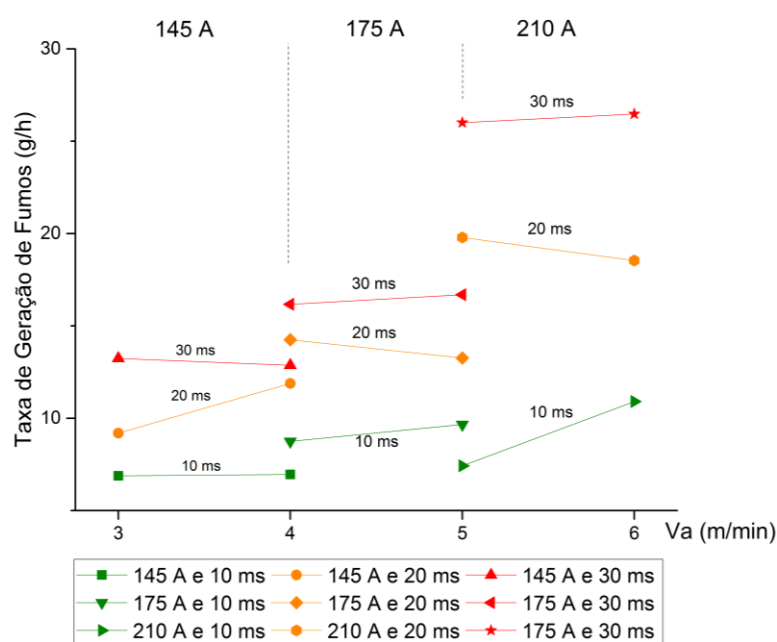


Figura 5.2 – Comportamento da TGF em função de T_F para diferentes condições de I_M e t_{mAA}

Já a Figura 5.3, traz os valores obtidos de TGF em função do tempo médio de arco aberto, por tempo e por massa de arame consumido. A priori convém pontuar que, assim como foi discutido à pouco, na Figura 5.3 (à esquerda), é notória a influência da corrente média, como fator independente da taxa de fusão, na TGF, a

qual aparenta ser ainda maior nas condições de maiores t_{mAA} . Isso, pois, para níveis de corrente semelhantes, não ocorre variação sensível na TGF, mesmo em condições distintas de taxa de fusão.

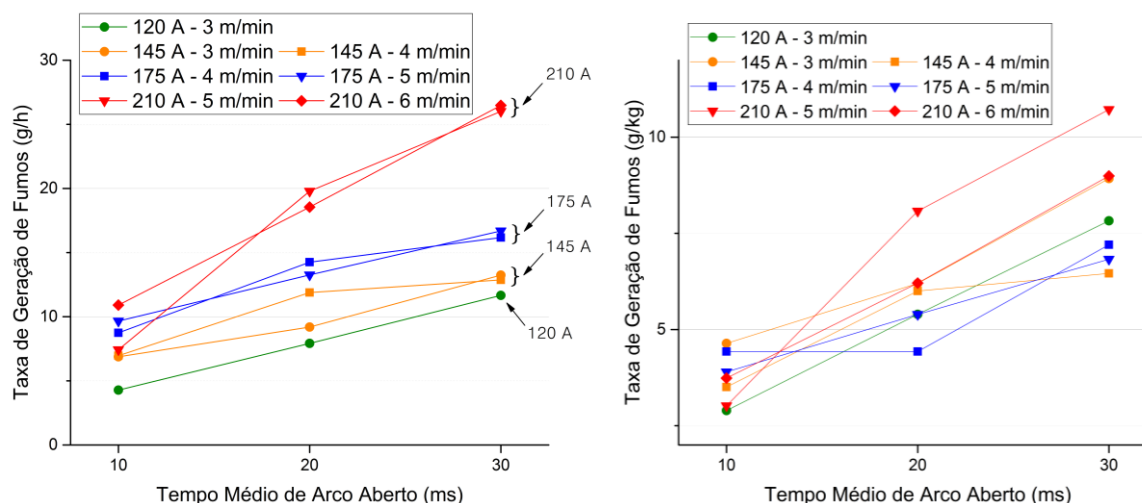


Figura 5.3 – Comportamento da TGF em função de t_{mAA} em g/h (esquerda) e g/kg (direita), para diferentes condições de I_M e T_F

Observa-se nessa figura que existe forte relação entre a quantidade de fumos gerada no processo GMAW com transferência por curto-circuito e o tempo médio de arco aberto, tanto por unidade de tempo, quanto por massa de arame consumida, fato que revela oportuna a escolha deste fator como critério de regulagem de tensão. Há de se reparar em conjunto que, na condição de 210 A, à 5 m/min, com 30 ms de tempo médio de arco aberto, no gráfico da direita - para se ter a dimensão do impacto da geração de fumos também no aspecto de produtividade - mais de 1% da massa de arame consumida se tornou fumos, não tendo sido efetivamente transferida para o cordão de solda.

O comportamento da TGF em função do tempo médio de arco aberto corrobora as conclusões de Chae et al. (2006), conforme discutido anteriormente, reforçando o indicativo de que a formação e emissão de fumos do processo GMAW curto-circuito ocorre prioritariamente durante períodos de arco aberto.

Outro detalhe a ser observado na Fig. 5.3 é que, sob a perspectiva de fumos gerados por unidade de tempo (g/h, à esquerda), as duas condições de soldagem mais severas (5 e 6 m/min a 210 A) produziram praticamente o mesmo volume de

fumos, quando em 20 e 30 ms de t_{mAA} . Contudo, há de se perceber que, neste mesmo nível de corrente, quando analisada a TGF_m (mássica, em g/kg, à direita), vê-se que na condição de 2,49 kg/h (5 m/min) foram gerados mais fumos que na condição de 2,99 kg/h (6 m/min), diferente do que se esperava.

Essa constatação vai em direção contrária à primeira hipótese levantada por Castner (1995), na qual o aumento da TGF em função do aumento da corrente se deveria ao (intrínseco) aumento da taxa de fusão. Por outro lado, este comportamento dá indicativos de que a segunda hipótese deste autor, bem como o levantado por Haidar (1999) teria maior plausibilidade.

De fato, seria fisicamente coerente admitir que, para correntes médias semelhantes, na condição de menor taxa de fusão as gotas seriam expostas à superaquecimento por mais tempo, podendo, efetivamente, atingir temperaturas mais elevadas do que na condição de maior taxa de fusão, implicando em maiores taxas de vaporização, gerando mais fumos por volume de arame fundido.

Além da hipótese de que o aumento da TGF em função do aumento da corrente seja proporcionado pelo aumento da temperatura de superaquecimento na superfície das gotas, pode-se assumir um segundo efeito ligado aos Mecanismos 3 e 4 de formação de fumos, propostos por Gray, Hewitt e Dare (1982), discutidos na revisão bibliográfica do presente trabalho (item 2.4).

O mecanismo 3 consiste na rápida evaporação (chamada de evaporação explosiva pelos autores) na região do empescoçamento da gota, instantes antes de seu destacamento, efeito típico das transferências por curto-circuito e globular. Devido ao aumento da densidade de corrente nessa região, ocorre o que eles chamam de evaporação explosiva (o que se entende por súbitos e potentes jatos de aerossol (spray) metálico a partir daquela região), dando origem a fumos não-fracionados (formados por elementos de baixa volatilidade, como o Fe).

Já o quarto mecanismo se baseia na geração de fumos a partir de pequenas gotículas de metal fundido ejetadas no momento do destacamento da gota. Devido a suas minúsculas dimensões, essas gotas não se tornam respingos, pois, em contato com uma atmosfera oxidante (gases oxidantes presentes no gás de proteção e/ou no próprio ar atmosférico), oxidam-se rapidamente, permanecendo em suspensão.

Este último, também gera fumos não-fracionados e, segundo estes autores, possui contribuição pronunciada na geração de fumos (em massa), uma vez que as

partículas geradas por meio deste mecanismo possuem dimensões muitas vezes superiores às formadas por meio da vaporização de metal.

Isto posto, o aumento da corrente de soldagem, possuiria influência direta na ocorrência destes dois mecanismos, uma vez que aumentaria a evaporação explosiva, no caso do mecanismo 3, devido às altas densidades de corrente, ao passo que tornaria mais caótico o destacamento da gota, no que tange o mecanismo 4, devido ao maior pronunciamento e velocidade com que ocorre o empescoçamento da gota, aumentando o volume de material ejetado (pequenas gotículas) para fora da região protegida.

Sabe-se que estes tipos de mecanismos de geração de fumos são característicos das transferências em modo curto-circuito e globular. Todavia, para que fosse possível atestar a ocorrência de tais mecanismos e suas respectivas contribuições na geração de fumos dos testes executados, seria necessária uma análise qualitativa dos fumos coletados, de modo a se verificar se há maior presença de elementos pouco voláteis (Fe), evidenciando a geração de fumos não-fracionados, em detrimento a elementos mais voláteis (Si, Mn), gerados a partir da vaporização (fumos fracionados).

Em se tratando de regularidade da transferência por curto-circuito, embora não tenha sido objetivo do presente trabalho a otimização dos parâmetros utilizando-se do IV_{cc} como critério, foram realizados seus respectivos cálculos e o devido registro. Assim sendo, considerou-se oportuna, em adição às análises propostas inicialmente, a avaliação do comportamento da TGF em função desse parâmetro. A Figura 5.5 apresenta a dispersão dos resultados dos ensaios de coleta de fumos em função do IV_{cc} , sob as duas óticas de mensuração, mássica e temporal.

Nota-se, neste gráfico, a tendência de aumento da quantidade de fumos gerada, tanto por tempo, quanto por massa de arame consumida, com o aumento do IV_{cc} (transferências de menor regularidade).

Todavia, salienta-se que o comportamento observado na Figura 5.5 já era esperado, porém tem de ser analisado com cautela. Lembra-se aqui que, como exposto na revisão deste trabalho, especialmente no que tange o exposto por Souza (2010), maiores níveis de corrente, inevitavelmente, implicam no aumento do IV_{cc} . Sendo assim, seria bem provável que as maiores TGFs observadas não tenham sido consequência direta da baixa regularidade da transferência metálica naquelas

condições, e sim dos níveis de corrente mais elevados, os quais, naturalmente, apresentaram pior regularidade.

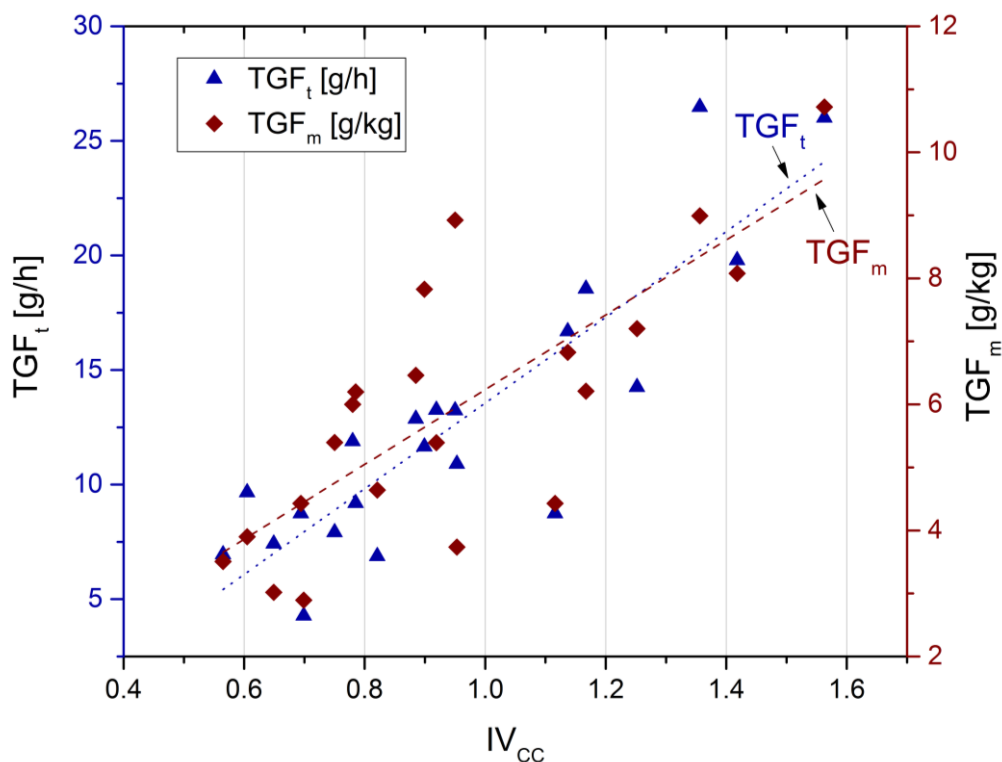


Figura 5.5 – Comportamento da TGF (por tempo, à esquerda, e por massa de arame consumido, à direita) em função do índice de regularidade IV_{cc}

Todavia, salienta-se que o comportamento observado na Figura 5.5 já era esperado, porém tem de ser analisado com cautela. Lembra-se aqui que, como exposto na revisão deste trabalho, especialmente no que tange o exposto por Souza (2010), maiores níveis de corrente, inevitavelmente, implicam no aumento do IV_{cc} . Sendo assim, seria bem provável que as maiores TGFs observadas não tenham sido consequência direta da baixa regularidade da transferência metálica naquelas condições, e sim dos níveis de corrente mais elevados, os quais, naturalmente, apresentaram pior regularidade.

Para contribuir com essa discussão e dar maior suporte no entendimento deste fenômeno, foram avaliados os valores de IV_{cc} em função da corrente de soldagem (Fig. 5.6) e, conforme previsto - e embora não se tenha trabalhado com valores de tensão otimizados para obtenção de menores IV_{cc} 's - notou-se um comportamento que corrobora com os resultados obtidos por Souza (2010), nos

quais foi verificado o aumento do IV_{CC} com o aumento da corrente de soldagem. Frisa-se, em complemento, que, via de regra, as condições de maior t_{mAA} apresentaram IV_{CC} elevado.

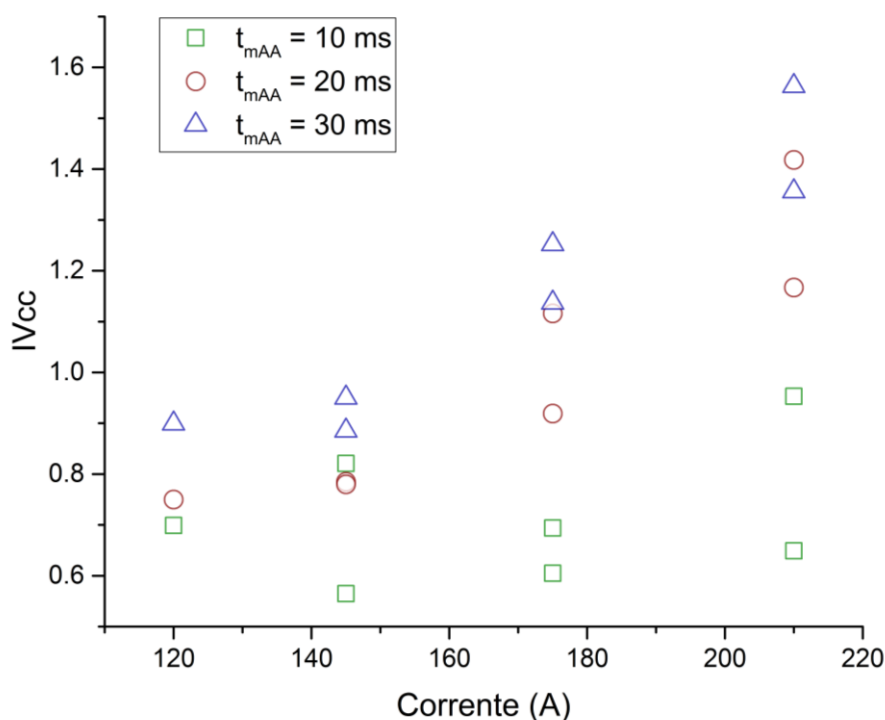


Figura 5.6 – IV_{CC} em função da corrente média de soldagem

Dessa forma, pode-se concluir que o aumento da TGF em função do aumento do IV_{CC} (Fig. 5.5) é fisicamente coerente, uma vez que, nas condições investigadas, os maiores valores de IV_{CC} foram obtidos nos ensaios de maiores níveis de corrente, nos quais, sabidamente, são gerados mais fumos.

5.3. Análises estatísticas

Nesse item são apresentados e discutidos os resultados das análises estatísticas por análise de variância (ANOVA) e modelo linear generalizado (MLG), bem como os gráficos de resíduos e de valores observados vs. preditos.

As Figuras 5.8, 5.9 e 5.10 trazem os resultados da análise de variância (ANOVA) para TGF em função da corrente média, taxa de fusão e tempo médio de arco aberto, respectivamente.

Como se observa na Fig. 5.8, existe uma tendência evidente de aumento da TGF em função do aumento da corrente média. Embora o nível de significância estatística (p) não tivesse apresentado confiabilidade menor que 0,05 ($p = 0,15598$), ainda assim pode-se considerar que o efeito da corrente média seja significativo na TGF.

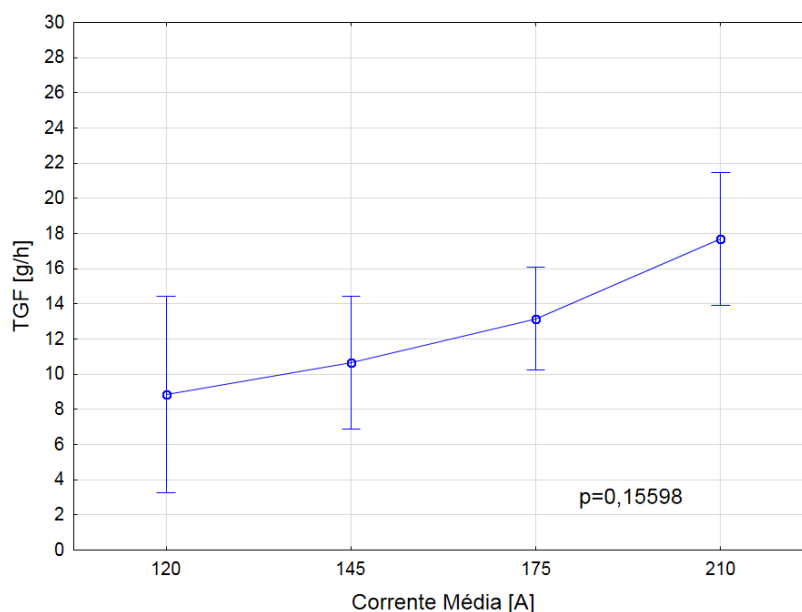


Figura 5.8 – Resultado da ANOVA; TGF em função de I_M

Por outro lado, na Fig. 5.9, a correlação entre a taxa de fusão e a geração de fumos se apresentou quase inexistente, sem tendências claras, apresentando um nível de significância estatística próximo a 0,96, o que evidencia que, *Ad Hoc*, não houve influência significativa desta variável na TGF. A principal justificativa física para tal tendência é o fato de que, embora esteja entrando mais massa no sistema eletrodo+arco+poça, não há aumento de trocas térmicas, haja vista à manutenção da corrente em nível constante.

Corroborando com os efeitos observados por meio da análise gráfica, o nível de significância estatística obtido pela ANOVA da TGF em função do tempo médio de arco aberto se apresentou menor que 0,001 (Fig. 5.10). Assim, conforme observado e discutido no item anterior, existe forte influência do t_{mAA} na geração de fumos do processo GMAW com transferência por curto-circuito. Poder-se-ia até ser dito que, para as condições estudadas neste trabalho, tal variável se faz um fator governante na emissão e dispersão de fumos metálicos.

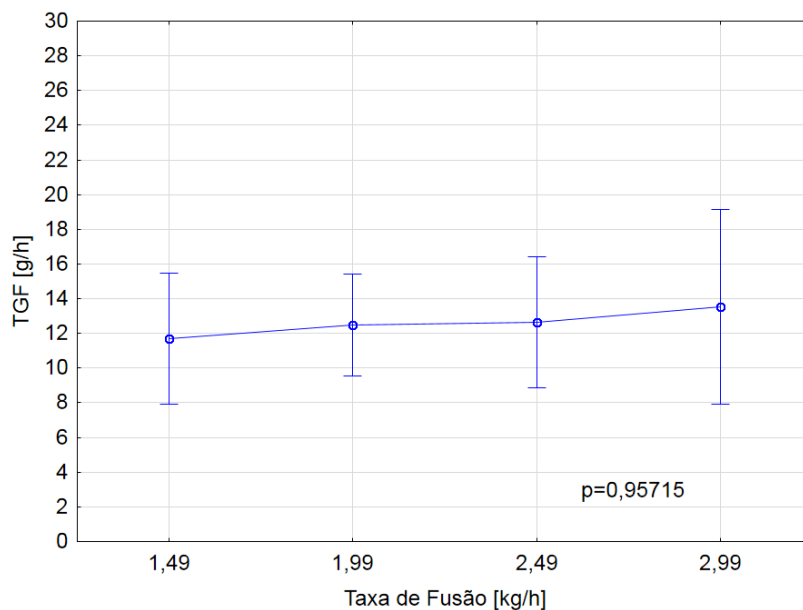


Figura 5.9 – Resultado da ANOVA; TGF em função de T_F

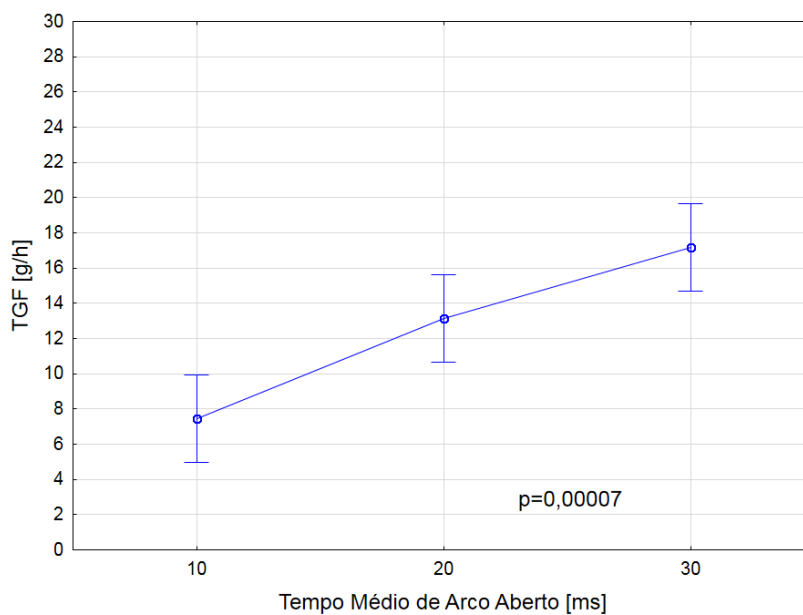


Figura 5.10 – Resultado da ANOVA; TGF em função de t_{mAA}

As Figuras 5.11 e 5.12 trazem os resultados do ajuste feito por meio do modelo linear generalizado (MLG) para a TGF em função da corrente média, na primeira, correlacionada ao tempo médio de arco aberto e, na segunda, à taxa de fusão.

Pela Figura 5.11, percebe-se que, como levantado no item anterior, existe forte interdependência entre a corrente e o tempo médio de arco aberto na TGF, uma vez que os efeitos da corrente na geração de fumos foram substancialmente maiores quando nas condições de maiores tempos médios de arco aberto. Para essa análise, o nível de significância estatística foi de 0,01115 (confiabilidade menor que 0,05), endossando a conclusão obtida acima.

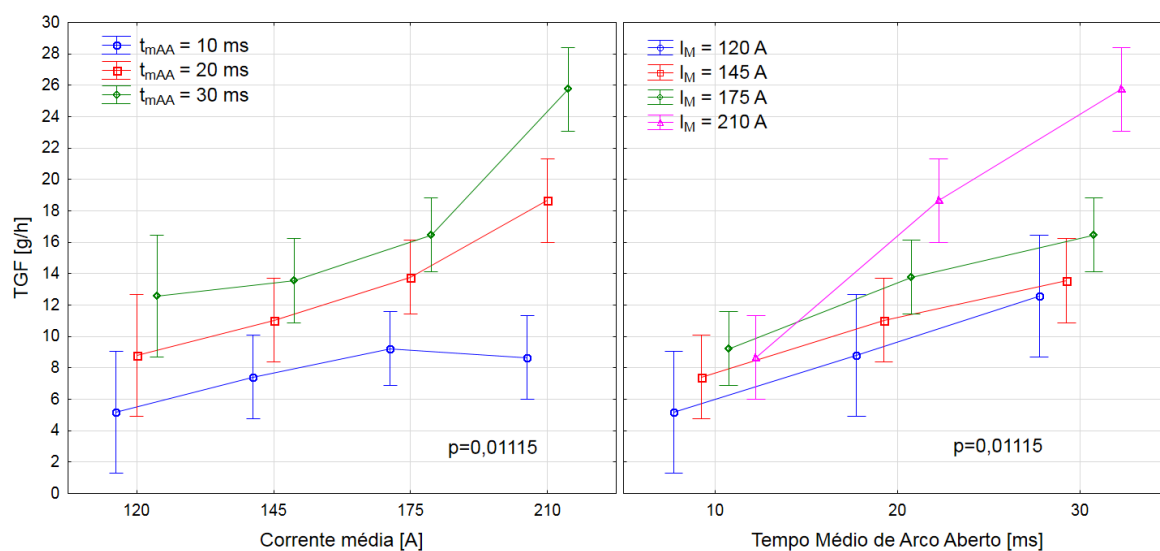


Figura 5.11 – Resultado do ajuste por MLG de TGF em função de I_M correlacionada a t_{mAA}

Em contrapartida, tem-se que praticamente não houve correlação entre a taxa de fusão e a corrente de soldagem na geração de fumos (Fig. 5.12). O que se interpreta a partir disso é que, conforme proposto no presente trabalho, conseguiu-se avaliar de forma independente as influências que ambos os fatores exerceram na TGF, apresentando um nível de significância estatística (p) de 0,95693.

Por último, as Figuras 5.13 e 5.14 apresentam os gráficos de valores observados versus valores preditos e valores observados versus resíduos, respectivamente. Nota-se, por essas duas figuras, que o modelo estatístico aplicado mostrou boa representatividade dos resultados obtidos, sem a presença de erro sistemático (Fig. 5.11).

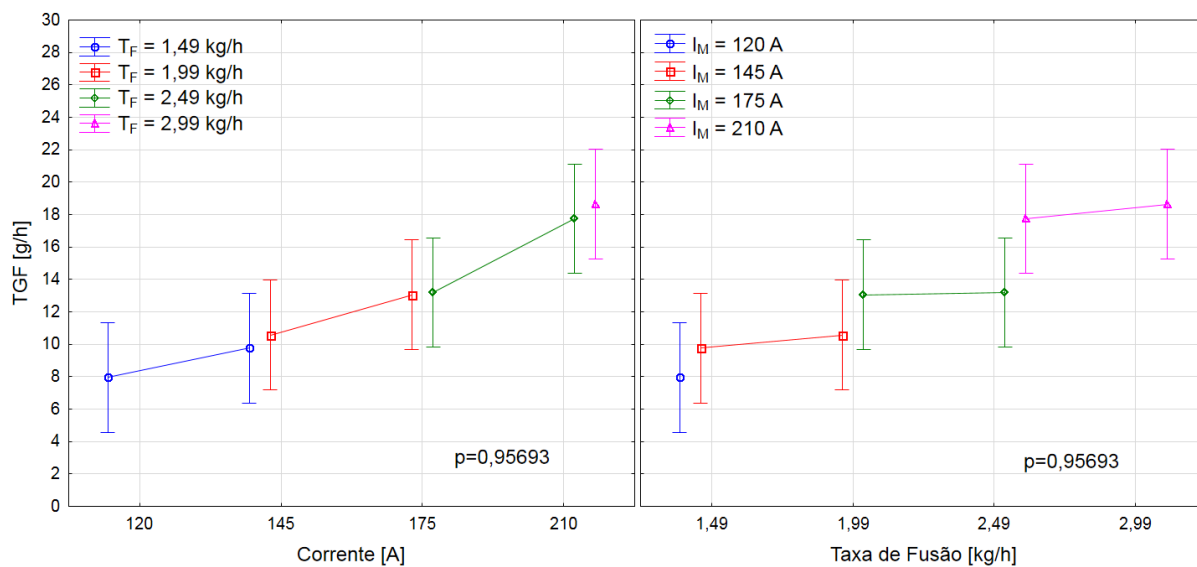


Figura 5.12 – Resultado do ajuste por MLG de TGF em função de I_M correlacionado a T_F

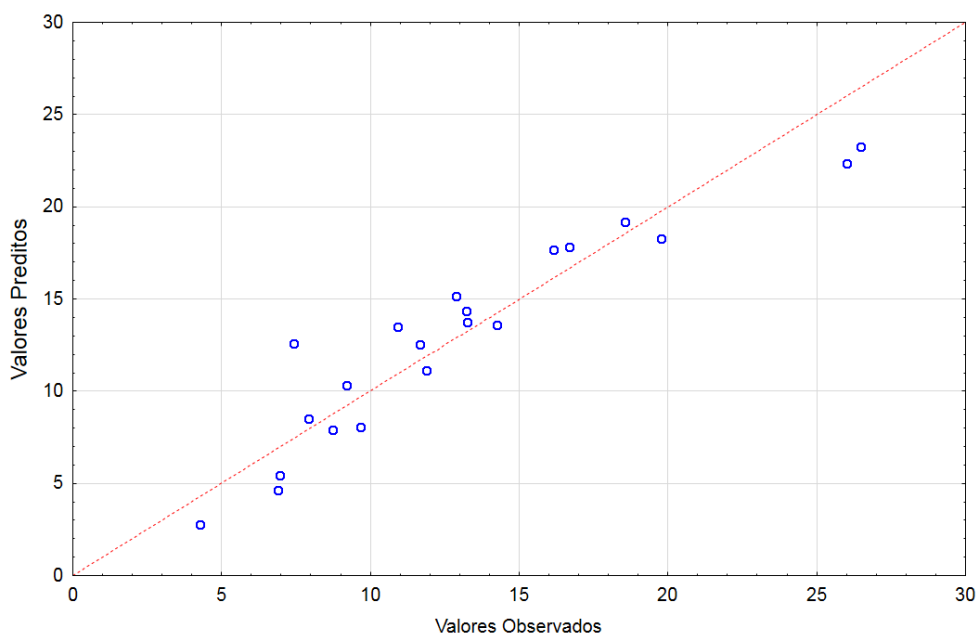


Figura 5.13 – Valores observados versus valores preditos

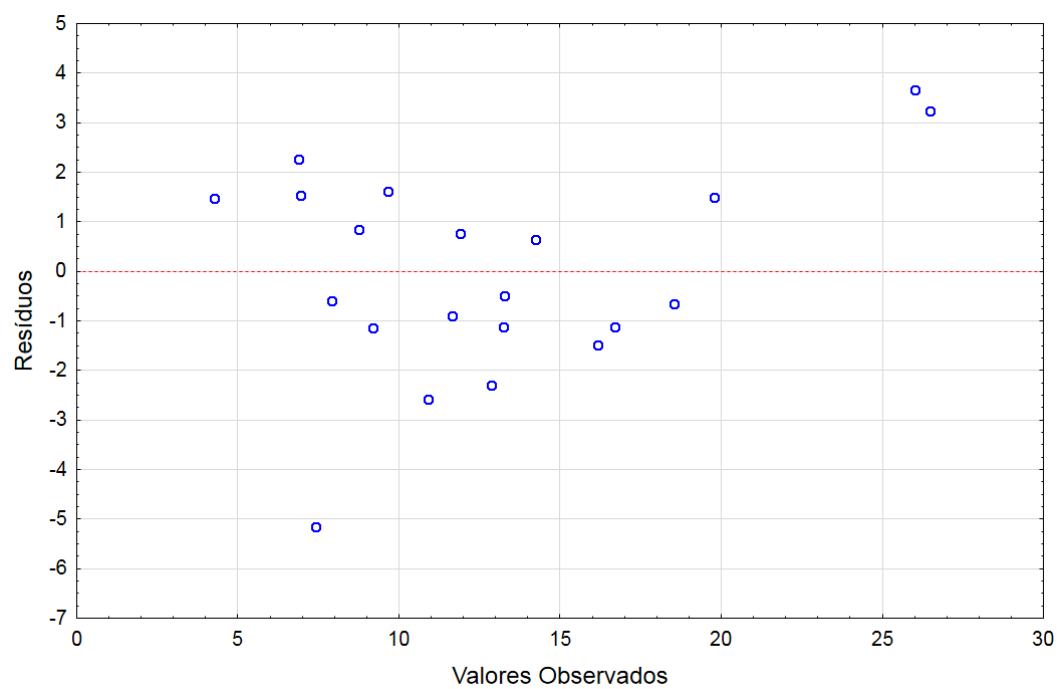


Figura 5.14 – Valores observados versus residuos

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

Obtidos os resultados dos ensaios de coleta de fumos e feitas as análises gráficas e estatísticas, é possível concluir que:

1. Para as condições testadas, a corrente de soldagem, como variável independente, mostrou maior influência na TGF, que a taxa de fusão, tornando mais plausível a justificativa do aumento da TGF em função do aumento da corrente, propriamente dita, no processo GMAW com transferência por curto-circuito;
2. Este efeito (corrente) ficou ainda mais pronunciado nos testes realizados nas condições de maior t_{mAA} . Isso se deve ao fato de que, quando se aumenta o t_{mAA} , tem-se maior tempo para que os efeitos da corrente de soldagem ocorram, no caso, o superaquecimento da superfície da gota, efeito que ficou mais claro após a realização da análise estatística pelo MLG, o qual confirmou a forte interdependência destes fatores na TGF;
3. Por sua vez, o tempo médio de arco aberto se mostrou a variável de influência mais significativa na TGF, sob todas as condições de corrente e taxa de fusão testadas e acredita-se que se deva a três fatores:
 - a) A variação de t_{mAA} foi possível por meio do ajuste de tensão na fonte de soldagem, de modo que, quanto maior a tensão de regulagem, maiores eram os tempos médios de arco aberto. Assim, como discutido na revisão deste trabalho, o aumento da tensão aumenta a velocidade e turbulência do jato de plasma, gerando mais fumos;
 - b) Outra explicação seria baseada nos mecanismos de geração de fumos, uma vez que a fonte principal de vaporização de metal seja o arco elétrico, quanto mais tempo ele “arder” maior será a quantidade de metal vaporizado, e assim, mais fumos, corroborando com os resultados obtidos por Chae et al. (2006);

- c) Por último, maiores tempos de arco aberto implicam em maior crescimento da gota na ponta do eletrodo, o que, conforme mostrado no trabalho de Bosworth e Deam (2000), acarretaria em maiores TGF's;
4. Embora tenha se notado certa tendência de aumento de TGF em função do aumento da taxa de fusão, essa influência não se mostrou estatisticamente significativa após a realização da ANOVA e análises por meio do MLG;
 5. Concluiu-se também que quanto menor a regularidade da transferência metálica (e conseqüentemente, maior o IV_{CC}), maior a geração de fumos; contudo, deve-se fazer a ressalva de que os maiores valores de IV_{CC} foram obtidos nas condições de soldagem de maiores níveis de corrente;
 6. Por fim, por meio dos resultados obtidos e analisados, não seria sensato constatar que a regularidade da transferência por curto-circuito exerce influência na geração de fumos do processo GMAW, uma vez discutido que, tal aumento do IV_{CC} é essencialmente consequência do aumento da corrente de soldagem, o que, como mostrado, é uma variável que exerce influência significativa na geração de fumos;
 7. Como conclusão adicional, tem-se que, para as condições estudadas, a utilização de maiores DBCP's proporcionou maiores taxas de fusão (portanto, maior produtividade) para um mesmo nível de corrente média. Essa prática pode representar ganhos de produtividade, reduzindo, ao mesmo tempo, a exposição de soldadores (e demais colaboradores que dividam o espaço de trabalho onde ocorrem atividades de soldagem) aos fumos gerados pelo processo.

CAPÍTULO VII

PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Buscando ampliar o alcance da análise proposta neste trabalho, bem como refinar o entendimento sobre a geração de fumos no processo GMAW com transferência por curto-circuito, seguem sugestões de investigações e análises possíveis de serem feitas em trabalhos futuros:

1. Investigar a influência do IVcc (regularidade) na geração de fumos, porém buscando variá-lo sem que seja alterada a corrente de soldagem;
2. Realizar análises qualitativas de fumos para o envelope operacional proposto neste trabalho, a fim de identificar e quantificar os elementos químicos e substâncias que compõem tais fumos, permitindo identificar a origem (mecanismo) de emissão de fumos;
3. Realizar medições de temperatura das gotas via pirometria (ou técnicas conexas), com objetivo de confrontar os resultados com a análise qualitativa e verificar a influência da temperatura na presença de elementos voláteis (como Si, Mn e Cr) nos fumos;
4. Realizar filmagens de alta velocidade, sob condições similares às utilizadas por Chae et. al (2006), como tentativa para observar a ocorrência da emissão de fumos por meio dos Mecanismos 3 e 4, propostos por Gray, Hewitt e Dare (1982), citados na revisão bibliográfica deste trabalho, correlacionando-os, ao verificar sua ocorrência, com a presença e teor de elementos pouco voláteis (Fe e Mo) na composição dos fumos coletados;
5. Levantar envelope operacional e investigar a influência da corrente, taxa de fusão e tempo médio de arco aberto sobre a TGF utilizando o CO₂ como gás de proteção;
6. Levantar envelope operacional e investigar a influência da corrente, taxa de fusão e tempo médio de arco aberto sobre a TGF utilizando arame-eletrodo de 1,00 mm de diâmetro nominal, pois se valendo de um eletrodo de menor diâmetro,

conseguir-se-ia maiores variações de corrente para um mesmo nível de taxa de fusão, uma vez que o efeito resistivo relacionado à variação da DBCP se faz mais sensível para eletrodos de menor diâmetro;

7. Levantar envelope operacional e investigar a influência da corrente, taxa de fusão e tempo médio de arco aberto sobre a TGF utilizando arames-eletrodos de aços inox, com objetivo de analisar quantitativa e qualitativamente, observando-se o comportamento da emissão de Cr^{VI} (cromo hexavalente) e a presença de elementos pouco voláteis (Fe, Ni e Mo), em função das variáveis investigadas.

CAPÍTULO VIII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS F1.2**: Laboratory Method for Measuring Fume Generation Rates and Total Fume Emission of Welding and Allied Processes. Miami, 2006. 10 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 800**: Standard Specification for Glass Fiber Blanket Insulation. West Conshohocken, 1994. 6 p.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12543**: Equipamentos de Proteção Respiratória – Classificação. Rio de Janeiro, 2017, 44 p.

BENEDETTI FILHO, E.; FERNANDES, D. B.; VILARINHO, L. O., **Avaliação da Influência da Taxa de Fusão e do Comprimento do Arco na Emissão de Fumos no Processo MIG/MAG com Transferência Goticular**, XLIII Consolda - Congresso Nacional de Soldagem, Associação Brasileira de Soldagem, 2017, Joinville – SC, Anais em CD.

BOSWORTH, M. R.; DEAM, R. T., Influence of GMAW Droplet Size on Fume Formation Rate. **J. Phys. D: Appl. Phys**, v.33, p. 2605–2610, 2000. DOI <https://doi.org/10.1088/0022-3727/33/20/313>

CASTNER, H.R., Gas Metal Arc Welding Fume Generation using Pulsed Current. **Welding Journal**, January, v.74, n.2, p. 59-s - 68-s, 1995.

CHAE, H. et al., Fume Generation Behaviors in Short Circuit Mode during Gas Metal Arc Welding and Flux Cored Arc Welding. Japan Institute of Metals, **Materials Transactions**, v.47, n.7, p.1859-1863, 2006. DOI <https://doi.org/10.2320/matertrans.47.1859>

DEAM R. T.; SIMPSON S.; HAIDAR J., A semi-empirical model of the fume formation from gas metal arc welding. **J. Phys. D: Appl. Phys**, v.33, p. 1–9, 2000. DOI <https://doi.org/10.1088/0022-3727/33/11/320>

FERNANDES, D. B.; SCOTTI, A; VILARINHO, L. O., **Procedimento para o Ensaio Laprosolda de Geração de Fumos em Soldagem MIG/MAG**. 14/2009b, v.9-1, 13 p., Uberlândia, 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, usados Consumível para Aço Estrutural**. 2010. 129 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

GRAY, C. N.; HEWITT, P. J., **Control of particulate emissions from electric arc welding by process modification**. Occupational Hygiene, Annals, p. 431-438, 1982.

GRAY, C. N.; HEWITT, P. J.; DARE, P. R. M., New approach would help control welding fumes at source, Part two: MIG fumes. **Welding And Metal Fabrication**, October, p.393-397, 1982.

GRAY, C. N.; HEWITT, P. J.; HICKS R., **The effect of oxygen on the rate of fume formation in metal inert gas welding arcs**. Weld Poll Chemistry and Metallurgy, an International Conference, v.1, Annals, April, p 167-176, 1980.

HAIDAR, J., An Analysis of Heat Transfer and Fume Production in Gas Metal Arc Welding. III. **J. Appl. Phys.**, v.85, n.7, p. 3448-3459, 1999. DOI <https://doi.org/10.1063/1.370500>

HEILE, R. F.; HILL, D. C., Particulate fume generation in arc welding processes. **Welding Journal**, v.54, n.7, p. 201s-210s, 1975.

JENKINS, N. T., **Welding Fume Formation: A Doctoral Proposal**. 1999. 53 p. Department of Materials Science and Engineering - Massachusetts Institute Of Technology, Massachusetts.

JENKINS, N. T.; EAGER, W., Fume formation from spatter oxidation during arc welding. **Science and Technology of Welding and Joining**, v.10, n.5, p. 537-543, 2005. DOI <https://doi.org/10.1179/174329305X48310>

JOHANSSON, G.; MALMQVIST, K.; BOHGARD, M.; AKSELSSON, R., **Characteristics of Welding Fumes**. 1981. 33 p., Research Report - Lund University, Lund.

KAPLAN S. D., **Effects of Welding on Health V**. Safety and Health Committee, American Welding Society, Miami, ISBN: 0-87171-275-X, Miami, 1986, 21 p.

MA, J.; APPS, R. L., MIG Transfer discovery of importance to industry. **Welding and Metal Fabrication**, September, p. 307-316, 1982.

MENESES, V. A.; GOMES, J. F. P.; SCOTTI, A., The effect of metal transfer stability (spattering) on fume generation, morphology and composition in short-circuit MAG welding. **Journal of Materials Processing Technology**, v.214, p. 1388-1397, 2014. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.02.012>

MILLER. Miller PipePro 450 RFC - **Manual do usuário**. Setembro, 64 p., 2007.

NORRISH, J., Advanced welding process. **IOP Publishing Ltd**, ISBN: 0-85274-325-4, 375 p., 1992.

PIRES, I.; QUINTINO, L.; MIRANDA R. M., Analysis of the influence of shielding gas mixtures on the gas metal arc welding metal transfer modes and fume formation rate. **Materials and Design**, v.28, p. 1623-1631, 2007. DOI <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.02.012>

QUIMBY, B.J.; ULRICH, G.D., Fume Formation Rates in Gas Metal Arc Welding. **Welding Journal**, April, p. 142-149, 1999.

ROSADO, T. M., **Inovação do Processo MIG/MAG – Análise de Produtividade e Emissão de Fumos**. 2008. 66 p. Dissertação de Mestrado – Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

SCOTTI, A.; MENESES, V., Governing parameters affecting fume generation in short-circuit MAG welding. **Weld World**, v.58, p. 367–376, 2014. DOI <https://doi.org/10.1007/s40194-014-0122-2>

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V., **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**. São Paulo, Artliber Editora, 2008, 284 p.

SOUZA, D., **Levantamento de mapas operacionais de transferência metálica para soldagem MIG/MAG de aço carbono na posição plana**. 2010. 304 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SUGA, T.; KOBAYASHI, M., Fume generation in CO₂ arc welding by solid wire. **Japanese Welding Society Papers Collection**, v.2, n.2, p. 22-29, 1984. DOI <https://doi.org/10.2207/qjjws.2.638>

THORNTON, M.; STARES, L., Analysis of particulate fume generation rates from gas metal arc welding. **Welding Review International**, November, v.13, n.4, p 363 – 365, 1994.

VILARINHO, L. O., Modos fundamentais de transferência metálica: naturais e controlados. **Revista da Soldagem**, Ano III, n.10, Maio, p. 14-19, 2007.

XIN, H.; GENG, Z.; NORTH, T. H., Fume generation during solid and MetalCored wire welding. **Welding Journal's Welding Research Supplement**, July, p. 173-183, 2001.

YAMAZAKI, K.; YAMAMOTO, E.; SUZUKI, K.; KOSHIISHI, F.; ONO, K.; TASHIRO, S.; TANAKA, M.; NAKATA, K., Effects of welding process parameters on fume emission in GMAW. **IIW Doc. XII-1922-07**, 8 p., 2007.

ZAKHARI, S.; STRANGE, J., **Effects of Welding on Health III**. Safety and Health Committee, American Welding Society, Miami, ISBN: 0-87171-226-1, 1983, 21 p.

ZHOU, S.; NORRISH, J.; CHEN, Z., **Influence of different metal transfer modes on welding fume generation during gas metal arc welding**. Proceedings of Materials 98, The Biennial Conference of the Institute of Materials Engineering, University of Wollongong, 1998, July, p. 295–300, Wollongong.

ZIMMER, A. T.; BISWAS, P., Characterization of the aerosols resulting from arc welding processes. **Journal of Aerosol Science**, v.32, p. 993–1008, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(01\)00035-0](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(01)00035-0)

APÊNDICE I – SINAIS ELÉTRICOS E DE VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO DOS ENSAIOS VÁLIDOS

A partir do apresentado na Tab. 5.1, seguem os respectivos sinais elétricos de tensão e corrente, além da velocidade de alimentação, monitorados em cada teste.

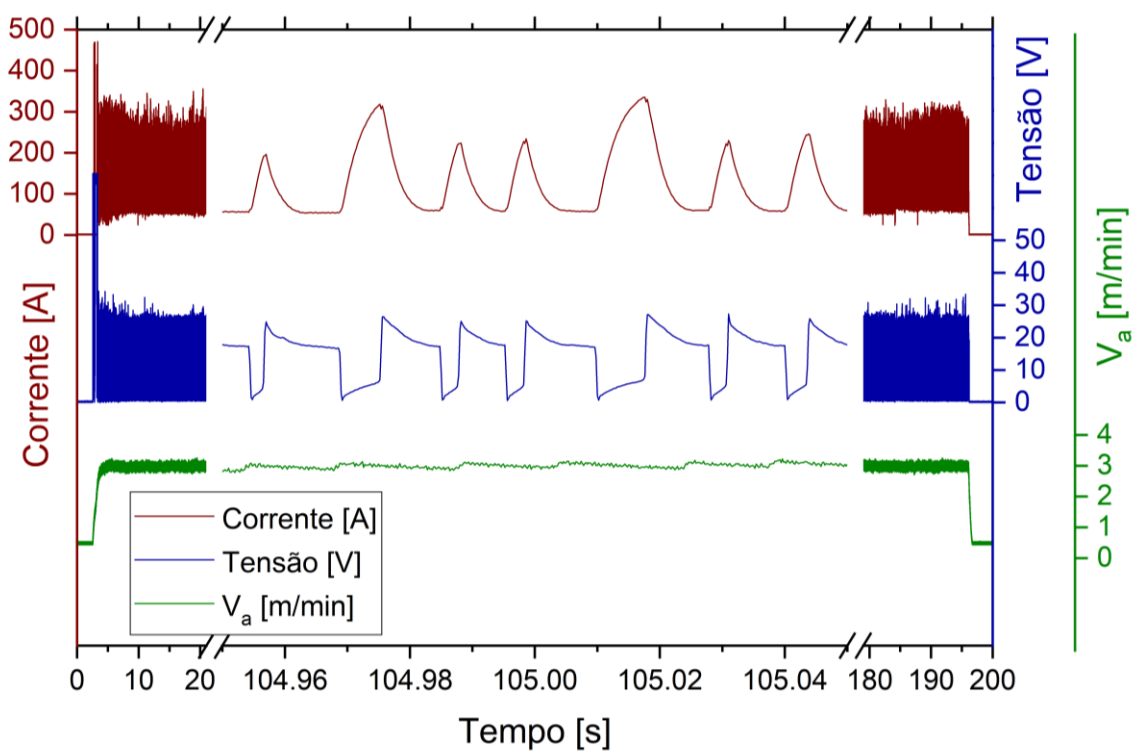


Figura A.1 – Sinais monitorados para o Teste FG_15_120_10-1

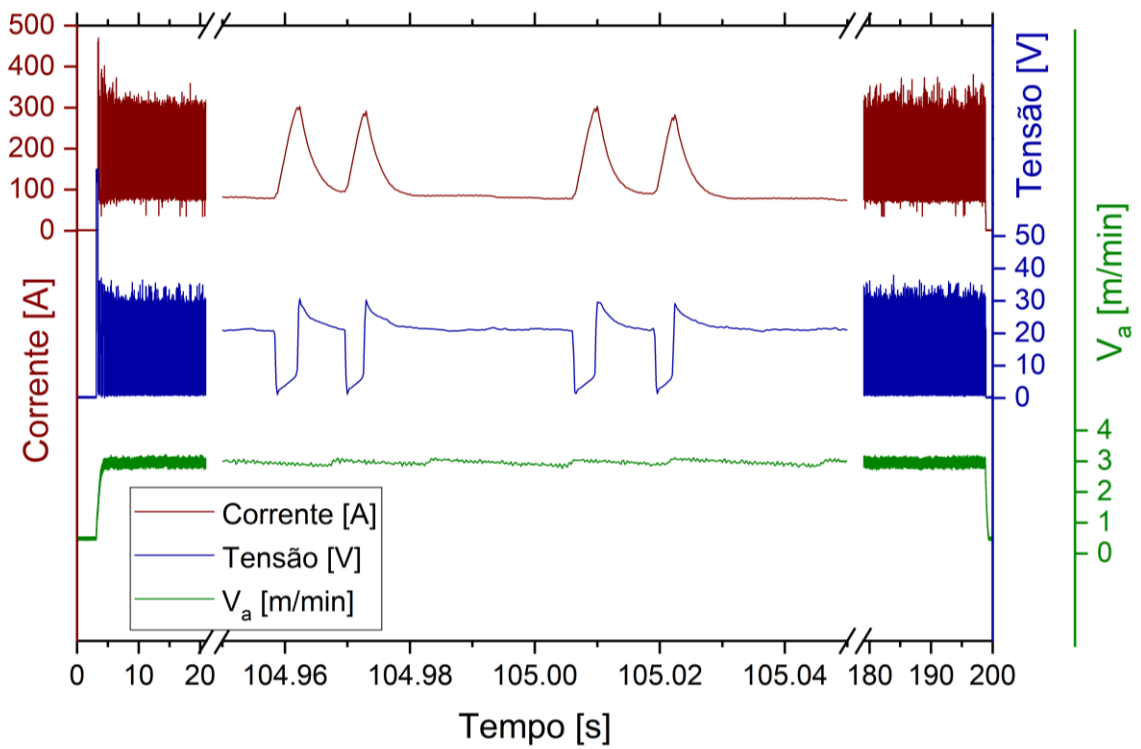


Figura A.2 – Sinais monitorados para o Teste FG_15_120_20-1

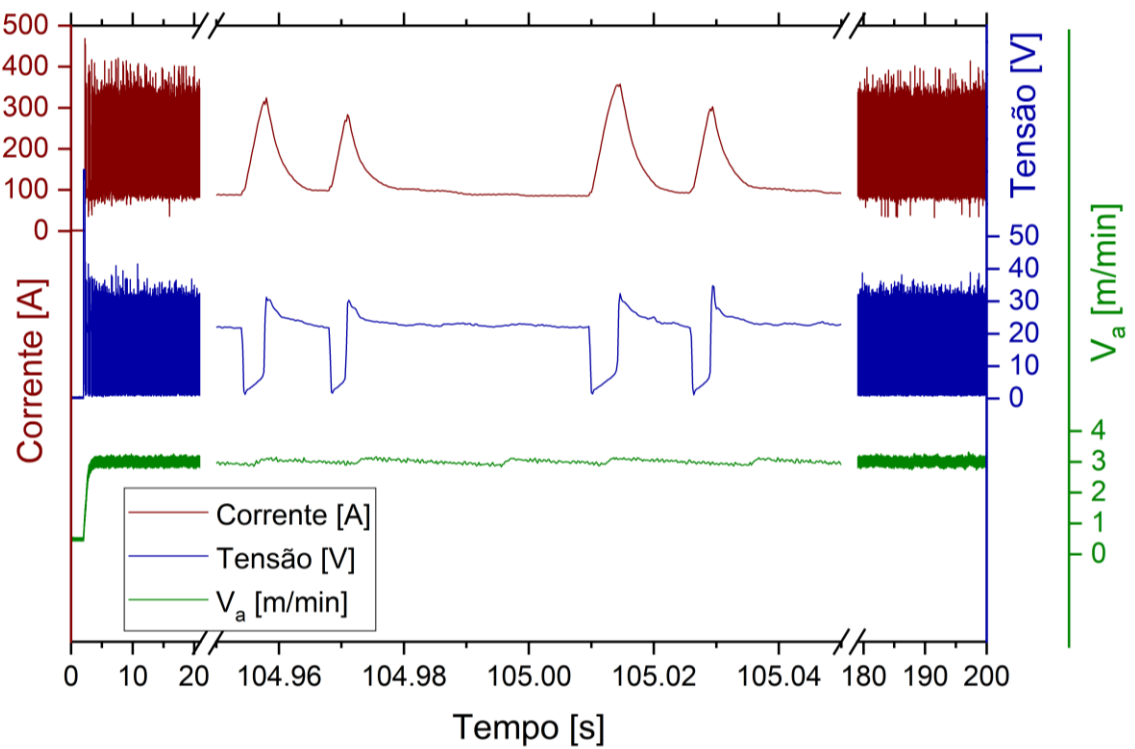


Figura A.3 – Sinais monitorados para o Teste FG_15_120_30-1

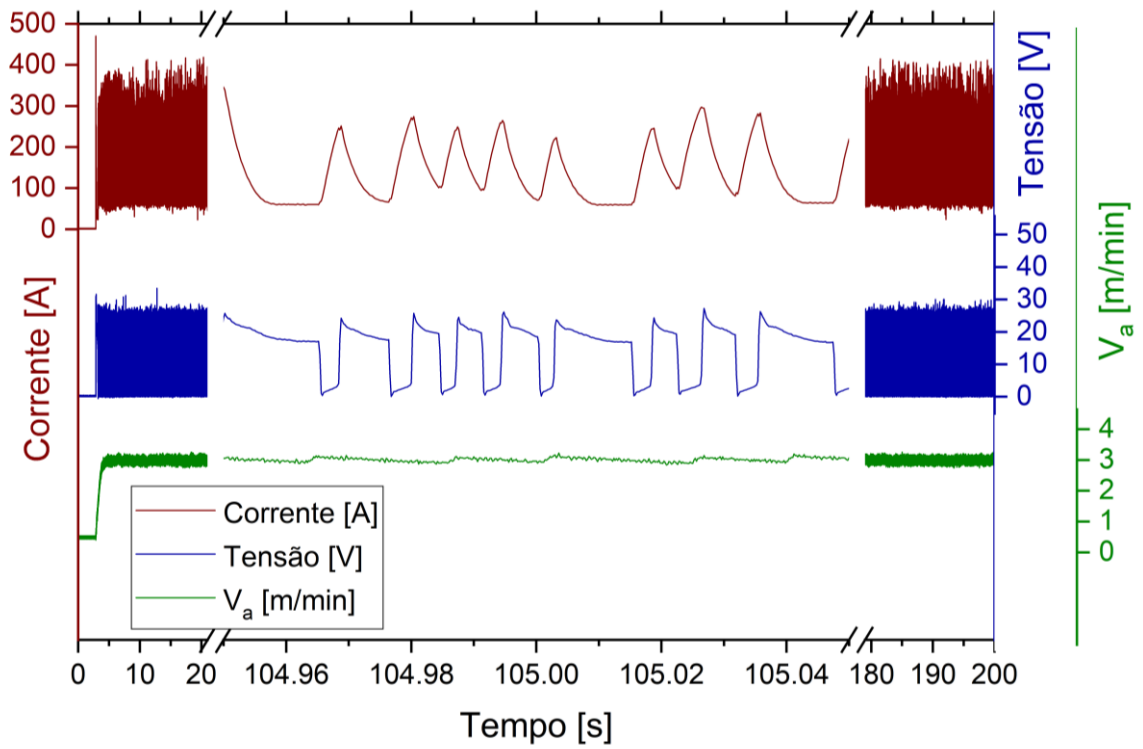


Figura A.4 – Sinais monitorados para o Teste FG_15_145_10-1

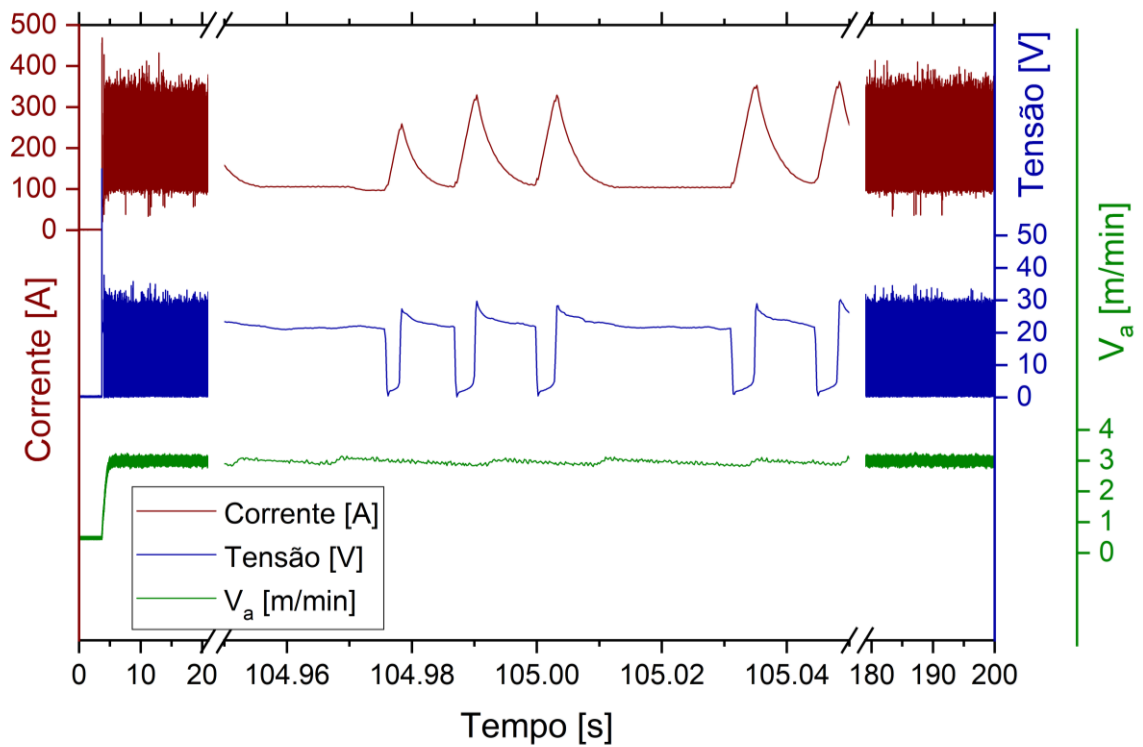


Figura A.5 – Sinais monitorados para o Teste FG_15_145_20-1

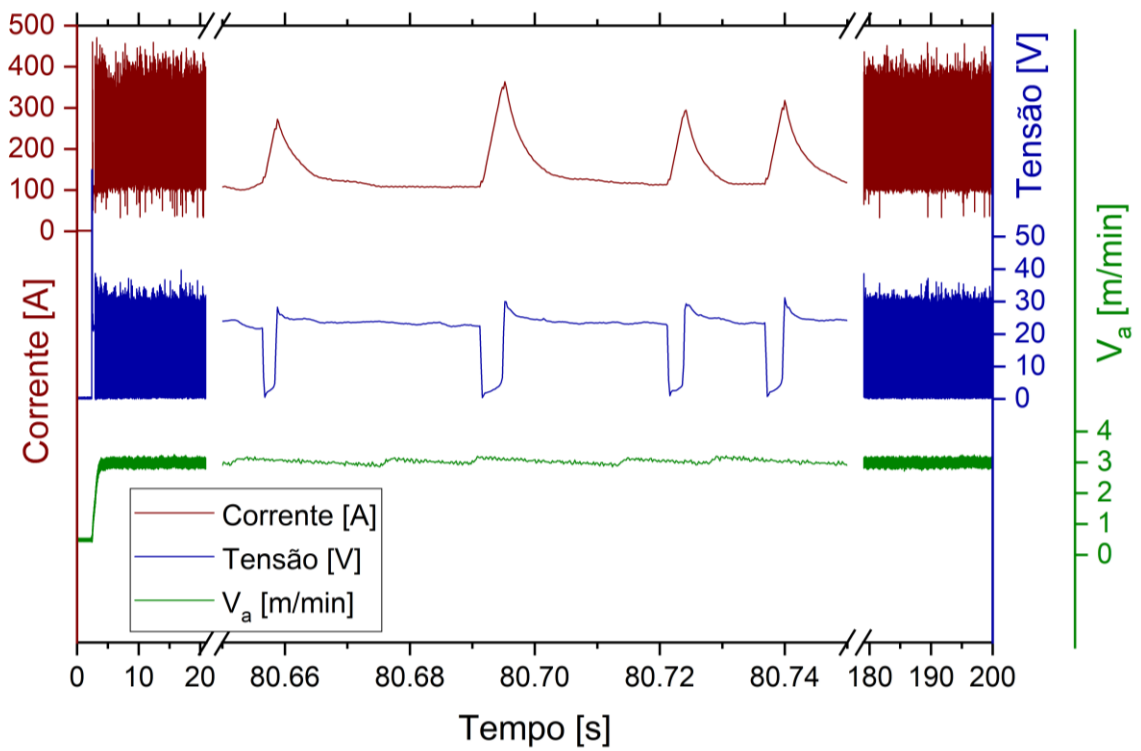


Figura A.6 – Sinais monitorados para o Teste FG_15_145_30-1

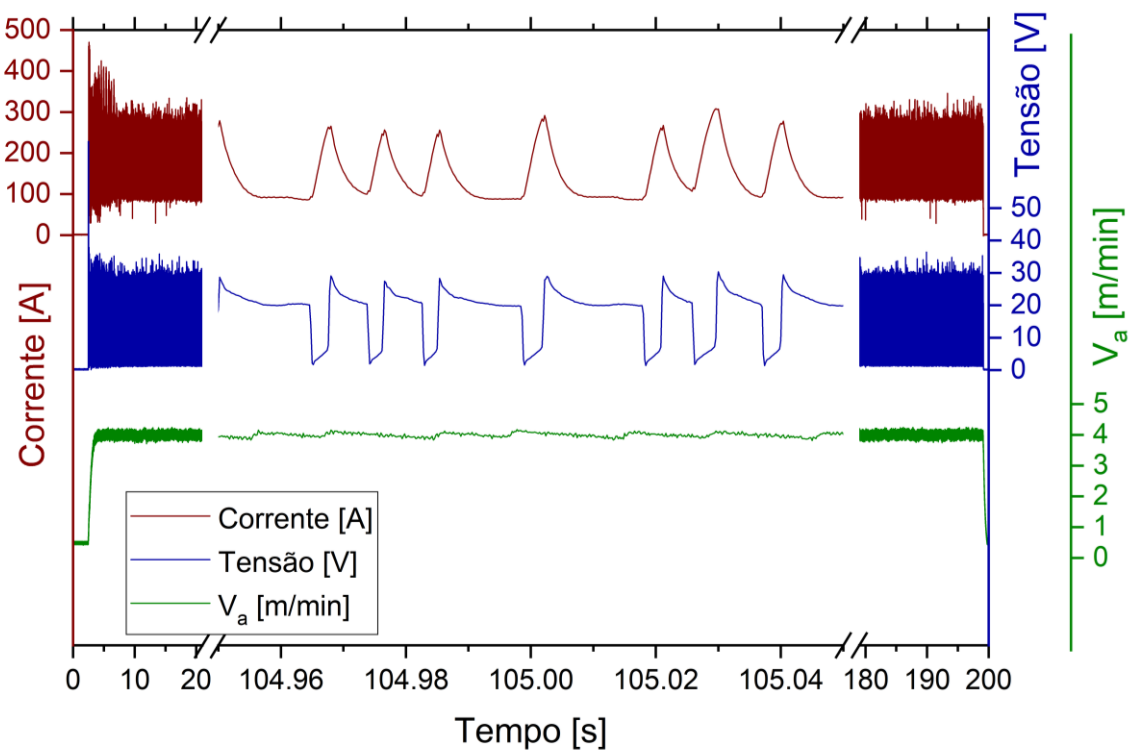


Figura A.7 – Sinais monitorados para o Teste FG_20_145_10-3

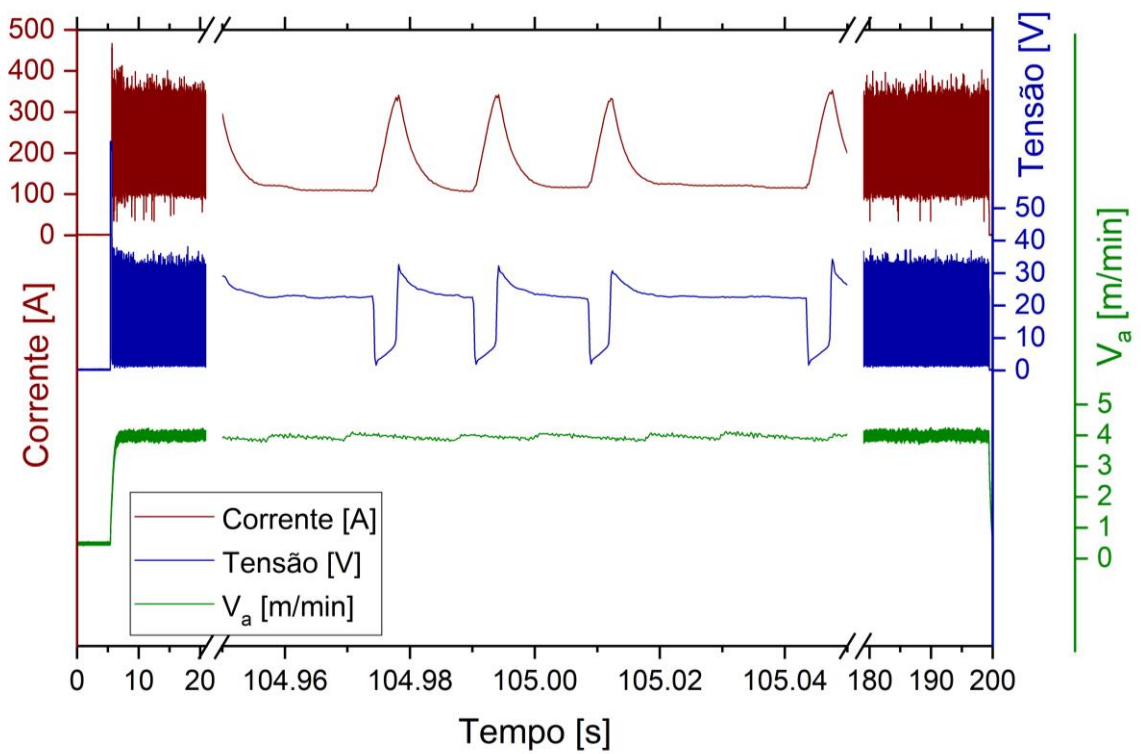


Figura A.8 – Sinais monitorados para o Teste FG_20_145_20-2

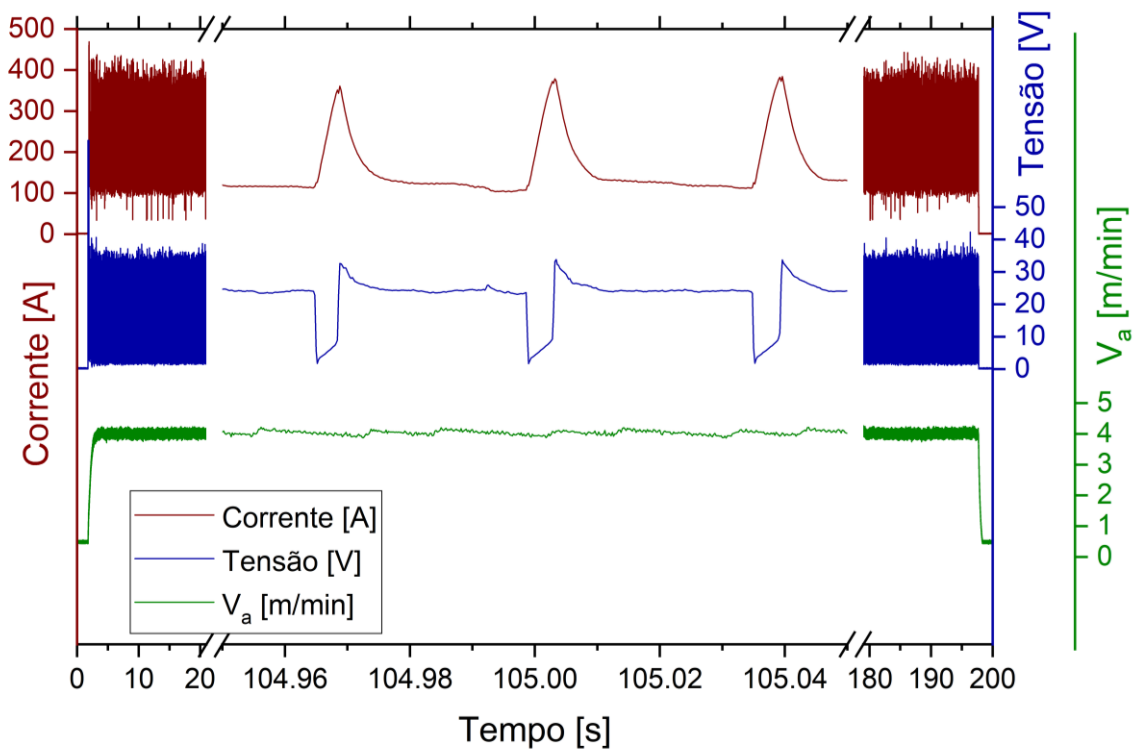


Figura A.9 – Sinais monitorados para o Teste FG_20_145_30-1

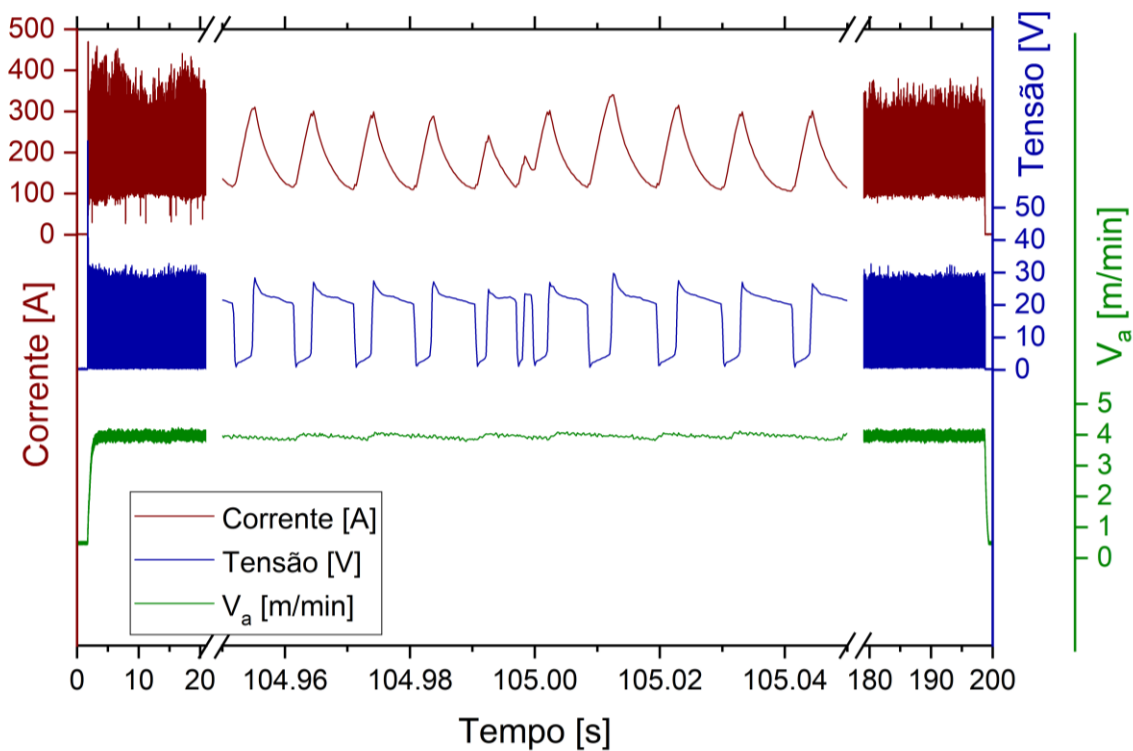


Figura A.10 – Sinais monitorados para o Teste FG_20_175_10-3

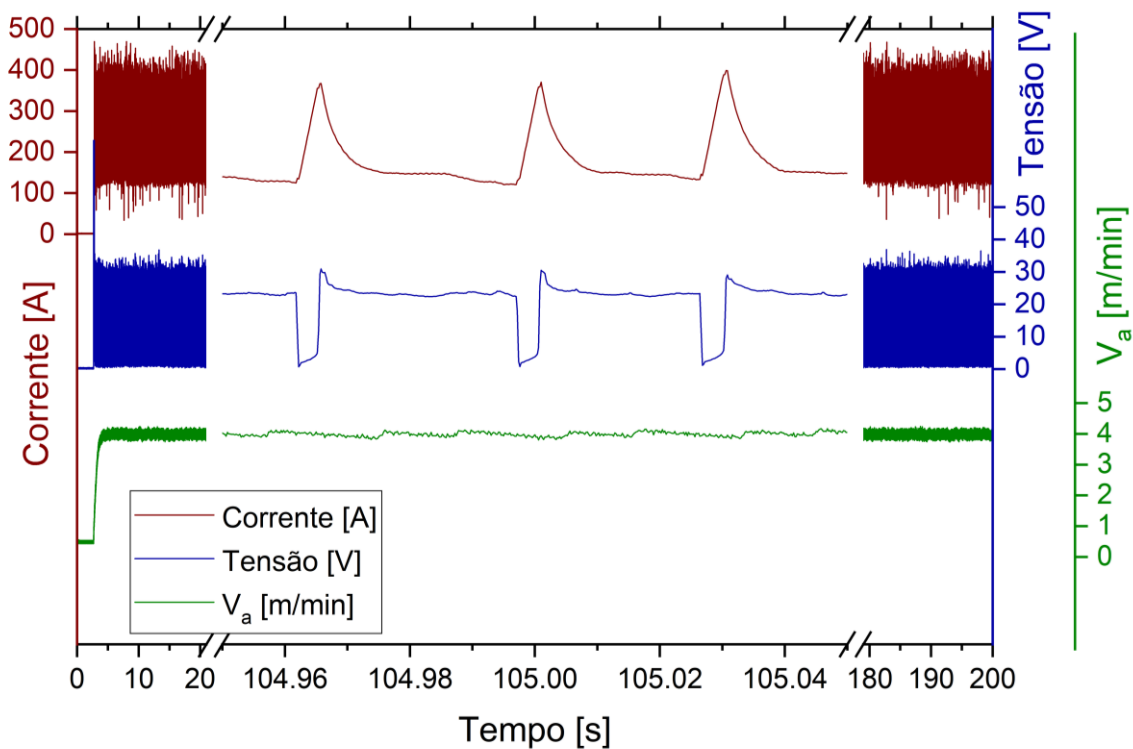


Figura A.11 – Sinais monitorados para o Teste FG_20_175_20-2

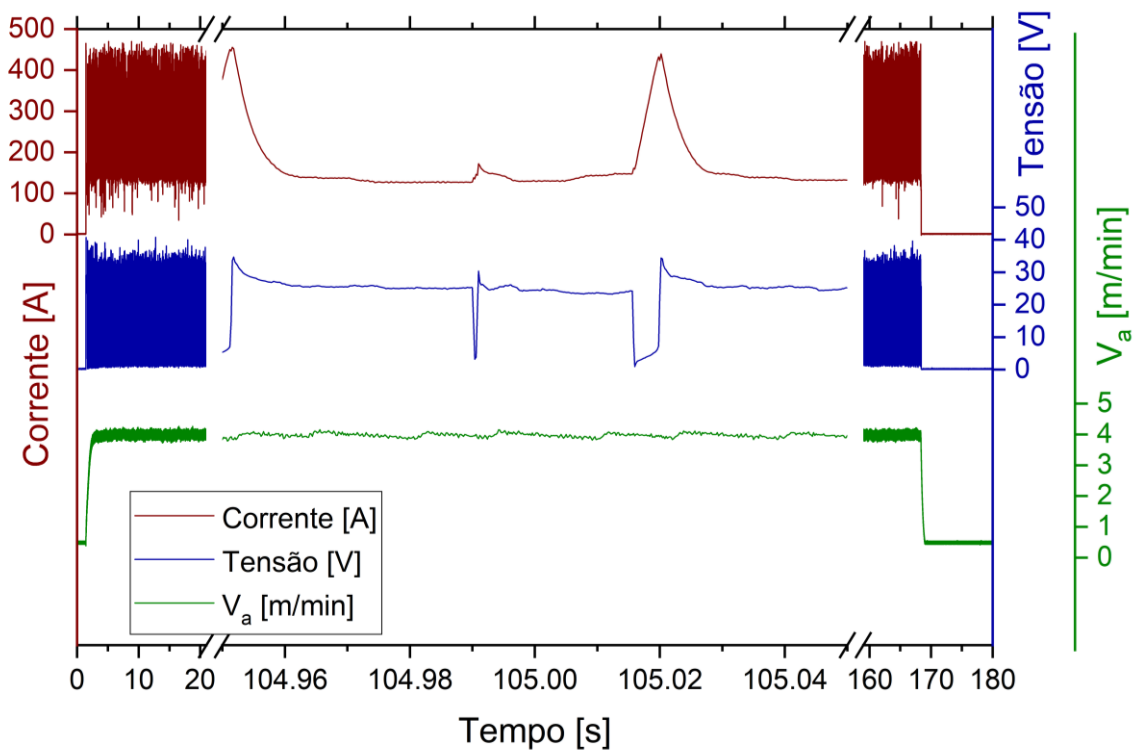


Figura A.12 – Sinais monitorados para o Teste FG_20_175_30-4

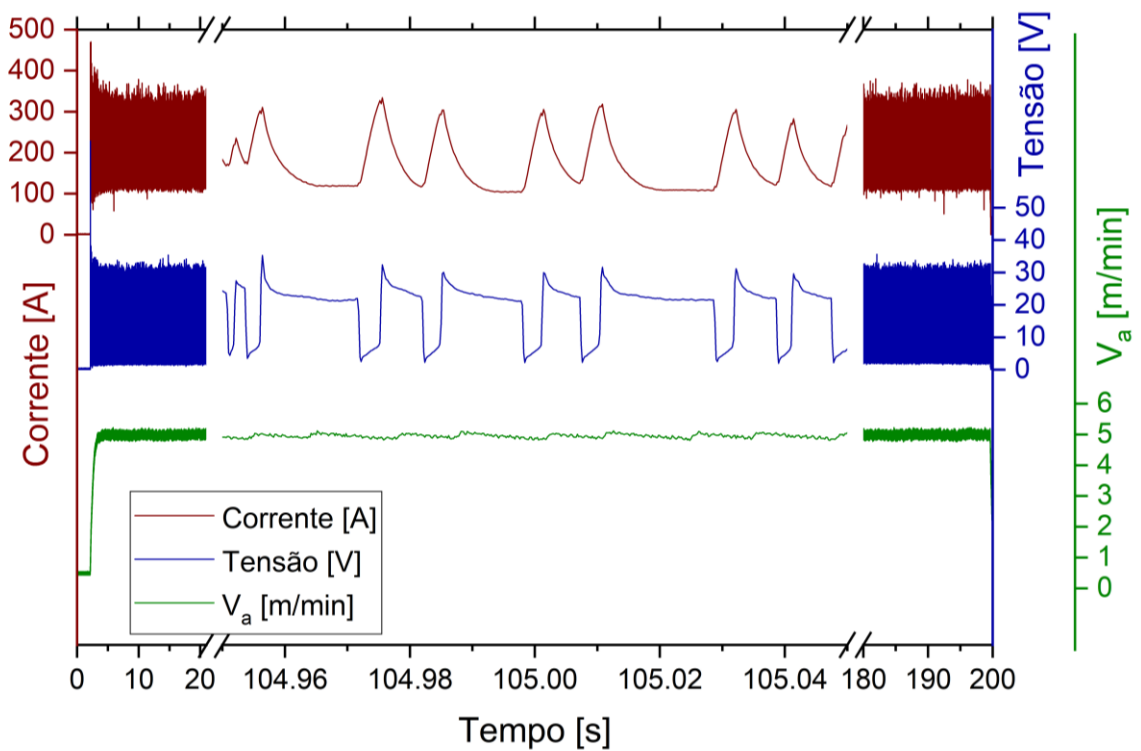


Figura A.13 – Sinais monitorados para o Teste FG_25_175_10-2

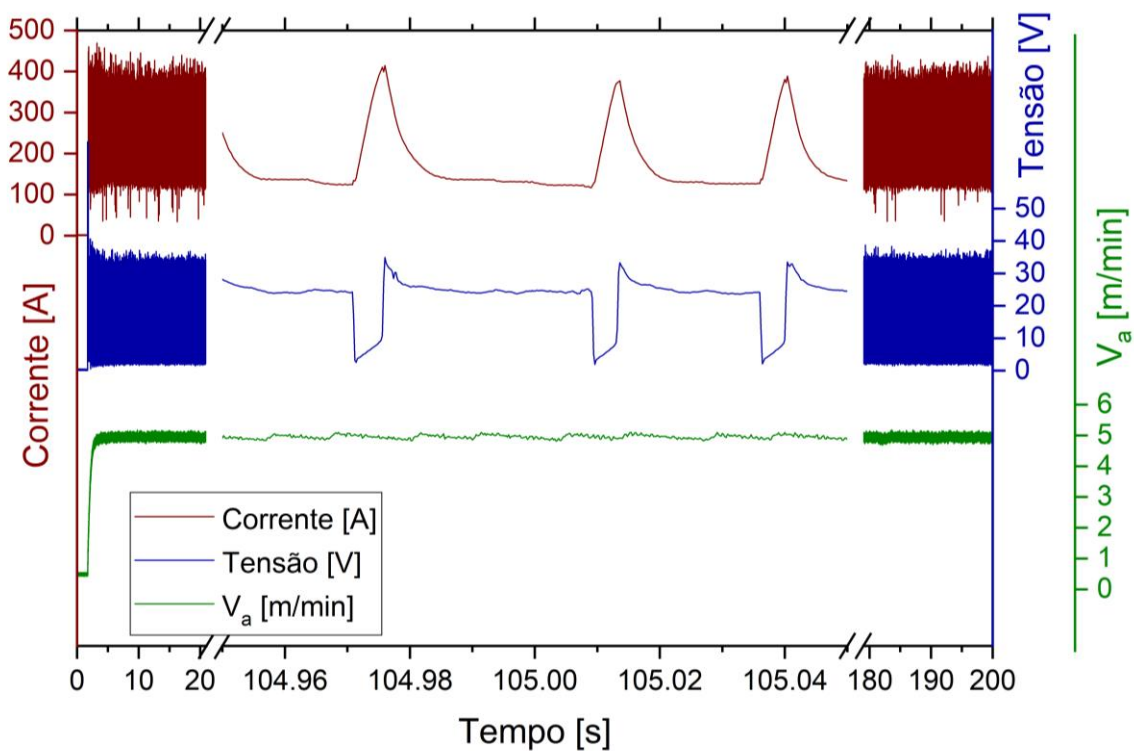


Figura A.14 – Sinais monitorados para o Teste FG_25_175_20-2

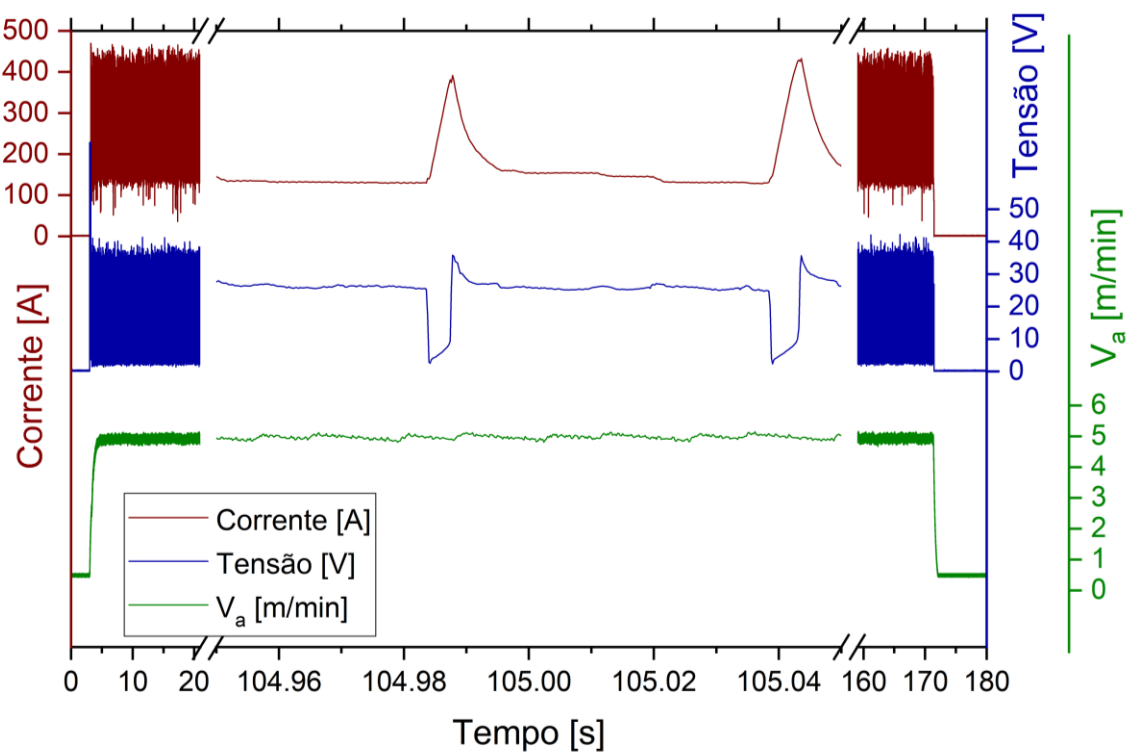


Figura A.15 – Sinais monitorados para o Teste FG_25_175_30-2

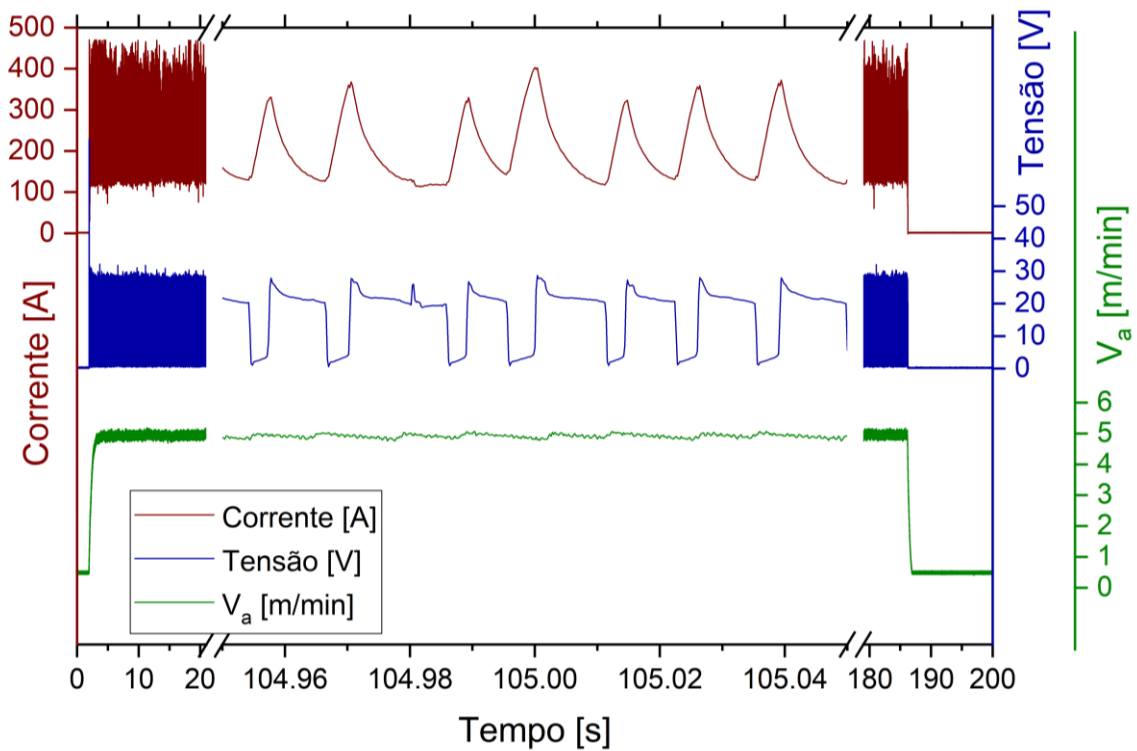


Figura A.16 – Sinais monitorados para o Teste FG_25_210_10-1

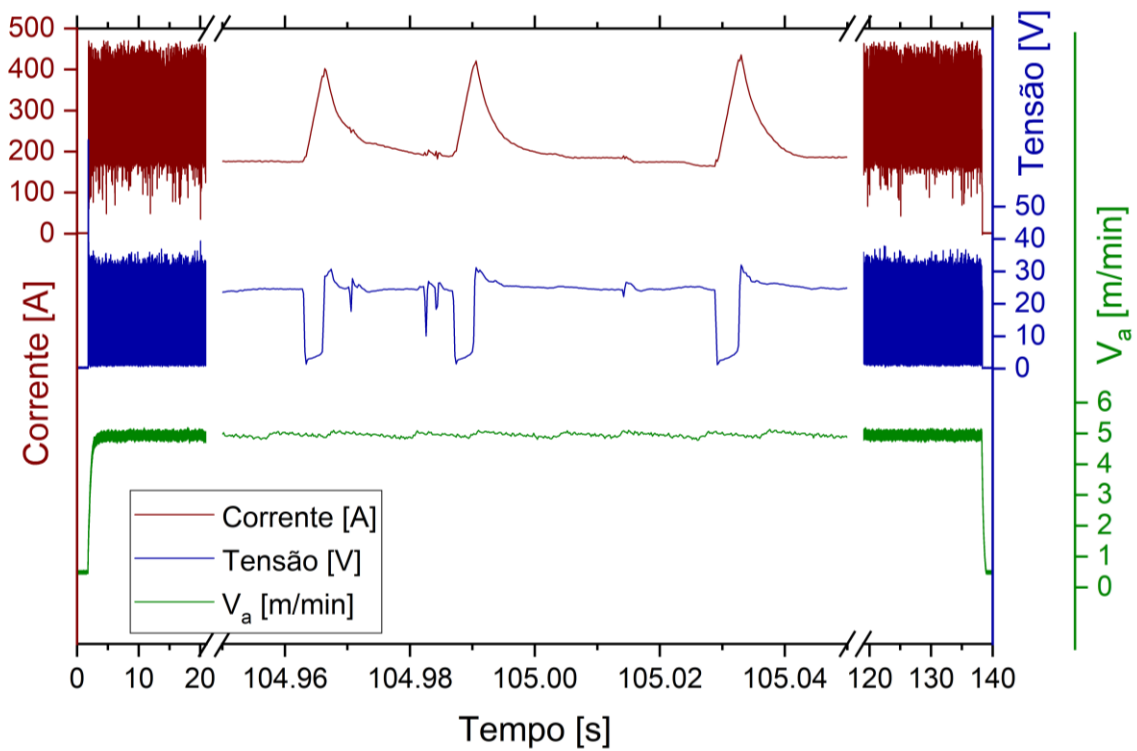


Figura A.17 – Sinais monitorados para o Teste FG_25_210_20-2

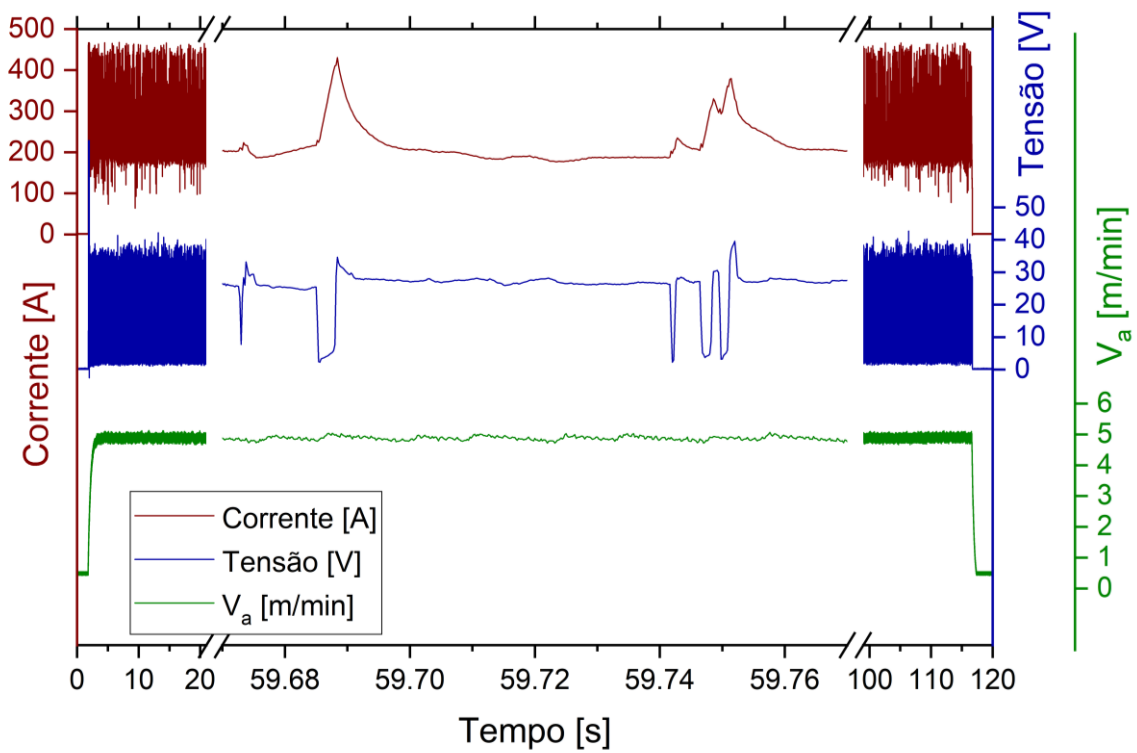


Figura A.18 – Sinais monitorados para o Teste FG_25_175_30-1

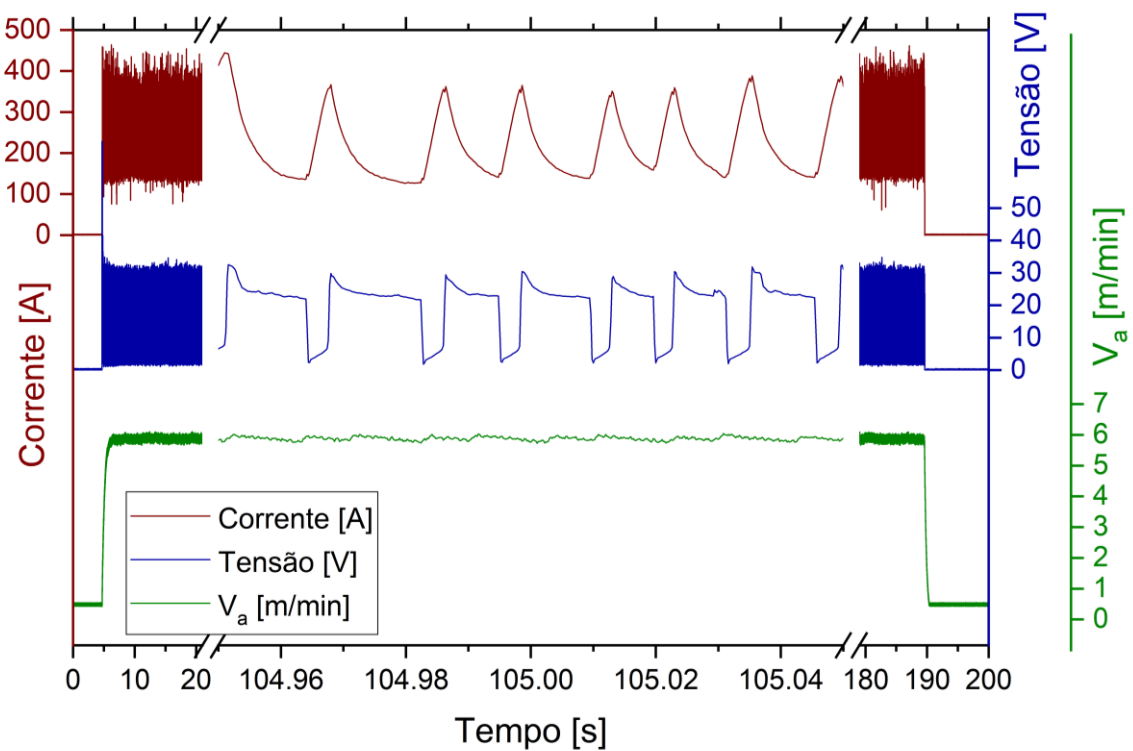


Figura A.19 – Sinais monitorados para o Teste FG_30_210_10-2

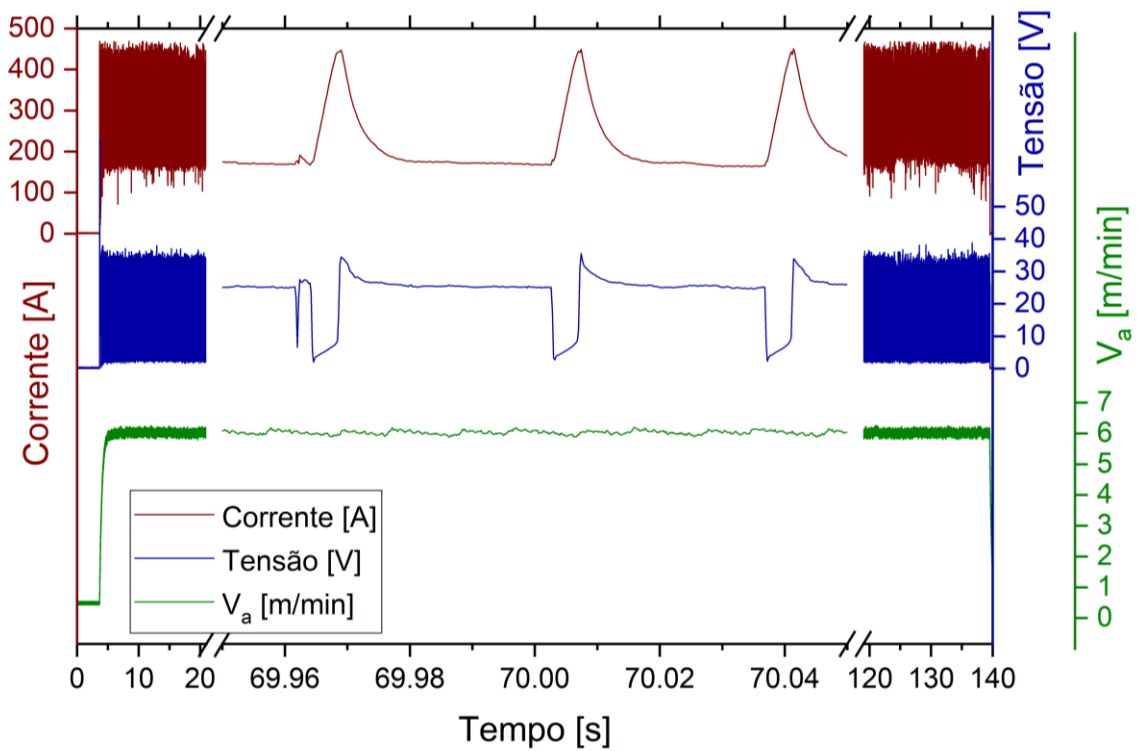


Figura A.20 – Sinais monitorados para o Teste FG_30_210_20-1

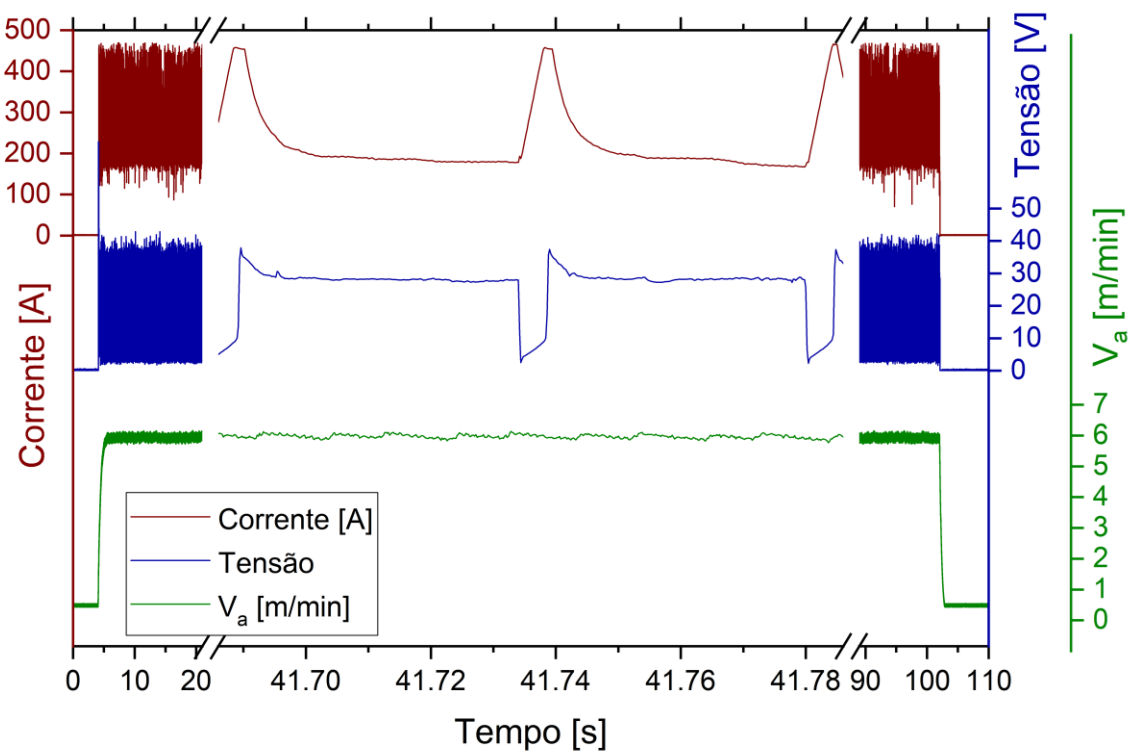


Figura A.21 – Sinais monitorados para o Teste FG_30_210_30-1