

Arthur Gustavo Moreira Santos

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ROTAÇÃO DO ELETRODO
NO PROCESSO MIG/MAG E ESTUDO PARA APLICAÇÃO EM
SOLDAGEM NARROW GAP**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Mateus Barancelli Schwedersky.

Coorientador: Prof. Dr. Régis Henrique Gonçalves e Silva.

Florianópolis
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

SANTOS, Arthur Gustavo Moreira
ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ROTAÇÃO DO ELETRODO NO
PROCESSO MIG/MAG E ESTUDO PARA APLICAÇÃO EM
SOLDAGEM NARROW GAP / Arthur Gustavo Moreira
SANTOS ; orientador, Mateus Barancelli Schwedersky,
coorientador, Régis Henrique Gonçalves e SILVA, 2019.
190 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Soldagem MIG/MAG
Mecanizada. 3. Tocha Spinarc. 4. Rotação do
Eletrodo. 5. Narrow Gap. I. Schwedersky, Mateus
Barancelli. II. SILVA, Régis Henrique Gonçalves e.
III. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV.
Título.

Arthur Gustavo Moreira Santos

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ROTAÇÃO DO ELETRODO
NO PROCESSO MIG/MAG E ESTUDO PARA APLICAÇÃO EM
SOLDAGEM NARROW GAP**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 04 de junho de 2019.

Prof. Dr. Jonny Carlos da Silva
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Mateus Schwedersky – Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Régis Henrique Gonçalves e Silva - Coorientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Milton Pereira
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Nelso Gauze Bonacorso
Instituto Federal de Santa Catarina

Petrônio Zumpano Júnior, Ms. Eng
Petrobras

Dedico este trabalho à minha família,
em especial ao meu pai Nilton e minha
mãe Beatriz

AGRADECIMENTOS

- Ao prof. Dr. **Mateus Barancelli Schwedersky**, pela paciência ao transmitir todo o seu conhecimento.
- Ao prof. Dr. **Régis Henrique Gonçalves e Silva** pela paciência ao transmitir o conhecimento e pela aceitação para cursar este programa.
- Gostaria de agradecer em especial ao meu pai **Nilton**, por todo apoio prestado e palavras de carinho nos momentos mais difíceis que, através da sua insistência à prática de atividades esportivas, pode com isso fortalecer nossa relação.
- A minha mãe **Beatriz** por sempre me incentivar mesmo nos momentos mais turvos e também por me guiar enquanto trilhava meus próprios caminhos.
- A **Márcia** e **Aparecida** (madrinhas), pelas palavras de carinho e conforto.
- A tia **Celma**, pela constante ajuda, tanto financeira quando emocional e por sempre acreditar em mim.
- Ao **Reginaldo Pinto Barbosa**, tanto pela carta de recomendação, mas também pela paciência ao passar seu conhecimento e pelo carinho mesmo à distância.
- Ao **Tarcísio Reis Oliveira** pela carta de indicação para cursar esse programa.
- A toda equipe de engenheiros, tecnólogos, técnicos, estagiários e pessoal de apoio do LABSOLDA, que muito contribuíram em várias etapas do trabalho, em especial ao Uallas Brito, Daniel Galeazzi, Arthur Gondim, Felipe Kallil, Fernando Lucas, Fernando Costenaro, Rafael Rodrigues, Cleber Guedes, Cleber Marques, Marcelo Okuyama, Hellinton Direne, Junior Bonetti, Alexssander Marzzona, Leandro Vacari, Thafarel Barcelos, Rafael Horn
- A **todos** que de alguma forma contribuíram para a concretização deste trabalho.
- A **Giulia** pela compreensão da minha ausência, pela paciência ao ajudar na confecção do texto, por todo amparo durante minha caminhada e por ter colocado vida aos meus dias.
- Por último, mas não menos importante, gostaria de agradecer a **Deus**, por ter me amparado nos momentos mais difíceis e nunca ter permitido que perca a fé em Ti.....

*Às vezes Deus te leva pelo caminho mais
longo não para te punir, mas sim para te
capacitar para a próxima guerra.*
(Autor desconhecido)

RESUMO

O presente trabalho aborda uma das variações do processo de soldagem MIG/MAG, caracterizada pela utilização da tocha *Spinarc*, que rotaciona automaticamente o arame-eletrodo. A tocha é destinada para realizar operações de soldagem mediante técnicas *Narrow Gap* em chapa de elevada espessura, sendo este um processo ainda pouco difundido. O objetivo geral deste estudo é investigar a influência da rotação do eletrodo na transferência metálica e possíveis aplicações da tecnologia em chanfros *Narrow Gap*. Já os objetivos secundários são o estudo do comportamento do gás de proteção mediante distintas frequências de rotação do eletrodo, para se obter uma melhor compreensão do fluxo gasoso; mapeamento de parâmetros por intermédio de ensaios práticos, que gerarão conhecimentos primordiais a respeito do comportamento do processo sob diversas condições, e um estudo e desenvolvimento de procedimentos de soldagem de chapas de aço carbono utilizando o processo a eletrodo rotativo. Para o desenvolvimento dos objetivos, foram realizados ensaios sobre a chapa com comando de tensão e comando de corrente, ensaios com técnica *Schlieren*, com câmera termográfica, com chanfros *Narrow Gap* em posição plana e em posição vertical descendente. Diversos foram os resultados encontrados, podendo ser destacados a identificação de que a rotação do eletrodo modifica o tipo de transferência metálica, onde foi observada uma transferência por voo livre a partir da frequência de 3000 rpm com valor médio de corrente de 125 A, valor esse abaixo do da corrente de transição. Também foi identificado para os ensaios realizados com comando de corrente a influência da frequência de rotação na taxa de fusão do eletrodo, onde foi observado um aumento da taxa de fusão de 49,5% com o aumento da frequência de rotação do eletrodo. No que diz respeito aos ensaios realizados em chanfros *Narrow Gap*, foi necessário o desenvolvimento de um novo formato de onda pulsada com maior frequência de pulsação e maior velocidade de alimentação para evitar o ancoramento do arco nos flancos laterais. Também foi observada a necessidade de um manipulador robótico com tempos programáveis de parada do eletrodo nos flancos laterais. No tocante aos ensaios realizados com a técnica *Schlieren*, foi possível observar a influência da rotação do eletrodo na proteção gasosa, sendo constatado um regime mais turbulento com maiores frequências de rotação.

Palavras-chave: Rotação do eletrodo, Transferência metálica, Chanfro *Narrow Gap*, Soldagem Mecanizada, GMAW

ABSTRACT

This work addresses one of the variations of the MIG/MAG welding process in which uses the Spinarc torch, a torch that automatically rotates the wire electrode and that was designed to perform welding operations in high plate thickness using the Narrow Gap techniques. That process is a little known process yet, so, the main purpose of this study is to investigate the influence of electrode rotation in the metal transfer. The secondary objectives are studying the behavior of the protection gas through different frequencies of rotation of the electrode, with a purpose to obtain a better understanding of the gas flow; mapping welding parameters through practical tests, which will generate primordial knowledge about the behavior of the process under various conditions and also studying and developing welding procedures of carbon steel plates using the rotary electrode process. A set of tests were developed to fulfil the established objectives, such as tests on the plate with voltage control and current control, tests with Schlieren technique, with thermographic camera, with Narrow Gap welding techniques on flat position and vertical down. Several results were found and it is possible to highlight the fact that the electrode rotation modifies the type of metallic transfer, where a spray transfer with an average current value below the transition current value was observed starting the frequency of 3000 rpm with current value about 125A, It was also possible to identify the influence of the rotation frequency of the electrode on the fusion rate of the electrode, where an increase of the 49,5% on the melting rate was observed with the increase of the rotation frequency of the electrode. Concerning the Narrow Gap welding techniques test, it was necessary to develop a new pulsed wave form with a higher frequency of pulsation and a higher wire feed speed to avoid anchoring of the arch on the sidewall. It was also observed the need for a robotic manipulator with programmable electrode stop times on the sidewall. Concerning the Schlieren technique tests, it was possible to observe the influence of the rotation of the electrode on the protection gas and a turbulent regime with higher of rotation speed.

Keywords: Electrode Rotation, Metal transfer, Narrow Gap Welding, Mechanized Welding, GMAW

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Exemplo comparativo entre (a) junta tipicamente utilizada em V à 60°; (b) junta <i>Narrow Gap</i> a 36°; (c) junta <i>Narrow Gap</i> do tipo I (parede reta); (d) comparativo entre a quantidade de material aportado em função da geometria da junta. Adaptado de [3].	32
Figura 1.2. Ilustração da tocha <i>Spinarc</i> sendo rotacionada em alta frequência. $W = 3000$ rpm.	34
Figura 2-1. Representação esquemática do processo MIG/MAG. Adaptado de [14].	37
Figura 2-2. Classes e respectivos modos naturais de transferência metálica que acontecem no processo MIG/MAG. Adaptado de [15]	38
Figura 2-3. Mapa dos modos de transferência metálica do processo MIG/MAG em função da corrente, tensão e mistura gasosa. Adaptado [15]	39
Figura 2.4. Quadros da filmagem de alta velocidade sincronizada com sinais elétricos, demonstrando apenas um ciclo. Adaptado de [16]	40
Figura 2.5. Quadros da filmagem em alta velocidade exibindo a transferência metálica por <i>spray</i> sincronizado com os sinais elétricos.	43
Figura 2.6. Quadros da filmagem de alta velocidade sincronizada com sinais elétricos, demonstrando a transferência metálica no MIG/MAG pulsado	46
Figura 2.7. Seção transversal do ensaio variando o percentual de CO ₂ na mistura gasosa. Adaptado de [32].	48
Figura 2.8. Comparativo entre os perfis do arco elétrico com distintas atmosferas contendo CO ₂ . Adaptado de [33].	49
Figura 2.9. Simulação numérica da medição do teor de O ₂ e imagens geradas a partir da técnica <i>Schlieren</i> em função do diâmetro do difusor de gás. Adaptado [34].	51
Figura 2-10. Imagens registradas com a técnica <i>Schlieren</i> . Gás utilizado: Argônio. Adaptado [35].	52
Figura 2.11. (a) Seção transversal; (b) radiografia e (c) vista superior do cordão; Gás utilizado: Argônio. Adaptado de [16].	52
Figura 2.12. Gráfico comparativo entre a área da seção transversal em função da variação do gap e espessura da chapa a ser soldada. Adaptado de [37].	53
Figura 2.13. Juntas <i>narrow gap</i> tipicamente utilizadas demonstrando a variação da quantidade de material a ser aportado. Adaptado de [37] - [36].	54
Figura 2.14. Comparativo entre a quantidade de massa a ser aportada em função do ângulo da junta. Adaptado de [38].	55
Figura 2.15. Figura representando os fenômenos. (a) Forças atuantes; (b) quadros da filmagem de alta velocidade demonstrando o ancoramento do arco elétrico e a trajetória da gota metálica. Adaptado de [20].	56
Figura 2.16. Quadros da filmagem de alta velocidade demonstrando o ancoramento do arco elétrico e repulsão da gota metálica. $V.a = 4,3$ m/min Adaptado de [41].	58
Figura 2-17. Quadros da filmagem de alta velocidade demonstrando o comportamento do arco elétrico. $V.a = 6.0$. Adaptado de [41].	59

Figura 2.18. Desenho esquemático representando as variáveis da tecnologia que provê um direcionamento especial do arame-eletrodo. Adaptado de [47].	61
Figura 2.19. Sistema típico de tecnologia a eletrodo rotativo exibindo o comportamento do arco elétrico em um chanfro do tipo I. Adaptado [49].	62
Figura 2-20. Variação da taxa de fusão do eletrodo para diferentes frequências de rotação do eletrodo com distintos processos (convencional e pulsado), depósitos em chapa e em chanfro. Adaptado [50].	63
Figura 2.21. Seções transversais do ensaio variando a frequências de rotação do eletrodo. Adaptado de [52].	64
Figura 2.22. Gráfico comparativo entre diâmetro de gota e frequência de destacamento em um único período de rotação, sincronizado com filmagem de alta velocidade. $W = 5$ Hz. Adaptado de [53].	65
Figura 2.23. Seções transversais: (a) Procedimento obtido por arco submerso (SAW) – (b) Procedimento obtido pela tocha MIG/MAG <i>Spinarc</i> . Adaptado [55]	67
Figura 3.1. Sequência dos ensaios realizados demonstrando as principais etapas da pesquisa.	69
Figura 3.2. Demonstração do mecanismo que permite mudança na posição do <i>crank na tocha Spinarc</i> .	70
Figura 3.3. Conjunto da tocha <i>Spinarc</i> . (A) Caixa de controle eletrônico, (B) Tocha <i>Spinarc</i> e (C) Cabos de alimentação e controle.	72
Figura 3.4. Parametrização inicial concernente a posição do <i>crank</i> e frequência de rotação do eletrodo em função das respectivas operações de acordo com o próprio fabricante. Adaptado de [13].	73
Figura 3.5. Bancada de ensaios: Cabeçote alimentador de arame, fonte de energia, manipulador robótico e tocha <i>Spinarc</i> , Cilindro de gás, Caixa controle de frequência e sentido de rotação do eletrodo.	74
Figura 4.6. Manipulador cartesiano Tartilope V2.	75
Figura 3.7. Sistema de aquisição de dados portátil do fabricante IMC Soldagem.	75
Figura 3.8. Configuração utilizada para a monitoração da velocidade de rotação: (a) Caixa controle, (b) Lâmpada Estroboscópica.	77
Figura 3.9. “Teach tip”: Bico de contato com arame de 25 mm fixado a sua ponta utilizado para a aferição do diâmetro efetivo de giro.	78
Figura 3.10. Exemplo de medição do diâmetro efetivo de giro utilizando as imagens obtidas com filmagem de alta velocidade da rotação do eletrodo.	79
Figura 3.11. Configuração utilizada para monitoração com filmagem em alta velocidade.	81
Figura 3.12. Configuração utilizada para monitoração com filmagem termográfica durante a soldagem.	82
Figura 3.13. Gráfico exibindo o formato de onda utilizado com ênfase nos oito períodos de extinção do arco elétrico.	83
Figura 3.14. Metodologia utilizada para a determinação da temperatura da gota metálica.	84

Figura 3.15. Metodologia utilizada para a determinação da velocidade final da gota metálica.....	85
Figura 3.16. Bancada utilizada para a realização dos ensaios com a técnica <i>Schlieren</i> . Com os respectivos equipamentos: Espelhos; Tocha MIG/MAG; Iluminação led; Câmera de alta velocidade.	86
Figura 3.17. Representação as regiões para medição da largura do fluxo gasoso.	87
Figura 3.18. Geometria da junta utilizada nos ensaios 1A.....	90
Figura 3.19. Geometria da junta utilizada nos ensaios 1B. Área transversal de 165,1 mm ²	91
Figura 3.20. Representação esquemática da seção transversal e definições geométricas.....	92
Figura 4.1. Gráfico comparativo demonstrando o diâmetro efetivo de giro para todas as posições do <i>crank</i> mantendo-se a frequência de rotação em 1000 rpm.	94
Figura 4.2. Gráfico comparativo exibindo o diâmetro efetivo de giro para as posições de interesse em função da frequência de rotação indicada pelo fabricante.	95
Figura 4.3. Oscilograma exibindo o comportamento da tensão e corrente.	97
Figura 4.4. Oscilogramas exibindo o comportamento da tensão em função das frequências de rotação do eletrodo. $U_a = 21,5V$; $V.a = 4,5$ m/min; $P_c = 3$	98
Figura 4.5. Oscilogramas exibindo o comportamento da corrente em função da frequência de rotação do eletrodo. $U_a = 21,5V$; $V.a = 4,5$ m/min; $P_c = 3$	99
Figura 4.6. Demonstração da inviabilidade ao se realizar um depósito sobre chapa com frequência de rotação igual ou superior a 3000 rpm; $P_c = 3$	100
Figura 4.7. Quadros da filmagem de alta velocidade exibindo o instante do destacamento da gota metálica sincronizado com os sinais elétricos. $W = 3000$ rpm; $P_c = 3$ mm; $U_a = 20,5V$, $V.a = 4,5$ m/min.	102
Figura 4.8. Quadros da filmagem de alta velocidade sincronizado com sinais de tensão demonstrando o curto-circuito acidental. $W = 3000$ rpm; $P_c = 3$; $U_a = 20,5$ V; $V.a = 4,5$ m/min.	103
Figura 4.9. Representação esquemática da ação da força centrífuga no destacamento da gota. Adaptado de [60]	104
Figura 4.10. Oscilogramas exibindo o comportamento da tensão e corrente em função das frequências de rotação do eletrodo. $U_a = 27,0$; $V.a = 8,5$; $\varnothing = 3$	106
Figura 4.11. Oscilogramas exibindo o comportamento da tensão e corrente em função das frequências de rotação do eletrodo. $U_a = 27,0$; $V.a = 8,5$; $\varnothing = 3$	107
Figura 4.12. Oscilograma exibindo o comportamento da tensão e corrente em função das frequências de rotação do eletrodo. $U_a = 27,0$; $V.a = 8,5$; $\varnothing = 3$	108
Figura 4.13. Gráfico demonstrando o desvio padrão da tensão e corrente em função da frequência de rotação para a transferência metálica por <i>spray</i> . $P_c = 3$ mm.....	109
Figura 4.14. Quadros da filmagem de alta velocidade sincronizado com sinais elétricos demonstrando a transferência metálica por <i>spray</i> . $W = 1000$ rpm; $\varnothing = 3$ mm.....	111

Figura 4.15. Gráfico exibindo o comportamento do diâmetro da gota em função da frequência de rotação do eletrodo.	112
Figura 4.16. Comparativo entre diâmetro de gota em função da frequência de rotação do eletrodo na transferência metálica por <i>spray</i>	113
Figura 4.17. Gráfico exibindo a influência da frequência de rotação na gota residual na ponta do eletrodo.	114
Figura 4.18. Vista superior e seções transversais em função da variação da frequência de rotação do eletrodo.	116
Figura 4.19. Gráfico comparativo entre reforço, penetração e largura referente ao ensaio variando a frequência de rotação do eletrodo.	117
Figura 4.20. Sobreposição das seções transversais entre os processos sem a rotação do eletrodo e com frequência de rotação de 2000 rpm.	118
Figura 4.21. Quadros da filmagem de alta velocidade sincronizado com sinais elétricos identificando o desprendimento da gota em função da rotação do eletrodo. $W = 1500 \text{ rpm}$; $P_c = 3 \text{ mm}$	119
Figura 4.22. Gráfico comparativo exibindo o comportamento da tensão com e sem correção na velocidade em função da alternância da frequência de rotação do eletrodo.	120
Figura 4.23. Gráfico comparativo exibindo o comportamento entre velocidade de alimentação e taxa de fusão em função do acréscimo da frequência de rotação do eletrodo. $I_m = 160 \text{ A}$; $P_c = 3$	121
Figura 4.24. Oscilogramas demonstrando os picos de tensão, caracterizando o momento exato de. (A) sem rotação do eletrodo e (B) com rotação de 1000 rpm.	123
Figura 4.25. Quadros da filmagem de alta velocidade sincronizados com oscilograma, demonstrando a variação da tensão em função da rotação do eletrodo. $W = 1000 \text{ rpm}$; $P_c = 3$; $V.a = 4,5 \text{ m/min}$	124
Figura 4.26. Quadros da filmagem de alta velocidade demonstrando a variação do comprimento do arco em função da frequência de rotação do eletrodo.	126
Figura 4.27. Gráfico comparativo exibindo a variação do comprimento do arco em função da frequência de rotação do eletrodo. $P_c = 3$; $V.a = 4,5 \text{ m/min}$; $I_m = 160 \text{ A}$	127
Figura 4.28. Quadros da filmagem termográfica: medição da temperatura média. (a) Processo convencional – $839 \text{ }^\circ\text{C}$, (b) Posição 1 – $715 \text{ }^\circ\text{C}$, (c) Posição 2 – $693 \text{ }^\circ\text{C}$, (d) Posição 4 – $686 \text{ }^\circ\text{C}$	128
Figura 4.29. Gráfico comparativo exibindo os valores médios da temperatura da poça de fusão em função da posição do <i>crank</i>	129
Figura 4.30. Representação esquemática do arame no processo de soldagem MIG/MAG com a rotação do eletrodo.	130
Figura 4.31. Quadros da filmagem termográfica exibindo a medição da temperatura média. (a) Processo com 500 rpm – $839 \text{ }^\circ\text{C}$, (b) Processo com 1000 rpm – $678 \text{ }^\circ\text{C}$, (c) Processo com 1500 rpm – $635 \text{ }^\circ\text{C}$, (d) Processo com 2000 rpm – $622 \text{ }^\circ\text{C}$	131
Figura 4.32. Valores médios de temperatura da poça de fusão em função da frequência de rotação do eletrodo.	132

Figura 4.33. Seções transversais dos ensaios variando a posição do <i>crank</i> e mantendo-se a frequência de rotação do eletrodo em 1000 rpm. $V.a = 4,5$ m/min; $I_m = 160$ A.	133
Figura 4.34. Gráfico comparativo demonstrando aspectos morfológicos em função da posição do <i>crank</i> para a mesma frequência de rotação do eletrodo. $W = 1000$ rpm; $V.a = 4,5$ m/min; $I_m = 160$ A.....	134
Figura 4.35. Sobreposição das seções transversais variando a posição do <i>crank</i>	135
Figura 4.36. Quadros da filmagem termográfica demonstrando a medição da temperatura média da gota metálica em função da frequência de rotação do eletrodo.	136
Figura 4.37. Gráfico comparativo demonstrando o comportamento da temperatura média de 20 gotas em função da frequência de rotação do eletrodo.	137
Figura 4.39. Gráfico comparativo entre velocidade tangencial e velocidade final da gota metálica.	139
Figura 5.1. Quadros da filmagem de alta velocidade demonstrando a trajetória da gota metálica e o ancoramento do arco elétrico.	143
Figura 5.2. Quadros da filmagem de alta velocidade demonstrando o ancoramento do arco elétrico e as variações no sinal da tensão.	145
Figura 5.3 Seção transversal do ensaio B.	146
Figura 5.4. Quadros da filmagem de alta velocidade sincronizado com sinais elétricos exibindo o momento exato do pulso de corrente nos flancos laterais e no centro da junta. $W = 1000$ rpm; $P_c = 3$ mm; $I_m = 173$ A; $V.a = 6,0$ m/min.	147
Figura 5.5. Seção transversal referente ao ensaio C. $I_m = 173$ A; $V.a = 6,0$ m/min.	148
Figura 5.6. Comparativo entre os formatos de onda desenvolvidos; (A) $T = 11,2$ ms – $F_p = 89$ Hz ; (B) $T = 9,0$ ms – $F_p = 111$ Hz e (C) $T = 5,6$ ms – $F_p = 178$ Hz	150
Figura 5.7. Seções transversais relativas ao ensaio variando a frequência de rotação do eletrodo. (a) 500 rpm. (b) 1000 rpm. (c) 1500 rpm. (d) 2000 rpm. $P_c = 3$ mm. $I_m = 173$ A; $V.s = 27$ cm/min.	151
Figura 5.8. Gráfico comparativo exibindo o comportamento entre reforço, penetração e área fundida em função da frequência de rotação do eletrodo - $P_c = 3$; $I_m = 173$ A; $V.s = 27$ cm/min.....	152
Figura 5.9. Gráfico exibindo a relação entre velocidade de alimentação e da taxa de fusão do eletrodo em função da frequência de rotação.	153
Figura 5.10. Seções transversais da primeira bateria de ensaios, com ênfase nas setas vermelhas demonstrando falta de fusão e setas brancas demonstrando porosidades. $W = 1000$ rpm; $P_c = 3$ mm; $V.a = 6, 1$ m/min; $I_m = 173$ A; $V.s = 27$ cm/min.....	153
Figura 5.11. Seção transversal relativo à segunda bateria de ensaios com ênfase nas setas vermelhas exibindo falta de fusão nos flancos laterais. $W = 1000$ rpm; $P_c = 3$ mm. $I_m = 173$ A, $V.s = 27$ cm/min.....	155

Figura 5.12. Seção transversal referente à segunda bateria de ensaios com comando de corrente na posição plana. W = 1000 rpm; Pc = 3mm; tp = 0,35 ms; V.a = 6,1 m/min Im = 173 A; V.s = 27 cm/min.....	156
Figura 5.13. Seção transversal relativo ao ensaio com comando de corrente na posição vertical descendente. W = 1000 rpm; Pc = 3mm, Im = 173 A; V.A = 6,1 m/min; Tp = 0,32 ms.	157
Figura 5.14. Quadros da filmagem de alta velocidade sincronizados com sinais elétricos demonstrando a transferência metálica por curto-circuito em chanfro NG. W = 1000 rpm; Pc = 3; U.a = 20,5 V; V.a = 4,5 m/min; Im = 160 A.....	159
Figura 5.15. Seções transversais dos ensaios realizados com transferência metálica por curto-circuito. Im = 160 A, W = 1000 rpm, Pc = 3. V.s = 25 cm/min, T.p = 0,35 ms.....	160
Figura 5.16. Seção transversal do ensaio utilizando transferência metálica por spray. W = 1000 rpm; Pc = 3; Im = 250 A; U.a = 28,5 V; V.a = 8,5 m/min; Tp = 350 ms.....	162
Figura 5.17. Seção transversal chapa de 1 e ¼' evidenciando problemáticas W = 1000 rpm; Pc = 3; U.a = 28,5 V; V.a = 8,5 m/min; Im = 265 A; V.s = 45 cm/min.	162
Figura 5.18. Seção transversal do ensaio realizado com a transferência metálica pulsada na posição vertical descendente sem a rotação do eletrodo.	164
Figura 5.19. Seção transversal do ensaio realizado com a transferência metálica pulsada por curto-circuito na posição vertical descendente sem a rotação do eletrodo.	165
Figura 5.20. Imagens registradas com a técnica <i>Schlieren</i> . Gás de proteção C8; Vazão do gás 15 l/min.; DBCP = 15 mm; (a) sem rotação; (b) processo com rotação de 2000 rpm.	167
Figura 5.21. Imagem registrada com a técnica <i>Schlieren</i> . Gás de proteção C8; Vazão 17 l/min. W = 1500 rpm. Pc = 3.	169
Figura 5.22. Imagem obtida pela técnica <i>Schlieren</i> . Gás utilizado C25. Vazão utilizada 15 l/min. Tocha SPA.	170
Figura 5.23. Imagens do fluxo de gás na tocha <i>Spinarc</i> (imagem A) e em uma tocha comercial SPA obtida pela técnica <i>Schlieren</i> . Gás utilizado CO ₂ . Vazão utilizada 15 l/min.	171
Figura 5.24. Detalhe da tocha <i>Spinarc</i> com ênfase nos orifícios de saída do gás de proteção (total de 8 saídas).....	172
Figura 4.25. Gráfico comparativo demonstrando a largura máxima da coluna de gás para as tochas <i>Spinarc</i> e SPA.	173
Figura 5.26. Imagens obtidas pela técnica <i>Schlieren</i> comparando o fluxo de gás em função da frequência de rotação do eletrodo. Gás utilizado CO ₂ . Vazão utilizada 15 l/min.	174
Figura 5.27. Gráfico comparativo demonstrando o comportamento entre a largura máxima do gás de proteção em função da frequência de rotação do eletrodo..	175
Figura 5.28. Imagens do fluxo de gás com anteparo na tocha <i>Spinarc</i> (A) e em uma tocha modelo comercial SPA obtida pela técnica <i>Schlieren</i> . Gás utilizado CO ₂ . Vazão utilizada 15 l/min; DBCP = 15 mm.....	176

Figura 5.29. Imagens registradas com a técnica *Schlieren* demonstrando o comportamento do gás de proteção para distintas frequências de rotação do eletrodo. Gás de proteção: CO₂; Vazão = 15 l/min; DBCP = 15 mm. 178

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1. Diâmetro efetivo de giro indicado pelo fabricante mediante a frequência de rotação de 1000 rpm. Adaptado de [10].	71
Tabela 4.2. Lista de componentes integrantes em sistema de monitoramento por filmagem de alta velocidade	80
Tabela 4.3. Parâmetros acondicionados na câmara térmica	83
Tabela 4.4. Parâmetros elétricos selecionados na fonte de energia para a primeira bateria de ensaios operando com o processo MIG/MAG convencional.	88
Tabela 4.5. Parâmetros regulados na tocha <i>Spinarc</i> para a primeira bateria de ensaios (comando de tensão).	89
Tabela 4.6. Parâmetros regulados na tocha <i>Spinarc</i> e na caixa de controle para a segunda bateria de ensaios (comando de corrente).	89
Tabela 5.1. Comparativo entre a frequência de rotação do eletrodo selecionada e frequência obtida.	93
Tabela 5.2. Parâmetros elétricos (aquisitados do SAP) para os ensaios com transferência metálica por curto-circuito. $U_a = 21,5V$; $V_a = 4,5$; $P_c = 3$	96
Tabela 5.3. Parâmetros elétricos aquisitados do SAP dos ensaios com transferência metálica por <i>spray</i>	105
Tabela 6.1. Parâmetros elétricos para os ensaios em chanfros <i>Narrow Gap</i> . ..	141
Tabela 6.2. Comparativo entre os parâmetros elétricos calculados e valores medidos no SAP.	149
Tabela 6.3. Parâmetros selecionados no Tartilope V2 para a primeira bateria de ensaios.	154
Tabela 6.4. Parâmetros selecionados no Tartilope V2 para a segunda bateria de ensaios.	156
Tabela 6.5. Parâmetros de soldagem dos ensaios realizados em chanfros <i>Narrow Gap</i> com transferência metálica por <i>spray</i>	161
Tabela 6.6. Parâmetros de tecimento selecionados no manipulador robótico referentes aos ensaios com transferência metálica pulsada sem a rotação do eletrodo.	164

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Af	Área fundida
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ASTM	<i>American Society of Testing Materials</i>
SAW	<i>Submerged Arc Welding</i>
CCC	Curto circuito controlado
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i>
LABSOLDA	Laboratório de Soldagem e Mecatrônica da Universidade Federal de Santa Catarina
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
RMD	<i>Regulated Metal Deposition</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SAW	<i>Submerged Arc Welding</i>
SAP	Sistema de Aquisição de Dados Portátil
STT	<i>Surface Tension Transfer</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Ar	Argônio
CO ₂	Dióxido de carbono
Dg	Diâmetro de gota
E	Energia cinética
F	Força resultante do destacamento
Fe	Forças de origem eletromagnéticas
Fp	Frequência de pulsação da corrente
Fw	Força devido a rotação do eletrodo
F _γ	Força devido a tensão superficial
I _b	Corrente de base
I _m	Corrente média
I _p	Corrente de pulso
I _t	Corrente de transição
P	Penetração
R	Reforço
r	Raio de rotação do eletrodo
L	Largura
m	Massa da gota metálica
V.a	Velocidade de alimentação
W	Frequência de rotação do eletrodo
Pc	Posição do <i>crank</i>
O	Posição da fonte de calor
R	Reforço
r	Raio de rotação do eletrodo
Tp	Tempo de pulso
Tb	Tempo de base
T	Período
Tp1	Tempo de parada do eletrodo no flanco direito
Tp2	Tempo de parada do eletrodo no flanco esquerdo
V	Velocidade da gora metálica
W	Frequência de rotação do eletrodo
α e β	Coefficientes dependentes da composição química do arame, gás de proteção, diâmetro do eletrodo
O'	Posição derivada da fonte de calor

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	31
1.1	OBJETIVOS	35
1.1.1	Objetivos Gerais	35
1.1.2	Objetivos Específicos	35
2	FUNDAMENTOS CIENTÍFICOS TÉCNOLOGICOS	37
2.1	PROCESSO MIG/MAG	37
2.1.1	Transferência Metálica no Processo MIG/MAG Convencional	40
2.1.2	MIG/MAG Pulsado	43
2.2	INFLUÊNCIA DOS GASES DE PROTEÇÃO.....	47
2.3	AVALIAÇÃO DO FLUXO DE GÁS DE PROTEÇÃO UTILIZANDO TÉCNICA <i>SCHLIEREN</i>	50
2.4	ASPECTOS RELEVANTES DA SOLDAGEM <i>NARROW GAP</i>	53
2.4.1	Relevância do projeto da junta	53
2.4.2	Problemas recorrentes da soldagem NG	56
2.5	TÉCNICAS ALTERNATIVAS PARA SOLDAGEM NG	60
3	EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E METODOLOGIA	69
3.1	EQUIPAMENTOS.....	70
3.1.1	Tocha <i>Spinarc</i>	70
3.1.2	Bancada Experimental	73
3.3	CONSUMÍVEIS	75
3.4	METODOLOGIAS DE ANÁLISES	76
3.4.1	Procedimento para monitoração da frequência de rotação e diâmetro efetivo de giro sem arco	76
3.4.2	Metodologia utilizada para filmagem em alta velocidade	79
3.4.3	Monitoração por Filmagem Termográfica	81
3.4.4	Metodologia de ensaios com a Técnica <i>Schlieren</i>	85
3.5	DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS DE SOLDAGEM.....	88
3.5.1	Ensaios em chapa	88
3.5.2	Ensaios em chanfros <i>Narrow Gap</i>	90
3.6	METODOLOGIA UTILIZADA PARA ANÁLISES MACROGRÁFICAS E RELATIVA A GEOMETRIAS	91
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	93
4.1	AVALIAÇÃO DA MOVIMENTAÇÃO PRODUZIDA PELA TOCHA <i>SPINARC</i>	93
4.1.1	Avaliação do diâmetro efetivo de giro	94

4.2	AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE ROTAÇÃO DO ELETRODO NO COMPORTAMENTO DO PROCESSO MIG/MAG CONVENCIONAL	96
4.2.1	Transferência Metálica por Curto-circuito.....	96
4.2.2	Transferência Metálica por Spray	105
4.3	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ROTAÇÃO DO ELETRODO NO PROCESSO MIG/MAG PULSADO	115
4.3.1	Influência da rotação do eletrodo em aspectos morfológicos do cordão.....	115
4.4	Estudo da Influência da Rotação do Eletrodo Usando Filmagem Termográfica	127
4.4.2	Ensaio complementar à termografia.....	133
5	DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÕES PARA A SOLDAGEM <i>NARROW GAP</i>	141
5.1	SOLDAGEM <i>NARROW GAP</i> UTILIZANDO O MIG/MAG PULSADO	141
5.1.1	Ajustes na forma de onda	141
5.1.2	Comparativo entre formas de onda desenvolvidas.....	148
5.2	SOLDAGEM <i>NARROW GAP</i> MIG/MAG PULSADO...	153
5.3	SOLDAGEM <i>NARROW GAP</i> MIG/MAG COM CURTO CIRCUITO	157
5.4	SOLDAGEM <i>NARROW GAP</i> MIG/MAG COM TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR <i>SPRAY</i>	161
5.5	SOLDAGEM <i>NARROW GAP</i> MIG/MAG SEM A ROTAÇÃO DO ELETRODO.....	163
5.6	AVALIAÇÃO DO ESCOAMENTO DO GÁS DE PROTEÇÃO UTILIZANDO A TÉCNICA <i>SCHLIEREN</i>	166
5.6.1	Ensaio sobre chapa	166
5.6.2	Ensaio em chanfro	167
5.6.3	Ensaio sem arco.....	170
5.6.4	Ensaio com anteparo	176
6	RESUMO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS, CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS... 179	
6.1	RESUMO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS.....	179
6.2	CONCLUSÕES.....	182
6.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	184
7	REFERÊNCIAS	185

1 INTRODUÇÃO

Empresas, que se encontram presas aos rigorosos regimes de produção capitalista, e tendo em vista a atual situação econômica nacional, buscam obrigatoriamente por táticas de sobrevivência no mercado através da redução de custos em seus processos. Essas táticas, que almejam a sobrevivência e desenvolvimento das empresas, não são difíceis de serem encontradas. Como, por exemplo, nas indústrias do ramo de metal mecânica, onde há uma grande parcela de processos de soldagem como um dos diversos processos de fabricação. Técnicos responsáveis pela execução de projetos tentam obter uma maior produtividade a todo custo e, muitas das vezes, acabam se decepcionando com o resultado obtido.

O cenário industrial necessita, de fato, de um aumento na produtividade da fabricação de equipamentos de caldeiraria pesada. Isso pôde ser visto no ano de 2018, quando a necessidade da criação de novas rotas para o transporte de petróleo e seus derivados ficou bastante clara com a greve dos caminhoneiros, evento esse que culminou no colapso nacional graças a falta de combustíveis nos postos e dificuldade de abastecimento nos mercados, por exemplo. Outra justificativa se trata da necessidade do país em aumentar sua capacidade produtiva de equipamentos de grande porte, como estruturas metálicas em geral, navios, equipamentos para exploração de petróleo, dentre outros.

Considerando esse contexto e também o intuito de superar as adversidades impostas nesse campo é que foi desenvolvida a técnica de soldagem intitulada *Narrow Gap* ou *Narrow Groove*, que ainda apresenta grande divergência sobre sua real definição. De acordo com Prasad et al [1], *Narrow Gap* refere-se a uma técnica de deposição de cordões, geralmente executada através de soldagem a arco elétrico e caracterizada pelo depósito de cordões por camadas, em um chanfro estreito, profundo e geralmente reto ou quando o ângulo de abertura é inferior a 20°. Já segundo Anant e Gosh [2], tal técnica tem como característica a redução do material a ser aportado na junta e, por consequência, a redução no tempo total de operação, nas distorções oriundas dos processos multipasses, nas tensões residuais, dentre outros. A Figura 1.1 exibe um comparativo entre juntas tipicamente utilizadas para operações manuais e juntas *Narrow Gap* destinadas a operações automáticas. Desta forma é possível observar a considerável redução na quantidade de material que deve ser adicionado, fator esse que obviamente implica no tempo necessário para a execução do projeto e no custo final.

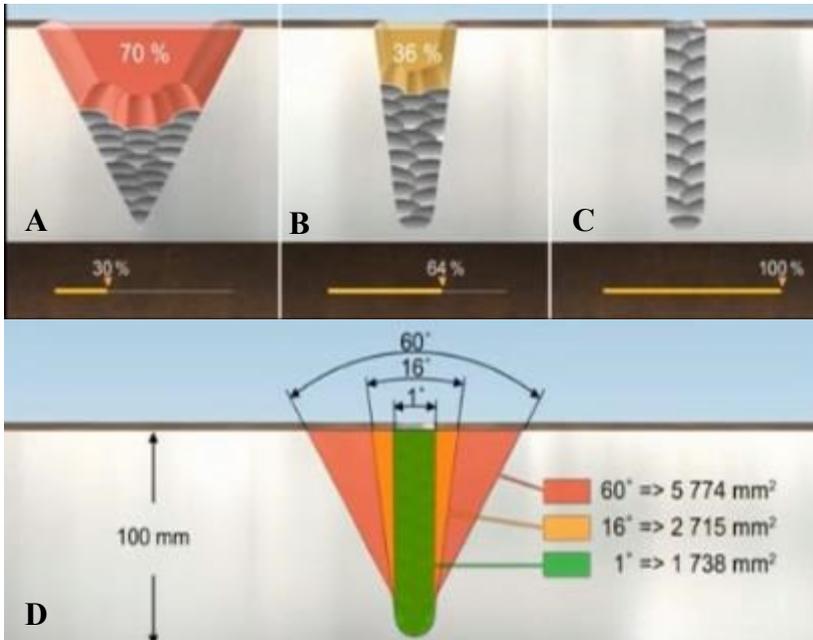


Figura 1.1. Exemplo comparativo entre (a) junta tipicamente utilizada em V à 60°; (b) junta *Narrow Gap* a 16°; (c) junta *Narrow Gap* do tipo I (parede reta); (d) comparativo entre a quantidade de material aportado em função da geometria da junta. Fonte: Adaptado de [3].

Diversos procedimentos de soldagem continuam sendo realizados de forma manual, mesmo para os dias de hoje. Essa ocorrência demonstra haver um alto grau de dependência em, inicialmente, encontrar um profissional qualificado e habilitado. Outra problemática diz respeito a necessidade de o profissional compensar as variações junta mediante a manipulação do eletrodo, o que proporciona baixa produtividade e alta susceptibilidade a defeitos. Considerando ainda uma dificuldade ultrapassada em aceitar novas tecnologias, há uma tendência de que esse cenário permaneça por mais tempo.

A configuração da junta escolhida para um determinado procedimento é um fator mandatório que dita o cronograma e o custo necessário para a concretização de tal empreendimento. Como em todo empreendimento de grande porte a palavra tempo é sinônimo de dinheiro, a configuração da junta utilizada irá ditar o cronograma da mesma.

Com o procedimento sendo realizado de forma automática, é possível trabalhar com chanfros mais reduzidos, fato esse que em uma soldagem manual seria impossível [4] - [5]. Essa ocorrência se justifica pela necessidade do soldador em posicionar a tocha de soldagem na junta, deixando-a, com isso, passível a mudanças na sua geometria.

Entretanto, um chanfro mais fechado tende a ter uma maior susceptibilidade a defeitos, como por exemplo a falta de fusão nos flancos laterais. Uma das alternativas para vencer os desafios impostos se trata de variantes modernas capazes de oscilar/rotacionar/direcionar o metal de adição em direção aos flancos laterais. Todavia, ainda se tem problemáticas relatadas pela literatura sobre dificuldades na operação de tais tecnologias com chanfros estreitos.

É perceptível, ao se analisar a última década do setor de soldagem, o contínuo investimento tecnológico, o que desencadeou no desenvolvimento de processos mais modernos, que buscam ganho em produtividade, menor susceptibilidade a defeitos, além de um aumento na segurança do usuário [6]. E, dentre os processos de soldagem existentes, o MIG/MAG é o mais aceito e difundido no ambiente industrial, destacando-se como o processo mais investigado e desenvolvido nas últimas décadas. Alguns fatores desse processo que o destaca e o torna vantajoso sobre seus concorrentes são a promessa de alta taxa de deposição, baixo custo de equipamentos e relevante facilidade de automação, conjuntura que proporciona um processo mais produtivo e que forma um aumento direto no valor agregado do produto final.

Esse ininterrupto e progressivo desenvolvimento na modernização dos processos no setor possibilita a avaliação da plena percepção de inúmeras variáveis modernas no processo MIG/MAG. Por exemplo, os seguintes processos: *buried arc*, capaz de prover alta taxa de deposição com elevada penetração, onde se consegue o preenchimento de uma junta espessa com apenas um único passe, o que reduz o tempo total de operação; *Cold Metal Transfer – CMT* [7] e *Surface Tension Transfer – STT* [8], ambos caracterizados por propiciarem uma transferência metálica do tipo curto - circuito controlado, onde é possível manipular a transferência metálica de modo que tal tecnologia atualmente tem sido aplicada no passe de raiz [9] - [10]; MIG/MAG Duplo Arame [11] - [12], que, por sua vez, é apontado como processo de alta produtividade, podendo apresentar vantagens como baixo aporte térmico e baixa incidência de falta de fusão, mordeduras e porosidades, além de possibilitar trabalhar com altas velocidades de soldagem. Outra versátil tecnologia, cujo eletrodo pode ser continuamente rotacionado, foi recentemente intitulada *Spinarc*, tecnologia essa representa o objeto deste trabalho acadêmico.

Nesse contexto, a presente pesquisa aborda uma nova variante moderna do processo MIG/MAG, que utiliza uma tocha de soldagem cuja rotação do arame-eletrodo é realizada de forma automática, sendo denominada pelo seu fabricante como *Spinarc*. A Figura 1.2 exibe a tocha *Spinarc* com o eletrodo sendo rotacionado em alta frequência. O Laboratório de Soldagem e Mecatrônica da Universidade Federal de Santa Catarina – LABSOLDA, em meados de 2015, foi o primeiro instituto em nível nacional a adquirir e a testar o equipamento desde então, sendo este o primeiro trabalho acadêmico a tratar de tal tecnologia.



Figura 1.2. Ilustração da tocha *Spinarc* sendo rotacionada em alta frequência. $W = 3000$ rpm. Fonte: O autor

De acordo com seus fabricantes [13], a tocha *Spinarc* é destinada para realizar operações de soldagem mediante técnicas *Narrow Gap* em chapas de elevada espessura. O fabricante ainda expõe como benefício da moderna variante do processo MIG/MAG ganhos relacionados a produtividade, como possibilidades da redução do ângulo do chanfro e também ganhos relacionados a propriedades mecânicas/metalúrgicas. De forma geral, existem poucos trabalhos em referência ao processo a eletrodo rotativo, os quais serão analisados e discutidos no decorrer do trabalho. Entretanto, tais trabalhos não trazem muitas informações técnico científico.

Face ao desenvolvimento da moderna tecnologia, faz-se necessário, nós, pesquisadores, investigarmos aspectos fenomenológicos para concluirmos suas reais vantagens e limitações e não ficarmos enclausurados a frases mercadológicas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos Gerais

O objetivo geral do presente trabalho é investigar a influência da rotação do eletrodo na transferência metálica, buscando também avaliar o comportamento do processo para o preenchimento de chanfros *Narrow Gap* de elevada espessura (1”).

Para que se possibilite o alcance do objetivo geral, diversas metas ou objetivos específicos devem ser vencidos, pois, se tratando de uma tecnologia capaz de prover a rotação do eletrodo, são diversas as áreas de conhecimento envolvidas, sejam elas em menor ou em maior parcela.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Mapeamento de parâmetros por intermédio de ensaios práticos que gerarão conhecimentos primordiais a respeito do comportamento do processo MIG/MAG a eletrodo rotativo.
- Estudo e desenvolvimento de procedimentos de soldagem de chapas de aço carbono utilizando o processo a eletrodo rotativo sob diversas condições, como distintas posições de soldagem, distintas geometrias de junta e diferentes modos de transferência metálica.
- Estudo do comportamento do fluxo de gás mediante a utilização da técnica Schlieren, com intuito de investigar a influência da frequência da rotação do eletrodo no comportamento do gás de proteção.

Os primeiros ensaios realizados com a tocha *Spinarc* demonstraram a possibilidade de a rotação do eletrodo influenciar no arco elétrico e na transferência metálica, estabelecendo-se então ser esse o estudo deste trabalho. Do ponto de vista prático, a presente pesquisa irá realizar ensaios

buscando avaliar a técnica utilizada em soldagem orbital de dutos de parede espessa com chanfros de menor angulação. Ao longo de seu desenvolvimento, foram verificadas dificuldades concernentes à proteção gasosa. Desta forma, foram realizadas algumas avaliações buscando comparar a eficiência da proteção gasosa da tocha *Spinarc* com outra tocha padrão comercial.

Este trabalho está dividido em 9 capítulos, a começar por esta introdução apresentando os principais objetivos a serem alcançados. No capítulo 2 são apresentadas informações extraídas da literatura técnico-científica, de temas considerados relevantes para as avaliações acerca do processo MIG/MAG. O capítulo 3 apresenta a metodologia adotada para a realização dos ensaios aqui propostos. No capítulo 4 são apresentados os resultados relativos à aspectos físicos do processo e ensaios sob chapas e no capítulo 5 são expostos os resultados obtidos em chanfros *Narrow Gap*. O capítulo 6 versa a considerações finais do trabalho e sugestões/recomendações. Por fim, no capítulo 7 são listadas as referências bibliográficas consultadas no decorrer do trabalho.

2 FUNDAMENTOS CIENTÍFICOS TECNOLÓGICOS

Este capítulo trata questões inerentes ao processo de soldagem MIG/MAG e variantes modernas existentes destinadas à união de chapas de elevada espessura.

2.1 PROCESSO MIG/MAG

O processo MIG/MAG é caracterizado por utilizar um arco voltaico em uma atmosfera de gás inerte ou ativo que é gerado entre o eletrodo e a peça de trabalho. A Figura 2.1 exibe uma representação esquemática do processo MIG/MAG.

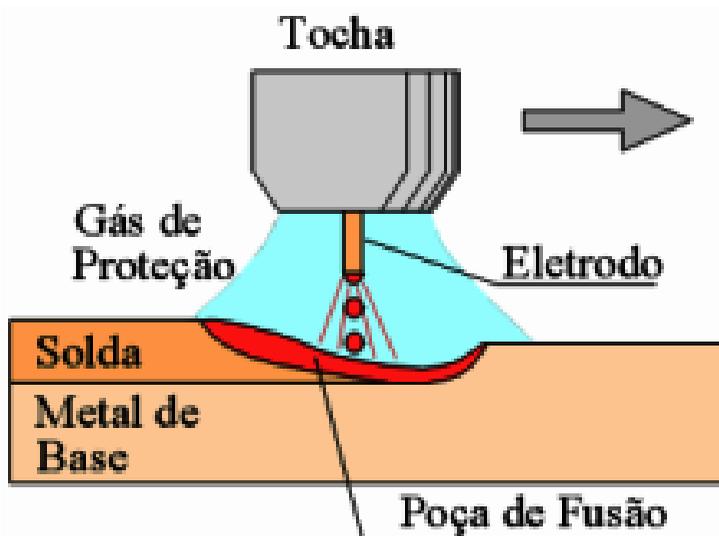


Figura 2.1. Representação esquemática do processo MIG/MAG. Adaptado de [14].

A transferência metálica no processo MIG/MAG se dá pela interação de diversas forças que atuam na extremidade da gota já fundida na ponta do eletrodo, poça de fusão e arco elétrico. Dentre os diversos tipos de mecanismos envolvidos, os mais relevantes se tratam das forças de origem eletromagnética, gravitacional e tensão superficial. A transferência metálica ocorre basicamente por dois mecanismos. No primeiro deles

há o contato da gota (curto-circuito) antes do destacamento da gota metálica, onde tal classe é intitulada como transferência por contato. Já no segundo modo de transferência metálica, a gota é ejetada da ponta do eletrodo sem que necessite o contato entre a gota e a poça de fusão, caracterizando-o, desta maneira, como transferência por voo livre, conforme os modos de transferência metálica podem ser visualizados na Figura 2.2.

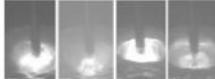
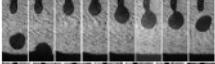
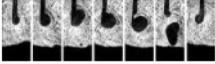
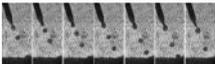
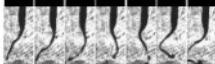
Classe de modos	Modo de transferência	Imagem	Força (efeito) governante principal
Por contato	Curto-circuito		Tensão superficial e efeito pinch
	Ponte		Tensão superficial
	Curto-circuito forçado		Efeito pinch fortemente acentuado
Por voo livre	Globular		Gravitacional
	Globular Repulsiva		Gravitacional e reação
	Goticular (ou Goticular projetada)		Eletromagnética
	Goticular com alongamento		Eletromagnética
	Goticular rotacional		Eletromagnética
	Explosiva		Eletromagnéticas e reações químicas

Figura 2.2. Classes e respectivos modos naturais de transferência metálica que acontecem no processo MIG/MAG. Fonte : Adaptado de [15]

A Figura 2.3 apresenta uma relação entre os parâmetros do processo de soldagem (corrente e tensão) em função dos tipos de gases de proteção, onde é possível observar os respectivos modos de transferência metálica.

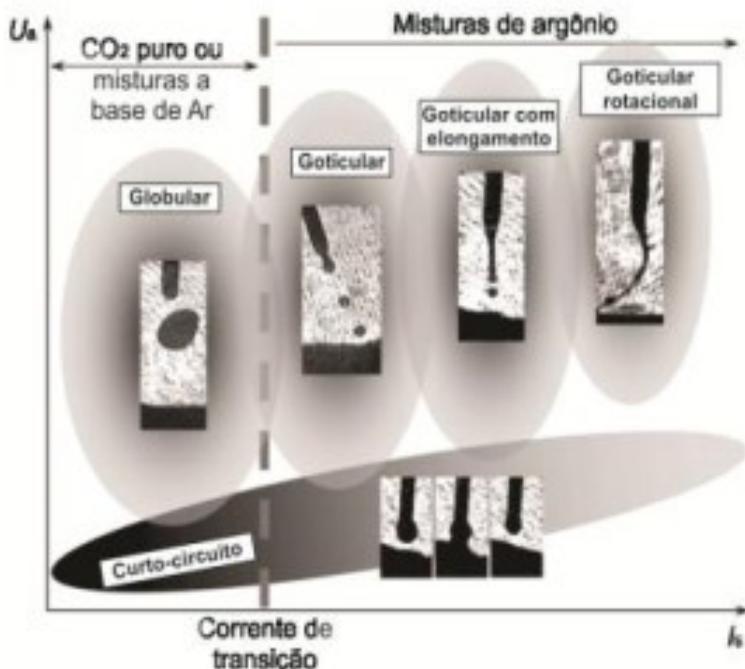


Figura 2.3. Mapa dos modos de transferência metálica do processo MIG/MAG em função da corrente, tensão e mistura gasosa. Fonte: [15]

Apesar de atualmente muitos procedimentos serem realizados pelo processo MIG/MAG convencional, onde o processo utiliza o controle por tensão, existem outras variantes do processo MIG/MAG que utilizam controle por imposição de corrente, como por exemplo os processos onde a transferência metálica ocorre por curto-circuito controlado, no qual merecem destaques os processos STT da empresa *Lincoln Eletronic*, CCC da empresa nacional IMC Soldagem, CMT da empresa *Fronius*, RMD da empresa *Miller*. Devem ser destacados também, os processos MIG/MAG pulsado, pulsado térmico e MIG/MAG com corrente alternada. Dentre todos os tipos de processos MIG/MAG aqui citados, será enfatizada a transferência metálica por curto-circuito, pulsado e *spray*, as quais serão exploradas mais a fundo no decorrer do texto.

2.1.1 Transferência Metálica no Processo MIG/MAG Convencional

O modo de transferência metálica mais utilizado no processo MIG/MAG convencional é o curto-circuito, que é particularizado por apresentar um baixo valor médio de tensão, acarretando, desta maneira, em baixo aporte térmico, quando comparado a outros modos de transferência.

A Figura 2.4 apresenta o mecanismo da transferência metálica, via oscilograma de tensão e corrente concatenado com filmagem de alta velocidade, onde uma explanação detalhada do fenômeno é proposta na sequência.

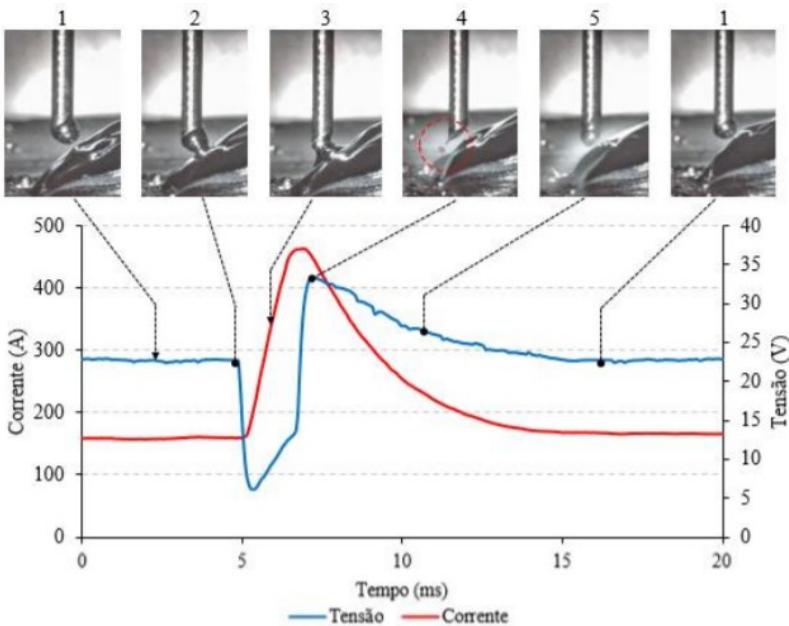


Figura 2.4. Quadros da filmagem de alta velocidade sincronizada com sinais elétricos, demonstrando apenas um ciclo. Fonte: Adaptado de [16].

Uma característica deste processo é que, neste caso, trabalha-se com imposição de tensão. Sendo assim, a corrente de soldagem permanece livre, de modo a se ajustar em função das condições impostas no processo com o intuito de manter um equilíbrio entre taxa de alimentação

do eletrodo e a taxa de fusão do mesmo. Cabe ressaltar que é possível alterar a velocidade tanto de subida quanto de descida da corrente através da regulagem da indutância ou impedância do circuito [17].

A) Nesta etapa o arame é alimentado continuamente em direção a poça de fusão e a gota já formada na ponta do eletrodo começa a crescer seu tamanho. Cabe aqui salientar que, nesta etapa, o arco elétrico já está estabelecido.

B) Esta fase é caracterizada pela aproximação do eletrodo à peça até que ocorra o contato com a poça de fusão, onde tal fenômeno é descrito como curto-circuito. Nesta fase, a corrente se encontra em valores bem baixos, sendo denominada corrente de arco.

C) Devido ao fato da curva característica da fonte de soldagem ser do tipo tensão constante, ou seja, a corrente é uma conjuntura das variáveis selecionadas na fonte de energia (tensão de referência e velocidade de alimentação), durante a fase de curto-circuito, a corrente se eleva bruscamente devido a menor resistência do circuito. Com isso, ocorre a compressão da ponte metálica, fenômeno esse denominado efeito *Pinch*. Nesta fase, o arco elétrico ainda se encontra extinto [18].

D) Nesta etapa, devido a somatória do efeito *Pinch* com a parcela da tensão superficial, a gota é despreendida da ponta do eletrodo. O rompimento da ponte metálica ocorre em valores de corrente elevados, ocorrendo essa que pode acarretar em uma abrupta transferência metálica, podendo gerar respingos e micro explosões [19].

E) Após o rompimento da ponte metálica (curto-circuito), o arco elétrico é restabelecido, onde os valores de tensão regressam aos valores operacionais predeterminados. A partir deste estágio, uma nova gota começa a ser formada na ponta do eletrodo, restabelecendo todo o ciclo detalhado acima.

F) Neste ponto em que a gota adquiriu um diâmetro maior que na etapa anterior, onde nem sempre a mesma assume uma forma esférica, fato esse justificável pela inexistência de um tempo definido para a formação de uma nova gota e devido a caótica vibração da poça de fusão, esporadicamente transcorre curtos-circuitos acidentais.

Como se pode constatar mediante o texto explicativo acima, a transferência metálica por curto-circuito é particularizada por momentos de arco aberto (A – D - E - F) e de extinção do mesmo (B – C).

Com o aumento da corrente de soldagem e, ocorre a mudança no tipo de transferência metálica, mudando de curto-circuito para globular, onde o diâmetro médio das gotas é, em geral, maior que o diâmetro do

eletrodo. Esse tipo de transferência metálica é caracterizado pela transferência irregular de gotas com grande diâmetro e com baixa frequência de destacamento, além de ter um nível elevado de respingos. Como a força dominante nesse tipo de transferência é a força gravitacional, a soldagem fica limitada apenas a posição plana.

Posteriormente, quando a corrente de soldagem ultrapassa um valor limite, denominado corrente de transição (I_t), ocorre uma abrupta redução do tempo de formação das gotas até o destacamento, gerando um aumento na frequência de destacamento e, por consequência, uma redução no diâmetro da gota. Tal transferência metálica é denominada goticular, conforme a mesma pode ser observada na Figura 2.5. Ainda como característica deste modo de transferência tem-se uma boa estabilidade do arco elétrico, baixa incidência de respingos, boa molhabilidade e ainda é possível operar com altas velocidades de soldagem e altas taxas de deposição. Cabe aqui versar que o valor de I_t é dependente do teor de CO_2 na mistura gasosa, onde, a partir de um certo valor acima de 18 a 20%, esse tipo de transferência dificilmente é observado. Esse modo de transferência necessita de altas correntes de soldagem, acarretando, desta maneira, em uma grande poça de fusão, onde dificulta a soldagem fora da posição plana.

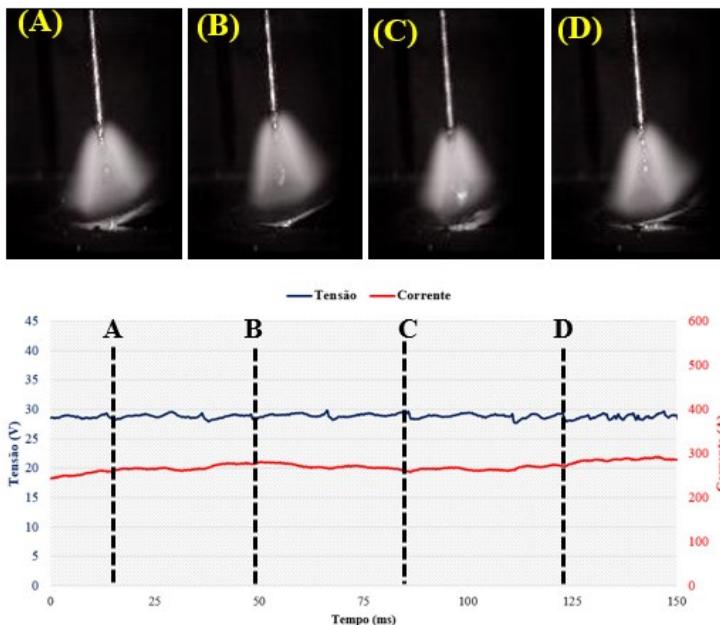


Figura 2.5. Quadros da filmagem em alta velocidade exibindo a transferência metálica por *spray* sincronizado com os sinais elétricos. Fonte: O autor

2.1.2 MIG/MAG Pulsado

Os avanços tecnológicos na área principalmente de eletrônica de potência culminaram no desenvolvimento de fontes eletrônicas, que possibilitam a pulsação da corrente. Tal desenvolvimento se justifica pela constante necessidade de se alcançar processos cada vez mais sofisticados, podendo manipular a transferência metálica de modo a se obter alta produtividade com uma menor susceptibilidade a defeitos.

A modalidade MIG/MAG com comandado por corrente pulsada proporciona o modo de transferência metálica do tipo goticular, onde é possível obter um valor médio de corrente abaixo da corrente de transição. O valor médio de corrente é função das distintas variáveis do processo, conforme pode ser visualizado na Equação 1.

$$I_m = \frac{I_p * t_p + I_b * t_b}{t_p + t_b} \quad (1)$$

Onde:

I_m = Corrente média (A)

I_p = Corrente de pulso (ms)

t_p = Tempo de pulso (ms)

I_b = Corrente de base (A)

t_b = tempo de base (ms)

Para a escolha do valor médio de corrente, distintos parâmetros podem ser regulados até que se atinja o valor predeterminado. Entretanto, aconselha-se a trabalhar com o valor médio de corrente abaixo do valor da corrente de transição, pois, para o caso de se trabalhar com valores acima, a melhor opção seria trabalhar com a transferência por *spray*.

Existem dois preceitos que devem atualmente ser atendidos para atingir a estabilidade no processo MIG/MAG pulsado. O primeiro deles está correlacionado com um equilíbrio a respeito da velocidade de alimentação e a taxa de fusão do eletrodo, conforme pode ser demonstrado mediante a Equação 2.

$$Tf = \alpha * I_m + \beta * L * I_m^2 \quad (2)$$

Onde:

Tf = Taxa de fusão (Kg/h)

α e β = Coeficientes dependentes da composição química do arame, gás de proteção, diâmetro do eletrodo, dentre outros.

L = extensão do eletrodo (mm)

O segundo preceito que muitos autores consideram para se obter um processo estável no modo pulsado se trata do destacamento de apenas uma gota por período. Hoje em dia, tais condições já se tornaram bem elucidadas perante a comunidade científica, sendo o instante temporal no qual a gota deve ser destacada, razão que ainda implica grande divergência por parte de diversos trabalhos encontrados na literatura [20] - [21].

De acordo com Scotti [15], o destacamento da gota metálica na fase de base é de difícil repetibilidade, dotando-se da ciência que o impulso cinético fornecido pelas forças de origem eletromagnéticas não supera a tensão superficial, que atua de modo a reter a gota na ponta do eletrodo, não acarretando, desta maneira, na transferência da mesma. O mesmo ainda explicita que, quando o destacamento da gota metálica ocorre na fase final do pulso, também há a possibilidade da ocorrência da

retração da gota para a ponta do eletrodo. Dutra, Silva e Marques [22], em suas pesquisas vislumbrando a obtenção de algumas respostas a respeito do comportamento da transferência metálica para a soldagem com arame de Al 4043, propuseram investigar fenômenos inerentes a transferência metálica quando o destacamento ocorre na fase de base. Os mesmos concluíram que, para as condições analisadas, o destacamento na fase de base se mostrou robusto e repetitivo, de modo que a retração da gota metálica para a ponta do eletrodo não foi observada. Os pesquisadores ainda teceram algumas conclusões a respeito da relação entre I_p e t_p , sendo também investigada a influência do diâmetro da gota tanto na transferência metálica quanto nos sinais elétricos do processo.

Comumente descrita pela literatura, a região UGPP pode ser representada como um mapa operacional, de modo a ser possível combinar distintos parâmetros entre I_p e t_p sem que se saia da ocorrência de uma gota por pulso. Tais possíveis correlações de parâmetros se tornam bastantes relevantes, de modo a poder manipular as variáveis físicas da gota, como sua temperatura, por exemplo, o que resulta de forma indireta em sua viscosidade e velocidade de impacto da gota na poça de fusão, sendo esse, um dos fatores que governam a penetração.

A Figura 2.6 exibe quadros da filmagem de alta velocidade sincronizados com os sinais elétricos, onde é possível observar o comportamento da transferência metálica. Na fase de pulso (A), a força de origem eletromagnética se torna grande o suficiente, de modo a quase ejetar a gota. Após o pulso de corrente, a gota é destacada na fase de base (B), onde a corrente cai para um patamar de menor valor e ali começa a se formar uma nova gota na ponta do eletrodo. Na fase C, após o destacamento da gota metálica, um novo ciclo passa a acontecer, onde ocorre a fusão do material e a gota tende a crescer seu tamanho na ponta do eletrodo (quadro D), onde, após tal ocorrência, irá ocorrer o próximo pulso de corrente.

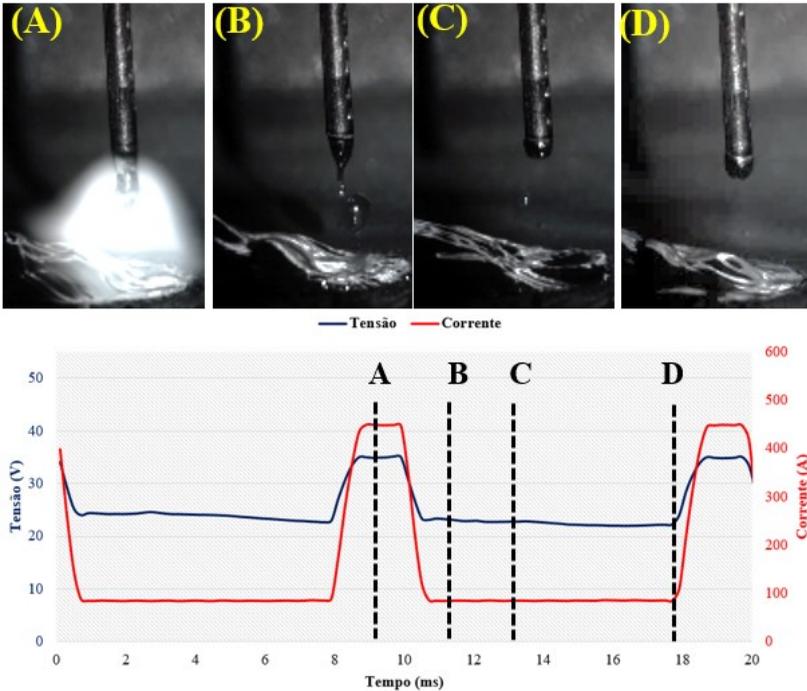


Figura 2.6. Quadros da filmagem de alta velocidade sincronizada com sinais elétricos, demonstrando a transferência metálica no MIG/MAG pulsado. Fonte: O autor

Ueguri, Hara e Komura [23] explicitaram como benefício do controle da transferência metálica uma regularidade de destacamento bem definida e a manutenção do valor médio de corrente, juntamente uma drástica redução da emissão de respingos, isso em comparação com a transferência metálica por curto-circuito. Outra característica intrínseca deste processo se trata da obtenção de um cordão com maior molhabilidade, fato esse de interesse na soldagem dos aços inoxidáveis devido à alta tensão superficial do mesmo e na soldagem das ligas de alumínio que detêm como característica alta condutividade térmica. De acordo com os pesquisadores um outro fator de interesse quanto utiliza a corrente pulsada, trata-se da possibilidade de trabalhar com correntes de pulso bem elevadas, o que, na teoria, tendem a propiciar um arco elétrico mais rígido, ocorrência essa de extrema relevância para a soldagem *Narrow Gap*, conforme será visto no decorrer do texto.

De acordo com as pesquisas realizadas por Waszink et al [24], um outro quesito também de interesse a respeito do controle da transferência

metálica se trata da manipulação de algumas variáveis, podendo ser destacadas entre elas a velocidade e a aceleração das gotas. Posteriormente, os resultados obtidos por Ogino et al [25] e Tanaka et al [26] evidenciaram que outras variáveis também são influenciadas com distintos parâmetros do modo pulsado, como a taxa de evaporação, concentração de ferro nos fumos, temperatura das gotas e temperatura da poça de fusão.

2.2 INFLUÊNCIA DOS GASES DE PROTEÇÃO

Como o próprio nome já diz, os gases de proteção têm como ofício primário a proteção da poça de fusão contra possíveis contaminações. Eles possuem como finalidade a criação de uma “barreira”, de modo a dificultar o ingresso de outros gases, tais como oxigênio, nitrogênio e hidrogênio, pois eles detêm relevante papel para a formação de trincas a frio, bem como ação prejudicial nas resistências mecânica/metalúrgica das juntas soldadas [27] - [28].

É sabido também que os gases de proteção são necessários para a própria funcionalidade do processo de soldagem pois, quando aquecidos, os mesmos se dissociam e se ionizam.

Entretanto, a corrente literatura [29] - [30] ainda expõe que eles desempenham uma outra participação de suma relevância na própria transferência metálica, nos efeitos morfológicos e nas propriedades mecânicas na junta soldada, assim como na emissão de fumos e, em muitos dos casos, pode ditar a eficiência do processo. Mesmo que os gases de proteção representem um baixo custo no orçamento da obra, eles podem representar um impacto sobre o orçamento do empreendimento [31].

A fim de demonstrar as possíveis alterações nos que diz respeito a aspectos morfológicos mediante o incremento do teor de CO₂ na mistura gasosa, Liskevych e Scotti [32], em suas pesquisas, propuseram a realização de um simples procedimento de união de chapas finas na posição plana, conforme a Figura 2.7 exhibe os resultados obtidos pelo pesquisador.

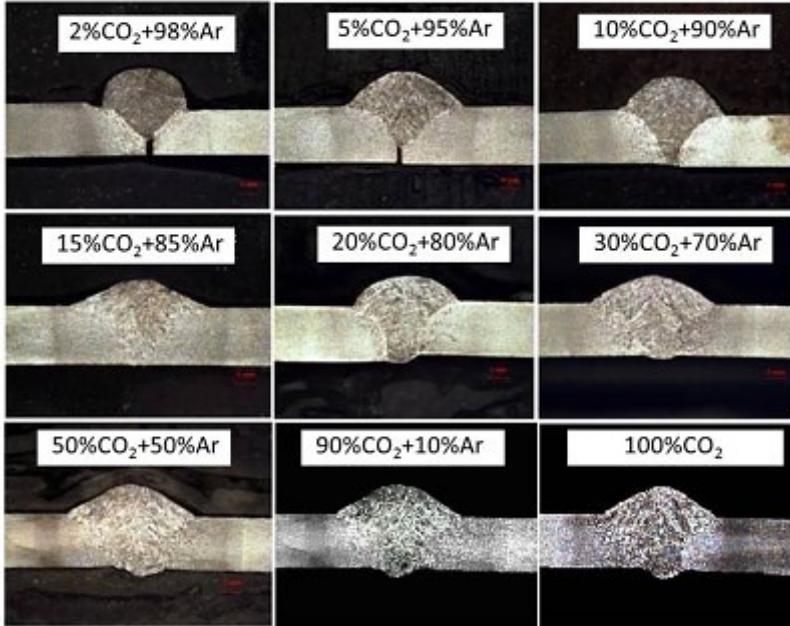


Figura 2.7. Seção transversal do ensaio variando o percentual de CO_2 na mistura gasosa. Fonte: Adaptado de [32].

Neste procedimento, os pesquisadores puderam concluir que o aumento do teor de CO_2 na mistura gasosa tende a aumentar a zona fundida com um acréscimo de penetração e reforço para as condições investigadas. Entretanto, eles ainda relataram uma maior presença de salpicos juntamente com uma maior geração de fumos, assim como também foi observada a tendência de haver uma transferência metálica mais abrupta. Os pesquisadores ainda ressaltam a viabilidade da utilização de atmosfera protetora composta por 100% de CO_2 somente por causa do baixo custo do gás, tendo em vista a necessidade de modernas fontes eletrônicas para que se possa atingir um certo nível de regularidade no processo de soldagem.

Com intuito de investigar as possíveis alterações no perfil do arco elétrico mediante distintas misturas contendo CO_2 , Cai et al [33] propuseram a realização de ensaios na posição plana em chanfros *Narrow Gap* do tipo I. Para a realização dos testes, os autores utilizaram os mesmos parâmetros de tensão e velocidade de arame para todos os ensaios, de modo a se observar possíveis alterações no sinais elétricos. As imagens

registradas via câmara de alta velocidade podem ser visualizadas na Figura 2.8.

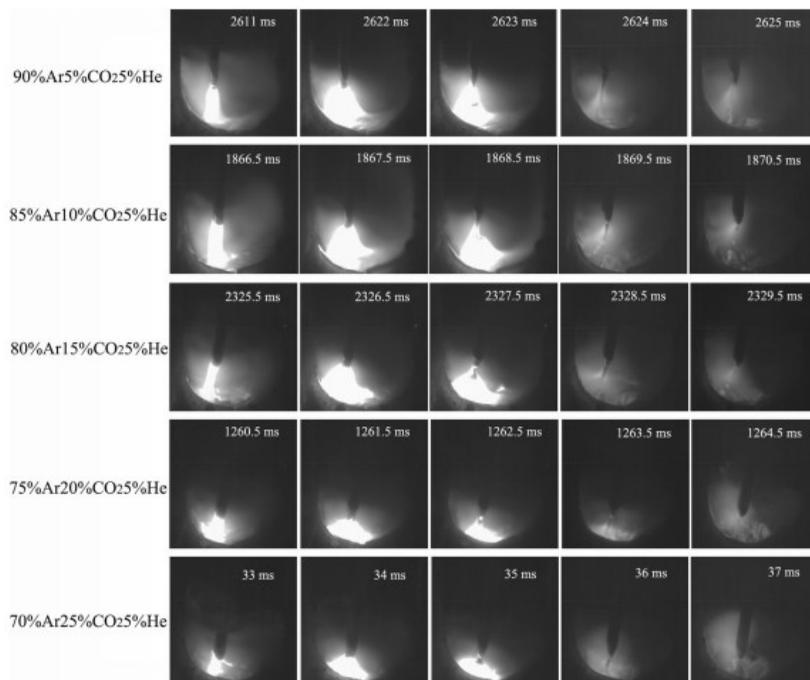


Figura 2.8. Comparativo entre os perfis do arco elétrico com distintas atmosferas contendo CO₂. Fonte : Adaptado de [33].

Assim, Cai et al [33] puderam concluir que o incremento no teor de CO₂ na mistura gasosa propiciou não somente uma mudança no perfil do arco elétrico, mas também proveu alterações nos sinais elétricos do processo. Inicialmente, foi observada uma redução no comprimento do arco com o incremento de CO₂. Posteriormente, os pesquisadores avaliaram os sinais elétricos do processo e concluíram que o aumento de CO₂ promoveu a redução do valor médio de tensão, sendo encontrado o máximo valor com misturas entre 5 a 10% de CO₂. Os autores ainda constataram que o aumento no teor de CO₂ culminava no destacamento de gotas secundárias após o pulso de corrente, sendo perceptível uma maior emissão de salpicos. Ainda foi possível relatar que o cordão que apresentou a melhor aparência visual se encontra com misturas na ordem de 10% de

CO₂, onde tais misturas com um percentual inferior de CO₂ apresentam baixa molhabilidade do cordão e falta de fusão nos flancos laterais. De posse de seus experimentos, os pesquisadores encontraram uma faixa de misturas contendo CO₂ que culmine em um procedimento estável e com isenção de defeitos.

2.3 AVALIAÇÃO DO FLUXO DE GÁS DE PROTEÇÃO UTILIZANDO TÉCNICA *SCHLIEREN*

A técnica *Schlieren* é um procedimento que já vem sendo utilizada a várias décadas para a visualização do fluxo de gás em diversas áreas, tais como termodinâmica, aerodinâmica, balística, ventilação e, mais recentemente, vem despertando os interesses de pesquisadores da área de soldagem e corte a plasma. A técnica *Schlieren* proporciona um estudo qualitativo concernente aos fenômenos que ocorrem na dinâmica dos fluidos, podendo assim ser utilizada para o estudo da dinâmica dos gases e plasma que ocorrem no arco elétrico de soldagem, fatores esses que podem ser decisivos para a obtenção de procedimentos com isenção de defeitos.

Em sua pesquisa, Dreher et al [34] buscou avaliar o fluxo do gás de proteção em função do diâmetro do furo do difusor de gás, dotando-se da combinação da técnica *Schlieren* e de simulações numéricas, de modo a se avaliar a confiabilidade do modelo desenvolvido destinado ao processo MIG/MAG, utilizando Argônio como gás de proteção. A Figura 2.9 exhibe os resultados por ele alcançados. Os autores investigaram ainda a relevância da posição dos difusores, assim como também realizaram testes investigando a influência do ângulo da tocha, temperatura do gás juntamente com distintas vazões, a fim de avaliar as possíveis alterações tanto no fluxo de gás quanto na qualidade final do cordão depositado.

Por fim, pôde-se concluir que, para um melhor fluxo de gás na saída do bocal e uma baixa concentração de oxigênio, os melhores resultados encontrados foram utilizando um difusor com orifícios de 1,5 mm de diâmetro, tendo em vista que a função do mesmo é garantir um fluxo laminar no gás de proteção, de modo que o gás possa garantir a integridade da poça de fusão.

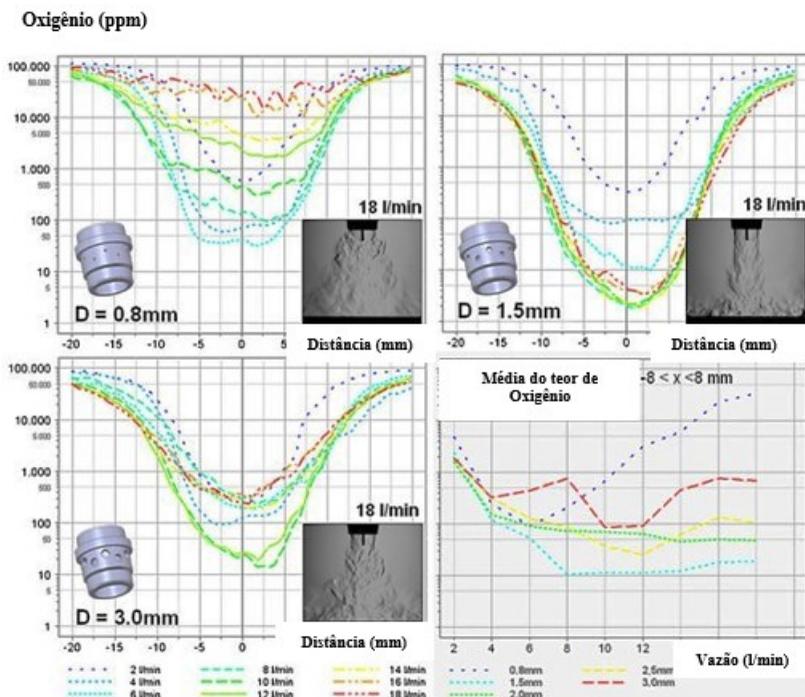


Figura 2.9. Simulação numérica da medição do teor de O_2 e imagens gerados a partir da técnica *Schlieren* em função do diâmetro do difusor de gás. Fonte: Adaptado [34].

Em seu trabalho, Bitharas et al [35] propuseram investigar os limites no que diz respeito ao teor de O_2 no cordão de solda, onde também realizaram simulações numéricas com o intuito de validar os experimentos realizados. Foram utilizadas análises via técnica *Schlieren* para indagar o comportamento do fluxo de gás com distintas misturas gasosas, conforme a Figura 2-10 exibe as imagens registradas apresentando um comparativo com diferentes vazões do gás de proteção.

Os pesquisadores ainda explicitam que somente foi possível visualizar o fluxo de gás devido a diferença do índice de refração dos gases, causado pela diferença de temperatura (representado pela letra T). Posteriormente, foi constatada a presença de um *vortex* (indicado pela letra V), onde é possível observar sua movimentação. A letra C representa o fluxo de gás na saída do bocal, onde, de acordo com Bitharas et al [35], foi possível observar uma deficiência na proteção gasosa com 6 l/min de vazão, acarretando, desta maneira, na formação de poros.

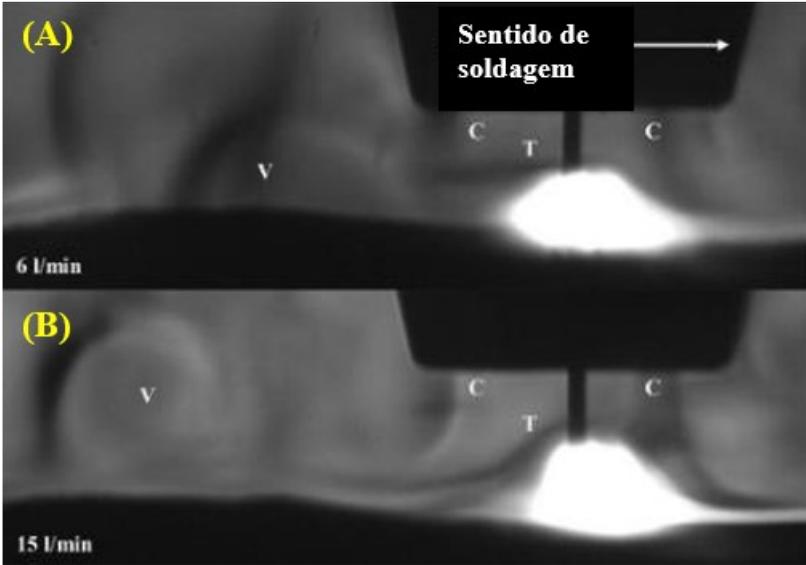


Figura 2-10. Imagens registradas com a técnica Schlieren. Gás utilizado: Argônio.
Fonte: Adaptado [35].

A Figura 2.11 exibe os resultados obtidos pelos pesquisadores [35] para o procedimento realizado na posição plana e com a vazão de gás em 6 l/min , exibindo a seção transversal (a), a radiografia com ênfase nos poros (b) e a vista superior do cordão.

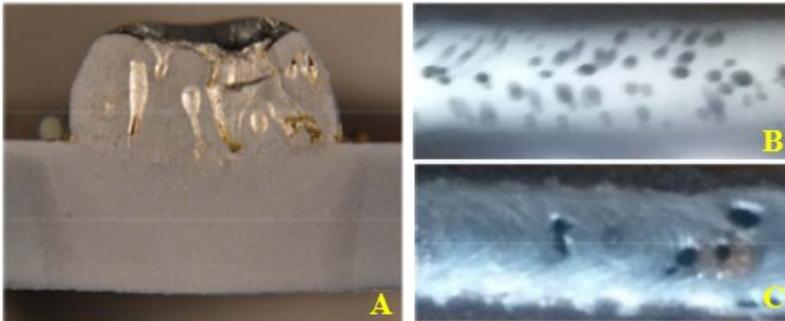


Figura 2.11. (a) Seção transversal; (b) radiografia e (c) vista superior do cordão; Gás utilizado: Argônio. Fonte: Adaptado de [16].

2.4 ASPECTOS RELEVANTES DA SOLDAGEM *NARROW GAP*

2.4.1 Relevância do projeto da junta

O projeto da junta representa grande importância pois é a partir de onde se pode determinar a quantidade de material que será depositado durante o processo de soldagem, o que irá impactar na produtividade do processo.

Em sua pesquisa, Norrish [36] pôde demonstrar a variação da área da seção transversal em função da variação do gap, isto é, para uma mesma geometria de junta em V. Os resultados obtidos pelo pesquisador são expostos na Figura 2.12.

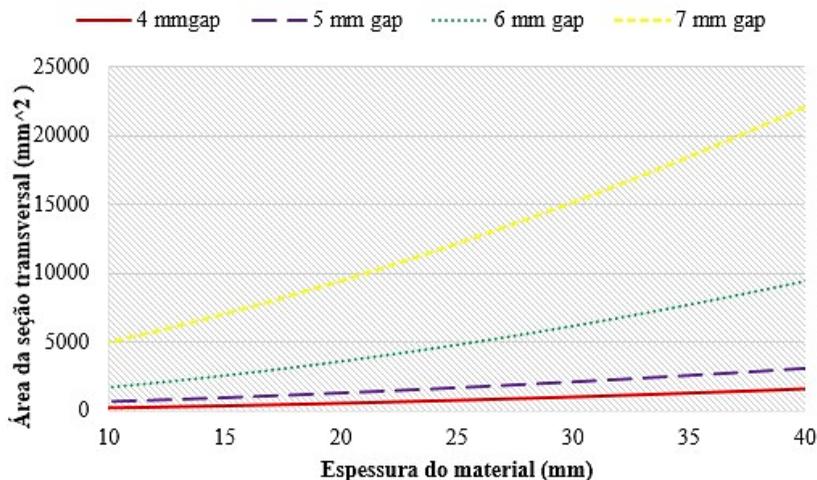


Figura 2.12. Gráfico comparativo entre a área da seção transversal em função da variação do gap e espessura da chapa a ser soldada. Fonte: Adaptado de [37].

Keltanen [37] propôs uma investigação nas principais geometrias de chanfros utilizados, juntamente com as principais problemáticas, onde a Figura 2.13 exibe os resultados obtido pelo autor. Como pode ser visualizado, dentre os tipos de juntas mais comumente utilizadas em operações *Narrow Gap*, a junta que apresenta uma menor quantidade de material a ser adicionado e, conseqüentemente, um menor tempo para a realização do procedimento se trata do chanfro o tipo I.

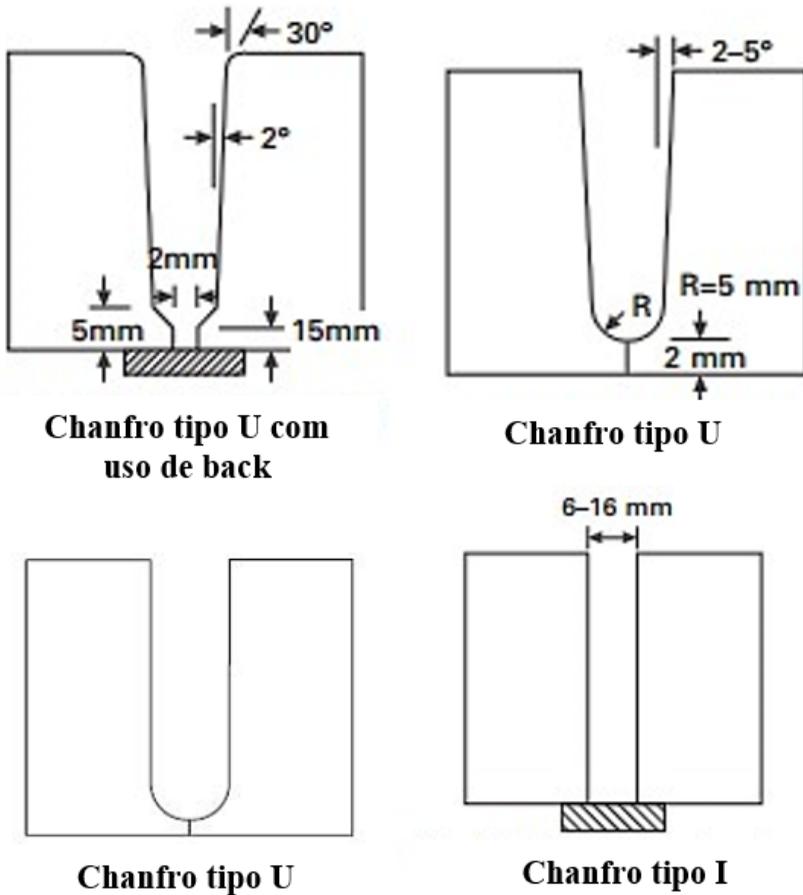
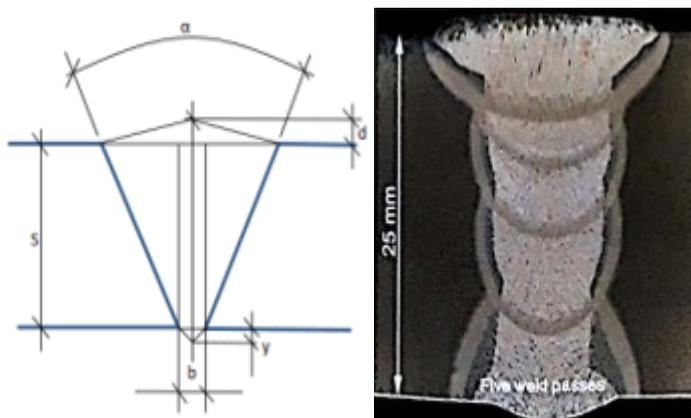


Figura 2.13. Juntas *narrow gap* tipicamente utilizadas demonstrando a variação da quantidade de material a ser aportado. Fonte: Adaptado de [37] - [36].

Todavia, as pesquisas correlatas de Norrish [36] e [37] demonstraram as dificuldades em empreender procedimentos em chanfros do tipo I. O pesquisador ainda reitera que, dentre todas as problemáticas derivadas de técnicas *Narrow Gap*, as mais comumente encontradas se tratam de problemas concernentes à falta de fusão nos flancos laterais.

De acordo com as pesquisas realizadas por KEMPPPI [38], onde o pesquisador propôs uma comparação entre a quantidade de massa a ser

adicionada em junção da geometria da junta, ao empreender o procedimento com a técnica *Narrow Gap*, foi factível a redução de aproximadamente 57% de massa a ser adicionada. A Figura 2.14 exhibe os resultados encontrados.



Groove Measurements		Current 45° groove	New 20° groove	New 5° groove
thickness	s	25 mm	25 mm	25 mm
bevel angle	$\alpha/2$	22,5°	10°	2°
gap	b	6 mm	6 mm	6 mm
root reinforcement	y	2mm	2 mm	2
reinforcement	d	2 mm	2 mm	2
groove area	A	442 mm ²	281 mm ²	191 mm ²
weld mass	G	3,5 kg/h	2,2 kg/m	1,5 kg/h

Figura 2.14. Comparativo entre a quantidade de massa a ser aportada em função do ângulo da junta. Fonte: Adaptado de [38].

Kim et al [39] propuseram em seu trabalho investigar os possíveis ganhos mediante a manipulação de técnicas *Narrow Gap*, onde ainda foram realizadas simulações numéricas com o intuito de validar o modelo desenvolvido. Os pesquisadores puderam concluir que o simples fato da redução do ângulo da junta e, por consequência, na massa do material a ser aportado, culminaram na redução dos picos de temperatura, juntamente com uma menor distorção, assim como também proveram uma melhora nas propriedades mecânicas/metalúrgicas da junta, ocorrência essa devido as altas taxas de resfriamento presentes em tais técnicas.

2.4.2 Problemas recorrentes da soldagem NG

Um dos principais problemas recorrentes da soldagem *Narrow Gap* é a falta de fusão nos flancos laterais, sendo essa problemática muitas vezes originada pela má parametrização concernente aos parâmetros elétricos do processo. Ou seja, devido a incompatibilidade de parâmetros elétricos do processo de soldagem, ocorre o ancoramento do arco elétrico, o que acaba impossibilitando a realização do primeiro passe, ou passe de raiz.

Com o intuito de investigar os possíveis fatores que levam ao ancoramento do arco elétrico, Wenji et al [40] propuseram a realização de ensaios na posição plana mediante técnicas *Narrow Gap* utilizando uma fonte comandada via corrente. A Figura 2.15 exhibe as forças atuantes no momento da repulsão da gota, juntamente com os quadros da filmagem de alta velocidade, onde é possível observar a repulsão da gota metálica em direção contrária ao ancoramento do arco elétrico.

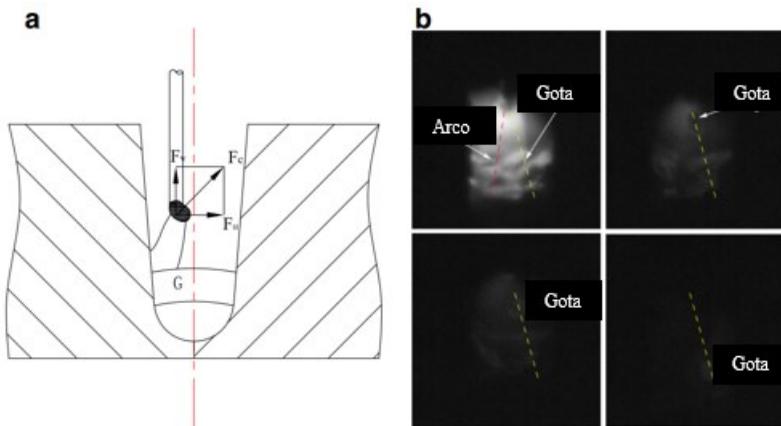


Figura 2.15. Figura representando os fenômenos. (a) Forças atuantes; (b) quadros da filmagem de alta velocidade demonstrando o ancoramento do arco elétrico e a trajetória da gota metálica. Fonte: Adaptado de [20].

Os pesquisadores observaram que, na fase de base, onde a corrente se encontra em um menor valor, e quando o eletrodo tende a ir em direção aos flancos, ocorre o ancoramento do arco elétrico devido à baixa rigidez do arco. Relataram ainda que, quando há o ancoramento do arco no período do pulso de corrente, a gota é ejetada em direção contrária a parede onde o arco elétrico é ancorado. Tal ocorrência foi associada não somente

ao campo elétrico gerado pelas linhas de corrente, mas também ao campo magnético. O mesmo ainda associou tal fenômeno, quando a distância entre o a ponta do eletrodo e a parede lateral é menor que a distância entre a ponta do arame e a poça de fusão. Constatou-se que o ancoramento do arco também está relacionado ao perfil da junta, onde juntas mais estreitas apresentam uma menor distância entre o eletrodo/parede em relação a distância eletrodo/raiz. De modo a vencer tais desafios, o autor utilizou-se de um controle adaptativo da altura do arco. Onde pode-se predizer de forma indireta o comprimento do arco, mantendo-o curto o bastante de modo a não a não ser plausíveis o ancoramento na fase de base.

Em seus trabalhos, Zhang et al [41] propuseram investigar os fenômenos inerentes a transferência metálica mediante a manipulação de técnicas *Narrow Gap* operando com uma fonte comandada via tensão. A priori, os pesquisadores investigaram o comportamento da transferência metálica com distintas velocidades de alimentação, complementando seus experimentos com simulações numéricas para tal fim. Pôde-se concluir que, para valores elevados de tensão (28V) e para baixas velocidades de alimentação (4,3 m/min), ocorria o ancoramento do arco elétrico nos dois flancos laterais, havendo a repulsão da gota para o sentido contrário a posição do arco elétrico, acarretando, desta maneira, em um processo instável, levando a formação de um cordão irregular. O mecanismo descrito acima pode ser visualizado na Figura 2.16.

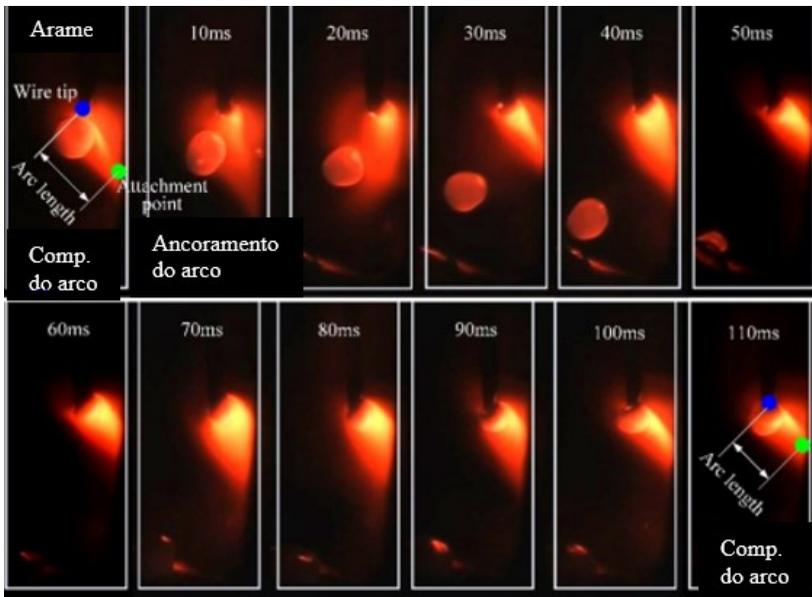


Figura 2.16. Quadros da filmagem de alta velocidade demonstrando o ancoramento do arco elétrico e repulsão da gota metálica. $V.a = 4,3 \text{ m/min}$ Fonte: Adaptado de [41].

Face a isso, os pesquisadores utilizaram-se de uma maior velocidade de alimentação ($6,3 \text{ m/min}$) para o mesmo valor de tensão selecionado na fonte de energia. Eles ainda explicitam que tal metodologia culminou em uma menor distância entre a ponta do eletrodo e a raiz do chanfro. A metodologia foi utilizada baseada em um curto-circuito forçado, de modo a manter o comprimento do arco elétrico curto o bastante, não deixando que ele atinja um certo comprimento onde possa se ancorar nos flancos laterais. A Figura 2.17 exhibe os quadros da filmagem de alta velocidade registrados.

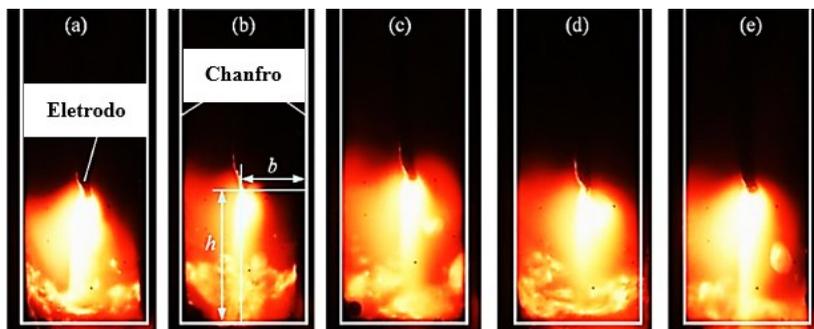


Figura 2.17. Quadros da filmagem de alta velocidade demonstrando o comportamento do arco elétrico. $V.a = 6.0$. Adaptado de [41].

Zhang et al [41] ainda relatou que, mesmo em trechos ocorrendo uma pequena deflexão do arco elétrico, conforme por ser visto no quadro (A), tal processo se mostrou estável onde não foi observado a total deflexão do arco elétrico. No quadro (B), pode ser observada uma menor distância entre a ponta do eletrodo e os flancos laterais, quando comparada à distância entre a ponta do eletrodo e o fundo do chanfro, onde não foi observada instabilidade de modo a gerar possíveis defeitos. Já nos quadros (C-D), foi possível observar a formação do arco elétrico entre a ponta do eletrodo e o fundo no chanfro. No quadro (E), é possível observar o destacamento da gota metálica.

Posteriormente, em seus trabalhos, Zhu et al [42] propuseram uma sistematização a fim de avaliar tanto o comportamento da poça de fusão quanto os possíveis defeitos na soldagem de chapas espessas de alumínio, mediante técnicas *Narrow Gap*. Os pesquisadores ainda realizaram simulações numéricas com o intuito de avaliar a confiabilidade dos experimentos efetivados. Foi explicitado que, devido às experiências adquiridas em trabalhos anteriores [43], para a realização dos experimentos em questão foi utilizado um sistema adicional de gás com o intuito de evitar possíveis porosidades. Os autores afirmam que tal medida preventiva se dá em função das propriedades físicas da liga apresentar alto índice de óxidos em altas temperaturas. Em seus experimentos, Zhu et al [42] puderam constatar a relação entre a morfologia dos cordões (côncavo, convexo e plano) e a corrente de soldagem, onde também foi constatada a correlação entre energia de soldagem e quantidade de material aportado, bem como a pressão do arco. Ressalta-se que a presença de porosidades geralmente encontrada perto das paredes laterais estão concatenadas ao movimento da poça de fusão.

Xu et al [44] associaram que uma das principais problemáticas da soldagem *Narrow Gap* se trata da aplicação em chapas de elevada espessura, pois, devido à alta de condução do calor, tende a propiciar problemas como a falta de fusão nos flancos laterais.

Com o intuito de sanar a problemática de maior relevância na soldagem de chapas espessas (falta de fusão), surgiram metodologias das quais serão abordadas na próxima secção.

2.5 TÉCNICAS ALTERNATIVAS PARA SOLDAGEM NG

Não obstante, tendo como embasamento todas as problemáticas até aqui citadas, foram desenvolvidas novas tecnologias capazes de superar os obstáculos impostos pelo universo *Narrow Gap*, sendo a maioria dessas envolvendo técnicas de rotação ou direcionamento especial do eletrodo.

Foram desenvolvidas tecnologias onde o eletrodo pudesse ser oscilado de um ponto a outro, conforme a Figura 2.18 exibe de forma didática [45]-[46]. O ângulo β formado geralmente é inferior a 90° , fato esse que limita a utilização do equipamento em muitas operações, ocasionando uma correlação entre as outras variáveis tais como frequência de rotação, tempo de permanência do eletrodo em cada extremo e raio de rotação. Ou seja, o usuário fica um pouco restrito a combinações de distintos parâmetros para resultar em uma frequência, por exemplo. Outra questão que proporciona certa limitação de tal equipamento remete à baixas frequências de rotação do eletrodo em questão [47]-[48].

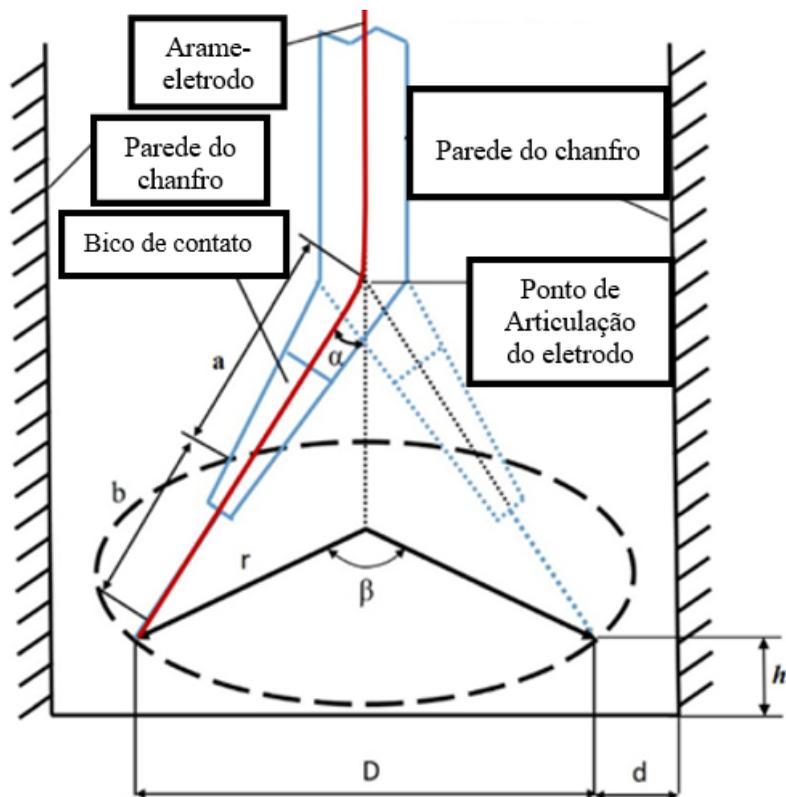


Figura 2.18. Desenho esquemático representando as variáveis da tecnologia que provê um direcionamento especial do arame-eletrodo. Fonte: Adaptado de [47]

Diferente da primeira tecnologia aqui exposta, o fato do eletrodo ser rotacionado continuamente não permite que se programe um tempo de parada para ele nas próprias configurações da tocha, sendo necessário, para isso, o uso de tecimento programado no manipulador robótico para selecionar tal variável, onde a trajetória percorrida pelo eletrodo pode ser visualizada de forma didática na Figura 2.19.

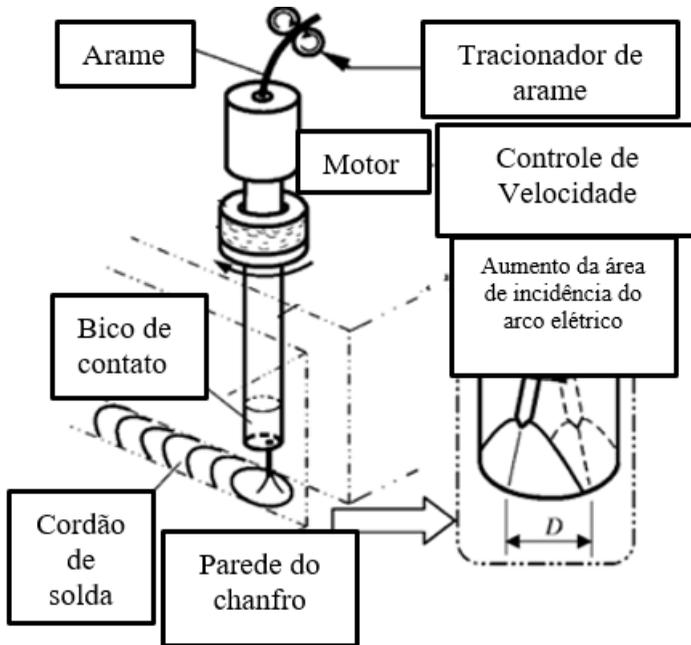


Figura 2.19. Sistema típico de tecnologia a eletrodo rotativo exibindo o comportamento do arco elétrico em um chanfro do tipo I. Fonte: [49].

Em sua pesquisa, Guo et al [50] propuseram investigar os efeitos decorrentes de distintas frequências de rotação do eletrodo na morfologia do cordão em um chanfro *Narrow Gap* do tipo I. Além disso, os pesquisadores indagaram a influência da frequência de rotação na taxa de fusão do eletrodo, realizando testes tanto com comando de tensão quanto com comando de corrente, sendo os depósitos realizados em chapas e chanfros na posição plana, onde a Figura 2-20 exhibe os resultados obtidos. De acordo com os autores, para o mesmo valor médio de corrente em função de acrescentar a frequência de rotação do eletrodo, o processo é capaz de fundir uma maior massa de metal, onde a medida que se aumenta a frequência de rotação do eletrodo reduz o gradiente térmica da gota metálica. Os mesmos explicitam ainda que a diferença encontrada na taxa de fusão do eletrodo quando o depósito ocorre sobre chapa e quando é realizado sobre chanfro se deve ao fato que em chanfros a parede lateral do mesmo tende a reter uma maior quantidade de calor, fato esse que acresce a taxa fusão do eletrodo. Contudo, os pesquisadores não explicitaram tanto os

aspectos físicos inerentes ao aumento na taxa de fusão do eletrodo quanto a diferença de valores obtidos em chapas e em chanfros *Narrow Gap*.

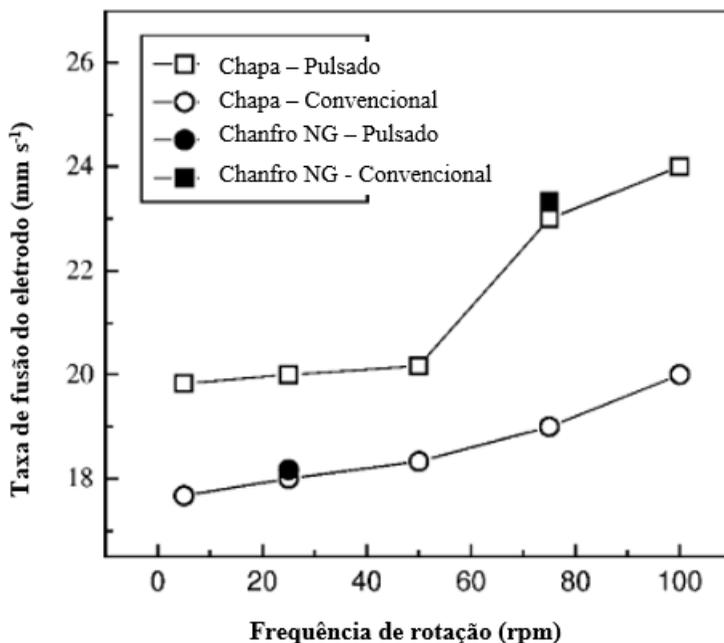


Figura 2-20. Variação da taxa de fusão do eletrodo para diferentes frequências de rotação do eletrodo com distintos processos (convencional e pulsado), depósitos em chapa e em chanfro. Fonte: Adaptado [50].

Iwata et al [51] relataram em seus experimentos que, mediante o incremento na frequência de rotação, pode-se manipular o perfil de penetração do cordão, cujas seções transversais com distintas frequências de rotação são exibidas na Figura 2.21. Os mesmos ainda explicitam que, devido tanto a concentração de calor quanto a pressão do arco elétrico ser concentrada no centro da junta em processos convencionais, o cordão de solda tende a apresentar uma morfologia do tipo *finger shape*, apresentando baixa molhabilidade nos flancos laterais e alta penetração, conforme pode ser visualizado na imagem (A). Os mesmos ainda afirmam que tal morfologia não é de interesse para a soldagem multipasses, onde nos passes subsequentes tendem a apresentar problemas como falta de fusão nos flancos laterais. Com o incremento na frequência de rotação do eletrodo, houve um acréscimo na penetração lateral de 0,57 mm (processo

convencional) para 1,48 mm ($W = 110$ Hz). Todavia, os pesquisadores não explicitaram o fenômeno responsável pela mudança do perfil de penetração.

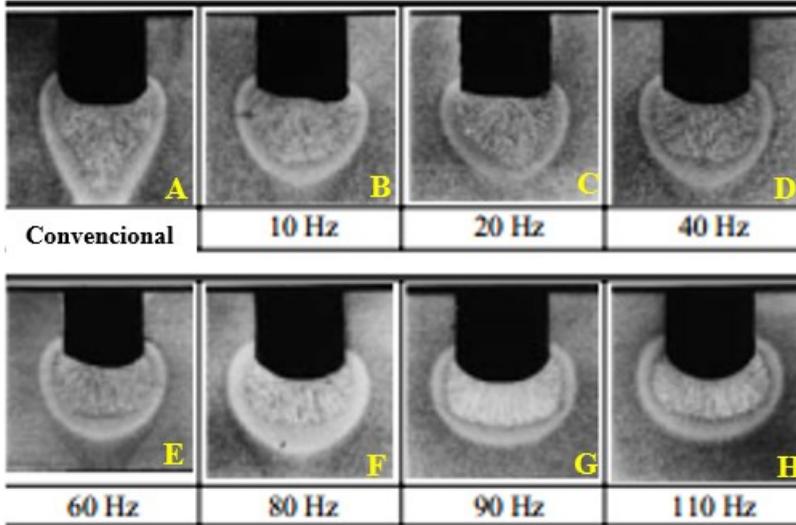


Figura 2.21. Seções transversais do ensaio variando a frequências de rotação do eletrodo. Fonte: Adaptado de [52].

Guo et al [53], almejando investigar os efeitos da frequência de rotação do eletrodo (operando entre 5 a 50 Hz) na transferência metálica, conduziram experimentos em chanfros *Narrow Gap* do tipo I na posição horizontal utilizando uma fonte de energia com curva característica do tipo tensão constante. A Figura 2.22 exibe um gráfico comparativo de apenas um ciclo rotação entre o diâmetro da gota e frequência de destacamento sincronizado com quadros da filmagem de alta velocidade para uma frequência de rotação do eletrodo de 5 Hz.

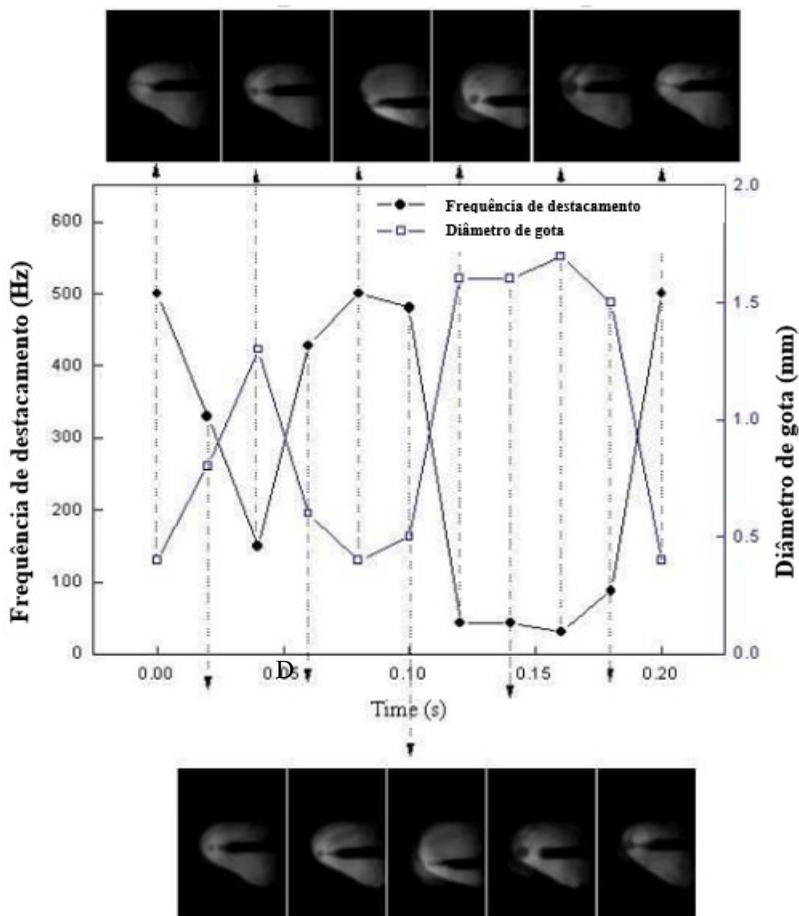


Figura 2.22. Gráfico comparativo entre diâmetro de gota e frequência de destacamento em um único período de rotação, sincronizado com filmagem de alta velocidade. $W = 5$ Hz. Fonte: Adaptado de [53].

Os autores ainda relataram sobre a percepção de distintos modos de transferência metálica. De acordo com as pesquisas realizadas por Lin et al [54], tal alternância no modo de transferência metálica se deve em função das distintas posições do eletrodo no chanfro, onde ora o eletrodo se posiciona no centro do chanfro e ora o eletrodo se encontra próximo aos flancos laterais. Para as condições investigadas, os pesquisadores observaram uma maior frequência de destacamento quando o eletrodo se posi-

ciona perto dos flancos laterais, propiciando, assim, gotas com menor diâmetro, sendo observada uma transferência por voo livre. Quando o eletrodo se posiciona no centro dos flancos laterais, foram observadas gotas com maior diâmetro, culminando, desta maneira, em uma menor frequência de destacamento, onde o tipo de transferência metálica observada foi constatada como sendo globular. Em razão de tais mudanças, os autores explicitam que tal comportamento se deve em conformidade com a curva característica da fonte de energia operando no modo de tensão constante, onde a variável corrente de soldagem se adequa às condições impostas pelo processo. Ressalta-se ainda que tal processo, destinado às aplicações na posição horizontal, encontra-se estável quando operando com frequências entre 5 a 20 Hz, resultando na formação de um cordão homogêneo, isento de quaisquer defeitos. Já operando em uma frequência de rotação de 20 Hz, há uma tendência do escorrimento da poça de fusão; todavia, nenhum defeito foi observado. Porém, quando a frequência de rotação do eletrodo é igual ou superior a 50 Hz, devido à ação da força centrífuga, ela é capaz de propiciar instabilidade na transferência metálica, acarretando na formação de um cordão não aceitável, com porosidade, mordedura e falta de fusão nos flancos laterais. Desta maneira, os pesquisadores concluíram que existe uma faixa no que concerne a frequência de rotação do eletrodo para a obtenção de procedimentos com a ausência de defeitos.

Weldrevolution [55], o desenvolvedor do produto aqui estudado, a tocha MIG/MAG intitulada *Spinarc*, propôs comparar tal equipamento com o processo SAW para o preenchimento de chanfros com 20° e do tipo I. A empresa relata que, face aos testes comparativos, pode-se perceber que foi possível reduzir a quantidade de material a ser aportado devido as características intrínsecas da tocha de proporcionar a rotação automática do eletrodo, fato esse que culminou em uma redução do volume da junta, proporcionando uma expressiva redução de custos. As seções transversais podem ser visualizadas na Figura 2.23.

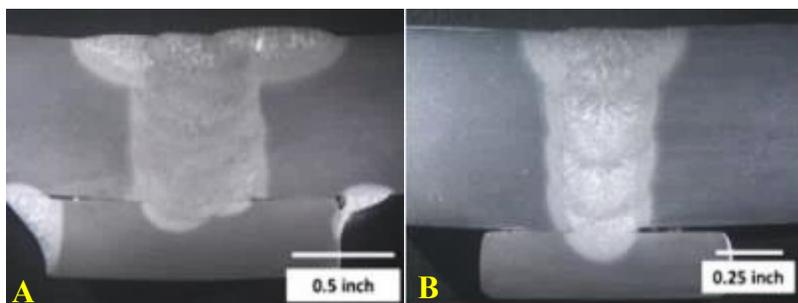


Figura 2.23. Seções transversais: (a) Procedimento obtido por arco submerso (SAW) – (b) Procedimento obtido pela tocha MIG/MAG *Spinarc*. Fonte : [55]

Os desenvolvedores da tocha *Spinarc* ainda explicitam que neste comparativo foi possível perceber que a redução da quantidade de material aportado não culminou simplesmente em redução do tempo total de operação e, conseqüentemente em um aumento de produtividade, mas também culminou na redução expressiva do material a ser aportado. Além disso, os pesquisadores [55] afirmam que tal feito, procedeu em um procedimento capaz de proporcionar altas velocidades de resfriamento, fenômeno esse que foi capaz de resultar em um maior valor médio de dureza, quando comparado com o procedimento empreendido pelo processo SAW. Os autores ainda apontam que esse aumento no valor médio de microdureza é uma ocorrência benéfica para o processo.

3 EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E METODOLOGIA

O presente capítulo aborda a metodologia legitimada para confecção do trabalho, juntamente com os materiais e equipamentos a serem utilizados e modernas técnicas para a monitoração do sistema. De modo a facilitar o entendimento, a Figura 3.1 exibe a sequência dos ensaios realizados.

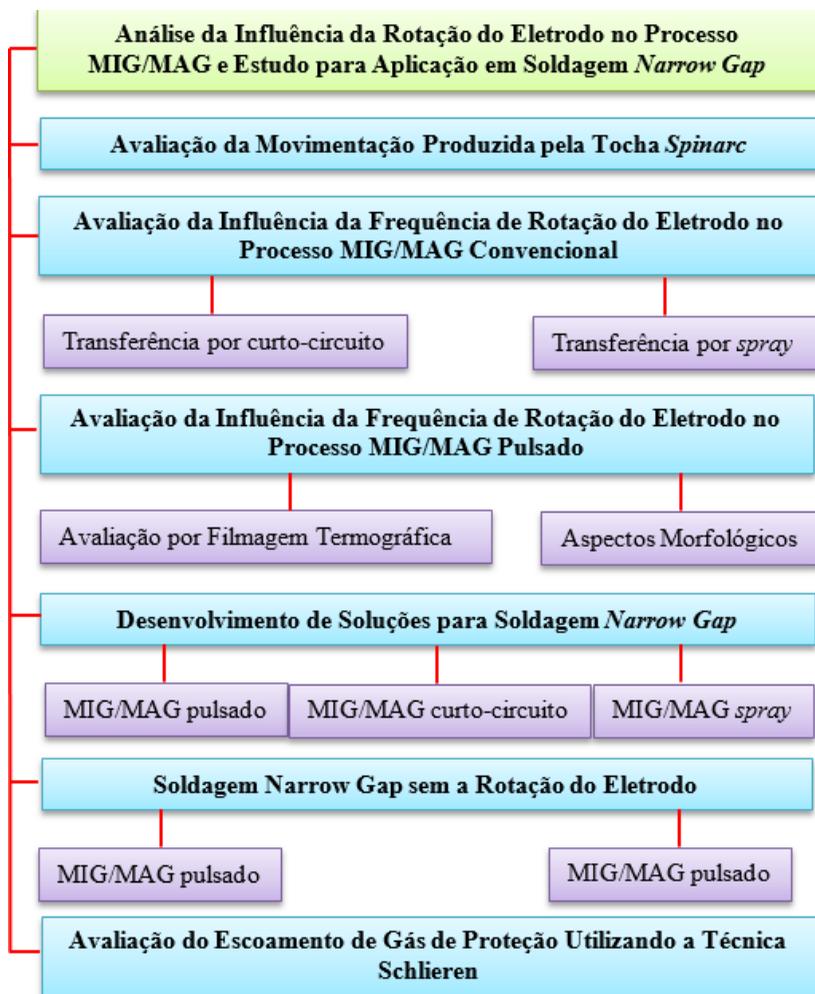


Figura 3.1. Sequência dos ensaios realizados demonstrando as principais etapas da pesquisa.

3.1 EQUIPAMENTOS

3.1.1 Tocha *Spinarc*

A tocha intitulada *Spinarc*, desenvolvida pela *WeldRevolution*, modelo MA - 400, possui capacidade máxima de operação de até 300 A, sendo esta refrigerada a ar. O equipamento permite alterar a frequência de rotação do eletrodo, variando de 500 a 5500 rpm, admitindo também transmutar o sentido de rotação do eletrodo. Outra possibilidade é que a tocha *Spinarc* também permite mudar o diâmetro no qual o eletrodo irá rotacionar, através do mecanismo denominado *crank*, cujo o mesmo permite regulagem do nº 1 a 8. A Figura 3.2 exibe o mecanismo que permite alterar a posição do *crank*.



Figura 3.2. Demonstração do mecanismo que permite mudança na posição do *crank* na tocha *Spinarc*.

Para mudar a posição do *crank*, basta destravar a capa protetora (1) e, em seguida, puxar a mesma para baixo (2). O usuário escolhe então a posição do *crank* desejada (3) puxando para baixo a parte de alumínio (4), enquanto gira para a direita para aumentar a posição do *crank*, ou gira para esquerda para reduzir sua posição. De acordo com o fabricante, cada

respectiva posição do *crank* representa o diâmetro no qual o eletrodo deveria percorrer, podendo ter uma margem de erro de até $\pm 0,5$ mm. Essas informações são indicadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Diâmetro efetivo de giro indicado pelo fabricante em função da posição do *crank* para a frequência de rotação de 1000 rpm. Adaptado de [13].

Posição do <i>crank</i>	Ø aproximado (mm)
1	0,5 - 1,5
2	1,5 - 2,5
3	2,5 - 3,5
4	3,5 - 4,5
5	4,5 - 5,5
6	5,5 - 6,5
7	6,5 - 7,5
8	7,5 - 8,5

Para a alternância da frequência de rotação do eletrodo, basta regular a frequência desejada na caixa de controle, lugar onde também possibilita alternar o sentido de rotação do eletrodo. Outra função disponível na caixa, se trata da possibilidade de programar um *delay* com a intenção de que o eletrodo comece a ser rotacionado após um tempo predeterminado. Cabe aqui salientar que tais parâmetros podem ser mudados enquanto o processo em questão opera. A Figura 3.3 exhibe o conjunto da tocha *Spinarc*, sendo possível observar a tocha, juntamente com a caixa de controle e os cabos de alimentação.

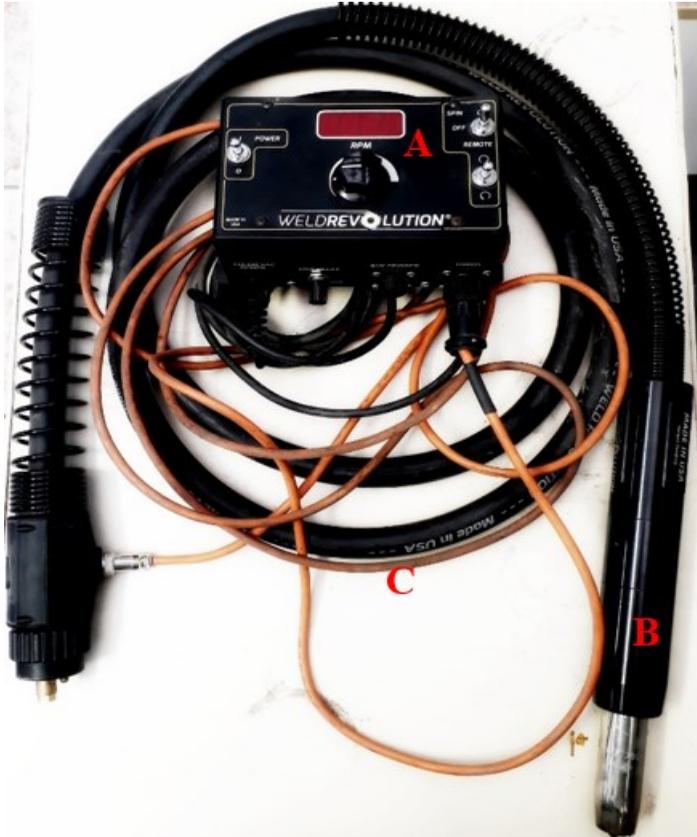


Figura 3.3. Conjunto da tocha *Spinarc*. (A) Caixa de controle eletrônico, (B) Tocha *Spinarc* e (C) Cabos de alimentação e controle.

Como a tocha em questão apresenta diversos conjuntos de parâmetros no que diz respeito à frequência de rotação e posição do *crank*, o fabricante orienta como ponto de partida as seguintes sugestões, expostas na Figura 3.4, em função da aplicação desejada.

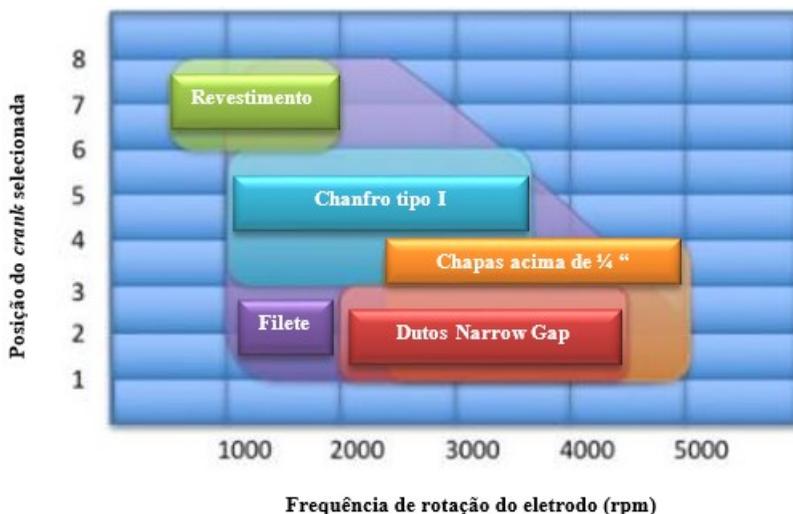


Figura 3.4. Parametrização inicial concernente a posição do crank e frequência de rotação do eletrodo em função das respectivas operações de acordo com o próprio fabricante. Adaptado de [13].

3.1.2 Bancada Experimental

Os ensaios com cunho de caracterização foram realizados em bancada experimental, conforme ilustra a Figura 3.5, constituída basicamente por uma fonte de soldagem, um cabeçote tracionador de arame, um manipulador cartesiano acoplado à tocha MIG/MAG *Spinarc*, juntamente com a interface homem-máquina e um cilindro de gás de proteção.

Foi utilizada uma fonte eletrônica multiprocesso, transistorizada, chaveada no secundário do transformador, controlada remotamente via microprocessador, modelo *Digiplus A7*, com capacidade máxima de operação de até 450 A. O cabeçote tracionador de arame utilizado foi o de modelo STA com velocidade de alimentação entre 0,2 a 20 m/min, ambos equipamentos fabricados pela empresa IMC Soldagem.

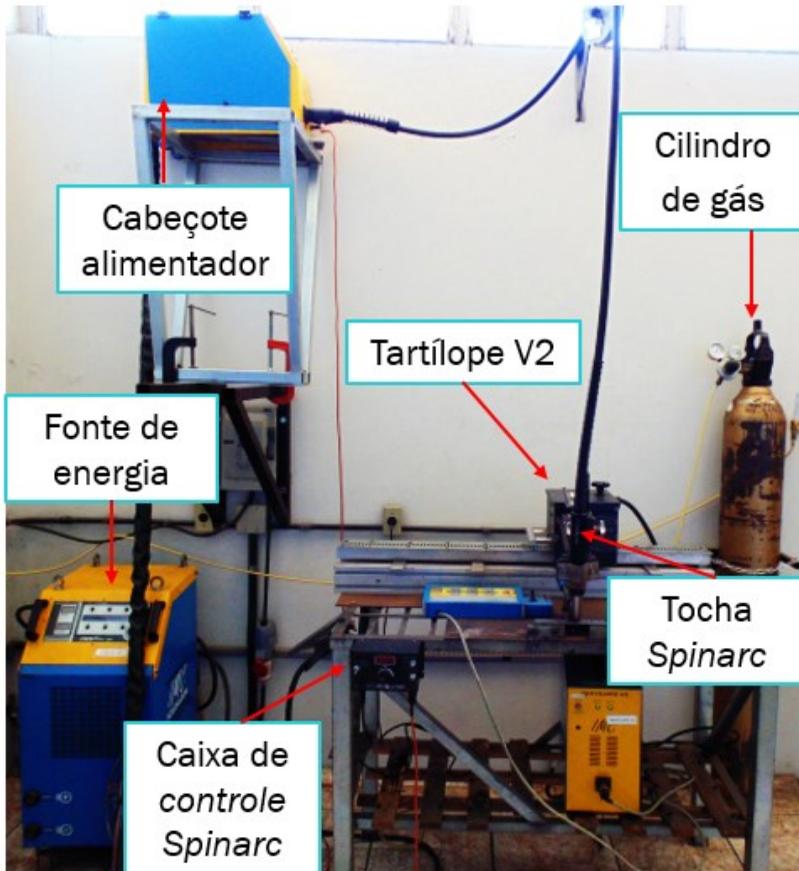


Figura 3.5. Bancada de ensaios: Cabeçote alimentador de arame, fonte de energia, manipulador robótico e tocha *Spinarc*, Cilindro de gás, Caixa controle de frequência e sentido de rotação do eletrodo.

Para a programação da trajetória, utilizou-se um manipulador cartesiano Tartilope V2, do fabricante SPS, sendo o mesmo posicionado sobre um trilho. O sistema possui 2 graus de liberdade (x e y), conforme ilustra a Figura 3.6.



Figura 3.6. Manipulador cartesiano Tartilope V2.

Para monitoração do processo de soldagem foi utilizado o sistema de aquisição portátil (SAP) do fabricante IMC Soldagem (Figura 3.7). Esse sistema realiza a aquisição dos sinais elétricos do processo de soldagem em uma frequência de 5 KHz, dispostos em forma de gráficos e histogramas, permitindo uma análise mais detalhada.



Figura 3.7. Sistema de aquisição de dados portátil do fabricante IMC Soldagem.

3.3 CONSUMÍVEIS

Para a realização dos ensaios tipo cordão sobre chapa, foram utilizadas chapas, com as respectivas dimensões 100 mm de largura e 6,35

mm de espessura. Para os ensaios realizados em chanfro, foram utilizadas chapas de 200 mm de comprimento e 9,525 mm de espessura. Fez-se uso de chapas de aço carbono similar ao SAE 1020 em todos os ensaios realizados.

O metal de adição utilizado foi o arame de aço carbono de designação AWS ER 70S-6, de 1,2 mm de diâmetro.

O gás de proteção utilizado foi C8, composto por 92% de Ar + 8% de CO₂, com vazão de 25 l/min (medido na ponta da tocha com um fluxímetro). Mesmo sabendo da influência do teor de CO₂ na mistura gasosa, foi utilizada a mistura C8 pois a mesma se encontra dentro da faixa de obtenção da transferência metálica por voo livre, sendo um dos objetivos do presente trabalho.

3.4 METODOLOGIAS DE ANÁLISES

3.4.1 Procedimento para monitoração da frequência de rotação e diâmetro efetivo de giro sem arco

Visando investigar a real frequência de rotação no qual o eletrodo está sendo rotacionado, foi proposta uma metodologia com a utilização da técnica da lâmpada Estroboscópica. Foram realizados para esta etapa de testes com 5 frequências de rotações, sendo 1000, 2000, 3000, 4000 e 5000 rpm, variando também o diâmetro no qual o eletrodo iria rotacionar, estando nas posições 1, 2 e 3 (posições essas que indicam aparentemente o diâmetro da circunferência percorrida pelo eletrodo em mm). A metodologia adotada baseou-se em ajustar um valor de frequência de rotação no qual o eletrodo irá ser rotacionado, na caixa de controle (item A), e alterar a frequência na qual a lâmpada Estroboscópica (item B) é pulsada. Tal sistemática tem como cunho encontrar a frequência natural, frequência essa caracterizada pela observação estática do eletrodo a olho nu. O valor da frequência encontrado na lâmpada Estroboscópica caracteriza a real frequência de rotação do mesmo. A Figura 3.8 representa a forma na qual foi mensurada a frequência de rotação do eletrodo.



Figura 3.8. Configuração utilizada para a monitoração da velocidade de rotação: (a) Caixa controle, (b) Lâmpada Estroboscópica.

Almejando averiguar o diâmetro percorrido pelo eletrodo em função de sua frequência, recorreu-se a artifício da análise mediante a filmagem em alta velocidade. Para esta fase, foram propostas duas etapas. A primeira parte averigua o diâmetro efetivo de giro, para todas as posições do *crank* e o diâmetro efetivo de giro para a mesma frequência de rotação, de 1000 rpm. Já a segunda parte, os testes avaliaram as posições 1, 3 e 4, alternando a frequência de rotação de 1000 em 1000 rpm, de modo a se atingir o limite de cada posição em função da velocidade de acordo com as indicações do fabricante.

Foi proposta, para caracterização do sistema, variar as frequências de rotações de 1000 em 1000 rpm, sucessivamente, até 5000 rpm, para as respectivas posições 1 e 3. Para a posição 4, também foram alteradas as frequências de rotação de 1000 em 1000 rpm, até 4000 rpm (limite indicado pelo próprio fabricante). Como cada vídeo gerado consiste em 5 revoluções, exclui-se a primeira e a última revolução, mensurando três vezes cada uma das três revoluções restantes. Essa estratégia foi adotada de modo a se evitar quaisquer perdas de dados, tanto na primeira quanto na última revolução. A análise foi realizada mediante a utilização do programa computacional *Photoshop*. O real diâmetro no qual o eletrodo está transladando foi determinado a partir do dispositivo *Teach tip* (exposto na Figura 3.9), por orientação dos desenvolvedores da tocha, pois, de

acordo com eles, o dispositivo tem a função de facilitar a visualização do objeto em movimento.



Figura 3.9. “Teach tip”: Bico de contato com arame de 25 mm fixado a sua ponta utilizado para a aferição do diâmetro efetivo de giro.

Através de uma medida de referência previamente conhecida, pode-se mensurar de forma direta o diâmetro efetivo de giro. A Figura 3.10 representa o exemplo de medição, utilizando a metodologia em questão para mensurar o diâmetro efetivo de giro. Cabe salientar que, para tal aferição, pode-se utilizar tanto o comprimento (25mm) quanto o diâmetro do mesmo (2,4 mm) no *Teach tip*.

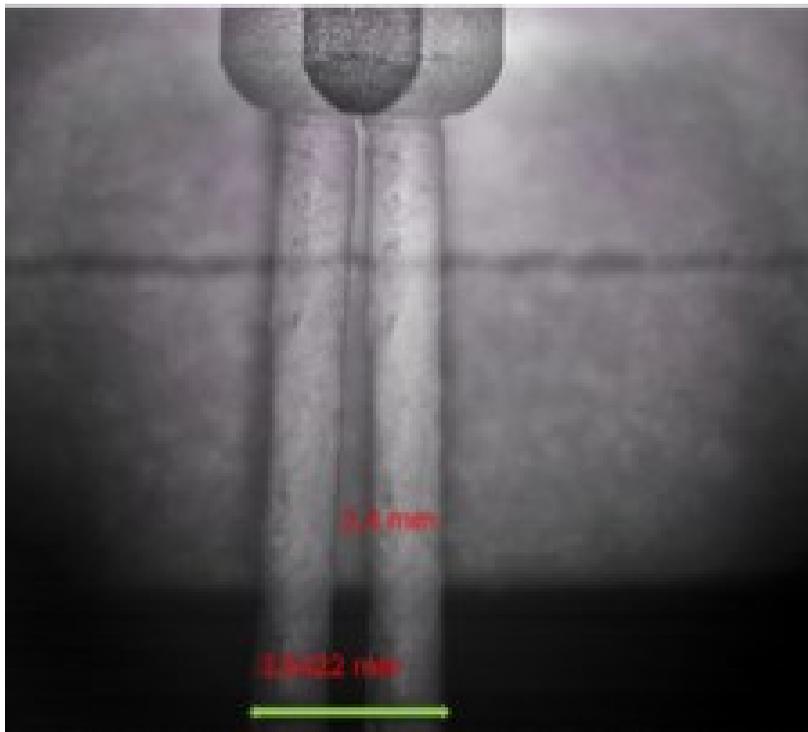


Figura 3.10. Exemplo de medição do diâmetro efetivo de giro utilizando as imagens obtidas com filmagem de alta velocidade da rotação do eletrodo.

3.4.2 Metodologia utilizada para filmagem em alta velocidade

Mediante a necessidade de investigar aspectos fenomenológicos relacionados ao comportamento tanto da transferência metálica como do arco elétrico, fez-se necessário um estudo envolvendo o uso da câmera de alta velocidade, sendo utilizado para tal o recurso da filmagem em alta velocidade. A Tabela 3.2 exibe a lista dos componentes integrantes do sistema de filmagem de alta velocidade.

Tabela 3.2. Lista de componentes integrantes do sistema de monitoramento por filmagem de alta velocidade

Equipamento	Descrição
<p data-bbox="138 269 225 293">Câmera</p> 	<p data-bbox="591 269 717 293">IDT, Y4S2</p> <p data-bbox="426 301 882 360">Taxa de aquisição: máx. 4500 quadros por segundo para a máx. resolução de 1016 x 1016 px</p> <p data-bbox="441 392 866 416">Tempo de gravação na maior resolução: 1.37 s equivalente a 6201 Frames</p> <p data-bbox="468 453 841 477">Memória: 8Gb de memória interna</p>
<p data-bbox="236 517 297 541">Lente</p> 	<p data-bbox="449 517 860 541">Canon, Macro EF 180 mm L USM</p> <ul data-bbox="553 549 799 639" style="list-style-type: none"> - Diâmetro: 72 mm - Abertura: f/3.5 - Ampliação máxima de 1x
<p data-bbox="206 676 325 700">Filtro óptico</p> 	<p data-bbox="482 676 826 700">Edmund Optics, 810 ± 10 nm</p> <p data-bbox="441 708 866 732">Passa banda 810 nm (half width 10 nm)</p> <p data-bbox="564 740 743 764">Diâmetro 50 mm</p>
<p data-bbox="146 815 387 863">Sistema de iluminação LASER</p> 	<p data-bbox="508 815 799 839">Cavitar, CAVILUX HF:</p> <p data-bbox="564 847 743 871">LASER classe 4</p> <p data-bbox="482 879 826 903">Potência de pulso 500 W ± 10%</p> <p data-bbox="524 911 785 935">Tempo do pulso < 50 ns</p> <p data-bbox="463 943 844 967">Comprimento de onda 810 ± 10 nm</p>
<p data-bbox="138 1007 393 1054">Sistema de Aquisição de Dados</p> 	<p data-bbox="524 1007 785 1031">IDT, DAS MotionPro</p> <p data-bbox="538 1038 770 1062">Entradas analógicas</p> <p data-bbox="538 1070 770 1094">Número de canais: 16</p> <p data-bbox="468 1102 841 1126">Resolução dos conversores: 16 bits</p> <p data-bbox="460 1134 848 1158">Taxa de aquisição máxima: 500 kHz</p> <p data-bbox="471 1166 837 1190">Tensão de entrada máxima: ±10 V</p> <p data-bbox="553 1198 754 1222">Saídas analógicas</p> <p data-bbox="542 1230 766 1254">Número de canais: 4</p> <p data-bbox="468 1262 841 1286">Resolução dos conversores: 16 bits</p> <p data-bbox="460 1294 848 1318">Taxa de aquisição máxima: 500 kHz</p> <p data-bbox="482 1326 826 1350">Tensão de saída máxima: ±10 V</p>

Para esta etapa, a metodologia consistiu em duas baterias de ensaios. A primeira consiste em analisar o modo de transferência por curto-circuito (chanfro e chapa), sendo a segunda etapa destinada às investigações concernentes ao modo MIG/MAG pulsado, conforme a Figura 3.11 exibe a configuração utilizada para o estudo em questão.



Figura 3.11. Configuração utilizada para monitoração com filmagem em alta velocidade.

3.4.3 Monitoração por Filmagem Termográfica

A fim de investigar as alterações dos gradientes térmicos, tanto na poça de fusão como na gota metálica, fez-se necessário o uso de uma câmera térmica, modelo FLIR SC 7000. Compete ressaltar que, antes de iniciar o estudo em si, foi necessário calibrar o sistema com o respectivo valor de emissividade do material. A configuração dos equipamentos é representado na Figura 3.12.

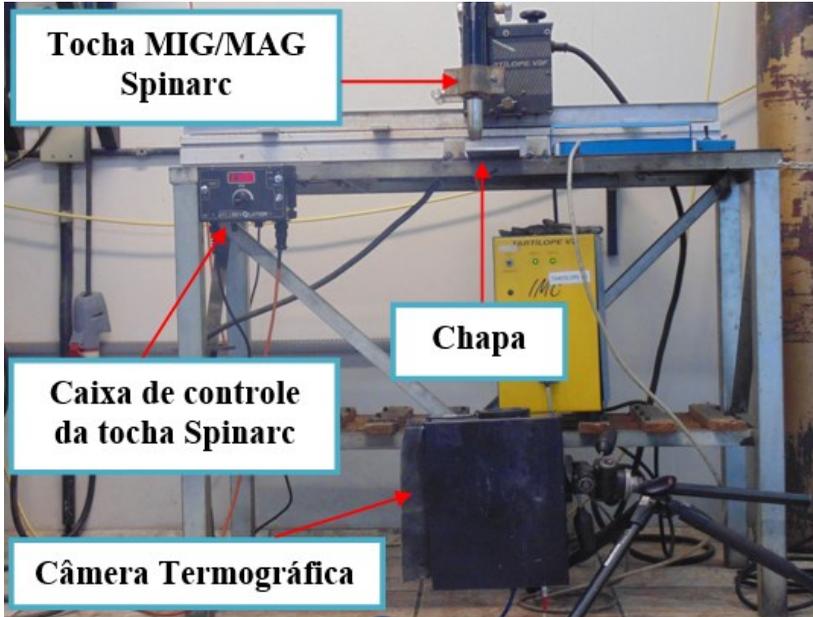


Figura 3.12. Configuração utilizada para monitoração com filmagem termográfica durante a soldagem.

Foram propostas duas baterias de ensaios para a etapa de instigação da temperatura da poça de fusão. A primeira etapa tem como objetivo investigar as alterações nos gradientes térmicos da poça de fusão mediante a variação da posição do *crank*, com permanência da mesma frequência de rotação do eletrodo (1000 rpm). Já para a segunda bateria de ensaios, manteve-se a posição do *crank* ($P_c = 3$), alterando, desta maneira, a frequência de rotação do eletrodo. Os parâmetros regulados na câmera são apresentados na Tabela 4.3. Cada situação de soldagem foi executada três vezes, resfriando o mesmo antes de iniciar os testes. Vale ressaltar que a aferição da temperatura máxima da poça de fusão foi realizada imediatamente após o último pulso, tendo sido adotada essa estratégia de modo a minimizar possíveis erros devido ao resfriamento da poça.

Tabela 4.3. Parâmetros selecionados na câmara térmica.

Emissividade ϵ	0,82
Escala (°C)	300 a 900
Transmissividade	97%

Posteriormente, foi investigada a temperatura e a velocidade da gota metálica. Para a realização deste teste, optou-se pela adoção de uma metodologia que visasse apagar o arco elétrico imediatamente após o pulso de corrente com o intuito de que a radiação exercida pelo mesmo não influenciasse na investigação da temperatura. Foi utilizado o formato de onda que pode ser visualizado na Figura 3.13. Para este caso, utilizou-se um patamar de arco apagado cuja corrente se encontra entre 5 a 10 A (Ioff) durante um intervalo de 3 ms (Ioff). Cabe versar que o arco elétrico se extingue oito períodos consecutivos antes de retornar para a sequência de períodos nos quais não há extinção do mesmo. Tomou-se o devido cuidado ao separar os dados das medições de cada um dos oito períodos devido a possibilidade de haver quaisquer possíveis alterações pela diminuição do valor médio de corrente ou algum outro fator. Cabe notabilizar que foram realizadas medições de 20 gotas para cada experimento realizado.

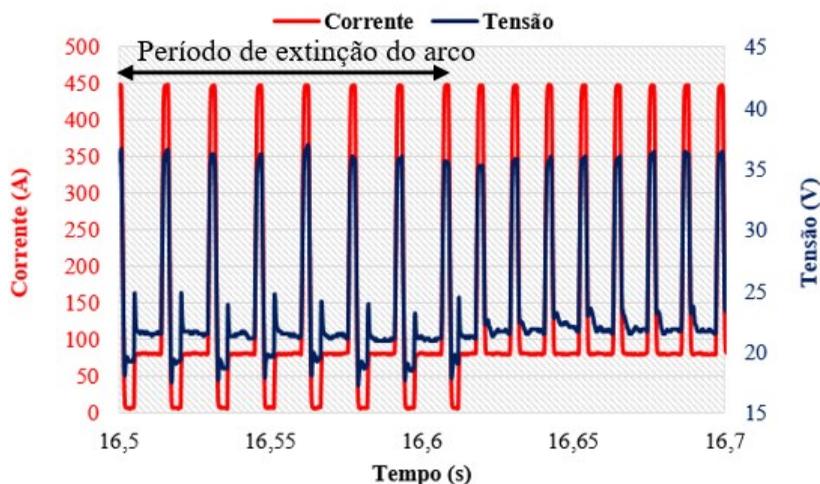


Figura 3.13. Gráfico exibindo o formato de onda utilizado com ênfase nos oito períodos de extinção do arco elétrico.

Para a aferição das temperaturas das gotas sem a presença da radiação exercida pelo arco elétrico, foi possível aferir sua temperatura após o destacamento da gota, conforme pode ser visualizado na Figura 3.14.

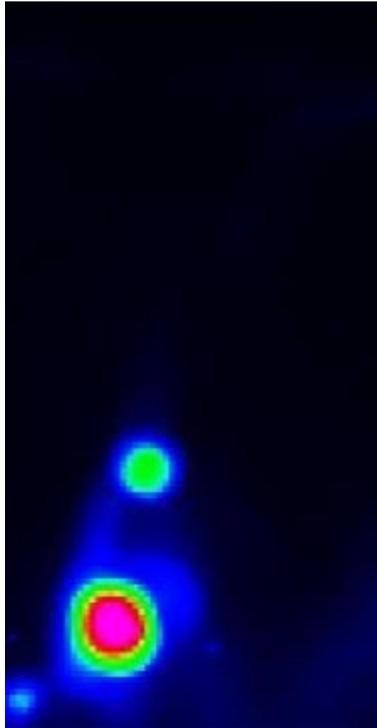


Figura 3.14. Metodologia utilizada para a determinação da temperatura da gota metálica.

Com intuito de investigar a velocidade final da gota, utilizou-se das filmagens termográficas geradas a partir do programa computacional *Image J*. O momento e a posição do destacamento foram registrados mediante a utilização de um marcador gráfico e o *frame* no qual a gota tangencia a poça de fusão foi utilizado para a análise, conforme a Figura 3.15. Conhecendo a distância percorrida pela gota metálica e o tempo necessário para tal finalidade, de maneira direta, consegue-se mensurar a velocidade médias das gotas para cada situação.

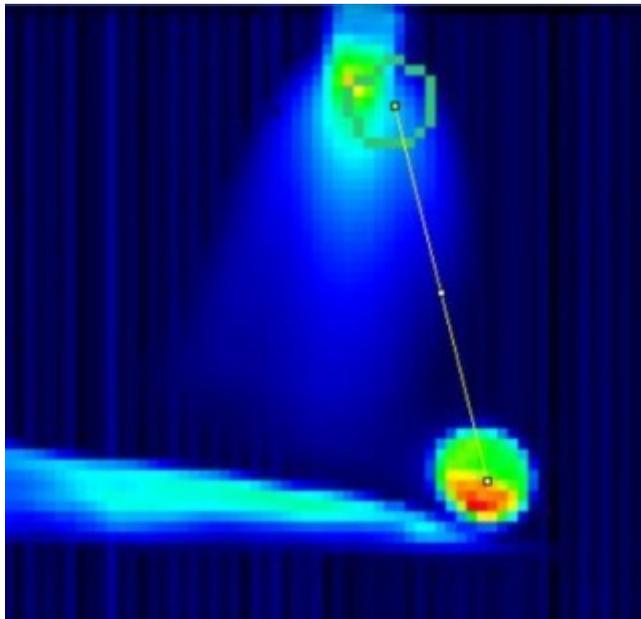


Figura 3.15. Metodologia utilizada para a determinação da velocidade final da gota metálica.

3.4.4 Metodologia de ensaios com a Técnica *Schlieren*

Devido à necessidade de investigar o comportamento do fluxo de gás de proteção, foi proposta a utilização da técnica *Schlieren*, onde os ensaios foram divididos em duas etapas. A primeira parte diz respeito dos ensaios realizados sobre chapa (com arco) enquanto a segunda parte concerne aos ensaios realizados sem arco, ou seja, apenas visualizando o fluxo do gás de proteção.

A iluminação utilizada consiste em um sistema de iluminação LASER Cavilux HF da empresa Cavitar, com potência de pulso de 500W, empregando um filtro passa banda da Edmund Optics com $810 \pm 10\text{nm}$. Foram utilizados dois espelhos côncavos (superfície frontal $f/10$) com diâmetro de 152,4 mm (diâmetro suficiente para a análise dos escoamentos das tochas em questão). Também foi utilizada iluminação com sistema LED do fabricante IDT, tratando-se de um sistema com LED pulsado.

Como abertura da passagem de luz foi utilizado um orifício com 2 mm de diâmetro para todos os ensaios apresentados.

Para os ensaios realizados com arco, os experimentos foram realizados de maneira análoga à seção 3.1.5.d. Nesta etapa, a peça continua a se mover enquanto a tocha permanece de forma estática. Cabe ressaltar que tal metodologia foi adotada com o intuito de manter o foco da câmera sempre na mesma posição, almejando, desta maneira, a obtenção de imagens mais satisfatórias. A Figura 3.16 exibe a bancada utilizada para a realização dos ensaios com a técnica *Schlieren*.

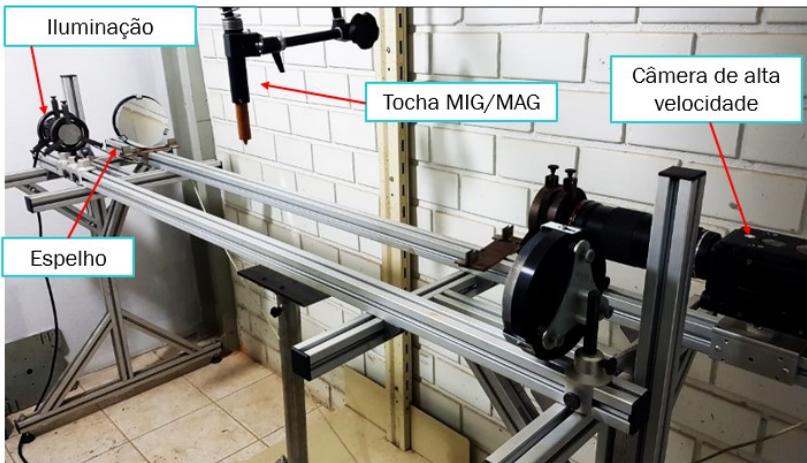


Figura 3.16. Bancada utilizada para a realização dos ensaios com a técnica *Schlieren*. Com os respectivos equipamentos: Espelhos; Tocha MIG/MAG; Iluminação led; Câmera de alta velocidade.

Uma maneira para avaliar o resultado das imagens obtidas com a técnica *Schlieren* no presente trabalho, foi realizada a medição largura do de gás, com o auxílio do o *software AutoCAD*. Para esta etapa de avaliação, quatro pontos de referências para mensurar o comprimento do fluxo de gás foram utilizados, conforme a Figura 3.17 exibe a metodologia adotada para realização de tal análise.

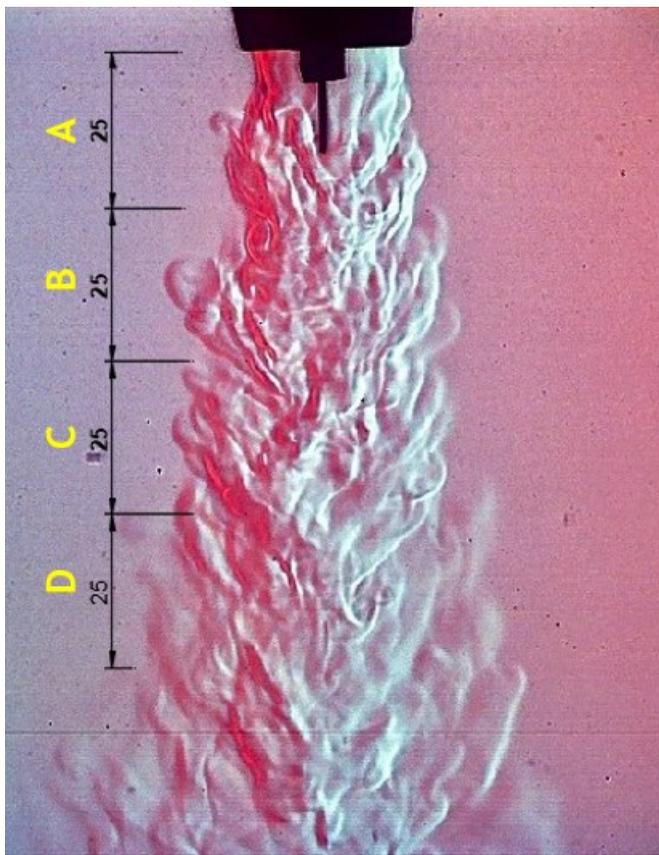


Figura 3.17. Representação as regiões para medição da largura do fluxo gasoso.

Considerando as misturas gasosas que são utilizadas comumente para a soldagem MIG/MAG de aços carbono, a mistura C25 foi selecionada pois apresenta como resultados imagens com maior sensibilidade do que a C8, permitindo adequada visualização do fluxo gasoso sem a presença do arco elétrico. Também foi proposto um estudo envolvendo CO_2 como atmosfera protetora, a fim de visualizar as possíveis alterações no fluxo gasoso.

3.5 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS DE SOLDAGEM

A estrutura dos ensaios de soldagem foi fragmentada em três partes, sendo a primeira designada para a exploração da natureza física do processo MIG/MAG, com a transferência metálica por curto-circuito, spray e pulsada. Já a segunda secção ficou destinada ao desenvolvimento de soluções destinadas a soldagem *Narrow Gap* em posições planas e vertical descendente. Por fim, a terceira parte é destinada a ensaios com a técnica *Schlieren*.

De maneira geral, o fabricante recomenda que se utilize o modo pulsado para operar com a tocha *Spinarc*. De fato, a maior parte das soldas realizadas no contexto do presente trabalho foram realizadas com o pulsado. Porém, também buscou-se caracterizar a influência da rotação do eletrodo na transferência metálica operando com o processo convencional.

3.5.1 Ensaios em chapa

A primeira série de avaliações realizadas foram os ensaios para avaliar a influência da rotação do eletrodo na transferência metálica sem correção dos parâmetros. Dessa forma, procurou-se então investigar a influência da frequência de rotação no comportamento da transferência metálica comandando a tensão. De tal modo, optou-se pela realização dos experimentos tanto em transferência metálica por curto-circuito como por *spray*, onde, para esta etapa, os parâmetros selecionados na fonte de energia podem ser observados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4. Parâmetros elétricos selecionados na fonte de energia para a primeira bateria de ensaios operando com o processo MIG/MAG convencional.

Modo de transferência	Ua (V)	V.a (m/min)	V.s (cm/min)	Ks	Kd
Curto-circuito	21,5	4,5	28	70	90
Spray	27	8,5	30	100	100

Para os experimentos selecionados na fonte de energia, dispostos na Tabela 3.4, foram selecionados os parâmetros tanto na tocha quanto no *control box*, que podem ser visualizados na Tabela 3.5

Tabela 3.5. Parâmetros regulados na tocha *Spinarc* para a primeira bateria de ensaios (comando de tensão).

Posição do <i>crank</i>	Frequência de Rotação (rpm)
3	-
	1000
	2000
	3000
	4000

Finda a etapa de análise das alterações comandando a tensão, foram investigadas as possíveis alterações na transferência metálica, agora comandando a corrente. Os parâmetros elétricos selecionados na fonte de energia podem ser visualizados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6. Parâmetros elétricos selecionados na fonte de energia para os ensaios realizados com comando de corrente.

Ip (A)	tp (ms)	Ib (A)	tb (ms)	Im (A)	V.a (m/min)
450	2,2	87	9	160	4,5

Esta etapa almeja investigar as possíveis alterações tanto na transferência metálica quanto na própria estabilidade do processo de soldagem, assim como aspectos morfológicos do cordão de solda, mediante alterações na frequência de rotação do eletrodo. As frequências utilizadas para a realização do presente ensaio são expostas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7. Parâmetros regulados na tocha *Spinarc* e na caixa de controle para a segunda bateria de ensaios (comando de corrente).

Posição do <i>crank</i>	Frequência de Rotação (rpm)
3	-
	500
	1000
	1500
	2000

Cabe versar que foi escolhida uma faixa de frequência (0 a 2000 rpm), de modo a se realizar possíveis comparações em aspectos morfológicos.

3.5.2 Ensaios em chanfros *Narrow Gap*

Após as avaliações da influência da rotação do eletrodo na transferência metálica em chapa plana, foram realizadas então avaliações em chanfros *Narrow Gap*, onde a Figura 3.18 exhibe ao desenho esquemático dos corpos de prova utilizados. Para esse tipo de chanfro o *gap* utilizado foi de 6,4 mm (1/4") e o ângulo formado entre os flancos é de 15°.

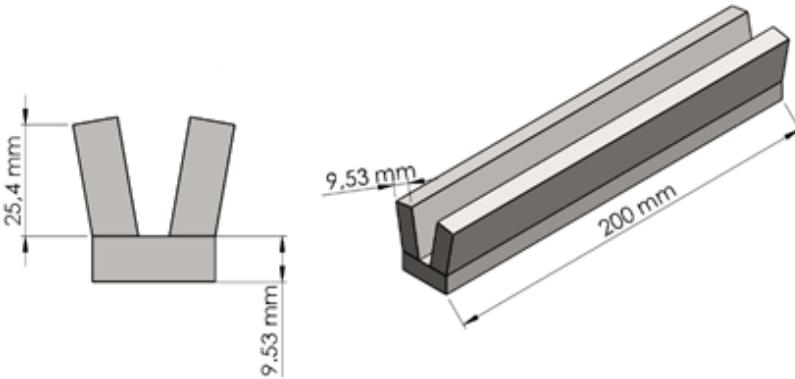


Figura 3.18. Geometria da junta utilizada nos ensaios 1A.

Outra análise importante a respeito da tecnologia se trata da possibilidade de isenção de ângulos. Face a isto, foram propostos ensaios com corpos de prova com chanfros do tipo I (parede reta), conforme a Figura 3.19 exhibe o desenho esquemática do corpo de prova utilizado.

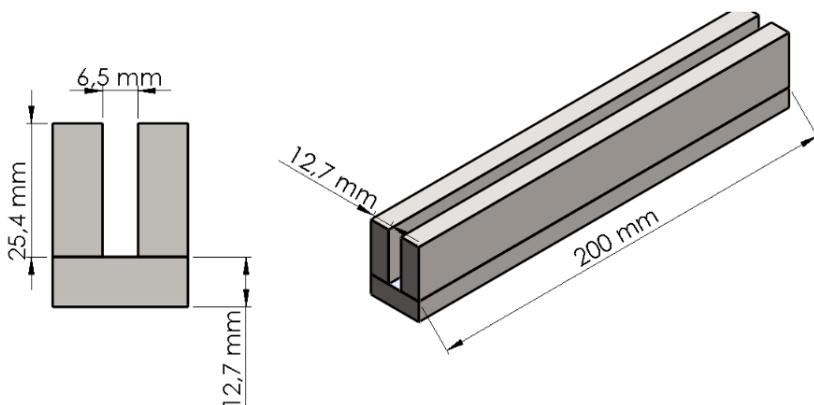


Figura 3.19. Geometria da junta utilizada nos ensaios 1B. Área transversal de 165,1 mm².

Posteriormente, com o intuito de explorar possíveis ganhos no que diz respeito a produtividade no que diz respeito a preenchimento de chanfros do tipo I (parede reta), foram propostos experimentos em corpos de prova de 1 e ¼” de espessura.

3.6 METODOLOGIA UTILIZADA PARA ANÁLISES MACROGRÁFICAS E RELATIVA A GEOMETRIAS

Para medição das características geométricas do cordão, como penetração, largura e reforço, cada corpo de prova soldado foi cortado transversalmente. Em seguida, preparou-se metalograficamente as amostras com lixas de granulação 80, 320, 400, 600 e 1200, além de alumina 1,0 μ para polimento. O ataque químico empregado consistiu em Nital 2% (98% álcool etílico absoluto e 2% ácido nítrico). Após ataque, as amostras foram fotografadas mediante a utilização de um estereoscópio OPTON com ampliação de 10x. Posteriormente, foram avaliadas as características geométricas dos cordões mediante a utilização de software de análise de imagens “Photoshop”. Este software permite mensurar as áreas delimitadas em imagens, sendo necessário realizar, para cada imagem, uma calibração de uma distância conhecida. Para todas as medições realizadas, a calibração foi empreendida utilizando como base a espessura do metal. Cabe ressaltar que o resultado apresentado foi a média de três aferições realizadas. A Figura 3.20 representa esquematicamente a secção transversal juntamente com as definições dos parâmetros geométricos.

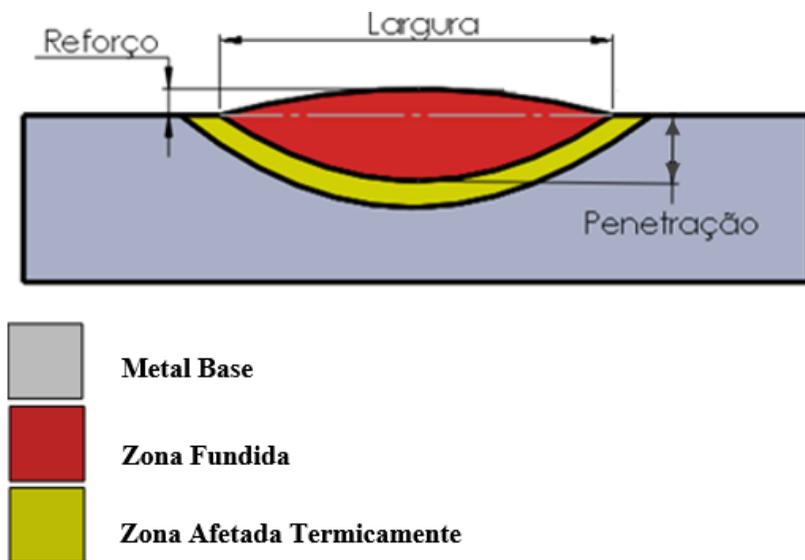


Figura 3.20. Representação esquemática da seção transversal e definições geométricas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 AVALIAÇÃO DA MOVIMENTAÇÃO PRODUZIDA PELA TOCHA *SPINARC*

Se tratando de uma tecnologia à eletrodo rotativo, é de suma relevância averiguar a real frequência de rotação do componente em questão, onde tanto a qualidade final do cordão depositado quanto dos fenômenos físicos decorrentes do processo é em função da respectiva frequência de rotação do eletrodo. Outra justificativa em questão se trata de caracterizar o comportamento dos sistemas utilizados e não somente confiar em informações advindas dos fabricantes. A Tabela 4.1 exibe a média dos resultados entre a frequência selecionada e a frequência obtida.

Tabela 4.1. Comparativo entre a frequência de rotação do eletrodo selecionada e frequência obtida.

Frequência selecionada no equipamento	Frequência obtida
1000	1007
2000	2019
3000	3025
4000	4038
5000	5051

Pôde ser observado que as frequências selecionadas se aproximam das resultantes, onde a máxima discrepância encontrada foi de 2%, relativo ao ensaio com frequência de 5000 rpm. Diante do exposto, é possível supor que tais valores se encontram dentro da tolerância admitida pelo Manual de Instruções do equipamento [13]. Assim como também se encontra apto para os experimentos aqui propostos.

4.1.1 Avaliação do diâmetro efetivo de giro

Almejando investigar o real diâmetro percorrido pelo eletrodo em função da frequência de rotação do eletrodo, a proposta inicial foi a realização de um ensaio mantendo a mesma frequência de rotação e alternando as posições do *crank*, a partir do número um até o número oito. Foi mantida, para este ensaio, a frequência de rotação do eletrodo em 1000 rpm. Cabe salientar que tal metodologia foi adotada mediante recomendações sucedidas do próprio fabricante [13], conforme a Figura 4.1 exibe os resultados médios obtidos.

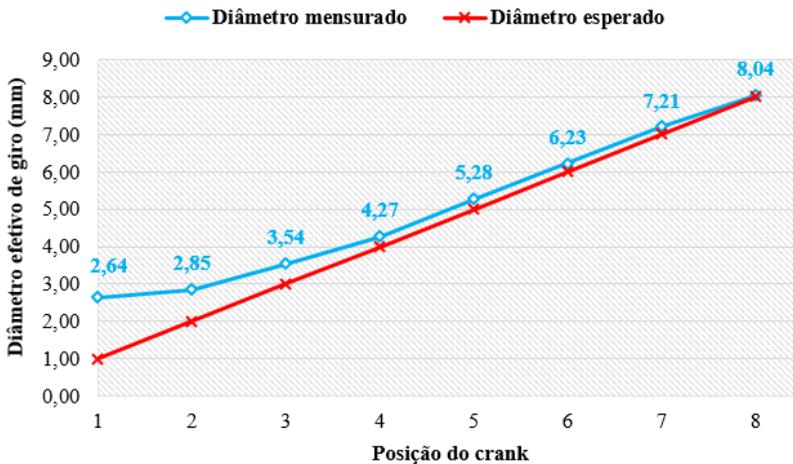


Figura 4.1. Gráfico comparativo demonstrando o diâmetro efetivo de giro para todas as posições do *crank* mantendo-se a frequência de rotação em 1000 rpm.

Ao realizar uma análise mais criteriosa, tanto nos resultados obtidos quanto no Manual de Instrução do equipamento, foi constatado a presença de uma dispersão nos resultados. Era esperado que o *crank* na posição 1 a 1000 rpm percorresse uma circunferência de aproximadamente 1 mm e, como aponta a Figura 4.1, o diâmetro percorrido pelo eletrodo foi de 2,64 mm. De posse desta informação, almejou-se então investigar o real diâmetro percorrido pelo eletrodo com o *crank* nas posições de interesse (1, 3 e 4), nas frequências limitadas pelo fabricante. Os resultados podem ser visualizados na Figura 4.2.

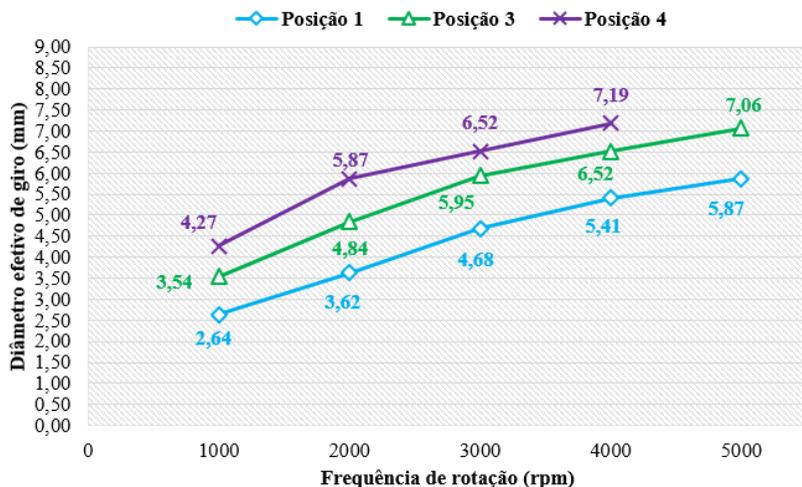


Figura 4.2. Gráfico comparativo exibindo o diâmetro efetivo de giro para as posições de interesse em função da frequência de rotação indicada pelo fabricante.

Face os resultados apresentados na Figura 4.2, identificou-se a possibilidade aumentar o diâmetro de giro através duas formas. Por exemplo, para que o eletrodo percorra uma circunferência com diâmetro de aproximadamente 6 mm, ele poderia operar com o *crank* na posição 3 com 3000 rpm, chegando a aproximadamente 5,95 mm de diâmetro, ou na posição 4 com 2000 rpm, facultando, desta maneira, em uma circunferência de diâmetro de aproximadamente 5,87 mm, ambas as opções resultando em um diâmetro efetivo próximo de 6 mm. Desta forma, é possível inferir que o aumento do diâmetro efetivo de giro em função do acréscimo na frequência de rotação do eletrodo é proveniente da flexão da deformação elástica do eletrodo. Os valores aqui encontrados, por outro lado, encontram-se divergentes dos valores expostos pelo fabricante, anteriormente exibidos na Tabela 3.1.

Deve aqui ficar elucidado que, como um dos objetivos propostos foi a investigação dos possíveis ganhos com tal tecnologia mediante a manipulação de técnicas *Narrow Gap*, mensurar o verdadeiro diâmetro percorrido pelo eletrodo se torna de extrema relevância. Isso ocorre, pois, uma parametrização imprópria entre frequência de rotação e posição do *crank* tende a propiciar que a ponta do eletrodo toque nos flancos laterais, fato esse que pode levar ao colapso do sistema e causar possíveis danos no equipamento.

4.2 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE ROTAÇÃO DO ELETRODO NO COMPORTAMENTO DO PROCESSO MIG/MAG CONVENCIONAL

4.2.1 Transferência Metálica por Curto-circuito

A presente seção aborda os ensaios de soldagem realizados com a transferência metálica por curto-circuito, almejando investigar possíveis alterações nos sinais elétricos, em aspectos físicos, no comportamento do arco e da transferência metálica para distintas frequências de rotação do eletrodo.

Durante a realização dos ensaios, variando apenas a frequência de rotação do eletrodo, foi perceptível que ela exerce influência nos sinais elétricos do processo, isso como resultado da mudança no comportamento da transferência metálica e frequência de curtos-circuitos. Para a realização deste ensaio, foi apenas acrescida a frequência de rotação do eletrodo, sem mudança na tensão ou velocidade de alimentação regulada na fonte de energia.

No que diz respeito aos valores médios aquisitados, a observação feita é que o aumento na frequência de rotação culmina em uma pequena variação na tensão, onde a variação máxima gerada foi de aproximadamente 0,5 V (2,3%), apesar da tensão regulada na fonte de energia ter sido a mesma, quando comparado aos ensaios com 0 e 4000 rpm. Já com relação a corrente, a variação atingida foi maior, apresentando uma diminuição de 20A (15%), conforme a Tabela 4.2 exibe os resultados médios aquisitados.

Tabela 4.2. Parâmetros elétricos (aquisitados do SAP) para os ensaios com transferência metálica por curto-circuito. $U_a = 21,5V$; $V_a = 4,5$ m/min; $\emptyset = 3$.

W (rpm)	Um (V)	Im (A)	Uef (V)	Ief (A)	P (W)
0	20,4	134	21,4	140	2733,6
1000	20,5	129	21,4	135	2644,5
2000	20,5	129	21,3	135	2644,5
3000	20,8	124	21	128	2579,2
4000	20,9	119	20,9	119	2487,1

O aumento do valor médio da tensão e, conseqüentemente, redução no valor de corrente, é uma ocorrência que, de certa forma, não é previsto, podendo ser explicado mediante a seguinte ótica. Em uma

fonte de tensão, a tensão média medida não é idêntica a tensão regulada, já que a tensão medida é afetada pela quantidade de curtos-circuitos, fator esse que a fonte de energia não controla diretamente.

Diante a redução do valor médio de corrente, pode-se fazer a seguinte analogia: um dos grandes fatores que impacta na I_m são os elevados valores de corrente que temos durante a subida de corrente, ocorrência essa durante o curto-circuito. Quando há a diminuição da frequência de curtos, há uma menor quantidade de momentos em que a corrente permanece em valores elevados (picos de corrente durante o curto-circuito). Dessa forma, o valor médio tende a cair.

Duas são as opções viáveis para restabelecer o comprimento do arco, uma culminando simplesmente em um aumento no valor da tensão selecionada na fonte de energia, outra em um aumento na velocidade de alimentação, de modo a reestabelecer o valor predeterminado. Ou seja, foi observado que o aumento na frequência de rotação do eletrodo consegue fundir a mesma quantidade de arame com uma potência elétrica menor.

Percebe-se, pelo comportamento dos sinais elétricos, que o acréscimo na frequência de rotação causa perturbações tanto na estabilidade do processo quanto na transferência metálica, como expostos na Figura 4.3 Figura 4.4 e Figura 4.5 .

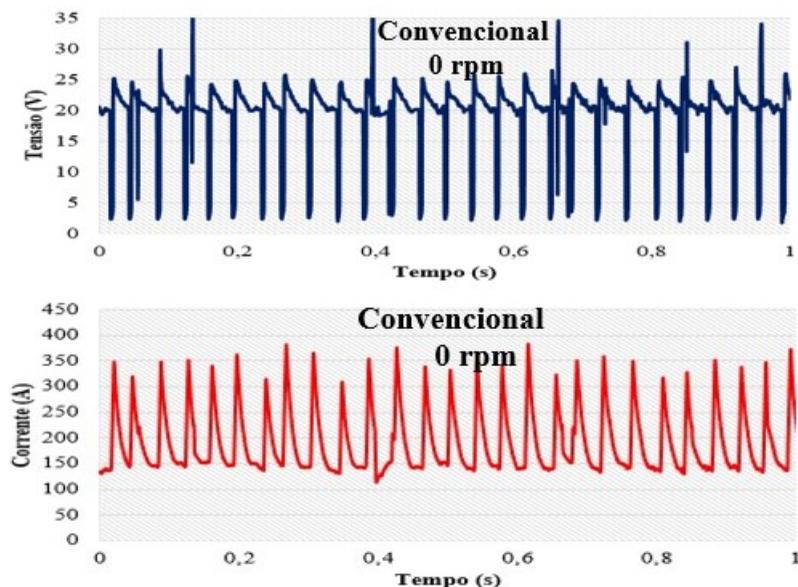


Figura 4.3. Oscilograma exibindo o comportamento da tensão e corrente.

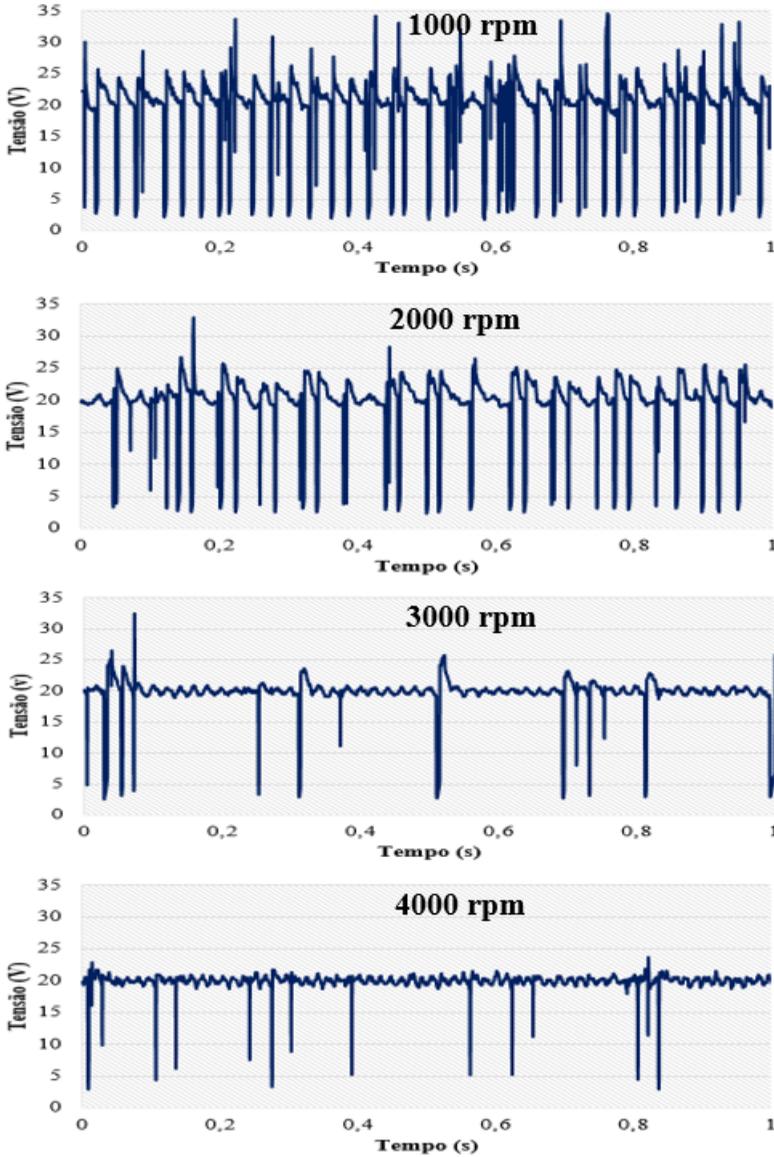


Figura 4.4. Oscilogramas exibindo o comportamento da tensão em função das frequências de rotação do eletrodo. $U_a = 21,5V$; $V.a = 4,5$ m/min; $P_c = 3$.

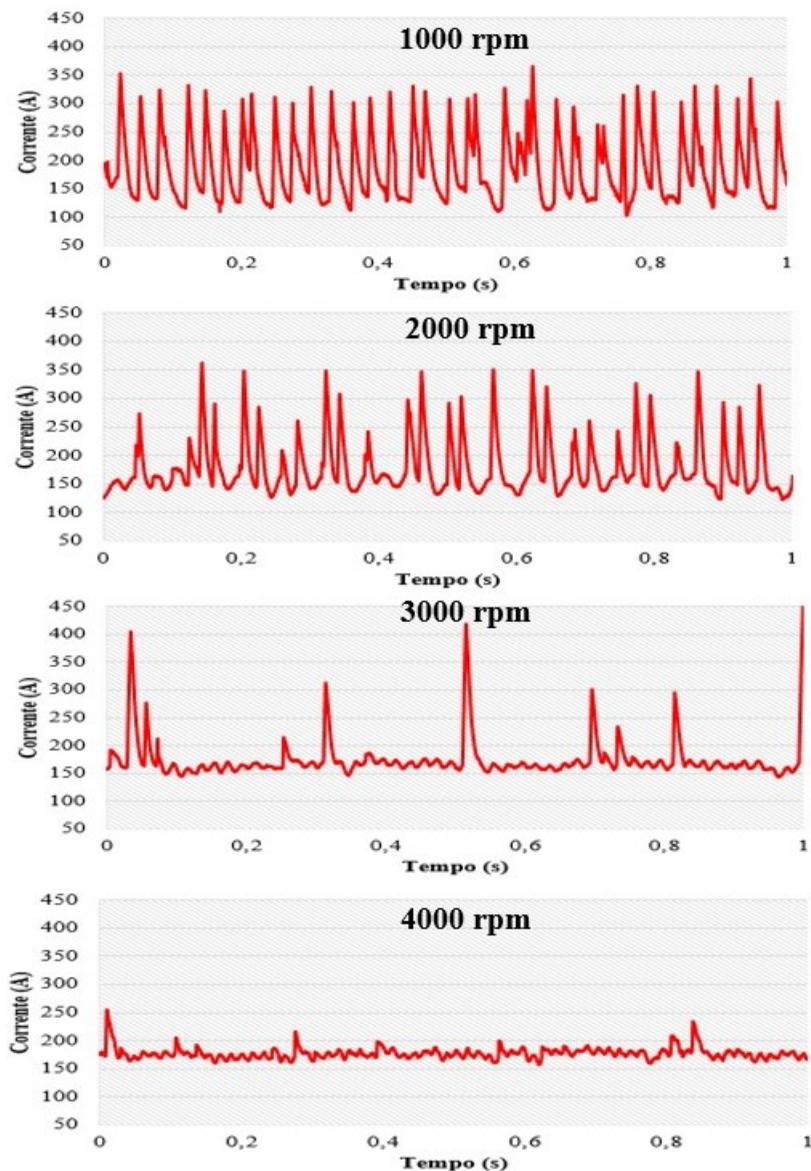


Figura 4.5. Oscilogramas exibindo o comportamento da corrente em função da frequência de rotação do eletrodo. $U_a = 21,5V$; $V_a = 4,5$ m/min; $P_c = 3$.

Um ponto negativo que foi observado diz respeito a emissão de respingos, onde foi constatada uma maior incidência nos ensaios realizados com 3000 e 4000 rpm, respectivamente. O fator que possa contribuir para tal ocorrência se trata da perturbação proveniente da própria física da rotação onde, em alguns momentos, acaba-se por desprender a gota da ponta do eletrodo e arremessá-la para fora da poça de fusão, ocorrência essa devido a ação da força centrífuga, força essa que será melhor descrita no decorrer do trabalho. Cabe ressaltar que altas frequência de rotação tendem a propiciar um depósito com qualidade não aceitável, conforme pode ser visualizado na Figura 4.6. Essa figura expõe a visão superior de um depósito realizado com a frequência de rotação do eletrodo igual a 3000 rpm, tornando, desta forma, perceptível a inviabilidade de se realizar depósitos sobre chapa com altas frequências de rotação, tendo ciência de que grande parcela do metal é ejetada para fora da poça de fusão.



Figura 4.6. Demonstração da inviabilidade ao se realizar um depósito sobre chapa com frequência de rotação igual ou superior a 3000 rpm; $P_c = 3$.

Ainda em relação aos respingos, o fato de se almejar processos com baixa ou até mesmo ausência dos respingos não se trata somente da preocupação com a eficiência de deposição, ou seja, a parcela de material entregue para a poça de fusão. Até porque ao se tentar quantificar a emissão de respingos no final do expediente, pode-se perceber que tais insumos representam uma pequena fatia no custo total de uma operação de soldagem [56] - [57], onde as indústrias conseguem facilmente absorver tal problemática, todavia tal ocorrência deve ser analisada com cautela. Ao se realizar uma análise mais detalhada sobre essa ocorrência, é possível perceber que ocorrem respingos muitas das vezes no bocal de proteção ou

até mesmo no bico de contato, perturbando desta maneira o perfeito escoamento do gás de proteção. Além disso, um dos principais problemas é o contato elétrico entre o bocal e o bico de contato, que possibilita com que se abra arco diretamente no bocal, podendo fazer a corrente elétrica passar por onde não deveria o que poderia acarretar em um dano ao robô ou equipamento de automação. Os respingos também são prejudiciais em casos de linha de produção, onde se tem esteiras com movimentação de *pallets*.

Ao analisar novamente os sinais elétricos, pode-se perceber que havia momentos em que a tensão sofria pequenas variações, comportando-se quase como um processo de corrente constante, assim como havia momentos com a presença de curtos-circuitos. Ao analisar apenas o trecho sem a presença de curtos-circuitos, poder-se-ia concluir prematuramente que a transferência metálica estaria ocorrendo por voo livre. Entretanto o valor médio de corrente se encontra abaixo da corrente de transição, ressaltando, desta forma, a influência da frequência de rotação do eletrodo no comportamento do processo.

Face aos resultados obtidos com a frequência de rotação do eletrodo de 3000 rpm, onde a transferência metálica parece ter deixado de ocorrer por curto-circuito, foi proposta uma metodologia de filmagem via câmera de alta velocidade, e os resultados expostos na Figura 4.7 e Figura 4.8.

A técnica de filmagem em alta velocidade foi a única opção com fundamento físico suficiente para se confirmar que, de fato, o vale de tensão caracteriza o destacamento da gota, onde foi possível observar o destacamento da gota metálica toda vez que a tensão fica em um valor mínimo, ou seja um vale de tensão. Assim, foi possível observar que, mesmo com um valor médio de corrente abaixo do valor da corrente de transição, a transferência metálica ocorre por voo livre. Contudo, tais ocorrências advêm unicamente por ser uma característica da tocha de soldagem *Spinarc* de prover a rotação do eletrodo. Ao analisar a transferência metálica por voo livre, mesmo com um valor médio de corrente abaixo do valor da corrente de transição, inicialmente é contra intuitivo com as informações advindas da literatura a respeito dos fenômenos governantes da transferência metálica [58] -[59]. Pode-se entender que a ação da força centrífuga tende a ser mais uma força atuante na transferência metálica, de modo a auxiliar o destacamento da gota sem que sejam necessárias também altas correntes para que se consiga transferir uma gota por voo livre (sem contato físico).

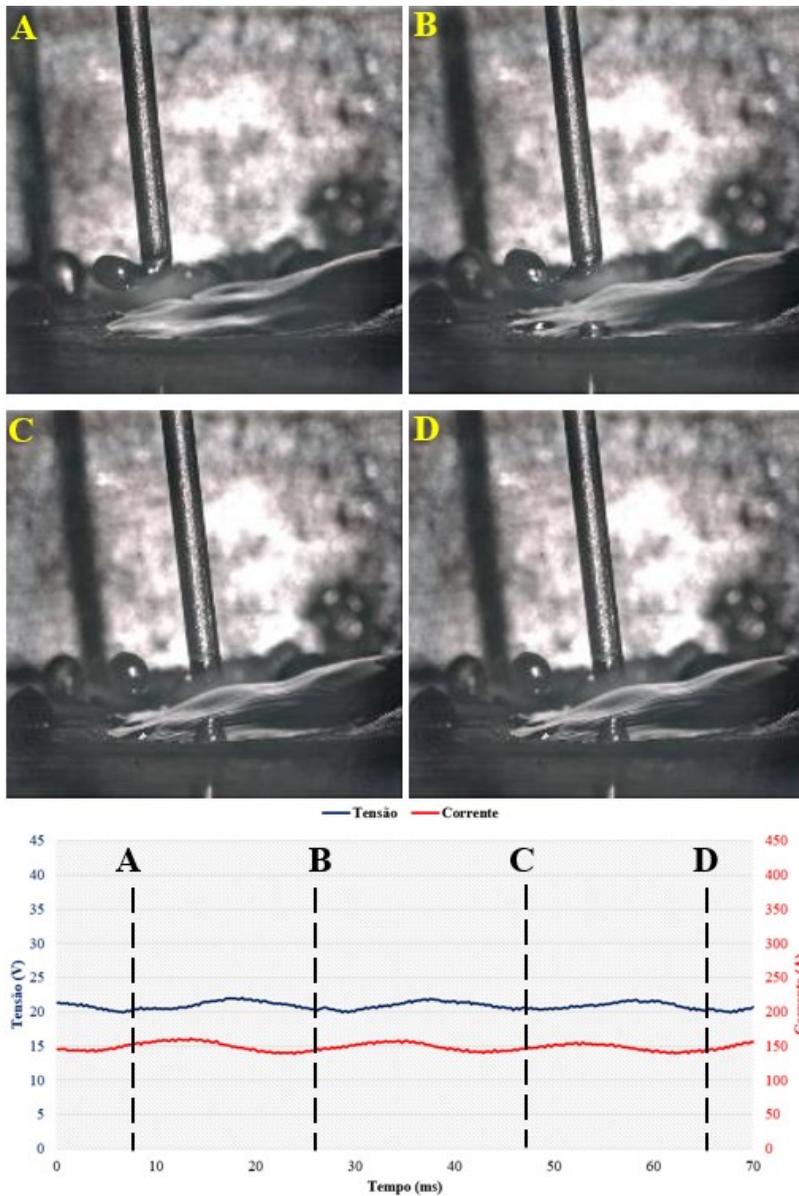


Figura 4.7. Quadros da filmagem de alta velocidade exibindo o instante do destacamento da gota metálica sincronizado com os sinais elétricos. $W = 3000$ rpm; $P_c = 3$ mm; $U_a = 20,5$ V, $V.a = 4,5$ m/min.

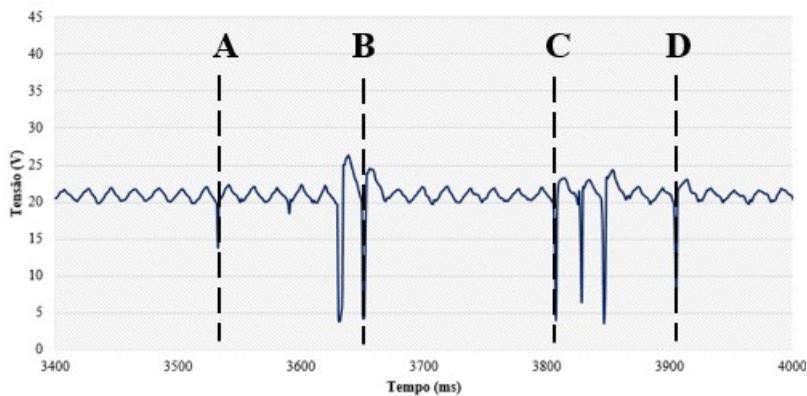
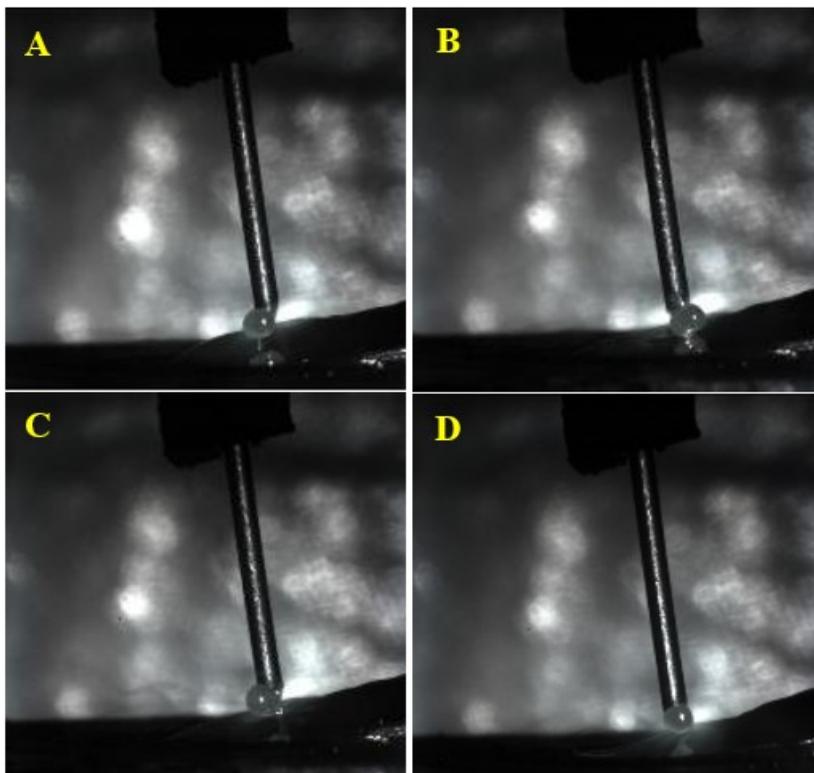


Figura 4.8. Quadros da filmagem de alta velocidade sincronizado com sinais de tensão demonstrando o curto-circuito acidental. $W = 3000$ rpm; $P_c = 3$; $U_a = 20,5$ V; $V.a = 4,5$ m/min.

Ao analisar a transferência metálica por voo livre, mesmo com um valor médio de corrente baixo do valor da corrente de transição, inicialmente é contra intuitivo com a corrente literatura a respeito dos fenômenos governantes da transferência metálica [58] -[59]. Pode-se entender que a ação da força centrífuga tende a ser mais uma força atuante na transferência metálica, de modo a auxiliar o destacamento da gota sem que sejam necessárias também altas correntes para que se consiga transferir uma gota por voo livre (sem contato físico). Comumente, a literatura relata que as principais forças atuantes no processo MIG/MAG são as forças de destacamento, de origem eletromagnética, e a força devido a tensão superficial que tende a reter a gota na ponta do eletrodo. Agora, se tratando de uma tecnologia capaz de propiciar continuamente a rotação do metal de adição, a força centrífuga passa a atuar como mais uma força de modo a auxiliar o destacamento da gota metálica, onde a Figura 4.9 exibe de forma didática a atuação das principais forças na gota metálica em um processo à eletrodo rotativo.

Onde:

F_γ = Força devido a tensão superficial

F_e = Forças de origem eletromagnéticas

F_w = força devido a ação da rotação do eletrodo

F = Força resultante do destacamento

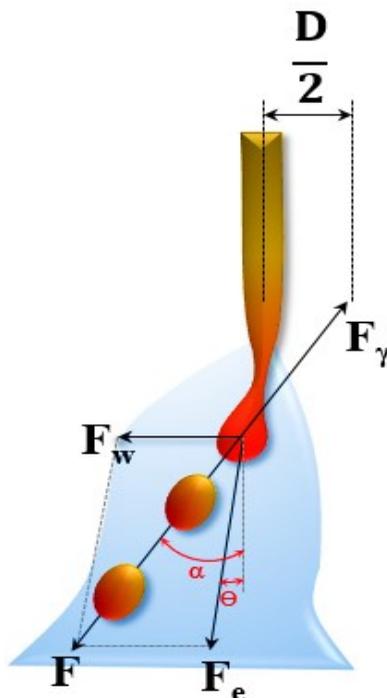


Figura 4.9. Representação esquemática da ação da força centrífuga no destacamento da gota. Fonte : Adaptado de [60] .

4.2.2 Transferência Metálica por Spray

A influência da frequência de rotação do eletrodo também foi avaliada para correntes médias com valores acima da corrente de transição, conforme a Tabela 4.3 exibe os valores médios aquisitados.

Os resultados apontaram para um aumento no valor médio de tensão e uma redução na corrente, conforme é aumentada a frequência de rotação do eletrodo, sendo essa uma ocorrência similar aos resultados observados nos ensaios realizados com a transferência metálica por curto-circuito. Ao realizar os ensaios, agora dotando-se de um valor relativamente alto de corrente média, pôde-se perceber que havia uma tendência de o valor médio de tensão apresentar um comportamento com uma menor variação ao crescer a frequência de rotação do eletrodo. Quando comparado aos ensaios com transferência metálica por curto-circuito, nota-se que houve, então, pouca variação da tensão. Já para a corrente, foi observada uma redução de aproximadamente 16 A. De forma geral, houve a incidência de uma menor variação nos sinais médios. Cabe aqui ressaltar que tais alterações são menores que as variações encontradas nos ensaios realizados com transferência metálica por curto-circuito.

Tabela 4.3. Parâmetros elétricos aquisitados do SAP dos ensaios com transferência metálica por *spray*.

W (rpm)	U (V)	Im (A)	Uef (V)	Ief (A)	P (W)
0	28,9	219	29,8	220	6329,1
1000	29,1	214	29,1	214	6227,4
2000	29,1	206	29,2	206	5994,6
3000	29,1	206	29,2	206	5994,6
4000	29,2	204	29,1	204	5956,8

A análise do aumento da frequência de rotação tende, a priori, a propiciar um processo com uma menor variação da tensão, conforme os sinais elétricos exibidos nas Figura 4.10, Figura 4.11 e Figura 4.12.

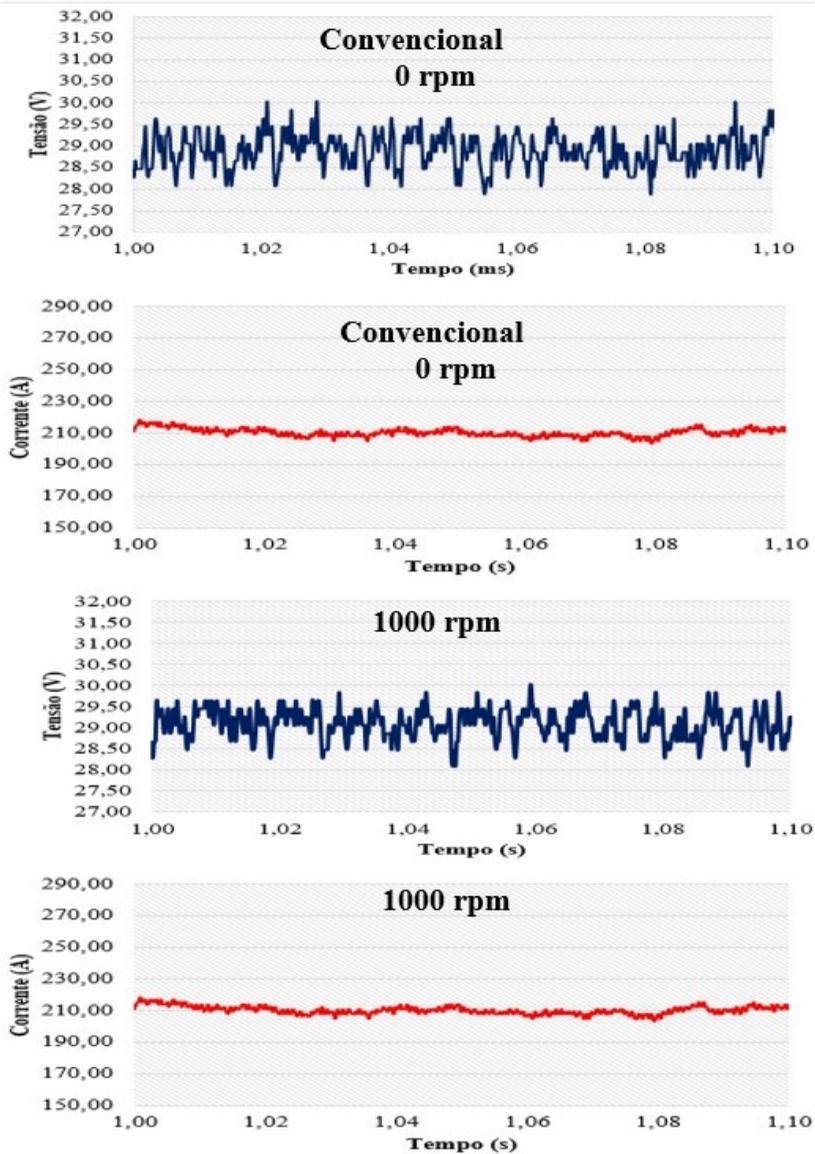


Figura 4.10. Oscilogramas exibindo o comportamento da tensão e corrente em função das frequências de rotação do eletrodo. $U_a = 27,0$ V; $v_a = 8,5$ m/min; $P_c = 3$.

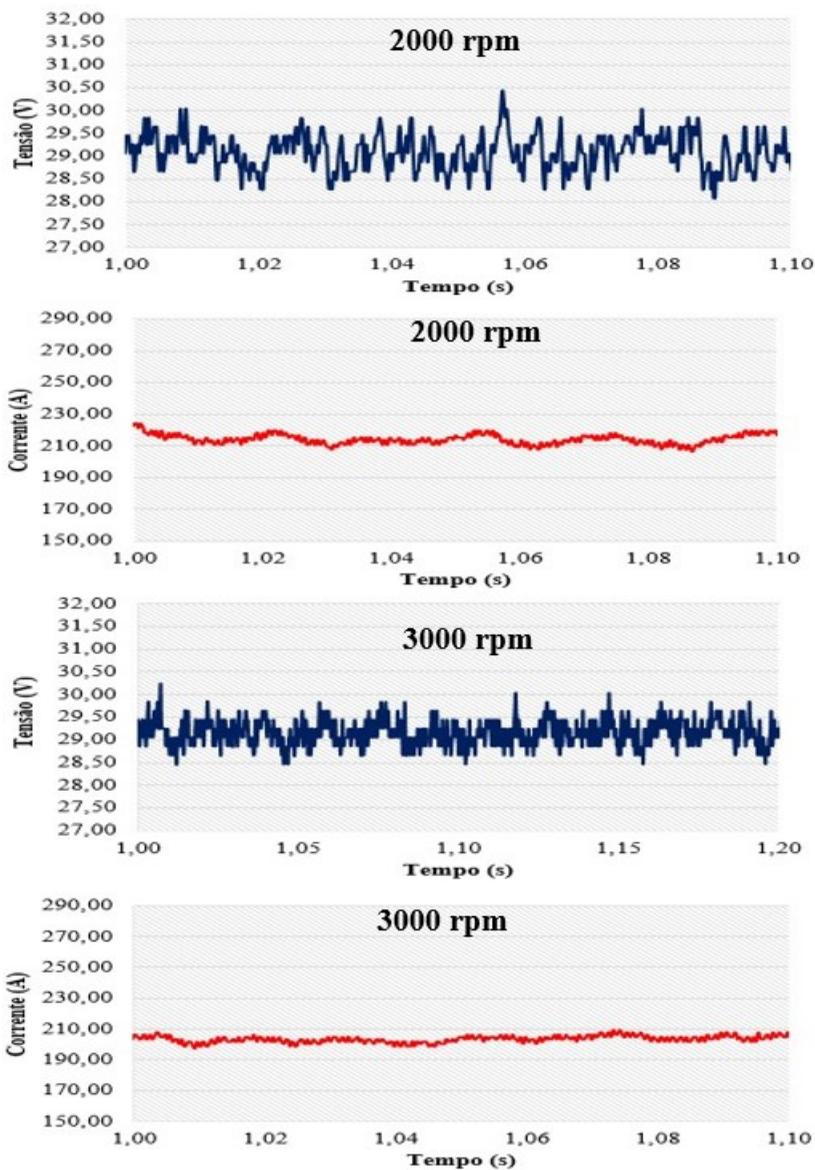


Figura 4.11. Oscilogramas exibindo o comportamento da tensão e corrente em função das frequências de rotação do eletrodo. $U_a = 27,0$ V; $V_a = 8,5$ m/min; $P_c = 3$.

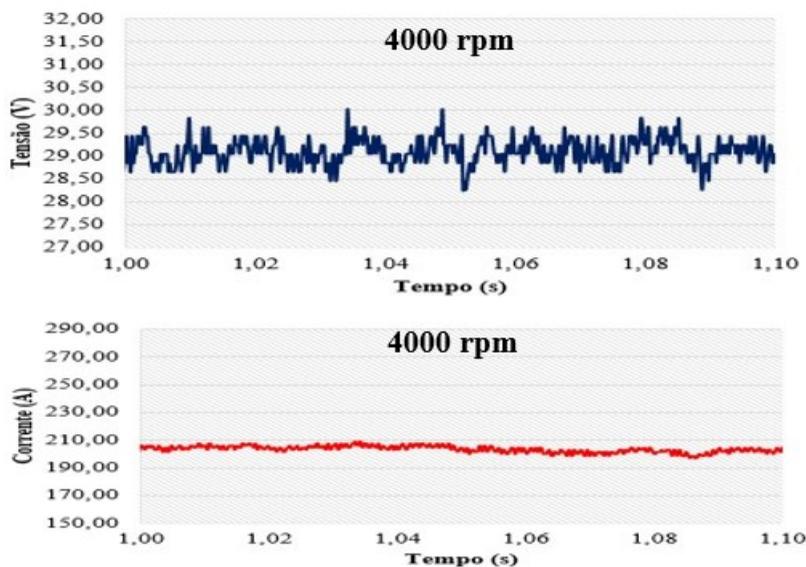


Figura 4.12. Oscilograma exibindo o comportamento da tensão e corrente em função das frequências de rotação do eletrodo. $U_a = 27,0$ V; $V_a = 8,5$ m/min; $P_c = 3$.

Diante do exposto, foi proposta uma metodologia para a obtenção de um dado mais próximo de quantitativo a respeito da variação dos sinais elétricos em função da frequência de rotação do eletrodo; e, para isso, optou-se por utilizar uma simples ferramenta estatística do sistema de aquisição de dados portátil (SAP) de desvio padrão, cujos resultados são exibidos na Figura 4.13. Desta forma, foi possível observar o comportamento dos sinais elétricos mediante o acréscimo na frequência de rotação do eletrodo, sendo possível inferir que o acréscimo na frequência de rotação do eletrodo acarreta em um menor desvio padrão dos sinais elétrico.

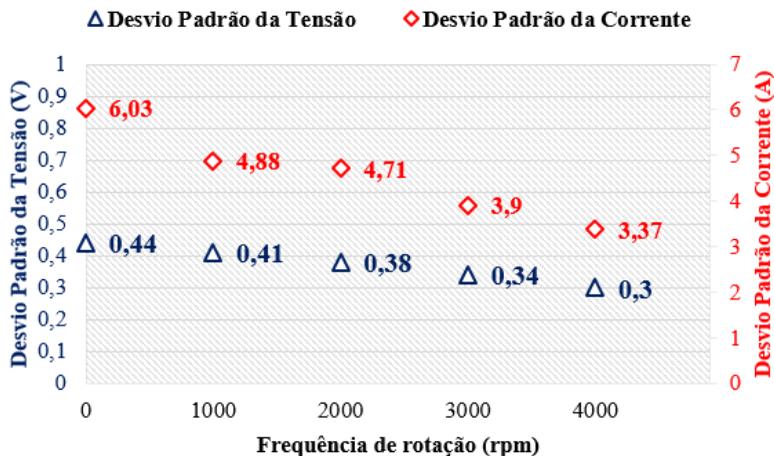


Figura 4.13. Gráfico demonstrando o desvio padrão da tensão e corrente em função da frequência de rotação para a transferência metálica por *spray*. $P_c = 3$ mm.

Diante da observação da variação nos dados do oscilograma de tensão, foi levantada a hipótese de que essa variação estaria ligada ao destacamento das gotas metálicas. Mesmo não sendo algo esperado para a transferência metálica por voo livre, foram realizadas análises para verificar a possibilidade de tal correspondência. Face a isso, realizou-se novamente a filmagem de alta velocidade, onde os quadros aquisitados são exibidos na Figura 4.14. Acreditava-se que, de maneira similar aos ensaios realizados com transferência metálica por curto-circuito, os vales de tensão estariam novamente representando o destacamento da gota. Todavia, somente após a realização da filmagem de alta velocidade é que foi possível observar que os vales de tensão não necessariamente representam o destacamento da gota metálica.

Ao analisar as filmagens de alta velocidade, foi possível registrar os momentos onde ocorre um pico de tensão (aproximadamente 29,25V), juntamente com o destacamento de apenas uma gota (Quadro A). Há outros momentos em que a tensão cai (aproximadamente 28,75V) e, mesmo assim, pode-se observar o destacamento de mais de uma gota, juntamente com uma porção líquida que tendia a escorrer da ponta do eletrodo (Quadro B). Posteriormente, foi perceptível outra vez o comportamento do pico de tensão acarretando o destacamento da gota principal juntamente com uma pequena porção líquida de material (Quadro C). A posteriori, foi constatado um decréscimo no valor de tensão e, novamente, ocorreu o

destacamento de mais de uma gota (Quadro D). Um outro fato observado são as transferências observadas onde a tensão permaneceu em um maior valor (Quadros A e C). A porção do material já em estado líquido na ponta do eletrodo tende a se escorrer em direção à poça de fusão. Desta maneira, acredita-se que os valores elevados de tensão registrados estejam relacionados à transferência de um grande volume de material e não somente de uma gota, como inicialmente se acreditava. Foi possível observar que, para as condições aqui investigadas, tal comportamento do pico de tensão caracterizando o destacamento da gota metálica não ocorre igual a como foi demonstrado nos ensaios anteriores (dotando-se de valores relativamente baixos de corrente média).

Uma outra observação obtida a partir da filmagem foi que, à medida que se acrescia a frequência de rotação, o diâmetro das gotas tendia a se reduzir, enquanto que a porção líquida na ponta do eletrodo aumentava. Desta forma, foi proposta uma metodologia que visasse investigar as possíveis alterações no diâmetro da gota, a fim de confirmar a veracidade dos fatos aqui observados.

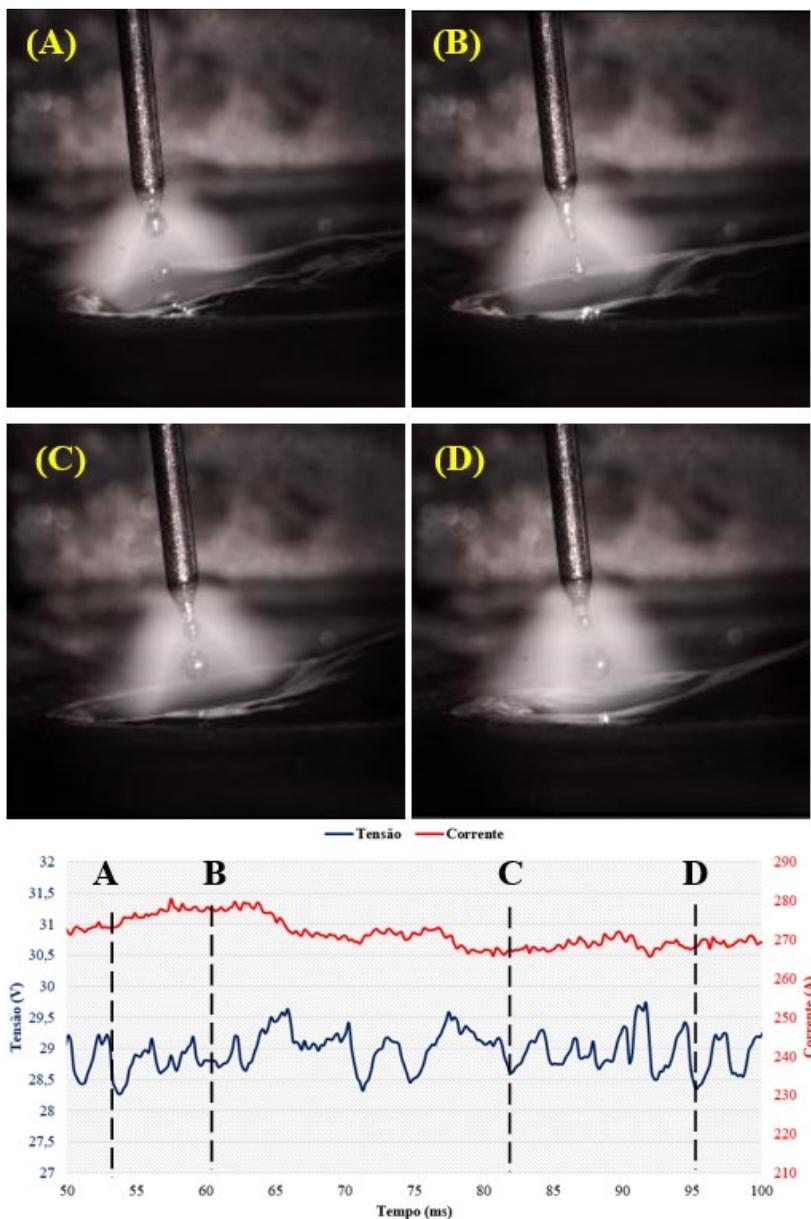


Figura 4.14. Quadros da filmagem de alta velocidade sincronizado com sinais elétricos demonstrando a transferência metálica por *spray*. $W = 1000$ rpm; $P_c = 3$ mm.

Para tanto, foi realizada uma análise que pode ser verificada na Figura 4.15 e Figura 4.16, onde são expostos os resultados médios da medição.

Pode-se observar o comportamento tendencioso da redução do diâmetro da gota com o aumento da frequência de rotação do eletrodo. Essa ocorrência se torna relevante para a melhor compreensão dos fenômenos físicos decorrentes do processo, pois é sabido que não foram alterados quaisquer parâmetros elétricos no processo de soldagem. Ao analisar a ocorrência da redução do diâmetro da gota em função do acréscimo na frequência de rotação do eletrodo, começa a surgir uma hipótese a respeito de que a frequência na qual essas gotas seriam ejetadas tendesse a aumentar (frequência de destacamento).

Cabe salientar que o critério utilizado para a consumação do cálculo a respeito do diâmetro da gota consiste em mensurar apenas a gota principal, em casos onde havia a ocorrência de gotas secundárias. Tal metodologia foi adotada por demonstrar uma maior coerência para as condições aqui analisadas.

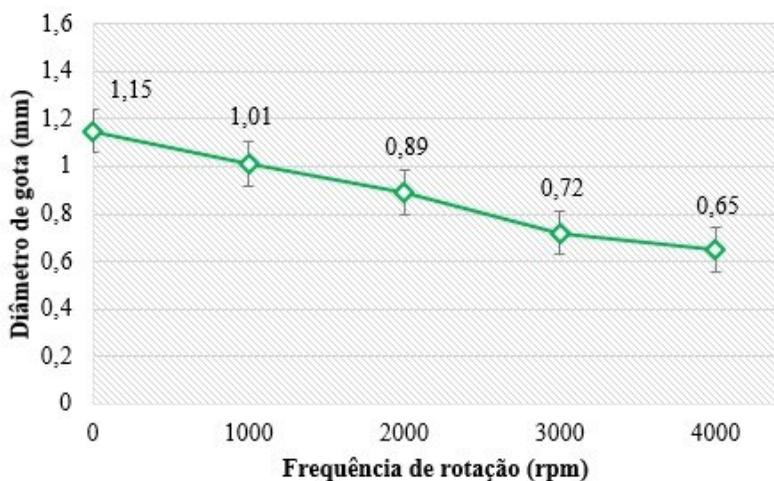


Figura 4.15. Gráfico exibindo o comportamento do diâmetro da gota em função da frequência de rotação do eletrodo.

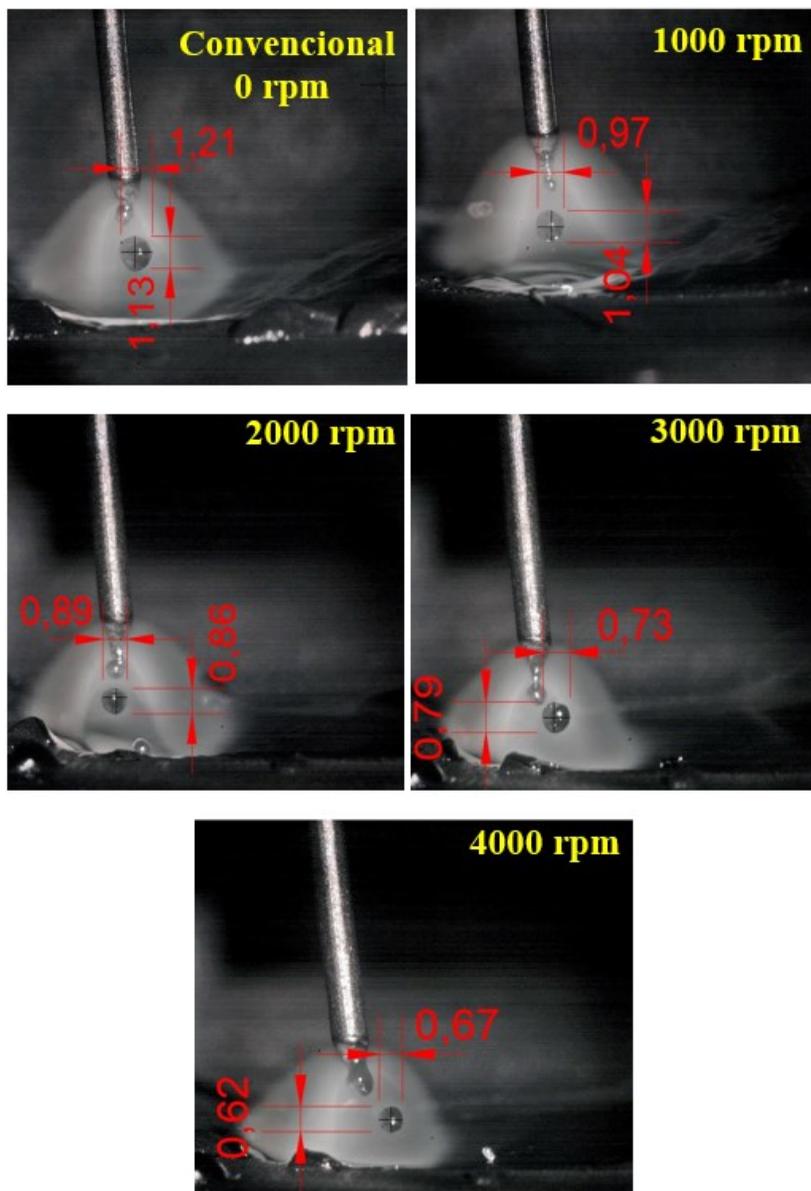


Figura 4.16. Comparativo entre diâmetro de gota em função da frequência de rotação do eletrodo na transferência metálica por *spray*.

No decorrer dos experimentos utilizando a transferência metálica por voo livre, foi observado que o diâmetro da gota residual no ponto do eletrodo tendia a reduzir com o aumento da frequência de rotação do eletrodo, onde a Figura 4.17 exibe os valores médios obtidos.

Visto isso, acredita-se que a ação da força centrífuga tende a auxiliar remoção de parte do metal na ponta do eletrodo ainda no estado líquido por conta das altas frequências de rotação (acima de 2500 rpm). Uma menor gota residual na ponta do eletrodo pode ser de grande auxílio para a próxima reabertura do arco, propiciando uma abertura menos abrupta. Em um processo convencional, geralmente a abertura do arco elétrico ocorre mediante o contato físico entre o eletrodo e a peça a ser soldada, acarretando em a abertura mais abrupta. Se tratando de uma tecnologia que provê a rotação do metal de adição, uma gota residual de maior diâmetro na ponta do eletrodo, pode acarretar em uma abertura ainda mais abrupta.

Cabe ressaltar que a rotação do eletrodo foi interrompida imediatamente após a extinção do arco elétrico, de modo a se evitar possíveis interferências.

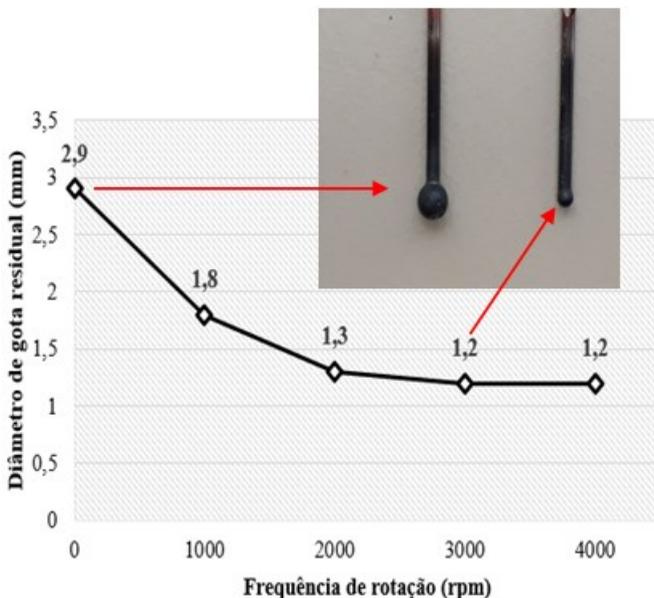


Figura 4.17. Gráfico exibindo a influência da frequência de rotação na gota residual na ponta do eletrodo.

4.3 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ROTAÇÃO DO ELETRODO NO PROCESSO MIG/MAG PULSADO

4.3.1 Influência da rotação do eletrodo em aspectos morfológicos do cordão

Esta seção aborda os ensaios de soldagem realizados sobre chapas, apresentando um comparativo entre distintas frequências de rotação. O estudo foi conduzido avaliando aspectos morfológicos, térmicos e físicos. Tais análises estão dentro do contexto de enchimento de chanfros *Narrow Gap*.

É esperado que a rotação do eletrodo modifique a morfologia do cordão. Em contrapartida, foi escolhido um diâmetro pequeno por conta da necessidade de aplicação dentro de chanfros *Narrow Gap*. Logo, é necessário avaliar se, mesmo assim, a rotação do eletrodo pode ter influência. Desta forma, foram realizados ensaios do tipo cordão sobre chapa para verificar essa questão, conforme a Figura 4.18 exibe uma vista superior, juntamente com as respectivas seções transversais.

Uma observação que despertou certa curiosidade foi que, ao utilizar a frequência de rotação de 2000 rpm do eletrodo, o cordão apresentou porosidade no seu início, e como tal fenômeno não ocorreu nos ensaios anteriores. Uma possível explicação para isso é que altas frequência de rotação do eletrodo tendem a propiciar um regime turbulento no gás de proteção, de modo a desviar o fluxo da poça de fusão, expondo-a a possíveis contaminações. Face a tal problemática, optou-se pelo aumento da vazão do gás de proteção para 30 l/min, cuja metodologia sanou o problema acima exposto.

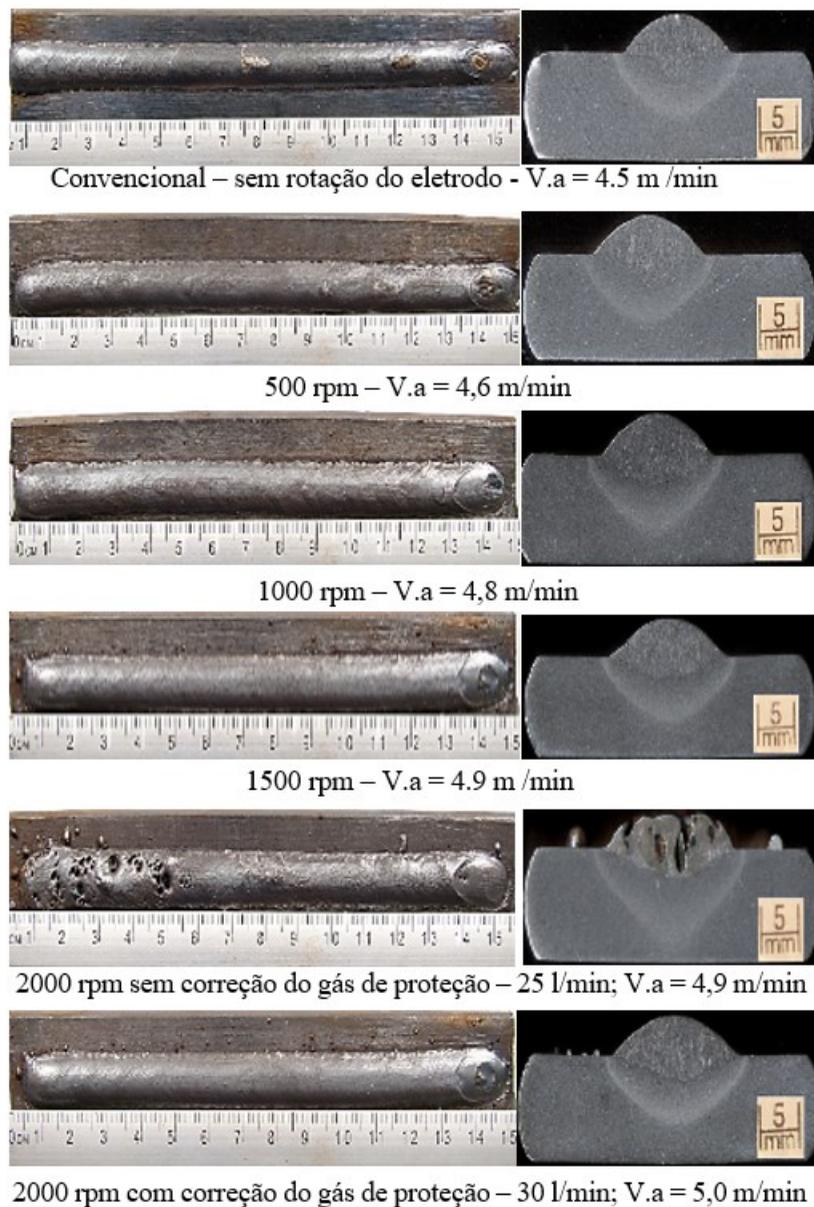


Figura 4.18. Vista superior e seções transversais em função da variação da frequência de rotação do eletrodo.

No que diz respeito aos aspectos morfológicos, com o aumento da frequência de rotação do eletrodo, pôde-se perceber o aumento na largura do cordão, enquanto que o reforço e a penetração tendiam a decrescer. Para os casos aqui investigados, foi perceptível um ganho de 17% na largura do cordão e, quanto à penetração, uma redução de aproximadamente 50%. Já para o reforço, foi perceptível uma variação de cerca de 17%, comparando o processo convencional e o processo com a frequência de rotação de 2000 rpm. A Figura 4.19 exhibe os valores médios encontrados.

Tal comportamento a respeito da morfologia do cordão depositado se trata de características desejáveis em um procedimento de revestimento, onde é possível o preenchimento de uma área com uma menor quantidade de material a ser adicionado, resultando, desta maneira, em um menor número de passes. Entretanto, cabe aqui ressaltar que tal experimento não objetiva a obtenção de revestimentos metálicos, mas sim a avaliação de possíveis alterações físicas e morfológicas mediante a variação da frequência de rotação do eletrodo operando com o processo MIG/MAG pulsado.

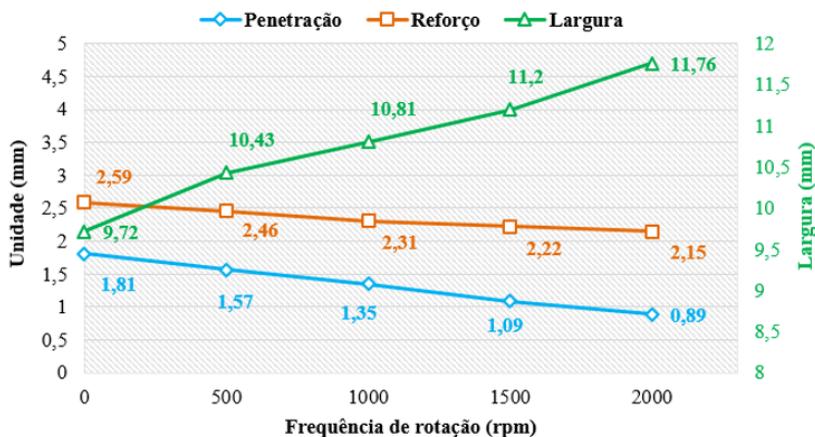


Figura 4.19. Gráfico comparativo entre reforço, penetração e largura referente ao ensaio variando a frequência de rotação do eletrodo.

A ocorrência do aumento da largura com a redução do reforço e penetração pode ser explicada segundo a seguinte ótica. A medida que se aumenta a frequência de rotação, aumenta-se também a área a ser percorrida pelo eletrodo (conforme pode ser visualizado na Figura 4.2).

Como os demais parâmetros são mantidos constantes (valor médio de corrente a velocidade de soldagem), há uma predisposição de aumentar a largura cordão, mesmo com um decréscimo das demais variáveis. A Figura 4.20 exibe uma sobreposição das seções transversais para os ensaios realizados sem a rotação do eletrodo e com o ensaio realizado com a frequência de 2000 rpm.

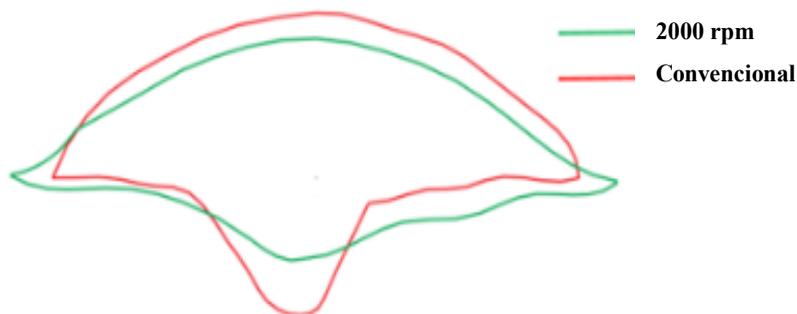


Figura 4.20. Sobreposição das seções transversais entre os processos sem a rotação do eletrodo e com frequência de rotação de 2000 rpm.

Foi observada a maior presença de respingos para os processos com 1500 e 2000 rpm, onde os mecanismos responsáveis por tal fenômeno já foram explicitados no tópico 4.2. A Figura 4.21 representa os quadros gerados via filmagem de alta velocidade, onde é possível observar o fenômeno da transferência metálica com ênfase na ejeção da gota para fora da poça de fusão.

Nos quadros A e B é possível observar que o destacamento da gota metálica juntamente com a presença de gotas secundárias. Também é possível observar que, devido ao próprio movimento do eletrodo, a gota é ejetada lateralmente para fora da poça de fusão. Nos quadros C e D é possível observar o momento em que ocorre o destacamento da gota metálica; todavia, a mesma novamente é ejetada fora da área de interesse. Desta maneira, foi possível evidenciar as possíveis ocorrências quanto a se empreender procedimentos como depósito sobre chapas com frequência de rotação na ordem de 2000 rpm.

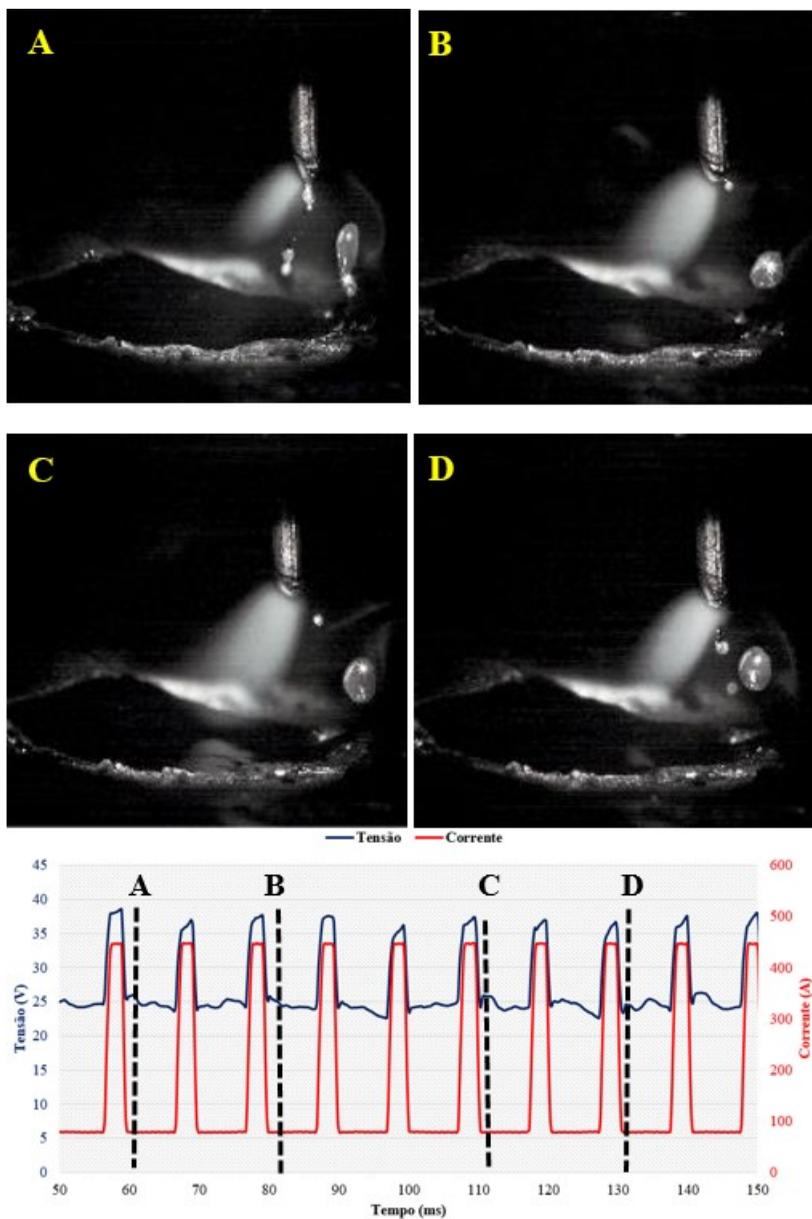


Figura 4.21. Quadros da filmagem de alta velocidade sincronizado com sinais elétricos identificando o desprendimento da gota em função da rotação do eletrodo. $W = 1500$ rpm; $P_c = 3$ mm.

Ao realizar os ensaios, foi perceptível que, à medida que acrescia a frequência de rotação do eletrodo, o comprimento do arco do elétrico tendia a aumentar e, conseqüentemente, a tensão média também aumentava, onde os valores médios da tensão são exibidos na Figura 4.22.

De posse deste conhecimento, duas podem ser as alternativas para resolver a alteração na tensão causada pela frequência de rotação do eletrodo. A primeira delas seria adequar os parâmetros de corrente do pulsado para reduzir a corrente média e, conseqüentemente, a taxa de fusão do eletrodo. A segunda alternativa seria reduzir o comprimento do arco elétrico com acréscimo na velocidade de alimentação. Desta maneira, optou-se por aumentar a velocidade de alimentação, de modo a chegar visualmente na mesma altura de arco, e com valores similares aos do ensaio sem a rotação do eletrodo (25,5 V).

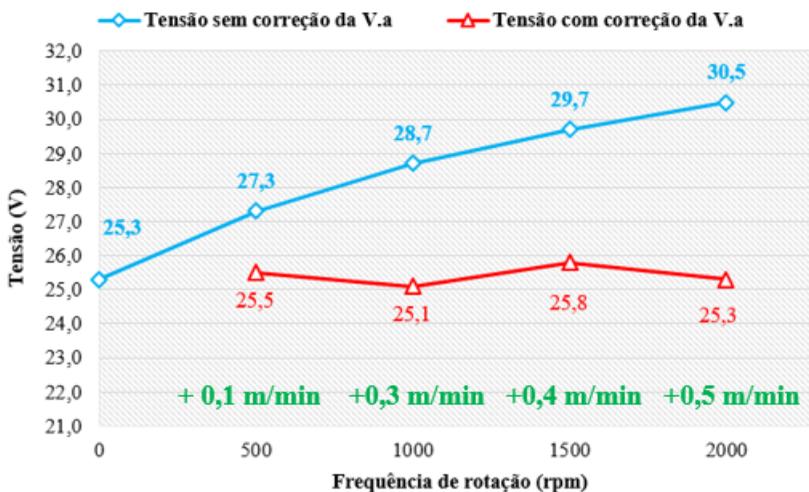


Figura 4.22. Gráfico comparativo exibindo o comportamento da tensão com e sem correção na velocidade em função da alternância da frequência de rotação do eletrodo

A Figura 4.23 exibe o comportamento da velocidade de alimentação e da taxa de fusão do eletrodo em função da frequência de rotação. Através da análise dos resultados, foi possível deduzir que é possível fundir uma maior massa de metal ao crescer a frequência de rotação do eletrodo, isso para o mesmo valor médio de corrente, ocorrência essa de extrema relevância no que tange a produtividade dos processos de soldagem.

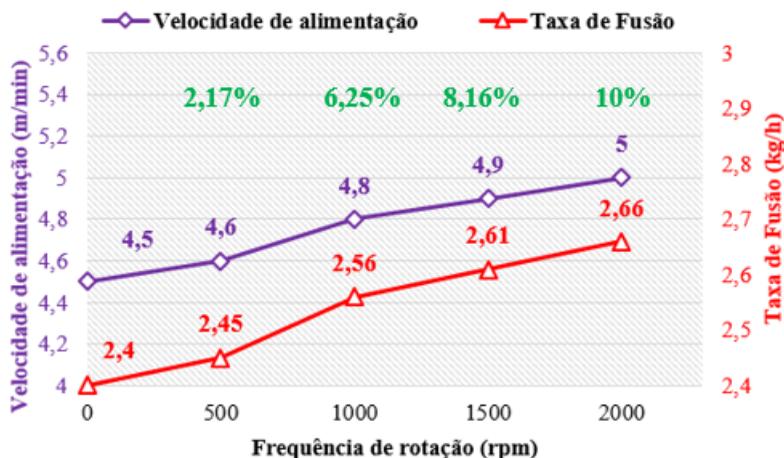


Figura 4.23. Gráfico comparativo exibindo o comportamento entre velocidade de alimentação e taxa de fusão em função do acréscimo da frequência de rotação do eletrodo. $I_m = 160$ A; $P_c = 3$.

Retornando a Figura 4.22 e a Figura 4.23, a ocorrência da fusão de uma maior massa de metal para um mesmo valor médio de corrente deve ser analisado com cautela. Os resultados aqui obtidos apontam para a ejeção de gotas com um menor gradiente térmico, sendo tal temática será melhor explanada no tópico 4.4. Esse fenômeno é de extremo interesse para a soldagem de chapas de baixa espessura e para procedimentos destinados a obtenção de revestimentos.

Para registrar e para melhor avaliar o comportamento do arco elétrico, foi proposto um ensaio cuja metodologia se baseia na aquisição dos sinais elétricos de um processo convencional (sem a rotação do eletrodo) e, repentinamente, liga-se a rotação do eletrodo em uma frequência predeterminada, cuja Figura 4.24 exibe o oscilograma demonstrando o comportamento dos sinais de corrente e tensão, com ênfase nos dois períodos.

Como pode ser observado, com o eletrodo sendo rotacionado sem quaisquer correções na velocidade de alimentação, tal ocorrência acarreta tanto em um aumento na tensão de pulso como na tensão de base, mudando o valor médio de tensão e alterando também o comprimento do arco.

A Figura 4.24 exibe um período maior dos sinais elétricos, onde é possível observar o comportamento da tensão em dois momentos distintos. O momento “A” representa o processo sem a rotação do eletrodo, ou

seja, exibe os sinais elétricos de um processo MIG/MAG pulsado convencional. A etapa (B) representa o eletrodo sendo rotacionado a 1000 rpm, onde é possível ver pequenas variações, tanto na tensão de base como na tensão de pulso, culminando, desta forma, em uma diferença considerável na tensão média. Para este caso em questão, foi observado um aumento de aproximadamente 1V tanto na tensão de base quanto na tensão de pulso. Esse aumento reflete no valor médio de tensão, conforme resultado já foi aqui demonstrado na Figura 4.22. Uma outra ocorrência observada se trata dos picos de tensão registrados entre o período que o eletrodo estava estático (quadro A) até o período onde o mesmo já estava em pleno regime de rotação a 1000 rpm (quadro B). Foi observado o comportamento desordenado da tensão, apresentando picos que em alguns casos ultrapassaram os valores quando o mesmo é não rotacionado. Dessa forma, acredita-se que tal período se trata de que o mesmo ainda não esteja em regime. Entretanto, tal afirmação seria errônea sem a análise da filmagem de alta velocidade.

A Figura 4.25 exibe a filmagem de alta velocidade sincronizada com os sinais elétricos, onde pode ser observada as variações nos sinais elétricos e, conseqüentemente, no comprimento do arco ao crescer a frequência de rotação do eletrodo. Os quadros A e C representam um processo convencional, ou seja, sem a rotação do eletrodo, onde é perceptível observar nos sinais elétricos que há uma certa estabilidade no que diz respeito aos valores de tensão de base e de pulso. Entre o quadro B e D, representado no oscilograma, é possível perceber que, em alguns momentos, há determinados picos de tensão, onde, muitas das vezes, os valores são até maiores que o processo com a rotação do eletrodo. Tal ocorrência se trata da estabilização da rotação do eletrodo, ou seja, os picos de tensão representam o momento em que o processo ainda não está em regime. Os quadros B e D representam o processo com a rotação do eletrodo a uma frequência de 1000 rpm, onde é possível observar um pico de tensão culminando, desta forma, em um aumento no comprimento do arco. Cabe aqui advertir que tal afirmação a respeito da variação do comprimento do arco somente foi possível mediante a filmagem de alta velocidade, registrando os dois momentos no mesmo vídeo. Um período sem a rotação do eletrodo e o outro período a uma frequência de rotação de 1000 rpm.

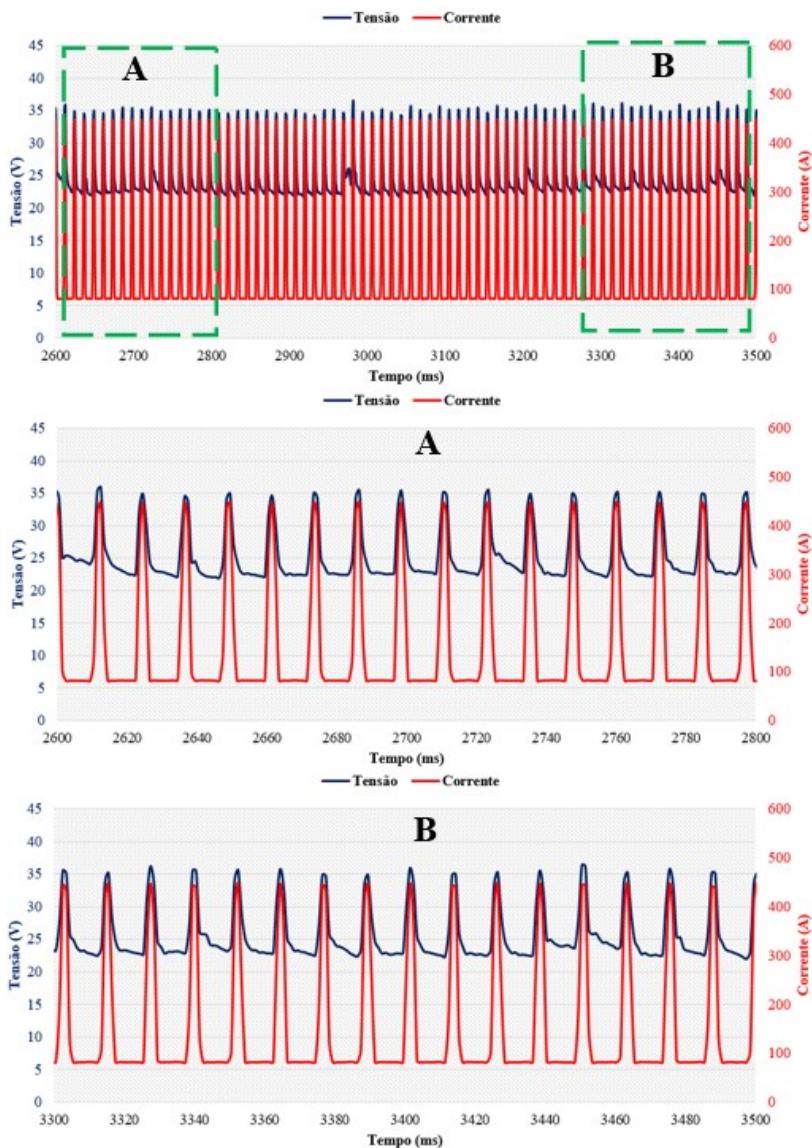


Figura 4.24. Oscilogramas demonstrando os picos de tensão, caracterizando o momento exato de. (A) sem rotação do eletrodo e (B) com rotação de 1000 rpm.

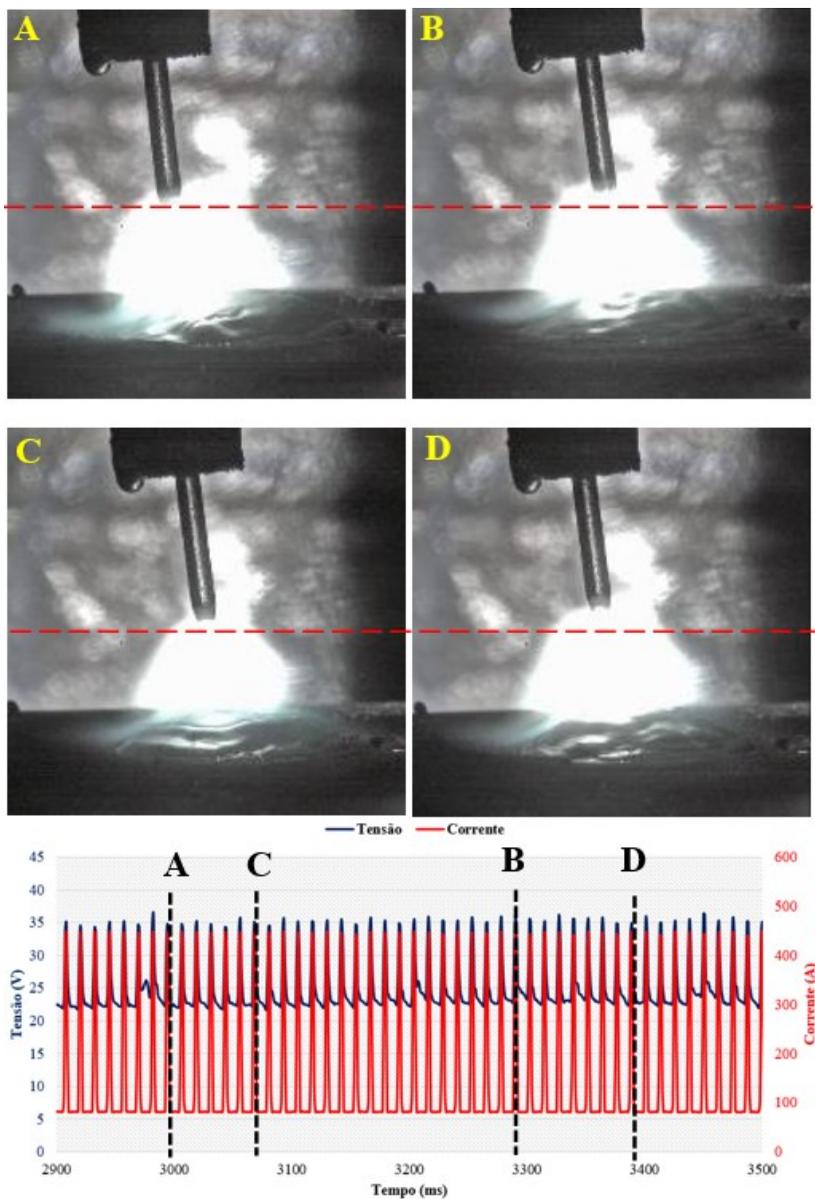


Figura 4.25. Quadros da filmagem de alta velocidade sincronizados com oscilograma, demonstrando a variação da tensão em função da rotação do eletrodo. $W = 1000$ rpm; $P_c = 3$; $V.a = 4,5$ m/min.

Finda a etapa anterior, foi proposta uma metodologia que almejava-se quantificar as alterações no comprimento do arco em função da variação da frequência de rotação do eletrodo. Para tal, recorreu-se as filmagens de alta velocidade geradas com as duas condições, utilizando o *software Autocad* para aferir o comprimento do arco. A Figura 4.26 exhibe as imagens geradas demonstrando a variação do comprimento do arco, enquanto que a Figura 4.27 exhibe os resultados médios juntamente com a sua dispersão.

Assim como constatado na observação direta do aspecto do arco, os resultados das filmagens também mostraram que a frequência de rotação do eletrodo possui influência no comprimento do arco para os casos aqui investigados, sendo observada uma relação direta entre a frequência de rotação e o comprimento do arco. Ao acrescer a frequência de rotação, o comprimento do arco também tende a aumentar, sendo necessário medidas de correções, onde as mesmas já foram aqui expostas. Cabe aqui reforçar que as correções mencionadas têm como cunho a redução do comprimento do arco, de modo que seja factível a realização do procedimento de soldagem. Para o caso investigado em questão, foi constatado um aumento de aproximadamente 49% no comprimento original do arco (conforme exibem os números verdes na Figura 4.27) ao acrescer a frequência de rotação do eletrodo para 2000 rpm, isso comparado ao processo convencional (eletrodo parado). Os resultados aqui obtidos reiteram a hipótese de que a frequência de rotação provê uma maior eficiência de fusão do eletrodo, onde, para um mesmo valor médio de corrente, o processo é capaz de fundir uma maior massa de metal.

Ao analisar tais resultados, o fato de se acrescer a frequência de rotação e, por consequência, propiciar uma maior fusão do arco elétrico para o mesmo valor médio de corrente deve ser analisada com maior cautela. Comumente descrita pela literatura [61] - [62], grande parte da energia necessária para a fusão do eletrodo é proveniente do arco elétrico, enquanto a parcela restante é fornecida pela passagem de corrente elétrica ao longo da extensão de um condutor sólido, fenômeno denominado Efeito *Joule*. Diante dos resultados aqui obtidos, foi perceptível que os fenômenos oriundos da rotação do eletrodo também apresentam uma parcela de contribuição para a fusão do eletrodo. O que parece ocorrer é que a força centrífuga facilita o destacamento das gotas, e, conseqüentemente, o fato de as gotas serem destacadas antes do que seria em uma condição normal (eletrodo parado) fazem com que a eficiência de fusão do eletrodo seja aumentada.

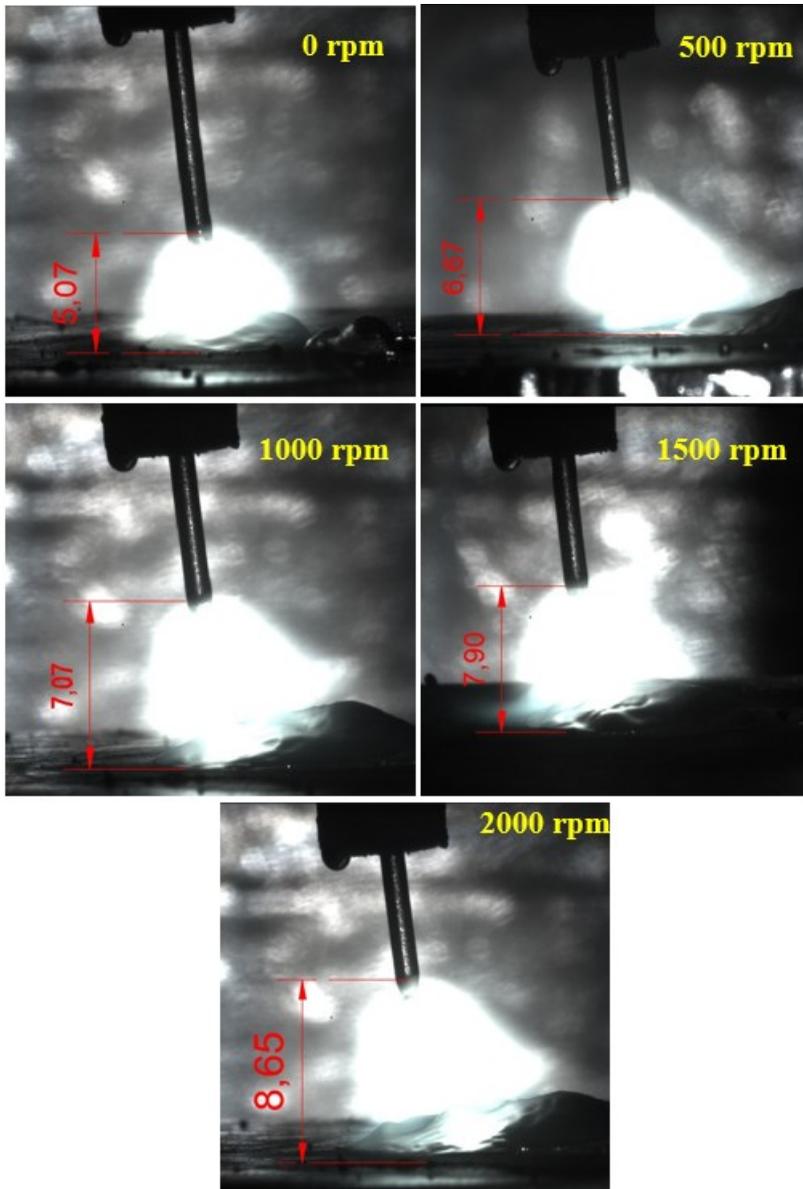


Figura 4.26. Quadros da filmagem de alta velocidade demonstrando a variação do comprimento do arco em função da frequência de rotação do eletrodo.

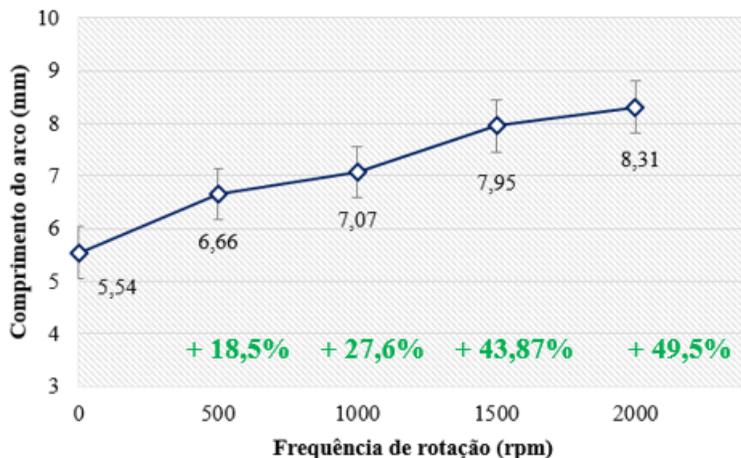


Figura 4.27. Gráfico comparativo exibindo a variação do comprimento do arco em função da frequência de rotação do eletrodo. $P_c = 3$; $V_a = 4,5$ m/min; $I_m = 160$ A.

4.4 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ROTAÇÃO DO ELETRODO USANDO FILMAGEM TERMOGRÁFICA

Diante de observações de que a frequência de rotação do eletrodo modifica a transferência metálica e próprio comportamento do arco elétrico, também foram realizados ensaios utilizando filmagem termográfica, onde foram avaliadas a influência da frequência de rotação e da posição do *crank* na temperatura da poça de fusão e na temperatura da gota metálica. Posteriormente, foi avaliada a influência da frequência de rotação do eletrodo na temperatura da gota metálica e também na velocidade final dela.

Foi investigada a influência da posição do *crank* no que diz respeito a temperatura da poça de fusão, onde Figura 4.28 exibe as imagens registradas do verso da chapa via filmagem termográfica.

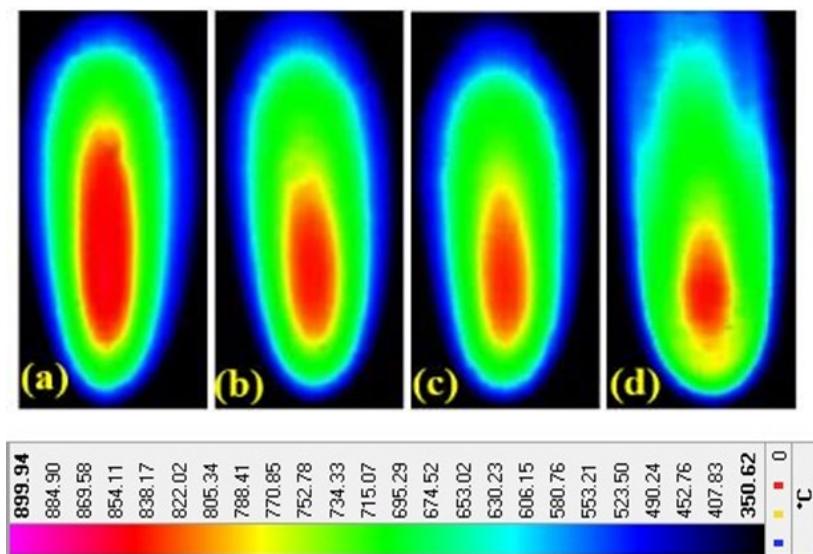


Figura 4.28. Quadros da filmagem termográfica: medição da temperatura média. (a) Processo convencional – 839 °C, (b) Posição 1 – 715 °C, (c) Posição 2 – 693 °C, (d) Posição 4 – 686 °C.

Observou-se que a posição do *crank* possui influência na temperatura da poça de fusão, sendo constatada uma redução do gradiente térmico central da poça de fusão a medida que se aumenta a posição do *crank*. A média dos resultados aqui obtidos, que corroboram com os de Gu et al [63], são expostos na Figura 4.29. Cabe ressaltar que, para a atual condição estudada, obteve-se uma redução de 20,5% na temperatura da região central da poça de fusão, em comparação ao processo convencional.

A ocorrência da maior temperatura em um processo convencional pode ser entendida pela lógica da fonte de calor (eletrodo) permanece de forma estática, ficando concentrada, desta maneira, na região central da poça de fusão. Quando o eletrodo passa a ser rotacionado, aumenta-se a área de incidência do arco elétrico, propiciando uma distribuição da pressão do arco e também da temperatura para uma maior área.

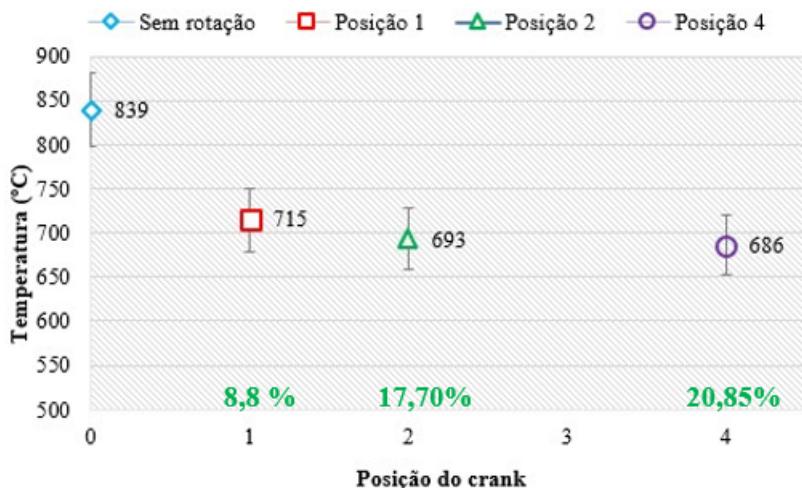


Figura 4.29. Gráfico comparativo exibindo os valores médios da temperatura da poça de fusão em função da posição do *crank*.

Como não houve alteração dos parâmetros iniciais indicados (corrente média e velocidade de soldagem), já era esperado que a temperatura se distribuisse em uma maior área com o aumento do diâmetro a ser percorrido pelo eletrodo, acarretando na redução do gradiente térmico na região central da poça de fusão. A Figura 4.30 exibe de forma didática o comportamento da fonte de calor em um processo de soldagem MIG/MAG com a rotação do eletrodo.

De forma geral, foi verificado que a posição do *crank* possui influência no gradiente térmico da poça de fusão para as condições aqui investigadas, sendo proporcional à redução da temperatura da região central da poça de fusão com o aumento da posição do *crank*.

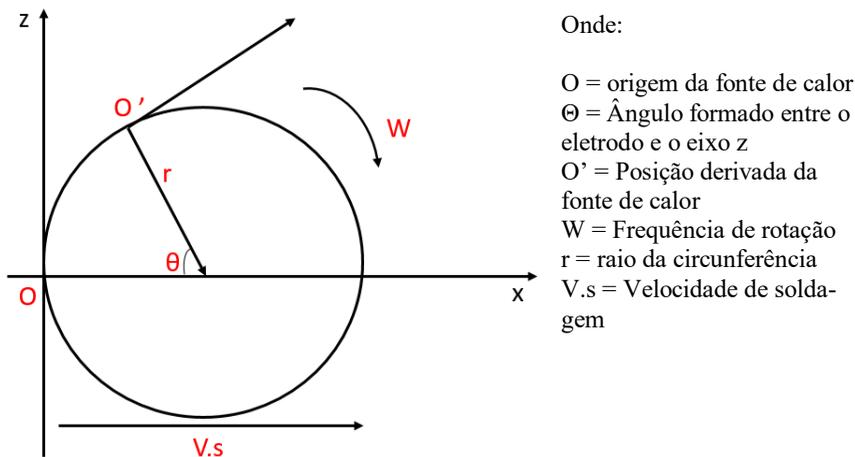


Figura 4.30. Representação esquemática da trajetória da fonte de calor no processo de soldagem MIG/MAG com a rotação do eletrodo.

Finda a etapa anterior, deu-se início a análise das possíveis influências da frequência de rotação do eletrodo na temperatura da poça de fusão, conforme a Figura 4.31 exibe as imagens geradas.

Mediante os ensaios realizados variando agora a frequência de rotação do eletrodo, foi perceptível que tal parâmetro também possui influência na temperatura da poça de fusão. Ao crescer a frequência de rotação, houve uma tendência de decrescer a temperatura na região central da poça, sendo constatado uma relação direta entre o aumento da frequência de rotação do eletrodo e a redução da temperatura da poça de fusão para as condições aqui analisadas.

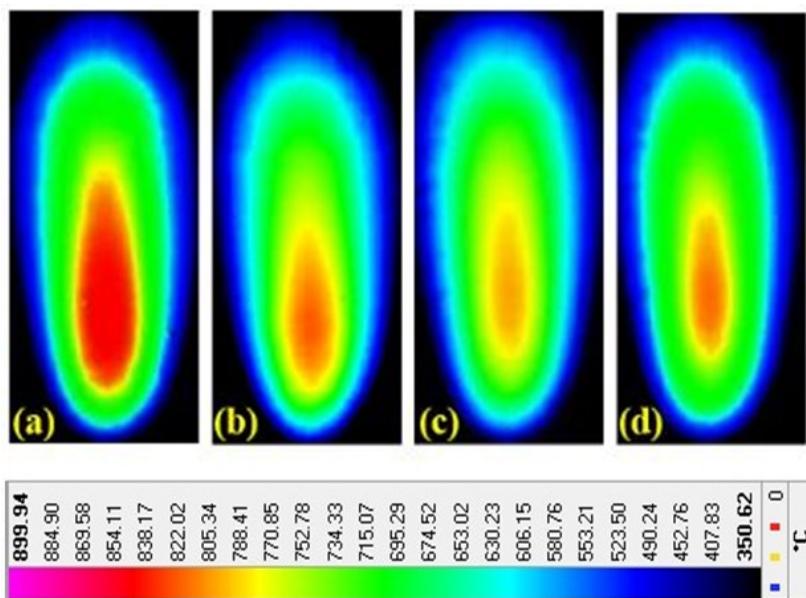


Figura 4.31. Quadros da filmagem termográfica exibindo a medição da temperatura média. (a) Processo com 500 rpm – 839 °C, (b) Processo com 1000 rpm – 678 °C, (c) Processo com 1500 rpm – 635 °C, (d) Processo com 2000 rpm - 622 °C.

Cabe ressaltar que, para a atual condição estudada foi perceptível uma redução de 19% na temperatura média, quando comparado aos processos com frequência igual a 500 rpm e 2000 rpm. A Figura 4.32 exhibe os resultados médios aqusitados, juntamente com sua dispersão.

Sabendo da tendência de aumento do diâmetro efetivo de giro ao acrescer a frequência de rotação do eletrodo, a temperatura central da poça de fusão tende a diminuir devido à energia de soldagem estar sendo dissipada em uma área maior. Em outras palavras, tal tecnologia é capaz de propiciar um menor aporte térmico por unidade de comprimento, quando comparado ao processo convencional (onde o eletrodo permanece de forma estática). Esse fato se torna de grande interesse para o universo das ligas de complexa soldabilidade, como por exemplo os aços inoxidáveis duplex, devido a sua complexa metalurgia e ligas de Al.

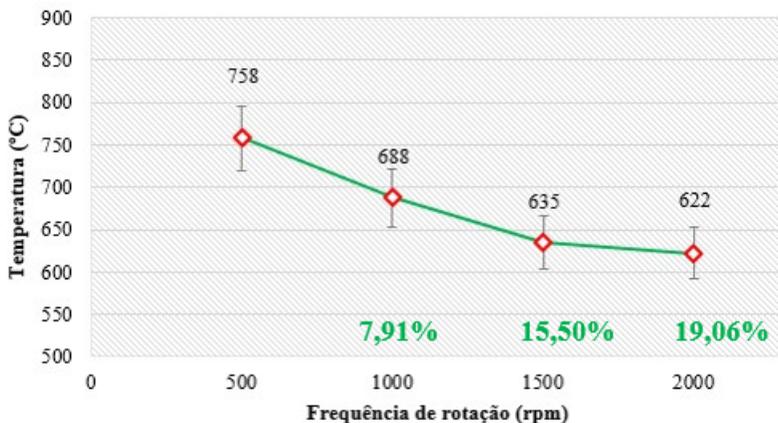


Figura 4.32. Valores médios de temperatura da poça de fusão em função da frequência de rotação do eletrodo.

Acredita-se que haverá um momento onde o aumento da frequência de rotação do eletrodo não resultará em redução no gradiente térmico da poça de fusão. Esse fato pode ser explicado sob a ótica de que, para baixas frequências de rotação, o processo refunde a mesma área um menor número de vezes e, quando se trata de altas frequências de rotação a re-fusão ocorre um maior número de vezes em um mesmo ponto. Isso faz com que haja uma simulação de um processo convencional, onde o arco elétrico permanece estático e onde a maior concentração do calor se estabelece na parte central da poça, fato esse que culmina em uma poça de fusão com um maior gradiente térmico.

Se tratando dos resultados aqui obtidos tanto nos ensaios variando a posição do *crank* quanto variando as frequências de rotação do eletrodo, ainda é possível reflexionar a respeito do comportamento da poça de fusão. Sabendo que a tensão superficial da poça de fusão possui uma correlação com a temperatura no qual o objeto em estudo se encontra, uma poça que apresenta um menor gradiente térmico tende a resultar em uma poça de melhor fluidez.

A ocorrência de poças de fusão com um menor gradiente térmico e, conseqüentemente, uma melhor fluidez se torna de grande relevância ao se empreender procedimentos de soldagem fora da posição plana, onde já se tornou uma temática transcrita e reescrita a respeito dos estorvos de sustentar a poça de fusão em posições que desafiam as leis da gravidade. Desta maneira, acredita-se que as eventualidades oriundas da tecnologia

a eletrodo rotativo tendem a contribuir para a realização de procedimentos de soldagem fora da posição plana.

4.4.2 Ensaios complementares à termografia

4.4.2.1 Influência da posição do *crank* em aspectos morfológicos

Ainda que haja divergência entre as morfologias de um depósito de cordão sobre chapa ou em chanfro, foi feita uma análise das seções transversais de ensaios que tiveram como objetivo variar a posição do *crank*, Para isso, manteve-se a mesma frequência de rotação do eletrodo, onde as seções transversais podem ser visualizadas na Figura 4.33.

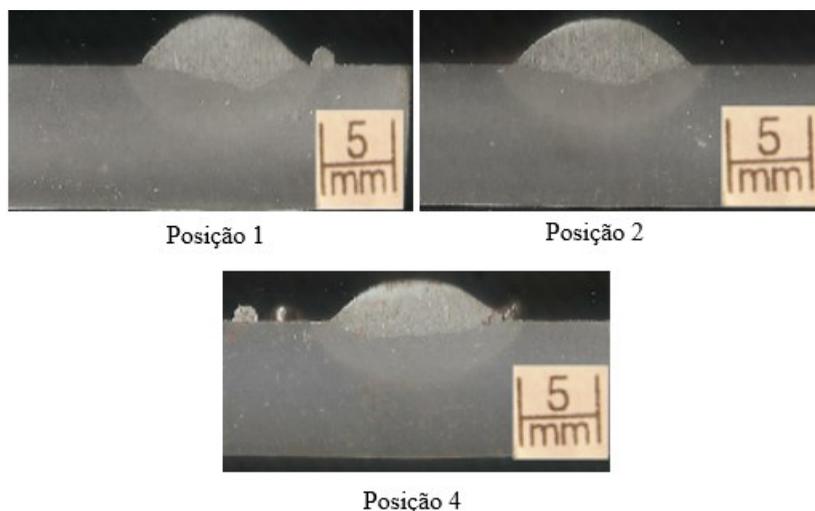


Figura 4.33. Seções transversais dos ensaios variando a posição do *crank* e mantendo-se a frequência de rotação do eletrodo em 1000 rpm. V.a = 4,5 m/min; I_m = 160 A.

Foi observado que, à medida que se acrescia a posição do *crank*, ocorria o aumento da largura do cordão e a redução tanto do reforço quanto da penetração, fenômeno esse similar ao observado nos ensaios variando-se a frequência de rotação do eletrodo, onde a Figura 4.34 exhibe os valores médios aquisitados.

Para os experimentos em questão, operando com o *crank* na posição 4, houve um ganho na largura do cordão de 1,36 mm, em comparação ao experimento onde se operava com o *crank* na posição 1. Esse experimento possibilitou perceber ainda que o processo apresentou uma maior emissão de respingos, fenômeno esse não observado nos ensaios anteriores. Um fato que chamou a atenção se trata do ensaio realizado com o *crank* na posição 1, onde é possível perceber que há semelhança com a morfologia descrita como *finger shape*, apresentando baixa molhabilidade e um maior valor de penetração na região central. Desta forma, pode-se evidenciar o comportamento morfológico dos cordões mediante distintas posições do *crank*.

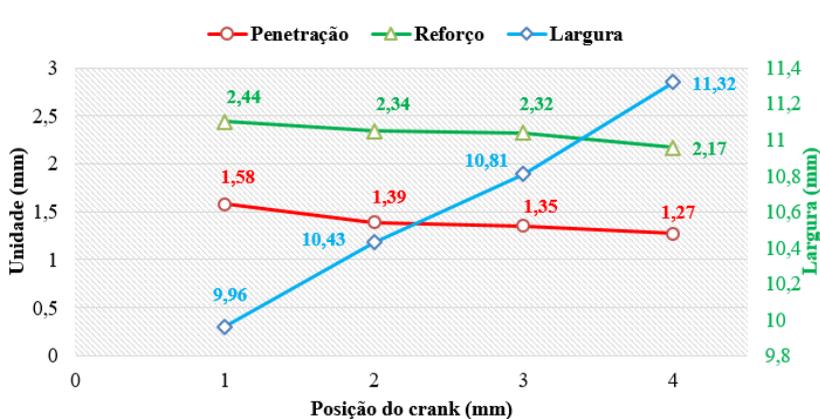


Figura 4.34. Gráfico comparativo demonstrando aspectos morfológicos em função da posição do *crank* para a mesma frequência de rotação do eletrodo. $W = 1000$ rpm; $V_a = 4,5$ m/min; $I_m = 160$ A.

Outra ocorrência observada se tratava da convexidade do cordão, onde os resultados apontam uma menor convexidade para procedimentos com o *crank* em uma posição maior (maior diâmetro percorrido pelo eletrodo), onde a Figura 4.35 apresenta de forma esquemática a sobreposição das seções transversais.

Outra informação que deve ser evidenciada é a obtenção da maior largura do cordão com o *crank* na posição 3, operando com frequência de 2000 rpm, quando comparado ao processo com o *crank* na posição 4 operando a uma frequência de 1000 rpm.

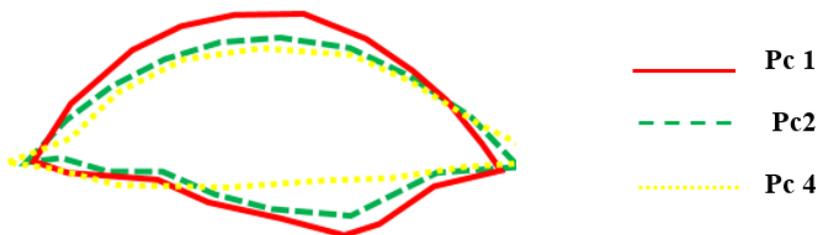


Figura 4.35. Sobreposição das seções transversais variando a posição do *crank*.

Cabe ressaltar que, para os ensaios realizados com a variação da posição do *crank*, não foi observado um aumento no comprimento do arco elétrico como foi observado nos ensaios acrescentando a frequência de rotação do eletrodo. Desta forma, foi possível evidenciar a hipótese sobre o aumento da eficiência de fusão do arco elétrico mediante o acréscimo da frequência de rotação do eletrodo.

4.4.2.2 Influência da frequência de rotação do eletrodo na temperatura da gota

Tendo como base científica, e demonstrado no item anterior, que a frequência de rotação do eletrodo possui influência na temperatura da poça de fusão, outra questão investigada se trata da temperatura gota metálica. A Figura 4.36 exhibe as imagens registradas via câmera termográfica.

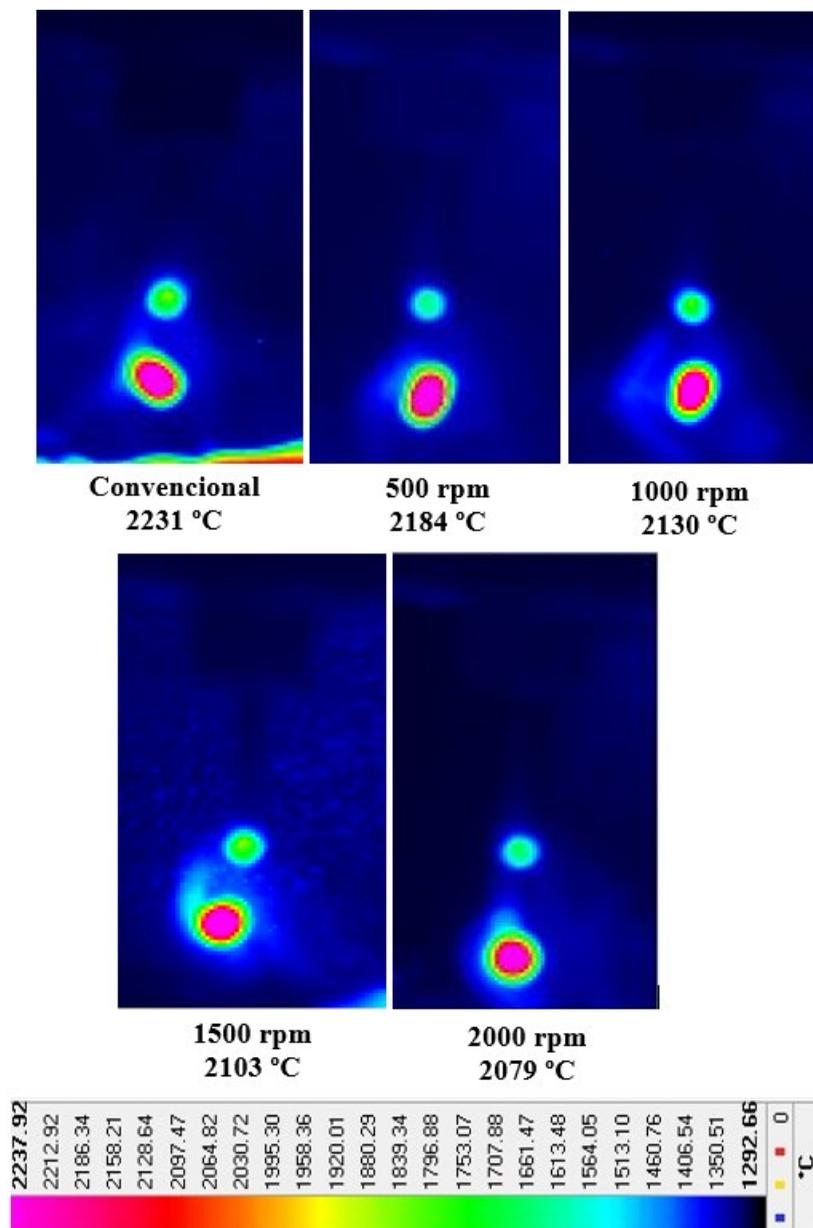


Figura 4.36. Quadros da filmagem termográfica demonstrando a medição da temperatura média da gota metálica em função da frequência de rotação do eletrodo.

Analisando a Figura 4.36, foi possível observar que a frequência de rotação do eletrodo não influencia somente na temperatura da poça de fusão, mas também acarreta alterações na temperatura da gota metálica, cujos resultados médios juntamente com sua dispersão são expostos na Figura 4.37.

Para esse caso investigado, foi constatada uma redução de cerca de 7,3% na temperatura da gota metálica, comparado ao processo convencional (eletrodo parado) e com o processo com frequência de rotação de 2000 rpm. Desta forma, tal ocorrência serviu para ratificar que, até aqui, toda a hipótese desenvolvida sobre a eficiência de fusão do arco elétrico em um processo a eletrodo rotativo. Sendo constatada uma redução da temperatura da gota metálica em função do acréscimo da frequência de rotação do eletrodo.

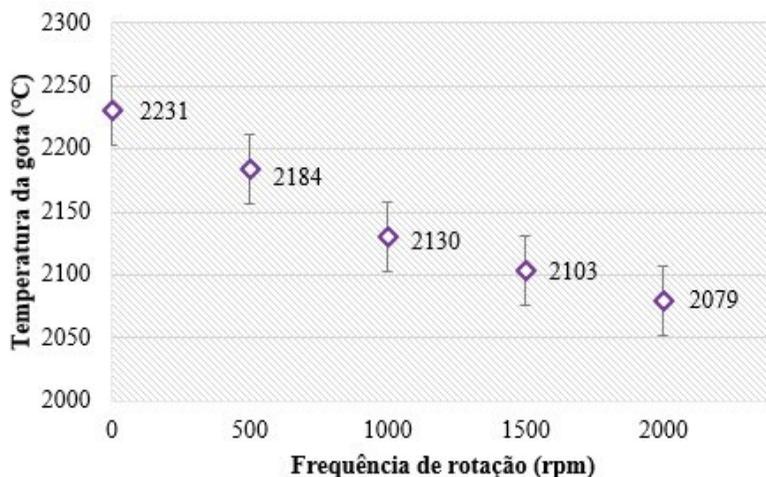


Figura 4.37. Gráfico comparativo demonstrando o comportamento da temperatura média de 20 gotas em função da frequência de rotação do eletrodo.

Outra análise se tratava do diâmetro da gota metálica, pois é sabido que gotas com um menor diâmetro tendem a apresentar uma menor temperatura. Todavia, não foi observada tal ocorrência para as condições aqui investigadas.

4.4.2.3 Velocidade da gota metálica

Com intuito de investigar a influência da velocidade tangencial na velocidade final da gota, foi conduzido um estudo envolvendo as filmagens termográficas geradas [64] - [65] .

Em um processo convencional, onde o eletrodo permanece de forma estática, a velocidade final da gota metálica comumente é atrelada a um vetor resultante composto entre a velocidade de transferência da gota e a velocidade transversal da tocha, conforme o melhor modelo que representa tal fenômeno pode ser visualizado na Equação 4.

$$V = \sqrt{(vtr^2) + (v^2)} \quad (4)$$

Onde:

vtr = velocidade de transferência da gota

v = Velocidade transversal da tocha

Se tratando de um processo de soldagem onde a força centrífuga tende a modificar a natureza física da transferência metálica, seria errôneo considerar a Equação 1 como um modelo basal para estimar a velocidade final da gota metálica. Para tal condição, acredita-se que a frequência de rotação do eletrodo possui influência na velocidade final da gota, induzindo a uma consideração de que a ação da força centrífuga atua de modo a propiciar mais um vetor, que, neste caso, se trata de três vetores atuantes na velocidade final da gota. Assim, acredita-se que o modelo matemático que melhor representa tal fenômeno é exibido na Equação 5.

$$V = \sqrt{(vtr^2) + (v^2) + (vt^2)} \quad (5)$$

Onde:

vt = Velocidade tangencial

De posse de tais conhecimentos, partiu-se então para a análise das filmagens termográficas geradas, na qual Figura 4.38 exhibe os resultados médios obtidos.

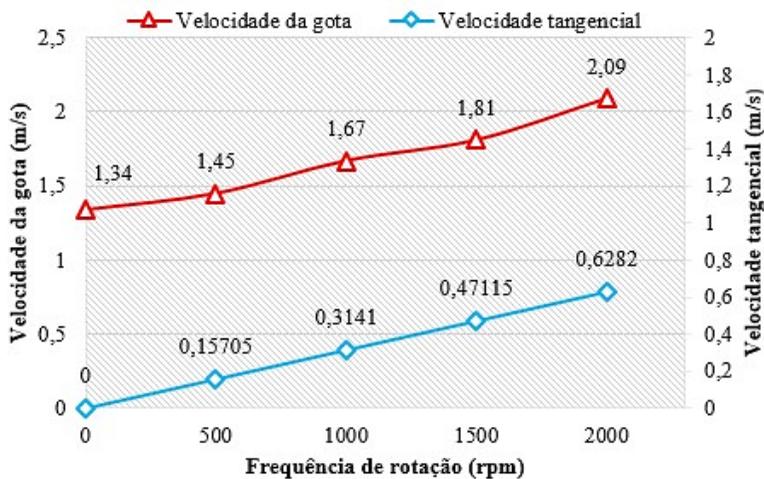


Figura 4.38. Gráfico comparativo entre velocidade tangencial e velocidade final da gota metálica.

Diante dos ensaios realizados, foi possível observar que, à medida que aumenta a velocidade tangencial ($W \cdot r$), a velocidade final da gota tende a aumentar, isso para os respectivos casos analisado. Em um processo convencional, a velocidade encontrada da gota metálica foi de 1,3 m/s, enquanto que a velocidade obtida foi de 2,09 m/s para o processo com rotação do eletrodo de 2000 rpm, acarretando em um aumento de aproximadamente 64% na velocidade final da gota.

Ao analisar tal ocorrência com um olhar mais físico, pode-se perceber que a frequência de rotação do eletrodo não possui somente influência na velocidade final da gota, mas também na energia cinética contida nela mesma. Como anteriormente não foi observada nenhuma redução no diâmetro ou na massa da gota metálica, a ocorrência de crescer a frequência de rotação do eletrodo culmina de forma direta em um aumento na energia cinética contida na gota metálica, conforme a Equação 6 exhibe seu modelo matemático.

$$E = \frac{m * v^2}{2} \quad (6)$$

Onde:

E = Energia cinética (J)

m = massa da gota (Kg)

v = velocidade da gota metálica (m/s)

5 DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÕES PARA A SOLDAGEM *NARROW GAP*

Os resultados relativos à soldagem *Narrow Gap* utilizando a tecnologia de eletrodo rotativo são apresentados nos itens a seguir. São descritos, primeiramente, os resultados utilizando o processo MIG/MAG pulsado, modalidade essa na qual maior parte das soldas foram realizadas. Posteriormente, no item 5.2, são apresentados os resultados utilizando o processo MIG/MAG com transferência metálica por curto-circuito.

5.1 SOLDAGEM *NARROW GAP* UTILIZANDO O MIG/MAG PULSADO

Apesar de o nome MIG/MAG pulsado passar uma conotação de que é uma variante muito bem definida, na prática é possível aplicar formas de onda muito diferentes para cada velocidade de arame. Isso faz com que o programa pulsado de uma fonte de soldagem de determinado fabricante possa apresentar comportamento diferenciado quando comparado aos demais. Além disso, cada fonte de soldagem possui maior ou menor capacidade de ajuste da forma de onda. Essa capacidade de ajuste é importante, uma vez que cada tipo de junta ou aplicação pode exigir um comportamento específico do arco. No caso do presente trabalho, a fonte de soldagem apresenta plena capacidade de alteração da forma de onda de corrente, permitindo realizar os ajustes necessários.

5.1.1 Ajustes na forma de onda

Como procedimento inicial, foi utilizado o parâmetro proposto para o ensaio sobre chapas demonstrado no item 4.3 (ensaio A). Os parâmetros elétricos utilizados nessa etapa são demonstrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Parâmetros elétricos para os ensaios em chanfros *Narrow Gap*.

Ensaio	I _p (A)	t _p (ms)	I _b (A)	t _b (ms)	I _m (A)	V.a (m/min)	F _p (Hz)
A	450	2,2	87	9	160	5,5	89
B	450	1,6	96	7,4	160	5,8	111
C	450	1,6	35	3,6	160	6,1	178

Como descrito no item 4.4, tanto a geometria de um cordão quanto a própria estabilidade do processo variam quando o procedimento é realizado em chapas ou para quando é realizado em chanfros. Desta forma, a priori, foi proposto reproduzir o formato de onda no qual foram realizados os cordões sobre chapa, expostos no item 4.3, conforme Figura 5.1 exibe os quadros gerados via filmagem de alta velocidade.

Através da filmagem de alta velocidade, foi possível perceber que o parâmetro previamente desenvolvido para a realização dos ensaios sobre chapa apresentou um comprimento de arco elevado, ancorando nos flancos laterais. Com esse parâmetro, o arco se mostrou muito longo, afastado do fundo do chanfro. Isso faz com que ele ancore nas paredes do chanfro, de forma que no fundo do chanfro não ocorra a fusão e adequada formação de um cordão contínuo. Os quadros da filmagem em alta velocidade permitem mostrar, de forma bastante clara, que o arco se ancora preferencialmente na parede esquerda do chanfro, tanto na fase do pulso como na base (Quadro A e B). Nesse caso, como o arco está ancorado preferencialmente na parede esquerda, as gotas tendem a ser projetadas para a direita, formando o depósito de material no canto direito da junta, como pode ser observado na Figura 5.1. Essa projeção das gotas em sentido oposto ao do arco pode ser vista como uma forma de repulsão, originada pelo desbalanceamento do campo eletromagnético que é causado, por sua vez, pelo ancoramento preferencial do arco na parede esquerda. Neste caso, a rotação do eletrodo não foi suficiente para evitar que o ancoramento do arco ocorresse preferencialmente em um dos flancos.

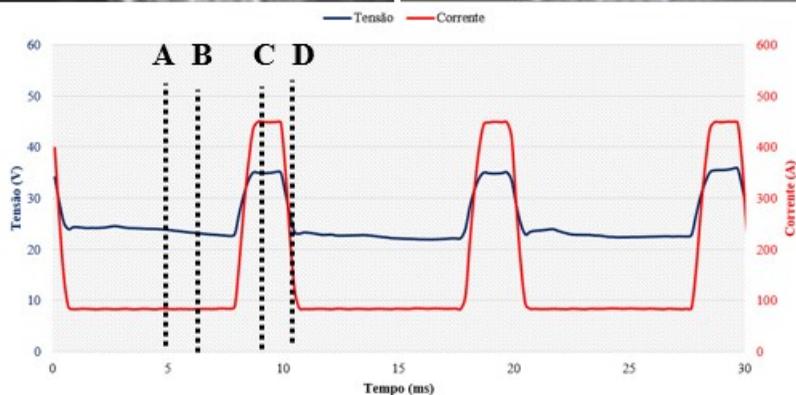
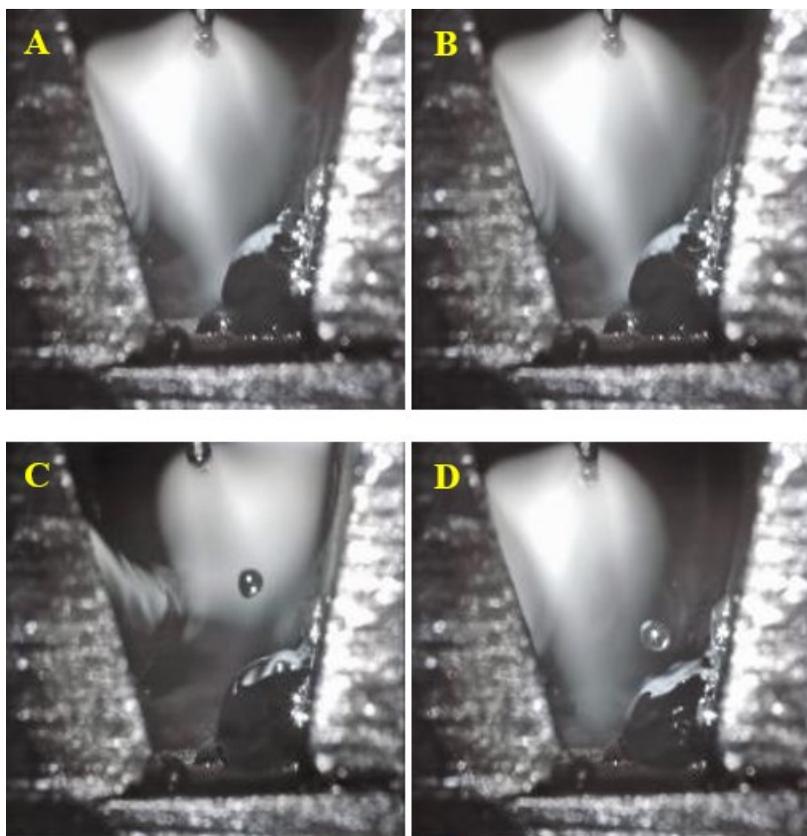


Figura 5.1. Quadros da filmagem de alta velocidade demonstrando a trajetória da gota metálica e o ancoramento do arco elétrico.

O parâmetro que produz uma altura do arco adequada para a soldagem sobre chapas produziu um arco muito longo, ancorado nas paredes, quando aplicado em chanfros *Narrow Gap*. Dessa forma, foi necessário alterar os parâmetros para que se obtenha um arco ancorado no fundo do chanfro.

Face a isso, houve a tentativa do desenvolvimento de um novo formato de onda com uma nova velocidade de alimentação e os sinais elétricos do ensaio B podem ser visualizados na Tabela 5.1. Os quadros da filmagem de alta velocidade sincronizados com os sinais elétricos podem ser visualizados na Figura 5.2.

Uma observação realizada se trata mesmo do eletrodo sendo rotacionado e, em um determinado momento, quando o mesmo se posiciona mais próximo a parede lateral direita (Quando B), não ocorre a mudança no sentido do ancoramento do arco elétrico. Ou seja, o arco sempre ancora na mesma parede ou, em determinados momentos, ancora na parede e no cordão gerado, como é possível observar no Quadro D.

A grande variação de distância entre eletrodo e a peça que ocorre nesse caso também fica evidente quando se observa os oscilogramas de tensão. Para esse caso, foram observados três consecutivos destacamentos da gota metálica com um maior valor de tensão no pulso, onde tais valores ultrapassavam os 37,8 V, enquanto que as demais situações ficaram na ordem de 35 V. Somente mediante a análise das filmagens em alta velocidade foi possível observar que tais ocorrências aconteciam no momento em que o eletrodo se posicionava no centro da junta, onde parte do arco elétrico se ancorava nos flancos, enquanto que a outra parte se ancorava na raiz do chanfro.

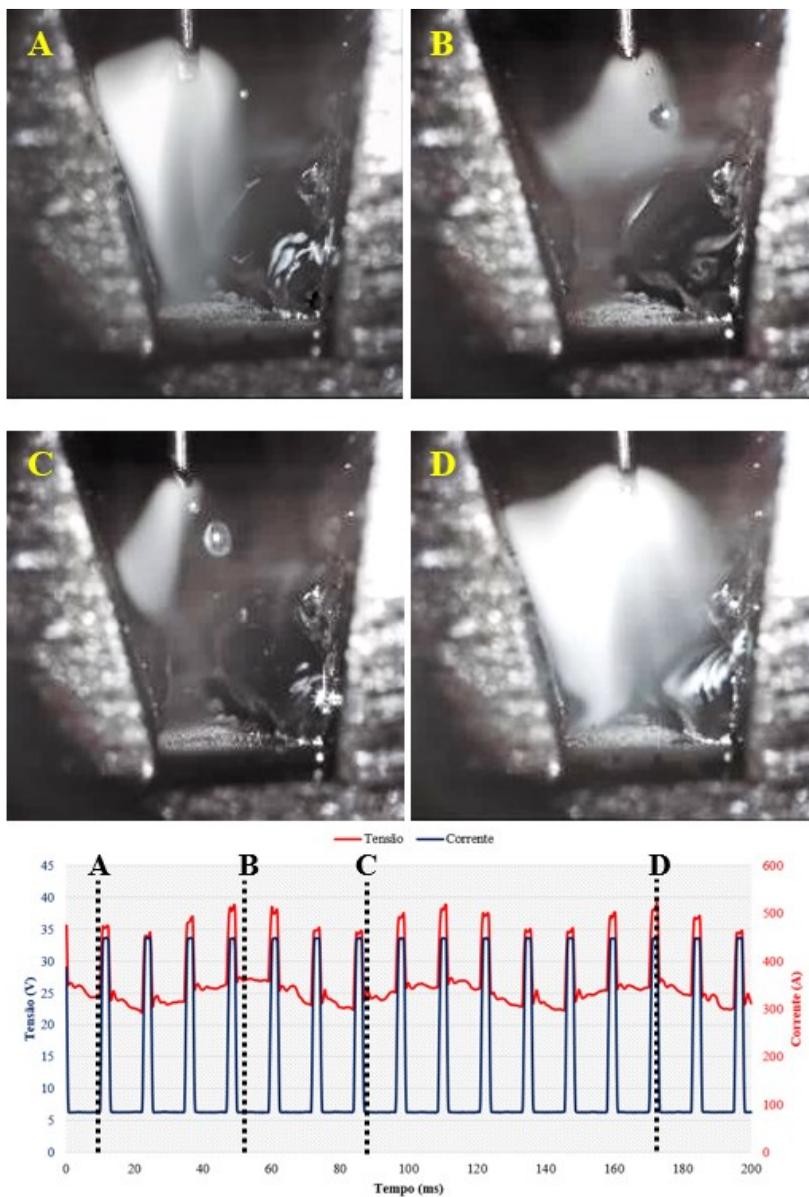


Figura 5.2. Quadros da filmagem de alta velocidade demonstrando o ancoramento do arco elétrico e as variações no sinal da tensão.

Ou seja, para o caso em questão aqui investigado, foram observados três picos de tensão para a frequência de rotação de 1000 rpm quando o eletrodo se posiciona no centro do chanfro, conforme a Figura 5.3 exibe a seção transversal do ensaio B.

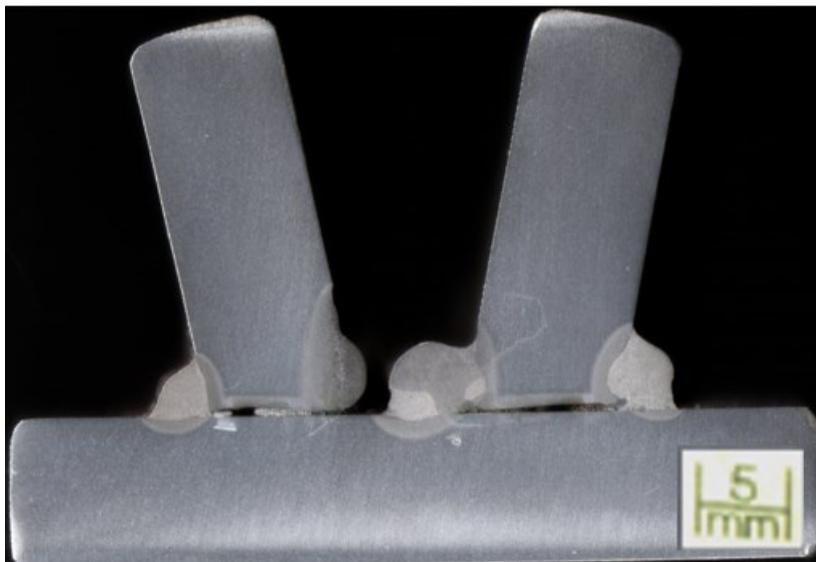


Figura 5.3 Seção transversal do ensaio B.

De modo geral, acredita-se que a problemática em questão do processo se trata de um arco elétrico com um alto comprimento e com ancoramento preferencialmente no flanco esquerdo, sendo necessário ao desenvolvimento de novos formatos de onda.

Face a tal problemática, foi desenvolvido um novo formato de onda, entretanto, agora com novos parâmetros elétricos e uma nova velocidade de alimentação (Ensaio C), conforme a Figura 5.4 exibe os quadros da filmagem de alta velocidade.

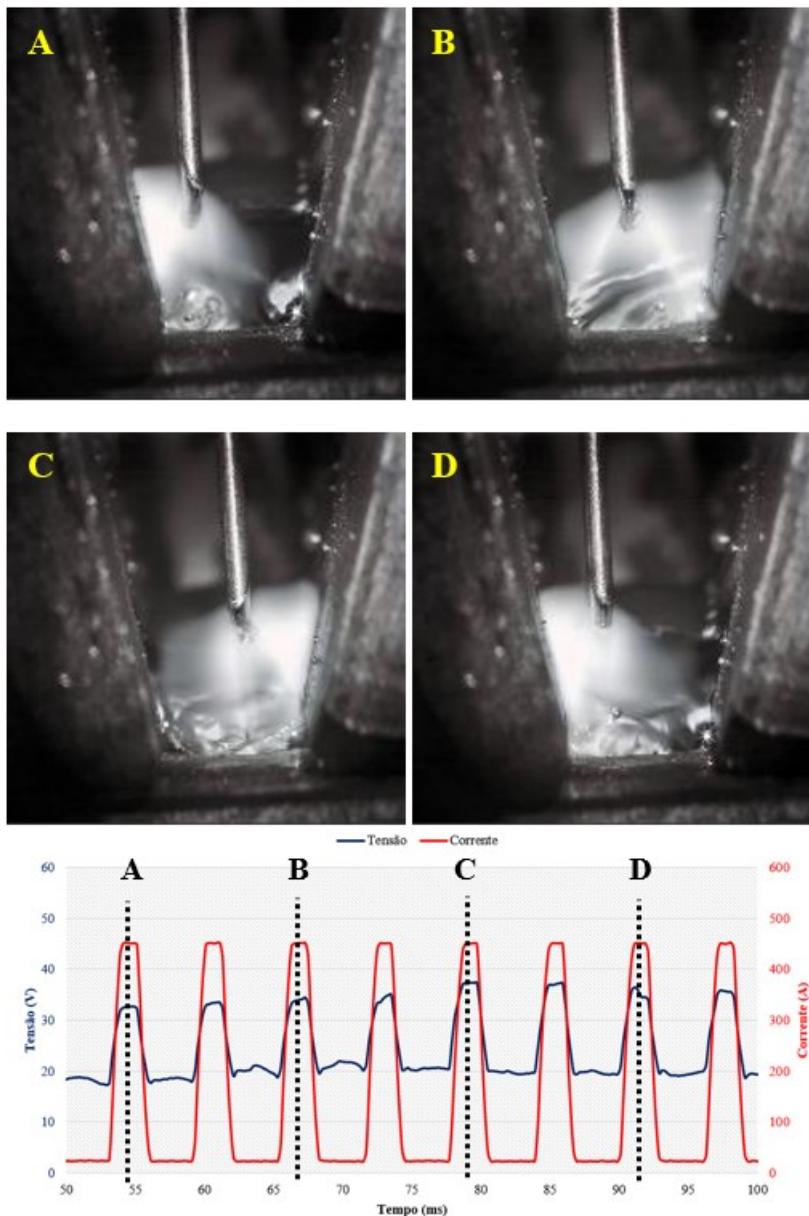


Figura 5.4. Quadros da filmagem de alta velocidade sincronizado com sinais elétricos exibindo o momento exato do pulso de corrente nos flancos laterais no centro da junta. $W = 1000$ rpm; $P_c = 3$ mm; $I_m = 173A$; $V.a = 6,0$ m/min.

Cabe versar que a metodologia adotada de aumentar a velocidade de alimentação e, conseqüentemente, a necessidade do desenvolvimento de uma nova onda com maior frequência de pulsação se mostrou eficiente, conforme a seção transversal do ensaio C é exibida na Figura 5.5.

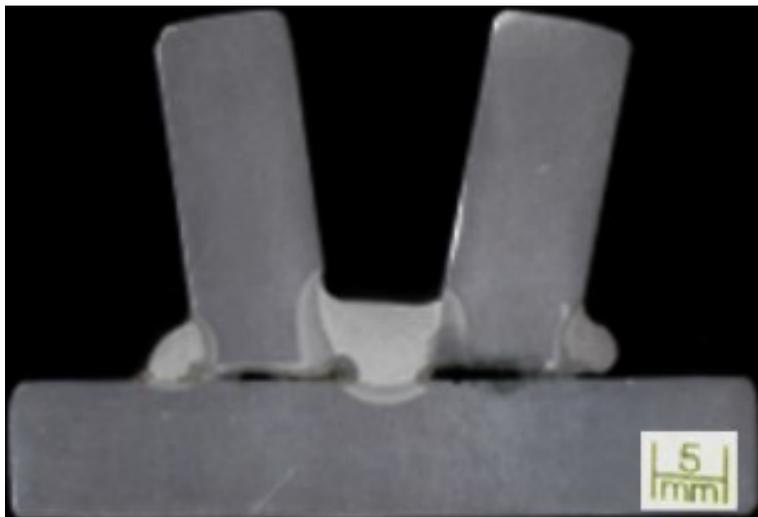


Figura 5.5. Seção transversal referente ao ensaio C. $I_m = 173 \text{ A}$; $V.a = 6,0 \text{ m/min}$.

Diante do exposto, o parâmetro desenvolvido foi considerado satisfatório e os seguintes ensaios foram realizados com esse novo formato de onda. Cabe aqui ressaltar que as ondas desenvolvidas ficaram limitadas pelo valor máximo permitido de corrente de pulso pela fonte de energia (450 A).

5.1.2 Comparativo entre formas as formas de onda utilizadas

Com o intuito de analisar as modificações nas ondas desenvolvidas, a priori, a Tabela 5.2 exibe os valores de corrente média calculada e os valores medidos no SAP.

Como pode ser observado na Tabela 5.2, o primeiro parâmetro utilizado, do ensaio A, apresentou uma pequena divergência entre a corrente média calculada e a corrente média medida no SAP.

Tabela 5.2. Comparativo entre os parâmetros elétricos calculados e valores medidos no SAP.

Ensaio	Im calculada (A)	Im medida SAP (A)	Ø Gota teórico (mm)	V.a (m/min)
A	160	155 ± 2	1,15	5,5 ± 0,1
B	160	161 ± 3	1,1	5,8 ± 0,1
C	160	173 ± 3	0,97	6,0 ± 0,1

Entretanto, acredita-se que tais discrepâncias se encontram dentro de uma faixa tolerável, até porque a fonte de energia para esse procedimento é comandada por corrente, mas não consegue impor de forma absoluta o valor desejado.

Para o segundo conjunto de parâmetros desenvolvidos, ensaio B, o valor médio de corrente medido no SAP vai de encontro com o valor médio calculado. Já para o terceiro conjunto de parâmetros, o ensaio C, apresentou um valor médio de corrente maior que o valor médio de corrente calculado. Entretanto, cabe aqui elucidar, que mesmo para o ensaio C, o valor médio de corrente se mostrou abaixo do valor da corrente de transição, sendo esse um dos pré-requisitos para se trabalhar com processo MIG/MAG pulsado.

De modo geral, foi observado que a providência de aumentar a velocidade a alimentação e, conseqüentemente, o aumento da frequência de pulsação da corrente, propiciou um aumento no valor médio de corrente para os casos aqui investigados.

De modo a facilitar a compreensão das alterações nos formatos de onda, a Figura 5.6 exhibe um comparativo entre as ondas utilizadas.

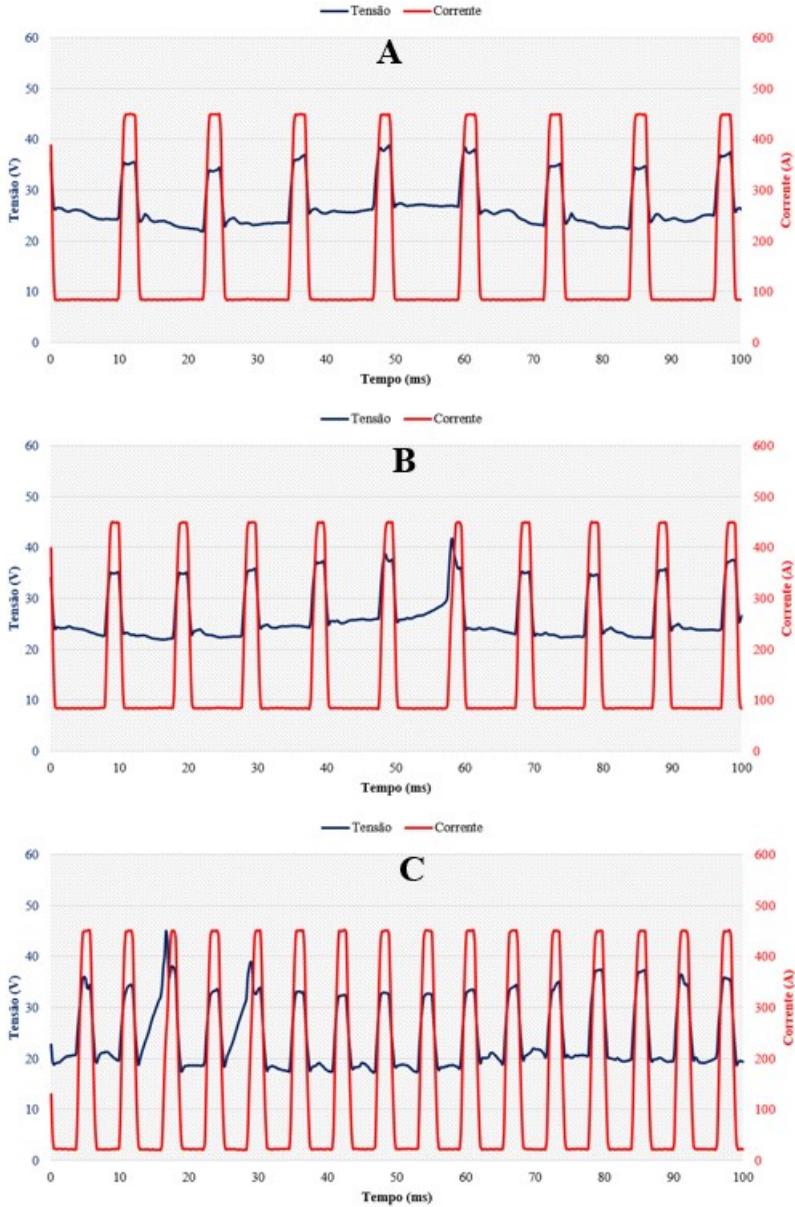


Figura 5.6. Comparativo entre os formatos de onda desenvolvidos; (A) $T = 11,2 \text{ ms}$ – $F_p = 89 \text{ Hz}$; (B) $T = 9,0 \text{ ms}$ – $F_p = 111 \text{ Hz}$ e (C) $T = 5,6 \text{ ms}$ – $F_p = 178 \text{ Hz}$

A fim de investigar as possíveis alterações da frequência de rotação do eletrodo em aspectos morfológicos em chanfros *Narrow Gap*, foi realizado um ensaio com quatro frequências de rotação do eletrodo, conforme as seções transversais podem ser visualizadas na Figura 5.7.

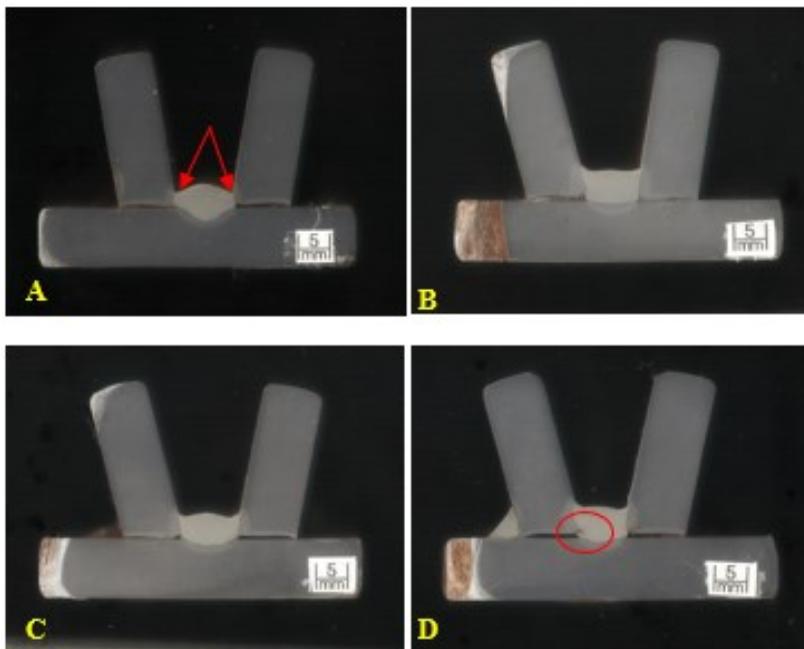


Figura 5.7. Seções transversais relativas ao ensaio variando a frequência de rotação do eletrodo. (a) 500 rpm. (b) 1000 rpm. (c) 1500 rpm. (d) 2000 rpm. $P_c = 3$ mm. $I_m = 173$ A; $V_s = 27$ cm/min.

Considerando o exposto e em análise à Figura 5.7, observou-se que, com o aumento da frequência de rotação do eletrodo, ocorria uma variação no perfil de penetração do cordão, onde os valores médios dos aspectos relacionados a morfologia do cordão depositado são exibidos na Figura 5.8.

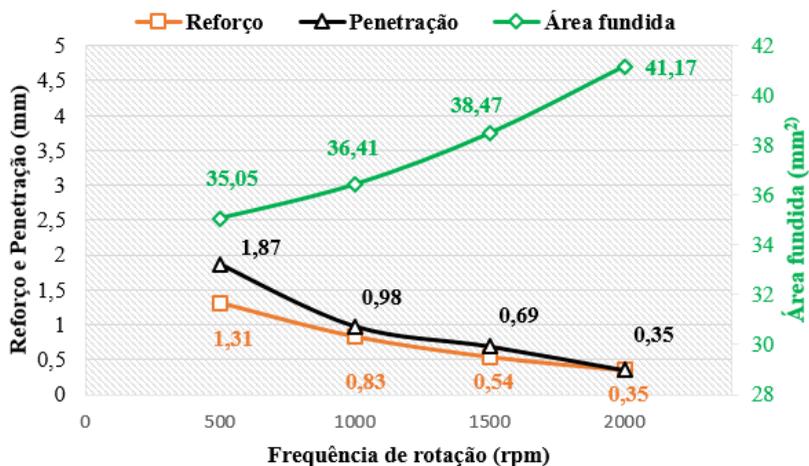


Figura 5.8. Gráfico comparativo exibindo o comportamento entre reforço, penetração e área fundida em função da frequência de rotação do eletrodo - $P_c = 3$; $I_m = 173$ A; $V_s = 27$ cm/min.

Foram observados problemas novamente no que diz respeito a porosidade quando operando com altas frequências de rotação (2000 rpm). Em processos *Narrow Gap*, muitas vezes devido a estreitos ângulos, o gás de proteção tem dificuldade de escoar para dentro da junta, de modo a proteger a peça durante o processo de solidificação.

Ao realizar os ensaios em chanfro, foi perceptível uma maior variação da taxa de fusão do eletrodo quando os mesmos aspectos são comparados a um simples depósito sobre chapas, exposto no item 5.1.3. Esse fato está correlacionado a, quando o depósito é realizado dentro do chanfro, as suas paredes do mesmo tendem a reter grande parte do calor gerado, acarretando, desta maneira, em um aumento na taxa de fusão do eletrodo, conforme a Figura 5.9 exhibe os resultados obtidos.

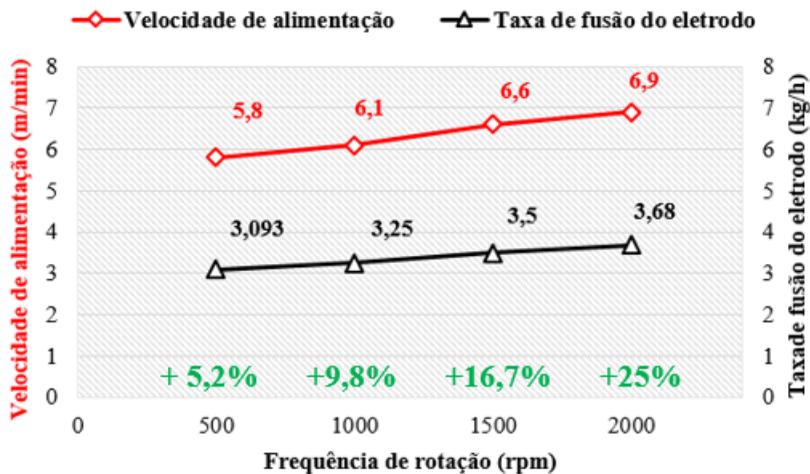


Figura 5.9. Gráfico exibindo a relação entre velocidade de alimentação e da taxa de fusão do eletrodo em função da frequência de rotação.

5.2 SOLDAGEM NARROW GAP MIG/MAG PULSADO

Posteriormente ao desenvolvimento de ondas para a soldagem *Narrow Gap* e após inferir sobre os aspectos concernentes a morfologia dos cordões em função da frequência de rotação do eletrodo, foram propostos os preenchimentos de chanfros *Narrow Gap* na posição plana. A priori, utilizou-se do parâmetro desenvolvido no ensaio C do tópico 6.1.1, onde tais parâmetros são exibidos na Tabela 5.2. A Figura 5.10 exhibe a seção transversal da primeira bateria de ensaios.

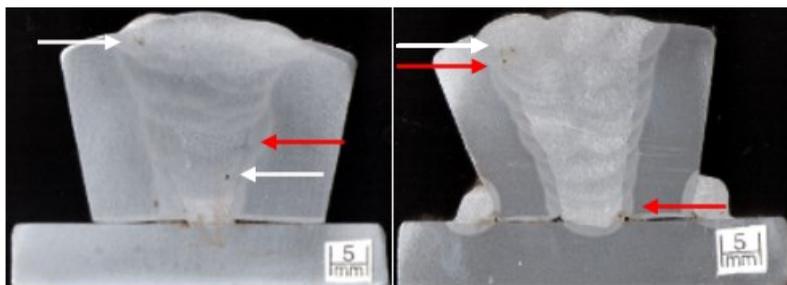


Figura 5.10. Seções transversais da primeira bateria de ensaios, com ênfase nas setas vermelhas demonstrando falta de fusão e setas brancas demonstrando porosidades. $W = 1000$ rpm; $P_c = 3$ mm; $V_a = 6$, 1 m/min; $I_m = 173$ A; $V_s = 27$ cm/min.

Foi constatado, mediante análise da Figura 5.10, que as respectivas macrografias apresentavam dois distintos defeitos, dentre eles a falta de fusão nos flancos laterais (indicados pela seta vermelha) e porosidades (indicados pela seta branca).

A ocorrência da falta de fusão, essa sim é uma problemática a ser vencido na soldagem *Narrow Gap*, principalmente se tratando de uma tecnologia a eletrodo rotativo. Diferente dos trabalhos publicados por Wang et al [44] e Chi et al [45], onde o eletrodo é oscilado em no máximo 180° e onde é possível escolher o tempo de parada do eletrodo nos flancos laterais sem a necessidade da adição de parâmetros de tecimento programáveis no manipulador robótico. Cabe aqui elucidar que, a tecnologia do presente estudo (tocha MIG/MAG *Spinarc*) rotaciona o eletrodo em 360°, não sendo possível programar o tempo de parada do eletrodo nos flancos laterais sem a necessidade de um manipulador robótico para isso.

Um fato de extrema relevância para o desenvolvimento dos procedimentos aqui propostos se trata da aceitação dos resultados via normas técnicas, predizendo que para o procedimento ser aceito quanto a porosidades, o mesmo deve ter tamanho inferior ou igual a 2% do valor da espessura do material, sendo neste caso com intuito de validar tal procedimento os poros não poderiam ter seu comprimento superior a 0,6 mm [66].

Valendo-se do conhecimento que o acréscimo na frequência de rotação do eletrodo aumenta sua taxa de fusão para o mesmo valor médio de corrente e, por consequência, tal fenômeno propicia gotas com um menor gradiente térmico, a ideia de se aumentar a frequência de rotação com intuito de propiciar gotas com uma maior quantidade de movimento efetivo, a fim de sanar as problemáticas de falta de fusão, parece não se aplicar a tal tecnologia. Essa ocorrência necessita o desenvolvimento de novas soluções a fim de sanar tal problemática. Desta forma, foi definido então uma baixa frequência de rotação (1000 rpm) e optou-se pela utilização de tecimento do tipo trapezoidal de modo que o eletrodo ficasse um tempo pré-determinado fundindo os flancos laterais, cujos os parâmetros selecionados no Tartilope V2 são exibidos na Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Parâmetros selecionados no Tartilope V2 para a primeira bateria de ensaios.

Tecimento	Ampli (mm)	Freq (Hz)	Tp1(ms)	Tp2 (ms)
Trap	1,5	0,5	0,20	0,20

Cabe salientar que a amplitude aqui escolhida é em função da formação que a própria frequência de rotação tende a crescer o diâmetro no qual o eletrodo irá transladar, decidiu-se utilizar baixas amplitudes de tecimento com o intuito de se evitar possíveis colisões do arame com os flancos laterais. De posse dos novos parâmetros, realizou-se novamente o procedimento de soldagem que resultou na macrografia exposta na Figura 5.11, com ênfase nas setas vermelhas, as quais representam a ocorrência falta de fusão nos flancos laterais. Outra ação corretiva foi a redução na vazão do gás de proteção para uma vazão de 18 l/min.

Pode-se perceber que a ação tomada da redução na vazão do gás de proteção se mostrou bastante eficiente, e não foi observada a presença de poros na macrografia.

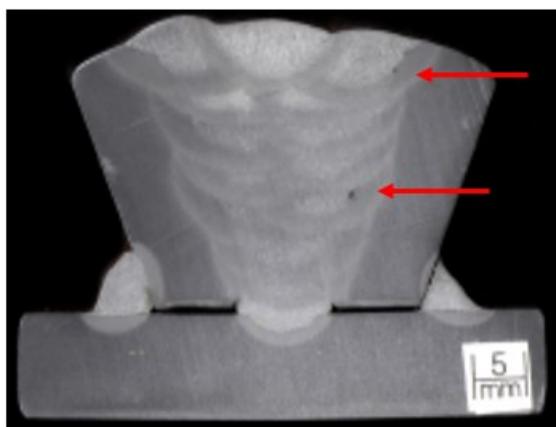


Figura 5.11. Seção transversal relativo à segunda bateria de ensaios com ênfase nas setas vermelhas exibindo falta de fusão nos flancos laterais. $W = 1000$ rpm; $P_c = 3$ mm. $I_m = 173$ A, $V_s = 27$ cm/min.

Outra ocorrência observada se trata de, mesmo utilizando 0,20 ms como tempo de parada do eletrodo nos flancos, houve falta de fusão nos flancos laterais, conforme a seção transversal pode ser observada na Figura 5.11.

De posse de tal informação, procurou então uma nova parametrização buscando juntar os tipos de tecimento. A rotação do eletrodo da tocha *Spinarc* mais o tecimento trapezoidal disponível no Tartilope V2. Essa alternativa adotada tem como objetivo, crescer o tempo de parada do eletrodo nos flancos laterais, de modo que o arco elétrico permanecesse um tempo maior nos flancos, propiciando desta maneira uma maior

fusão nos mesmos. Os parâmetros seleccionados no manipulador robótico podem ser visualizados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4. Parâmetros seleccionados no Tartilope V2 para a segunda bateria de ensaios.

Tecimento	Ampli (mm)	Freq (Hz)	Tp1(ms)	Tp2 (ms)
Trap	1,5	0,5	0,35	0,35

A metodologia adotada de acrescentar os tempos de parada do eletrodo nos flancos laterais, resultou em uma operação bem-sucedida, conforme a seção transversal é exibida na Figura 5.12.

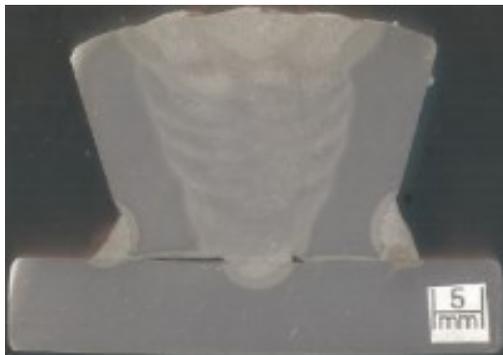


Figura 5.12. Seção transversal referente à segunda bateria de ensaios com comando de corrente na posição plana. $W = 1000$ rpm; $P_c = 3$ mm; $t_p = 0,35$ ms; $V.a = 6,1$ m/min; $I_m = 173$ A; $V.s = 27$ cm/min.

Após ter sido desenvolvido um procedimento de soldagem em junta *Narrow Gap* livre de defeitos na posição plana, realizou-se os testes em questão na posição vertical descendente. Inicialmente, ao realizar os experimentos, foi perceptível que os parâmetros utilizados na posição plana, expostos na Tabela 5.4, deveriam ser alterados para o sucesso da operação, pois foi observado o escorrimento da poça de fusão devido a ação da gravidade tendendo a puxar a mesma. Face a tal problemática, inicialmente optou-se por reduzir o tempo de parada do eletrodo nos flancos laterais (t_p) para 0,32 ms, de modo que a poça de fusão não se tornasse tão fluida e tendesse a escorrer. Entretanto, tal ação não culminou em um total sucesso do procedimento, onde as seções transversais são expostas na Figura 5.13.

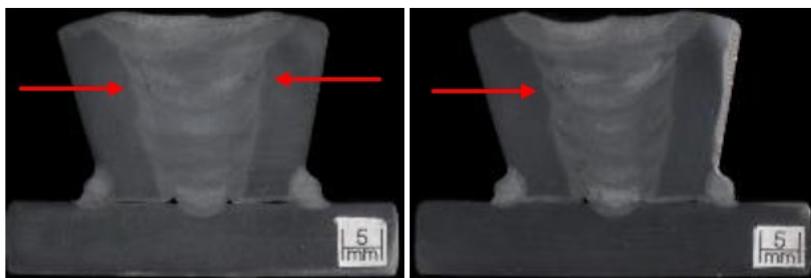


Figura 5.13. Seção transversal relativo ao ensaio com comando de corrente na posição vertical descendente. $W = 1000$ rpm; $P_c = 3$ mm, $I_m = 173$ A; $V.A = 6,1$ m/min; $T_p = 0,32$ ms.

5.3 SOLDAGEM *NARROW GAP* MIG/MAG COM CURTO CIRCUITO

Após a realização dos ensaios com comando de corrente, deu-se início aos ensaios com a transferência metálica por curto-circuito, com cunho de testá-la para poder comparar com o MIG/MAG pulsado e poder verificar as vantagens de cada um. Cabe versar que um dos objetivos aqui indagados se trata das possíveis aplicações em comando de tensão. É sabido que fontes com maiores recursos tecnológicos (fonte de corrente) tendem possuir um maior valor de mercado e também há uma necessidade de profissionais com um maior grau de conhecimento para a parametrização das variáveis inerentes ao processo.

Um outro possível ganho com a transferência metálica por curto-circuito se trata de uma menor possibilidade de ancoramento do arco elétrico nos flancos laterais. Como a própria transferência ocorre por curto-circuito, o arco não se torna grande o bastante para se ancorar nos flancos e, caso tal façanha ocorra, há ainda a possibilidade de apenas acrescer a velocidade de alimentação, de modo a forçar um curto-circuito. Mesmo que a transferência ocorra com um menor índice de regularidade, é possível realizar um cordão homogêneo e sem discontinuidades. Mediante os fatos aqui apresentados, acredita-se necessário investigar o comportamento do processo com a transferência metálica por curto-circuito. Face a isso, recorreu-se novamente à filmagem de alta velocidade sincronizada com os sinais elétricos, que podem ser visualizados na Figura 5.14.

No quadro A, é possível observar a transferência metálica ocorrendo próximo ao flanco esquerdo da junta, onde observa-se também que o eletrodo não encosta nos flancos laterais, mesmo se posicionando bem

próximo deles. No quadro B, é possível observar que o momento em que irá ocorrer no próximo quadro o rompimento da ponte metálica, onde mesmo o eletrodo sendo rotacionado, tal característica não perturbou/atrapalhou a transferência da gota metálica. No quadro C, foi perceptível um pico de tensão maior que nas outras transferências observadas. Esse fato está atrelado a abrupta transferência metálica que propiciou, após a gota ser destacada, uma maior distância entre a ponta do eletrodo e a peça de trabalho, isso justificável pela brusca transferência metálica. No quadro D, é possível observar o movimento do eletrodo já com a gota formada, onde não foram observados curtos-circuitos acidentais.

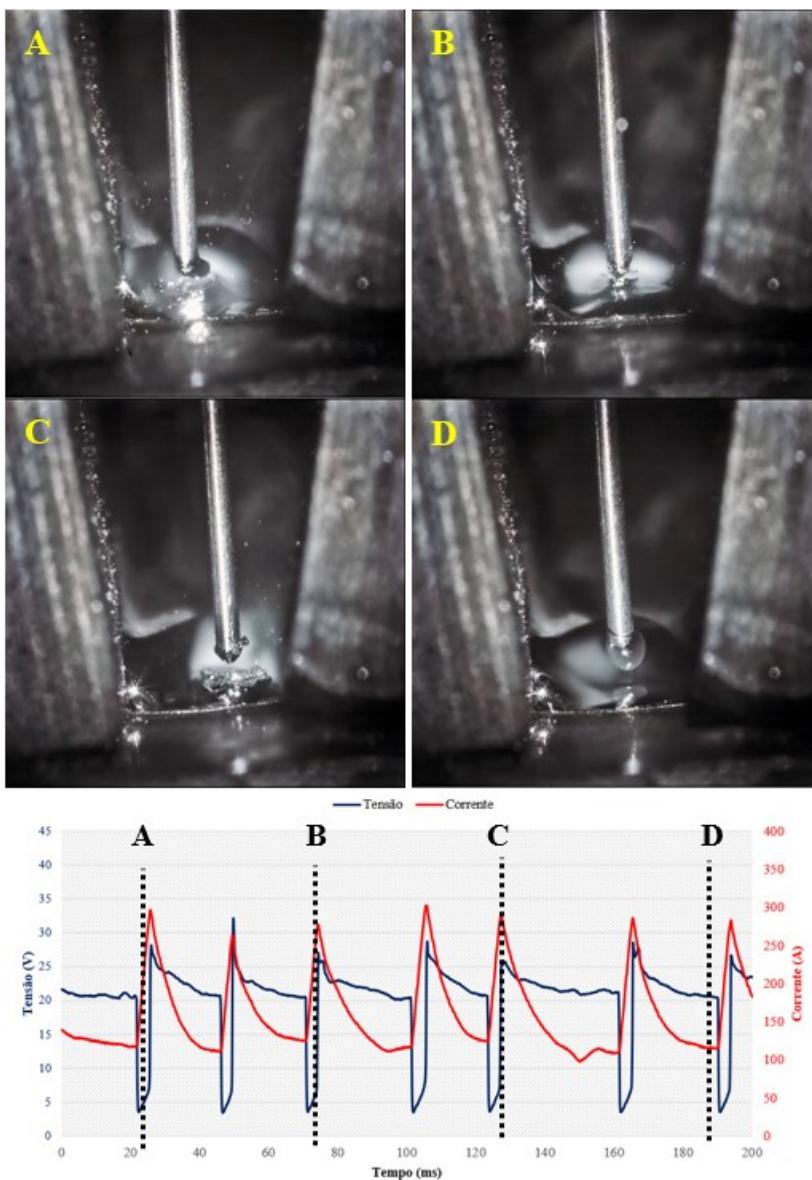


Figura 5.14. Quadros da filmagem de alta velocidade sincronizados com sinais elétricos demonstrando a transferência metálica por curto-circuito em chanfro NG. $W = 1000$ rpm; $P_c = 3$; $U.a = 20,5$ V; $V.a = 4,5$ m/min; $I_m = 160$ A.

Em análise visual do oscilograma exposto na Figura 5.14, o processo apresenta um bom nível de regularidade da transferência metálica, onde pode ser observada uma tendência no tempo de transferência e acredita-se que as gotas formadas estariam aproximadamente no mesmo diâmetro.

Para o tipo de transferência metálica em questão, inicialmente acreditava-se que, devido a própria natureza física do equipamento, o fato de se rotacionar o eletrodo com a transferência metálica ocorrendo por curto-circuito poderia causar possíveis perturbações para o processo. Essa ocorrência se perpetua na possibilidade da gota, ainda presa na ponta do eletrodo, em algum momento tocasse a poça de fusão e propiciasse uma transferência metálica inesperada e abrupta, acarretando em uma instabilidade na transferência metálica. Nada obstante, a filmagem exposta na Figura 5.14 exibe a transferência metálica ocorrendo com o eletrodo a uma frequência de rotação de 1000 rpm, onde as perturbações descritas anteriormente não foram observadas.

A Figura 5.15 exibe a seção transversal dos ensaios realizados com transferência metálica por curto-circuito, onde é possível observar que tal procedimento culminou no sucesso da operação. Cabe aqui salientar que, após ter consolidado os parâmetros no que concerne o tecimento programado no manipulador robótico, foram realizadas então as avaliações das possíveis alterações no preenchimento de chanfros *Narrow Gap* utilizando a transferência metálica por curto-circuito.

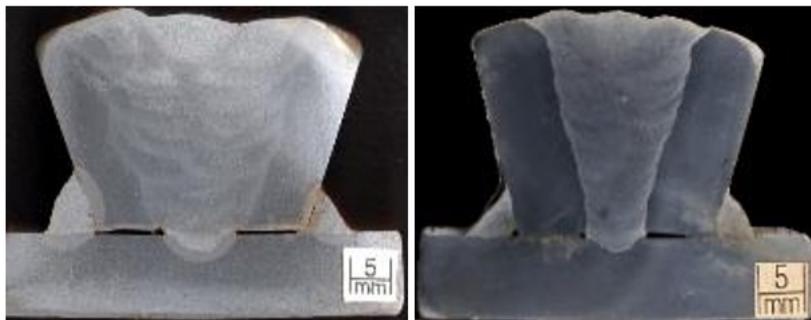


Figura 5.15. Seções transversais dos ensaios realizados com transferência metálica por curto-circuito. $I_m = 160$ A, $W = 1000$ rpm, $P_c = 3$. $V.s = 25$ cm/min, $T_p = 0,35$ ms.

5.4 SOLDAGEM *NARROW GAP* MIG/MAG COM TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR *SPRAY*

A fim de investigar as potencialidades da tecnologia a eletrodo rotativo no que concerne a produtividade e, ao mesmo tempo confrontar as informações advindas dos artigos científicos, foi proposta uma metodologia para o preenchimento de chanfros *Narrow Gap* do tipo I com 1" de espessura, cujos parâmetros utilizados para o respectivo ensaio podem ser visualizados na Tabela 5.5.

Nesta etapa, a vazão do gás de proteção utilizada continuou a ser de 18 l/min. No que diz respeito aos tempos de parada do eletrodo nos flancos laterais, continuou a utilizar 350 ms. Cabe versar que ambos parâmetros foram levantados no tópico 5.2

Tabela 5.5. Parâmetros de soldagem dos ensaios realizados em chanfros *Narrow Gap* com transferência metálica por *spray*.

U (V)	Im (A)	V.a (m/min)	Tp1(ms)	Tp2 (ms)
28,5	250	8,5	350	350

Uma ocorrência observada para esse arranjo de parâmetros de tecimento da tocha *Spinarc* ($W = 1000$ rpm e $P_c = 3$) e um *gap* de 6,35 mm, foi que proporcionou um cordão com boa molhabilidade, onde não foi observado nenhuma instabilidade devido ao toque do eletrodo nos flancos laterais. Para essa etapa, continuou com a frequência de rotação do eletrodo em 1000 rpm devido problemáticas do fluxo de gás, que será melhor exposto no tópico 5.6. A Figura 5.16 exibe a seção transversal para o ensaio utilizando a transferência metálica por *spray*.

Foi possível observar que tais parâmetros, tantos elétricos como de tecimento (tocha *Spinarc* e cartilope V2), levaram ao sucesso da operação culminando, desta maneira, um procedimento isento tanto de falta de fusão quanto problemáticas relativas a porosidade.

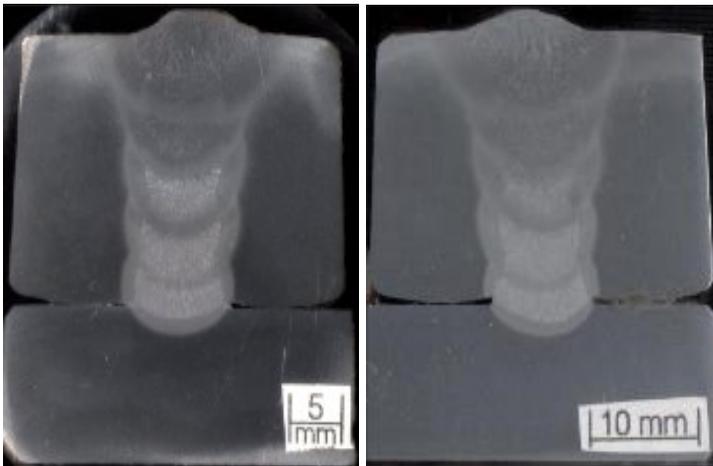


Figura 5.16. Seção transversal do ensaio utilizando transferência metálica por spray. $W = 1000$ rpm; $P_c = 3$; $I_m = 250$ A; $U.a = 28,5$ V; $V.a = 8,5$ m/min; $T_p = 350$ ms.

Após ter obtido sucesso no preenchimento de um corpo de prova de parede reta com a transferência metálica por *spray* isento tanto de falta de fusão quanto de porosidade, foi proposta então uma metodologia de aumentar a espessura da chapa para $1\frac{1}{4}$ ' onde a Figura 5.17 a seção transversal do respectivo ensaio.

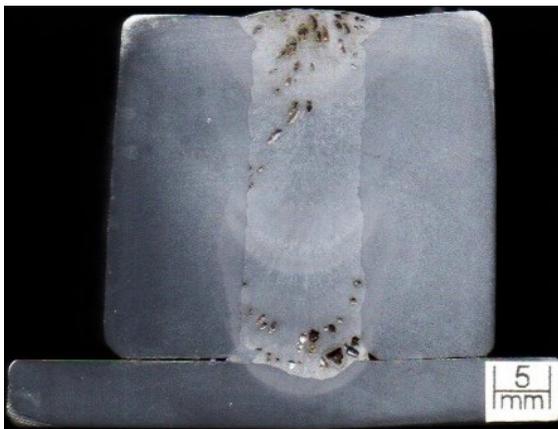


Figura 5.17. Seção transversal chapa de $1\frac{1}{4}$ ' evidenciando problemáticas $W = 1000$ rpm; $P_c = 3$; $U.a = 28,5$ V; $V.a = 8,5$ m/min; $I_m = 265$ A; $V.s = 45$ cm/min.

Uma ocorrência observada foi a porosidade na raiz do cordão, ocorrência essa não observada quando o procedimento foi realizado em chanfro do tipo I. Isso pode estar relacionado a dificuldade do escoamento do gás de proteção na raiz da junta, fato esse devido a maior distância entre o bocal e a raiz da junta a ser soldada.

Como pode ser observado, um simples aumento na espessura do material culminou em um total colapso do processo, mesmo utilizando os parâmetros que deram certo nos ensaios anteriores. Outro problema aqui encontrado se trata da falta de fusão, conforme indicado pelas setas. Ou seja, mesmo repetindo os parâmetros de tecimento trapezoidal, conforme expostos na Tabela 5.4, não foi possível a obtenção de um procedimento estável para tal espessura. Desta maneira, optou-se por não dar continuidade para o preenchimento de chanfros *Narrow Gap* com a vigente espessura (1 e ¼’), onde foi observada a necessidade de um estudo mais sistemático. Face a tal situação, foi dada continuidade aos demais experimentos na posição vertical descendente para a espessuras de 1”.

5.5 SOLDAGEM *NARROW GAP* MIG/MAG SEM A ROTAÇÃO DO ELETRODO

Outra análise em questão se trata de avaliar as possibilidades do preenchimento de chanfros *Narrow Gap* sem a rotação do eletrodo, com o processo MIG/MAG pulsado e com curto-circuito. A análise em questão avalia se, de fato, é vital para o processo a rotação do eletrodo para o preenchimento de chanfros *Narrow Gap* de elevada espessura.

Para a realização dos ensaios em questão, foi priorizada a obtenção do mesmo valor médio de corrente, a fim de realizar possíveis comparações. Cabe salientar também que, para esses ensaios, utilizou-se uma menor velocidade de alimentação. Tal mudança nos parâmetros elétricos se deve em função dos fenômenos provenientes da rotação do eletrodo, conforme demonstrados nos tópicos 5.1 e 5.2.

A priori, foi conduzido um ensaio sobre as possíveis eventualidades de se operar com corrente pulsada sem a rotação do eletrodo. Inicialmente, para este ensaio, foram utilizados os parâmetros de soldagem desenvolvidos no tópico 5.2, onde foi perceptível o escorrimento da poça de fusão para a posição vertical descendente. Acredita-se que essa ocorrência esteja atrelada a maior temperatura na região central para processos convencionais (sem a rotação do eletrodo), reiterando assim as percepções constatadas no item 5.4.

Desta maneira, foi necessária uma nova parametrização concernente a velocidade de soldagem (v.s), a frequência de tecimento do tartilope e o tempo de parada do eletrodo nos flancos laterais. A Tabela 5.6 exibe os parâmetros de tecimento selecionados no manipulador robótico.

Tabela 5.6. Parâmetros de tecimento selecionados no manipulador robótico referentes aos ensaios com transferência metálica pulsada sem a rotação do eletrodo.

Tecimento	Ampli (mm)	Freq (Hz)	Tp1(ms)	Tp2 (ms)
Trap	3,5	0,8	0,30	0,30

No tocante aos parâmetros de tecimento utilizados, cabe ressaltar que foi necessário aumentar a amplitude de tecimento para o procedimento sem a rotação do eletrodo, de modo a compensar a área percorrida pelo eletrodo sem rotação. Mesmo utilizando parâmetros de tecimento, onde aparentemente a poça de fusão não tendia a escorrer, não foi possível a obtenção de um procedimento isento de defeitos, conforme Figura 5.18 exibe a seção transversal, com ênfase nas setas vermelhas, que representam a falta de fusão nos flancos laterais.

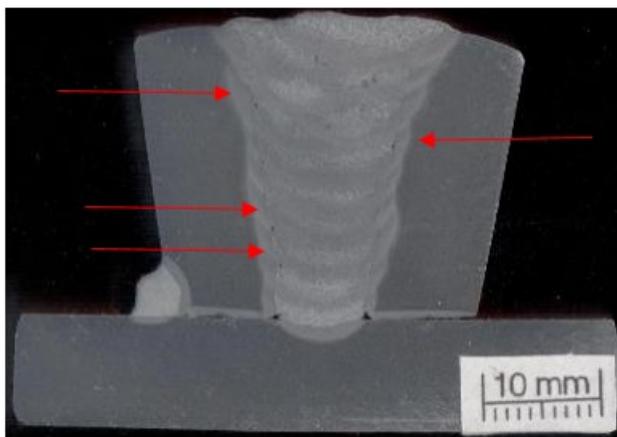


Figura 5.18. Seção transversal do ensaio realizado com a transferência metálica pulsada na posição vertical descendente sem a rotação do eletrodo.

Posteriormente, foi analisado o preenchimento de chanfros *Narrow Gap* com a transferência metálica por curto-circuito, onde a Figura 5.19 exibe a seção transversal, com ênfase nas setas vermelhas, exibindo a falta

de fusão nos flancos laterais. Para esse tipo de transferência metálica, foi observada uma maior falta de fusão nos flancos laterais para posição vertical descendente.

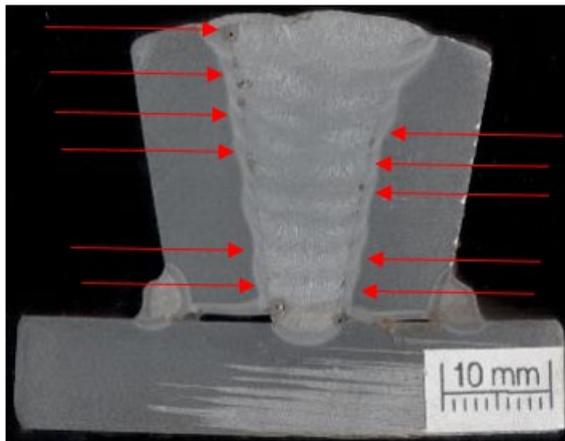


Figura 5.19. Seção transversal do ensaio realizado com a transferência metálica pulsada por curto-circuito na posição vertical descendente sem a rotação do eletrodo.

De modo geral, tanto os resultados obtidos com a transferência metálica por curto-circuito quanto com corrente pulsada sem a rotação do eletrodo não se mostraram satisfatórios sob o quesito qualidade. Entretanto, foi possível observar uma menor falta de fusão para o procedimento realizado com corrente pulsada, quando comparado ao procedimento realizado com a transferência metálica por curto-circuito.

Uma observação que deve ser feita é que, mesmo que os procedimentos aqui expostos sem a rotação do eletrodo não culminem em um procedimento com isenção de defeitos, o fato de se trabalhar com maiores velocidades de arame no processo MIG/MAG pulsado se torna bastante atrativo para os olhos industriais.

5.6 AVALIAÇÃO DO ESCOAMENTO DO GÁS DE PROTEÇÃO UTILIZANDO A TÉCNICA *SCHLIEREN*

No decorrer do trabalho, foram registradas situações onde deparou-se com a presença de porosidade. Dessa forma foi levantado um questionamento concernente a efetividade da proteção gasosa da tocha *Spinarc*. Por conta disso, foram realizados ensaios com a técnica *Schlieren* almejando avaliar a eficiência da proteção gasosa nas diferentes configurações de rotação do eletrodo.

O estudo em questão foi segmentado em três etapas para a melhor compreensão dos dados expostos. A primeira delas exhibe os ensaios realizados em um simples depósito sobre chapa. Já a segunda parte exhibe os experimentos realizados em chanfro. E, por fim, a última parte exhibe os resultados obtidos em um ensaio com anteparo embaixo do bocal, sem a presença do arco elétrico.

Diante da observação da falta de proteção no ensaio do tipo cordão sobre chapa e também no chanfro, foi analisado se a rotação do eletrodo tende a prejudicar a proteção e gás. Como a tocha tem um projeto de canais de distribuição consideravelmente diferentes das tochas convencionais, também foi escolhida a realização de comparação.

5.6.1 Ensaios sobre chapa

Após as problemáticas aqui relatadas quanto a deficiência da proteção gasosa mediante a rotação do eletrodo, foi proposto então um estudo mais aprofundado dotando-se da técnica *Schlieren*, conforme a Figura 5.20 exhibe as imagens registradas, demonstrando um comparativo entre a tocha sem rotação e com frequência de rotação do eletrodo à 2000 rpm.

Inicialmente, os experimentos foram conduzidos com a mistura C8 e os resultados obtidos não foram satisfatórios, pois a maior parte do gás que se consegue visualizar se encontra próximo a região do arco elétrico. Mesmo assim, fica claro mediante a análise das filmagens em alta velocidade que o eletrodo sendo rotacionado a uma frequência igual a 2000 rpm, conforme ele rotaciona, propicia um deslocamento da coluna do gás conforme o eletrodo é rotacionado. Todavia, os resultados aqui obtidos vão em direção as percepções realizadas nos depósitos sobre chapa, de que altas frequências de rotação do eletrodo (2000 rpm) tendem a causar possíveis turbulências no gás de proteção, acarretando na contaminação da poça de fusão.

Desta maneira, foi possível identificar as limitações acerca da sensibilidade da técnica *Schlieren* no que concerne a visualização do fluxo do gás de proteção, mesmo quando o gás é aquecido pelo arco elétrico.

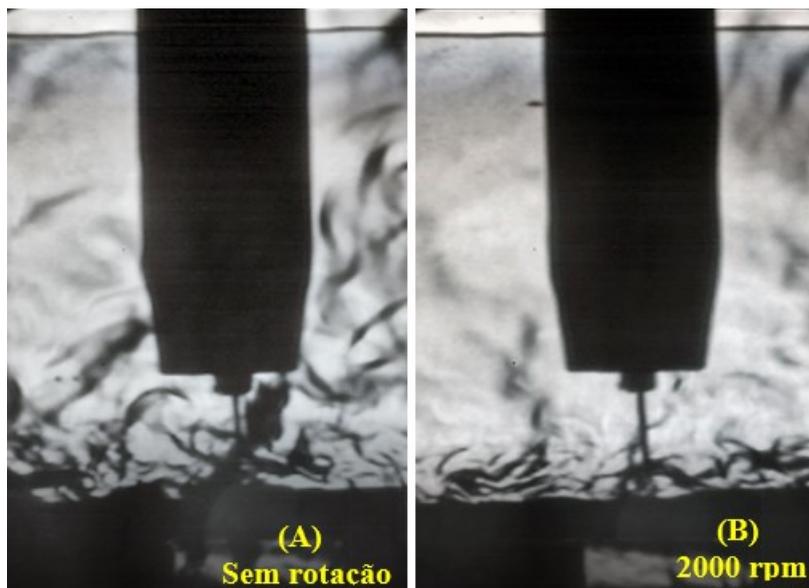


Figura 5.20. Imagens registradas com a técnica *Schlieren*. Gás de proteção C8; Vazão do gás 15 l/min.; DBCP = 15 mm; (a) sem rotação; (b) processo com rotação de 2000 rpm.

5.6.2 Ensaios em chanfro

Como um dos objetivos específicos do presente trabalho se trata da avaliação de tal variante em chanfros *Narrow Gap*, foram realizadas filmagens de alta velocidade com o intuito de avaliar possíveis eventualidades, onde a Figura 5.21 exhibe os quadros gerados.

Como pode ser observado, foi possível registrar a presença do escoamento giratório do gás de proteção onde as linhas de corrente apresentam um padrão circular ou espiral, sendo este fenômeno é intitulado *vortex*. Para a realização do presente ensaio, foi adotado o sentido de rotação do eletrodo em anti-horário, onde, não obstante, foi possível perceber que o *vortex* era rotacionado em sentido horário, ou seja, em sentido contrário a rotação do eletrodo. Também foi observada a presença do *vortex* apenas

do lado direito, quando ocorria o pulso de corrente, e o eletrodo se deslocava da “direita para a esquerda”.

Para os experimentos realizados com uma frequência de rotação abaixo de 1500 rpm (0 – 500 e 1000 rpm), não foi observada a presença de *vortex*. Essa ocorrência induz a crer que há um limite na frequência de rotação, onde tais configurações não propiciem uma diferença tão expressiva de pressão. Os resultados até agora obtidos apontam para a realização de procedimentos com frequência de rotação do eletrodo abaixo de 1500 rpm, de modo a se evitar as problemáticas anteriormente expostas.

De modo geral, através dos experimentos realizados no presente tópico, foi possível demonstrar dois fenômenos decorrentes. O primeiro deles está concernente a presença de *vortex* quando o processo é empreendido a partir de 1500 rpm. Como os testes em questão foram realizados variando a frequência de 500 em 500 rpm, foi possível demonstrar que, para as frequências menores que 1500 rpm, tal fenômeno não foi observado. Já o outro fenômeno se trata da visualização do *vortex* apenas do lado direito da junta. Foi observado que o *vortex* era criado quando o eletrodo se deslocava do “lado direito para o esquerdo”. Um fato intrigante é que, inicialmente, tinha-se observado que *vortex* estava com apenas um sentido de rotação.

Cabe aqui salientar que, novamente, mesmo com o gás sendo aquecido pelo arco elétrico, não foi possível tecer relevantes conclusões a respeito do comportamento do fluxo de gás em chanfro *Narrow Gap*.

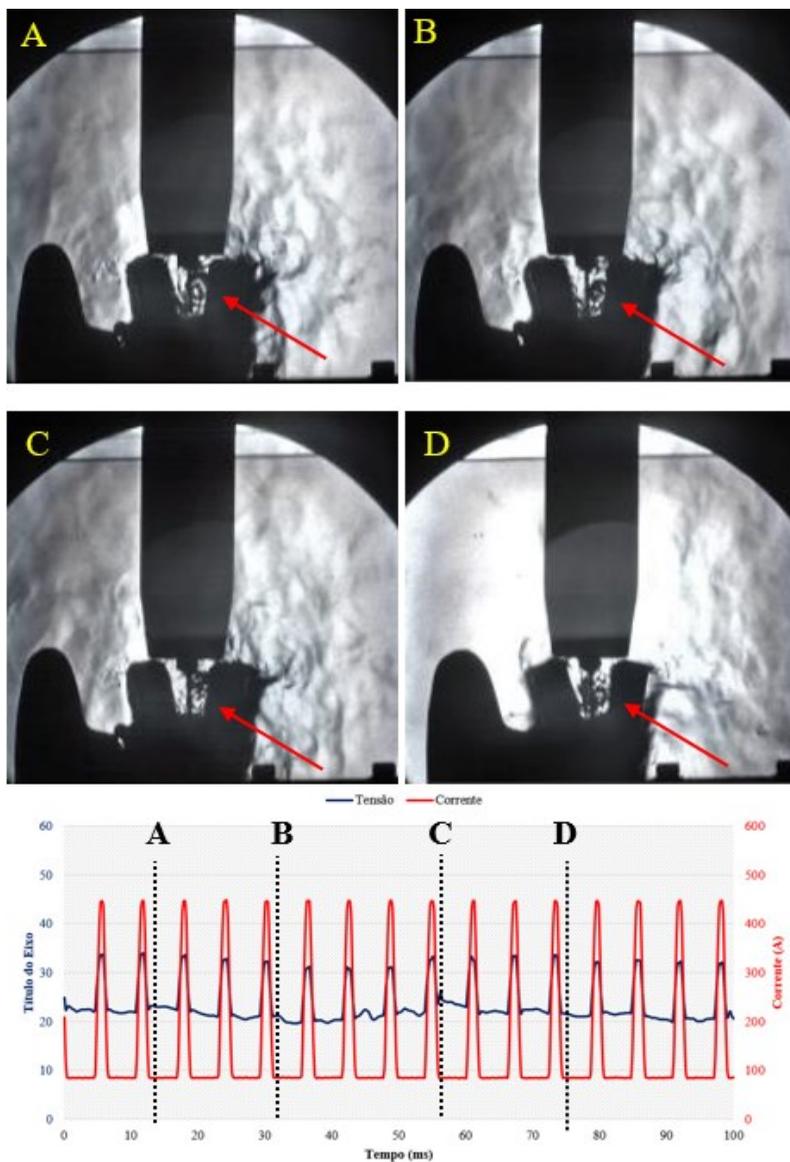


Figura 5.21. Imagem registrada com a técnica Schlierem. Gás de proteção C8; Vazão 17 l/min. W = 1500 rpm. Pc = 3.

5.6.3 Ensaios sem arco

Almejando a visualização do comportamento do gás filmando agora frente da tocha, foi proposta uma metodologia sem a presença do arco elétrico, fazendo uso de um anteparo embaixo do bocal.

Inicialmente, foi proposto investigar o fluxo do gás de proteção para uma proteção gasosa com composição química, o mais próximo possível do gás utilizado para o desenvolvimento da pesquisa em questão. De posse desta informação, optou-se pela utilização do gás C25, que é composto por 75% Ar e 25% CO₂, onde a Figura 5.22 exibe as imagens registradas.



Figura 5.22. Imagem obtida pela técnica *Schlieren*. Gás utilizado C25. Vazão utilizada 15 l/min. Tocha SPA.

Como pode ser observado, devido ao baixo índice de refração da mistura C25, quando comparado ao ar atmosférico 1,000292, tais condi-

ções experimentais apresentam uma imagem com qualidade visual melhor que as produzidas no tópico anterior. Entretanto almejava-se uma visualização mais nítida das linhas de fluxo.

Com o intuito de investigar as possíveis alterações no fluxo gasoso entre a tocha *Spinarc* e uma tocha comercial do fabricante SPA, foi realizado um comparativo entre as duas tochas, onde a Figura 5.23 exhibe as imagens aquisitadas.

Um dos objetivos do vigente teste trata da hipótese de que a tocha *Spinarc* teria uma proteção gasosa deficiente quando comparado às tochas tradicionais, fato esse, devido ao próprio projeto mecânico da tocha. Outro objetivo deste estudo, se trata de avaliar como a rotação do eletrodo causa distúrbios no escoamento do gás de proteção.

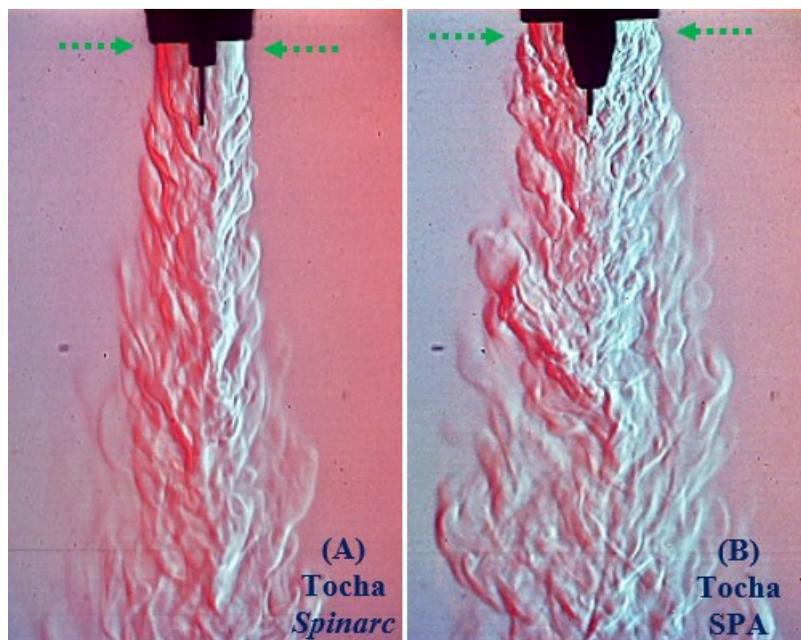


Figura 5.23. Imagens do fluxo de gás na tocha *Spinarc* (imagem A) e em uma tocha comercial SPA obtida pela técnica *Schlieren*. Gás utilizado CO_2 . Vazão utilizada 15 l/min.

Os orifícios de saída de gás da tocha *Spinarc* são localizados antes do *crank*, ou seja, o gás passa pela tocha onde é rotacionado devido a movimentação do conjunto mecânico. Acreditava-se que diante da plena

rotação do conjunto mecânico e do bico de contato que tal feito propicia um regime mais turbulento próximo ao bocal, onde tal turbulência poderia auxiliar na formação de possíveis defeitos. Cabe aqui salientar que os diâmetros do bocal das duas tochas utilizadas para esse comparativo são do mesmo tamanho, de modo a se precaver de possíveis eventualidades no comportamento do fluxo gasoso. Foi constatado que os orifícios de saída do gás da tocha *Spinarc* se encontra em uma distância relativamente longa, de aproximadamente 165 mm, quando comparada a tocha SPA, que é acerca de 35 mm. Quando a concepção dos difusores, foi constatado o mesmo número em cada tocha, sendo 6 difusores de 4 mm de diâmetro.

De modo a facilitar o entendimento acerca do difusor e o próprio projeto mecânico da tocha em questão, a Figura 5.24 exhibe detalhes da tocha *Spinarc* com ênfase nos orifícios de saída de gás de proteção.



Figura 5.24. Detalhe da tocha *Spinarc* com ênfase nos orifícios de saída do gás de proteção (total de 8 saídas).

Mediante a análise dos vídeos gerados, foi observado o fluxo do gás de proteção nas distintas tochas. Inicialmente, foi observado perto da região do bocal que na tocha *Spinarc* se tratava de um regime laminar, enquanto na tocha SPA pode-se perceber nitidamente a turbulência do gás de proteção. Outra ocorrência observada se trata da distância máxima percorrida pelo fluxo em regime laminar. Desta maneira, os resultados indicam um melhor fluxo de escoamento na tocha *Spinarc* quando comparada à SPA.

Uma das grandes problemáticas na utilização da técnica *Schlieren* é que a maioria dos resultados já expostos pela literatura são qualitativos e não quantitativos, de modo a tecer possíveis conclusões sobre do fluxo do gás de proteção. De modo a se expor um dado mais quantitativo, foi proposta uma metodologia para medir a largura máxima da coluna do gás

conforme descrito no 4.2.1.3 da metodologia onde os resultados são expostos na Figura 4.25.

Os resultados nos permitem supor que a tocha *Spinarc* sem a rotação do eletrodo, aparentemente não apresenta cobertura da proteção pior do que o modelo de tocha convencional que foi testado, sendo que os resultados mostram menores dispersões para o caso da tocha *Spinarc*.

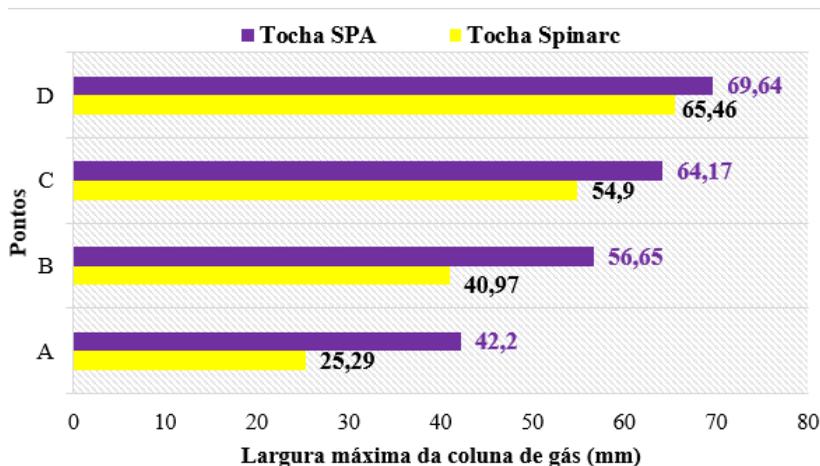


Figura 4.25. Gráfico comparativo demonstrando a largura máxima da coluna de gás para as tochas *Spinarc* e SPA.

Como um dos objetivos do trabalho se trata de aplicações com a rotação do eletrodo, desta forma, foi proposto um ensaio buscando avaliar as possíveis alterações no fluxo gasoso com distintas frequências de rotação do eletrodo, utilizando CO_2 como atmosfera protetora. A Figura 5.26 exibe as imagens geradas.

Face os quadros gerados via filmagem de alta velocidade, pode-se perceber dois fenômenos ocorrendo mediante ao incremento na frequência de rotação do eletrodo. O primeiro deles (indicado pela seta verde) se refere a região onde o fluxo do gás de proteção aparenta ser laminar na saída do bocal. A segunda ocorrência se trata da observação de padrões de movimentação da sucção do ar atmosférico (indicados pelas setas azuis), parecidos com vórtices, que permitem supor maior sucção do ar atmosférico. Desta forma, é possível conjecturar que, conforme o eletrodo chegava a ser rotacionado, o mesmo tendia a aspirar parte do ar atmosférico para dentro do bocal.

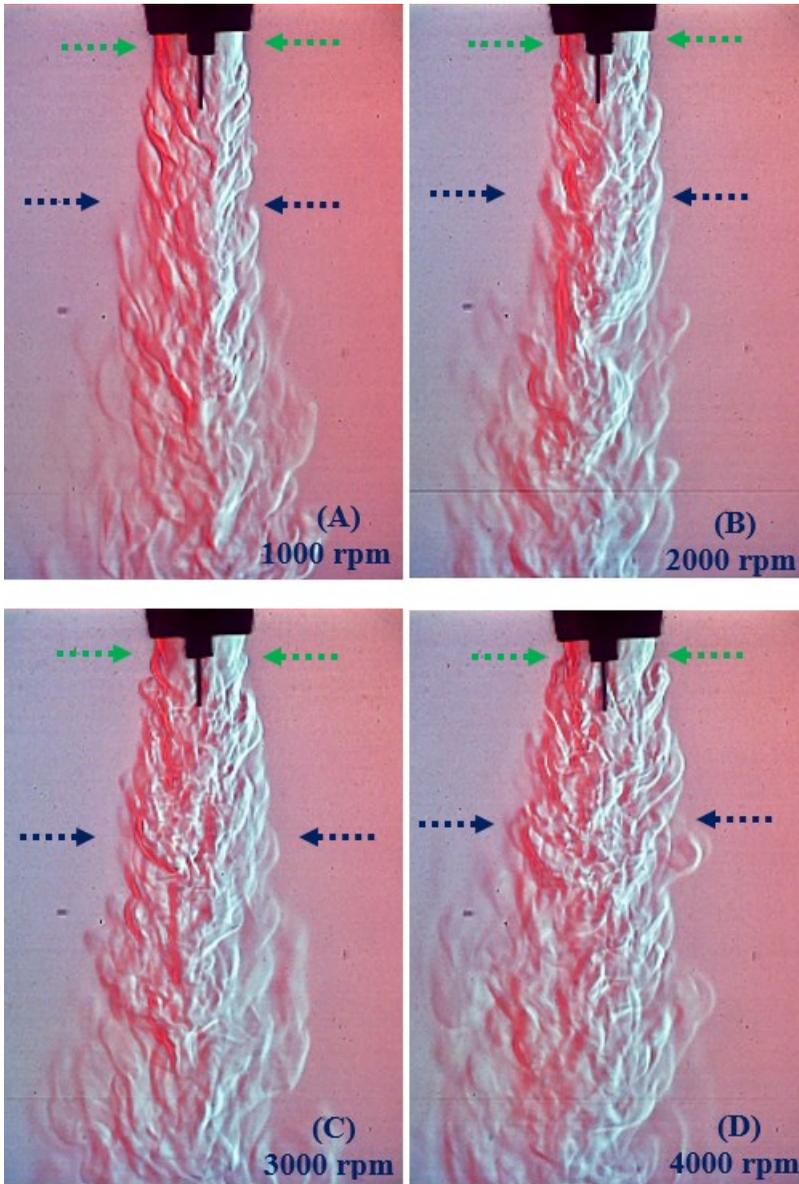


Figura 5.26. Imagens obtidas pela técnica *Schlieren* comparando o fluxo de gás em função da frequência de rotação do eletrodo. Gás utilizado CO_2 . Vazão utilizada 15 l/min.

Com o intuito de gerar um dado mais quantitativo, novamente foi utilizada a metodologia de mensurar a largura da coluna do gás de proteção em quatro pontos distintos, conforme os resultados médios obtidos são expostos na Figura 5.27.

Para os experimentos aqui realizados, foi observada uma largura máxima no ponto D de aproximadamente 84,58 mm, para o ensaio realizado com a frequência de rotação de 5000 rpm. Ou seja 12,32 mm a menos quando comparado ao processo com a frequência de rotação igual a 1000 rpm. A maior interferência encontrada foi no ponto B, sendo de aproximadamente 19,5 mm. A frequência de rotação do eletrodo tende a propiciar divergência do fluxo de gás de proteção, ou seja, conforme se aumenta a frequência de rotação do eletrodo, o fluxo gasoso tende a se dispersar para a região periférica ao bocal de proteção, onde apresenta maior dispersão na região central, ocorrência essa que auxilia a explicar um dos possíveis problemas de porosidade até aqui encontrados.

De posse de todos os resultados aqui expostos, fica evidente que quanto maior a frequência de rotação do eletrodo, maior é a interferência no fluxo.

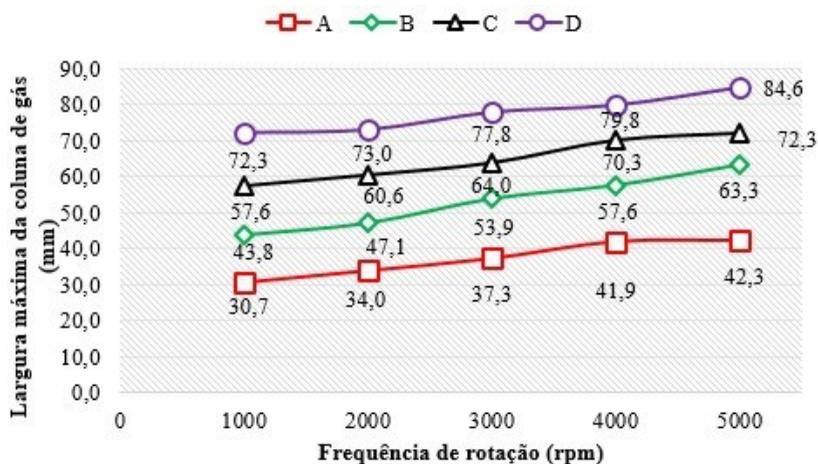


Figura 5.27. Gráfico comparativo demonstrando o comportamento entre a largura máxima do gás de proteção em função da frequência de rotação do eletrodo.

5.6.4 Ensaios com anteparo

Face as imagens satisfatórias geradas no tópico 5.5.2, foi proposto então um ensaio que mais se parecia com a condição real dos experimentos até aqui realizados. Para isso, foi utilizado um anteparo embaixo do bocal de proteção, com 15 mm de DBCP, de modo que fosse possível observar o fluxo de gás onde ele é escoado em direção a tal anteparo. Face a isso, os testes foram conduzidos novamente com CO₂ como atmosfera protetora devido a melhor sensibilidade do gás de proteção. A Figura 5.28 exibe um comparativo entre a tocha *Spinarc* sem a rotação do eletrodo e uma tocha modelo comercial.

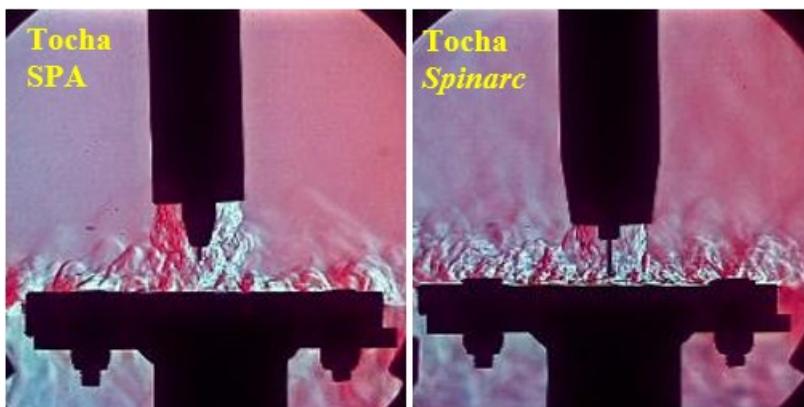


Figura 5.28. Imagens do fluxo de gás com anteparo na tocha *Spinarc* (A) e em uma tocha modelo comercial SPA obtida pela técnica *Schlieren*. Gás utilizado CO₂. Vazão utilizada 15 l/min; DBCP = 15 mm.

Mediante a análise dos vídeos gerados, foi possível perceber novamente o escoamento do fluxo de gás em ambas as tochas, onde foi constatado uma pior proteção gasosa na saída do bocal para a tocha SPA. Tais observações corroboram com as percepções realizadas no tópico;5.5.3. Entretanto, dessa vez, foi possível observar a formação do *vortex* perto do anteparo.

Para a tocha *Spinarc*, não foram encontrados indícios que a proteção gasosa é pior quando comparado ao modelo comercial SPA, sendo que, aparentemente, a tocha *Spinarc* proporcionou melhores resultados.

De forma similar a seção 5.5.2, foram conduzidos os testes com distintas frequências de rotação do eletrodo, conforme

Figura 5.29 exhibe as imagens adquiridas.

No que diz respeito aos experimentos realizados com a frequência de rotação do eletrodo inferior à 2000 rpm, foi observado um regime mais próximo ao laminar. Entretanto, foi possível demonstrar no tópico 5.3 os efeitos de se empreender depósitos com frequências de 2000 rpm, sendo também demonstrado os efeitos ao se realizar preenchimento em chanfros *Narrow Gap* com frequência de rotação igual a 1500 rpm. Desta forma, diante tanto aos vídeos gerados no tópico 5.5.2 quanto as percepções realizadas no tópico 5.5.3, foi evidenciada a turbulência propiciada por frequências superiores a 1500 rpm, onde abaixo de tal frequência não foi observado tal comportamento do fluxo de gás.

Para as frequências maiores que 3000 rpm, fica evidenciado que, quanto maior a frequência de rotação do eletrodo, mais turbulento é o fluxo do gás de proteção.

Diante do que foi exposto, fica evidenciado que o acréscimo na frequência de rotação do eletrodo também aumenta o distúrbio no gás de proteção. Fato esse que pode se tornar um problema. Entretanto a eficiência da proteção gasosa é dependente de vários outros fatores, tais como, tipo de gás utilizado, vazão do gás, formato do bocal e tanto a quantidade de orifícios da saída de gás quanto o diâmetro deles.

Tendo em vista todos ensaios realizados para o presente estudo, os resultados alcançados acerca do entendimento sobre a tecnologia a eletrodo rotativo serão expostos no tópico a seguir, bem como sugestões para futuro *benchmarking*.

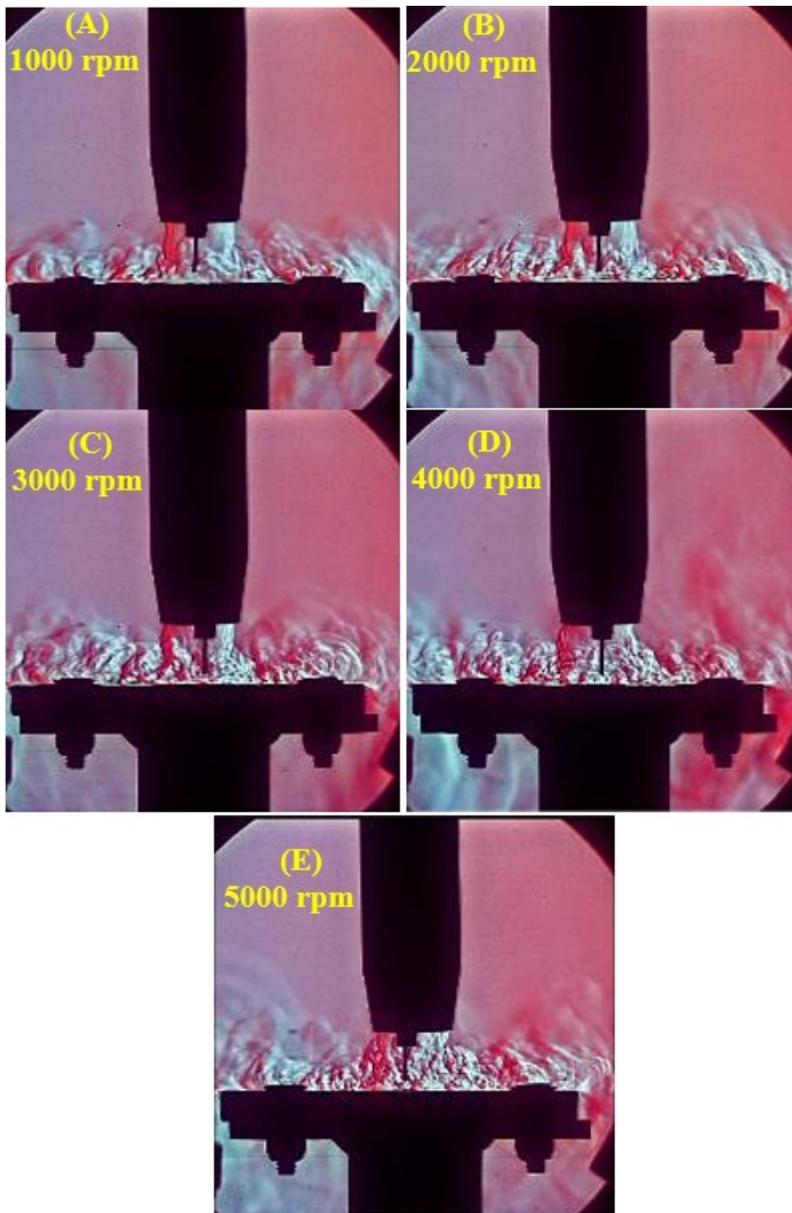


Figura 5.29. Imagens registradas com a técnica *Schlieren* demonstrando o comportamento do gás de proteção para distintas frequências de rotação do eletrodo. Gás de proteção: CO₂; Vazão = 15 l/min; DBCP = 15 mm.

6 RESUMO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS, CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A tocha *Spinarc*, da empresa *Weldrevolution*, tem demonstrado ser um avanço tecnológico dentre os processos MIG/MAG. Entretanto, foi observado que muito trabalho ainda precisa ser feito para ser esse considerado um processo robusto em soldagem. Os resultados encontrados neste trabalho são apresentados de maneira resumida para cada uma das categorias listadas, sendo posteriormente apresentadas as conclusões finais acerca.

6.1 RESUMO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS

No que concerne aos ensaios realizados sobre chapa com comando de tensão:

- ❖ Foi possível demonstrar que é factível a transferência metálica por voo livre operando com um valor médio de corrente abaixo do valor da transição utilizando rotações iguais ou superiores a 3000 rpm.
- ❖ Foi possível demonstrar que a frequência de rotação modifica os sinais elétricos de modo a se obter uma menor variação nos sinais em função do acréscimo da frequência de rotação do eletrodo quando operando com a transferência metálica por spray.
- ❖ Para os ensaios realizados por transferência metálica por voo livre (*spray*), foi possível demonstrar a atuação da força centrífuga tendendo a reduzir o diâmetro da gota e aumentando, desta maneira, a frequência de destacamento, conforme a frequência de rotação do eletrodo é acrescida. Também foi possível demonstrar que o pico de tensão não caracteriza o destacamento da gota metálica.

Com referência aos ensaios realizados sobre chapa com comando de corrente:

- ❖ Foi possível demonstrar a influência da frequência de rotação do eletrodo em aspectos geométricos do cordão de solda. No que diz respeito à aspectos morfológicos as adoções de maiores frequências tendem a propiciar um cordão com maior largura e menor reforço e penetração.
- ❖ Para as condições analisadas, pôde-se verificar que, ao crescer a frequência de rotação do eletrodo, o processo tende a aumentar a taxa de fusão do eletrodo, sendo necessárias ações corretivas na velocidade de alimentação de modo a reduzir o comprimento do arco elétrico. Desta forma, foi possível obter um aumento de aproximadamente 20% na velocidade de alimentação do arame para o mesmo valor médio de corrente ao realizar comparação entre o processo convencional e o condições com frequência de rotação do eletrodo igual a 2000 rpm.
- ❖ Foi possível demonstrar que trabalhando com a frequência de rotação do eletrodo igual a 2000 rpm, tende a propiciar turbulência no fluxo do gás de proteção, sendo necessárias correções na vazão do gás de proteção a fim de se eliminar problemas com porosidades;

Ao que se refere ao estudo conduzido com a câmera termográfica:

- ❖ Foi possível demonstrar que, a frequência de rotação do eletrodo modifica de forma direta na temperatura da poça de fusão, sendo proporcional a redução da temperatura na região central da poça de fusão ao aumento da frequência de rotação do eletrodo para as condições aqui analisadas.
- ❖ Foi possível evidenciar a relação direta entre posição do *crank* (mecanismo responsável por aumentar o diâmetro efetivo de giro do eletrodo) e gradiente térmico da poça de fusão. Para as condições aqui analisadas observou uma redução na temperatura central da poça de fusão com o aumento do diâmetro percorrido pelo eletrodo. Os aspectos morfológicos indicaram uma maior largura

e menor penetração do cordão para processos com o *crank* em uma maior posição.

- ❖ Foi possível verificar a influência da frequência de rotação na temperatura da gota metálica, onde os resultados apontaram uma gota com menor temperatura para condições usando maior frequência de rotação do eletrodo.
- ❖ Foi possível demonstrar a relação entre a frequência de rotação e a velocidade final da gota metálica para os casos aqui investigados. Os resultados apontam uma gota com maior velocidade para condições utilizando maiores frequências de rotação.

Quanto aos ensaios realizados em chanfro NG na posição plana:

- ❖ Para os ensaios realizados com o processo MIG/MAG pulsado, foi necessário o desenvolvimento de novos formatos de onda, com maior frequência de pulsação e maior velocidade de alimentação do arame para a que o arco não ficasse ancorado nos flancos laterais e fosse possível realizar o depósito do cordão na junta a ser unida.
- ❖ No que diz respeito aos ensaios realizados com a transferência metálica por curto-circuito com a rotação do eletrodo, foi possível a obtenção de procedimentos com isenção de defeitos.
- ❖ Ao realizar os experimentos com transferência metálica por *spray* foi possível a obtenção de um procedimento com isenção de defeitos e com maior velocidade de soldagem em comparação aos outros modos de transferência metálica.
- ❖ Para os ensaios realizados em chanfros simulando a espessura de 1,25" (31,75 mm) com a transferência metálica por *spray* não foi possível a obtenção de um procedimento isento de defeitos para os parâmetros ali investigados, mesmo utilizando a rotação do eletrodo.

Quanto aos ensaios realizados em chanfro NG na posição vertical descendente:

- ❖ Comparando os resultados obtidos na soldagem Narrow Gap foi identificado uma menor susceptibilidade a falta de fusão com o processo MIG/MAG pulsado em comparação à transferência metálica por curto-circuito.

No que diz respeito aos ensaios realizados com a técnica *Schlieren*:

- ❖ Nos ensaios realizados sobre chapa, foi possível evidenciar que o aumento da frequência de rotação do eletrodo tende a propiciar um regime mais turbulento no gás de proteção. Os resultados apontam para uma tendência da rotação do eletrodo de desviar o fluxo de gás de proteção da poça de fusão, acarretando desta maneira em possíveis contaminações da mesma.
- ❖ Em chanfro foi possível demonstrar que frequências de rotação acima de 2000 rpm tendem a propiciar a formação do *vortex*. Onde o sentido de rotação do *vortex* é contrário ao sentido do eletrodo.
- ❖ Nos ensaios realizados com uma chapa servindo como anteparo, foi possível observar a presença do *vortex* tanto do lado direito quanto do lado esquerdo para frequências ≥ 3000 rpm. Também foi possível observar o momento em que há a um padrão de movimentação de aspersão do ar atmosférico.

6.2 CONCLUSÕES

Diante dos ensaios realizados, foi possível identificar que a rotação do eletrodo modifica tanto a transferência metálica, conforme demonstrado nos ensaios com a transferência metálica por curto-circuito, como também modifica a taxa de fusão do eletrodo, conforme demonstrado nos ensaios utilizando a transferência metálica pulsada.

A tocha MIG/MAG *Spinarc*, de fato faculta a obtenção de procedimentos de soldagem *Narrow Gap* sem ocorrência de defeitos como falta de fusão. Entretanto a tocha por si só, não garante a obtenção de um procedimento isento de defeitos, sendo necessário a realização de uma parametrização muito minuciosa. Inclusive foi identificado a necessidade de

um sistema de movimentação da tocha que pode ser programado os tempos de parada do eletrodo nos flancos laterais para chanfros *Narrow Gap*.

Apesar da tocha *Spinarc* disponibilizar uma frequência de rotação do eletrodo de até 5500 rpm, na prática é difícil de se trabalhar com frequências superiores a 2000 rpm, por conta do espalhamento das gotas e também por conta do distúrbio no fluxo do gás de proteção. Na prática, os procedimentos ficam limitados em frequências menores.

6.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Comumente após a realizações de trabalhos acadêmicos constata-se que apesar de todo o conteúdo explanado restaram ainda algumas questões ainda não desmistificadas, devido ao hábil tempo disponível. De acordo com as aplicações em vista, são traçadas diretivas e sugestões para trabalhos futuros:

- ❖ Desenvolver procedimentos na posição sobre cabeça visando a continuação das pesquisas para aplicações em dutos de grande diâmetro.
- ❖ Desenvolver procedimentos utilizando chanfros com configurações “*closed gap*”. A configuração “*closed gap*” não apresenta abertura entre as chapas a serem unidas.
- ❖ Se tratando da soldagem em juntas estreitas, nem sempre a preparação da junta é realizada de forma correta, levando desta maneira ao desalinhamento do cordão, e de posse das informações até aqui geradas sobre tal tecnologia, são validas pesquisas na área de sensoriamento a laser dedicado a tecnologias a eletrodo rotativo.
- ❖ Devido as informações aqui expostas sobre aspectos morfológicos e aspectos concernentes a taxa de fusão, é valido destinar investigações sobre o comportamento de tal tecnologia operando com corrente alternada, de modo a se avaliar os possíveis ganhos destinados a operações de obtenção de revestimento.
- ❖ Tendo em vista que a própria tocha apresenta uma deficiência no fluxo do gás de proteção para os experimentos realizados com a rotação do eletrodo, é valido o desenvolvimento de protótipos com cunho de sanar tal problemática. Sugere-se ainda a inclusão de um sistema de refrigeração a agua na mesma.
- ❖ Continuar as pesquisas correlacionadas com a cinemática da gota metálica.
- ❖ Verificação da influência da frequência de rotação do eletrodo no tocante à aspectos metalúrgicos (ZAC, refino microestrutural).

7 REFERÊNCIAS

- [1] V. Vara Prasad, C. Madhu Babu, and P. Ajay. A Review on Rotating Arc Welding Process. **Materials Today Processing**, vol. 5, no. 2, pp. 3551–3555, 2018.
- [2] R. Anant and P. K. Ghosh. Ultra-Narrow Gap Welding Of Thick Section Of Austenitic Stainless Steel To HSLA Steel. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 239, pp. 210–221, 2017.
- [3] Esab, **ESAB Narrow Gap Welding Technology**. Disponível em : <[http: https://www.esab.com.br/br/pt/automation/process-solutions/saw/subarc-narrow-gap.cfm](https://www.esab.com.br/br/pt/automation/process-solutions/saw/subarc-narrow-gap.cfm)>. Acesso em : 25/02/2018.
- [4] W. Xu, S. Lin, C. Fan, and C. Yang. Feasibility study on tandem narrow gap GMAW of 65 mm thick steel plate. **China Welding**, vol. 21, no. 3, 2012.
- [5] D. Yapp and S. A. Blackman. Recent Developments in High Productivity Pipeline Welding. **Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences Engineering**, vol. 26, no. 1, pp. 89–97, 2004.
- [6] T. M. V. Rosado. **Inovação do processo MIG / MAG: Análise de Produtividade e Emissão de Fumos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- [7] S. Egerland. A contribution to arc length discussion. **Soldagem e Inspeção**, vol. 20, no. 3, pp. 367–380, 2015.
- [8] P. Kah, R. Suoranta, and J. Martikainen, “Advanced Gas Metal Arc Welding Processes. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 67, no. 1–4, pp. 655–674, 2013.
- [9] Silva.R.H.G. **Soldagem MIG/MAG Em Transferência Metálica Por Curto- Circuito Controlado Aplicada Ao Passe De Raiz**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [10] C. Marques. **Rospeções Da Natureza Física Da Soldagem MIG**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [11] M. G. Mogrovejo. **Investigação e Desenvolvimento do Processo MIG/MAG com Arame Adicional**. 2014. Dissertação (Mestrado em engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [12] P. J. Groetelaars. **Influência da Variação de Parâmetros de Soldagem Sobre a Transferência Metálica e Perfil do Cordão no Processo MIG/MAG Duplo-Arame**. 2005 - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- [13] D. Kelley. **Operation Manual - MA-400TM Air-Cooled**

SpinArc® Welding Torch. 2016.

- [14] B. A. . Modenesi, P. J. **Introdução à Física do Arco Elétrico E sua Aplicação na Soldagem dos Metais**. 2013 Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
Disponível em :
<[Http://demet.eng.ufmg.br/wpcontent/uploads/2012/10/fundamento_sfsicos1.pdf](http://demet.eng.ufmg.br/wpcontent/uploads/2012/10/fundamento_sfsicos1.pdf)>
Acesso em: 28/03/2018.
- [15] V. Scotti, Américo; Panomarev, **Soldagem MIG/MAG Melhor entendimento Melhor Desempenho**, 2º edição. São Paulo : Artiber Editora, 2008.
- [16] D. GALEAZZI. **Soldagem MIG/MAG Orbital com Sensoriamento Laser**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [17] R. H. Gonçalves. Fundamentos Científicos e Tecnológicos para o Desenvolvimento do Processo MIG/MAG por Curto- Circuito Controlado (CCC) – Uma Revisão da Literatura. Parte 3 de 3: Princípios dos Sistemas MIG/MAG em Curto-Circuito com Controle de Corrente. **Soldagem e Inspeção**, vol. 13, no. 1, pp. 70–81, 2008.
- [18] R. H. G. Silva, J. C. Dutra, and R. Gohr, “Fundamentos científicos e tecnológicos para o desenvolvimento do processo MIG/MAG por curto-circuito controlado (CCC) – Uma revisão da literatura. Parte 1 de 3: Aspectos Históricos e dos Mecanismo de Fusão do Arame. **Soldagem e Inspeção**, vol. 12, no. 3, pp. 237–243, 2007.
- [19] R. H. G. Silva, J. C. Dutra, and R. Gohr. Fundamentos científicos e tecnológicos para o desenvolvimento do processo MIG/MAG por curto-circuito controlado (CCC) – Uma revisão da literatura. Parte 2 de 3: Formação da gota metálica, gases de proteção, mecanismos de proteção, aporte térmico e aspecto. **Soldagem e Inspeção**, vol. 12, no. 4, pp. 326–335, 2007.
- [20] M. Amin. Pulse Current Parameters For Arc Stability And Controlled Metal Transfer In Arc Welding. **Metal Construction**, vol. 15. pp. 272–278, 1983.
- [21] P. Praveen, M. J. Kang, Y. Incheon, and S. Korea, “Arc voltage behavior in GMAW-P under different drop transfer modes,” *Manuf. Eng.*, vol. 32, no. 2, pp. 196–202, 2009.
- [22] J. C. Dutra, C. Marques, and R. H. G. e Silva, “Consonancias e dissonancias interpretativas no inter-relacionamento das variáveis da corrente pulsada aplicada a soldagem com arame de alumínio 4043. **Soldagem e Inspeção**., vol. 17, no. 3, pp. 201–209, 2012.
- [23] S. Ueguri, K. Hara, and H. Komura. Study of Metal Transfer in Pulsed GMA Welding. **Welding Journal**., no. August, pp. 242–250, 1985.

- [24] M. J. Piena, M. Secondly, and M. Thirdly. Experimental Investigation of Drop Detachment and Drop Velocity in G M A W The drop velocity at detachment is controlled by Lorentz. **Welding Journal**, no. May, pp. 289 - 298, 1986.
- [25] Y. Ogino, Y. Hirata, and S. Asai. Numerical simulation of metal transfer in pulsed-MIG welding. **Welding in the World**, vol. 61, no. 6, pp. 1289–1296, 2017.
- [26] H. Komen, M. Shigeta, and M. Tanaka. Numerical Simulation of Molten Metal Droplet Behavior in Gas Metal Arc Welding by Three-Dimensional Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics Method. **Journal of Flow Control, Measurement & Visualization**. vol. 06, no. 02, pp. 66–81, 2018.
- [27] SINDO. K. **Welding Metallurgy**. New York: John Wiley & Sons, 2003.
- [28] J. C. Lippold and D. J. Kotecki. **Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels**. John Wiley and Sons. 2014.
- [29] C. E. I. Baixo and J. C. Dutra. Efeito do gás de proteção e do modo de transferência na aplicação da liga 625 em aço carbono. **Soldagem e Inspeção.**, vol. 14, no. 4, pp. 313–319, 2009.
- [30] B. Mvola and P. Kah. Effects of shielding gas control: welded joint properties in GMAW process optimization. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. vol. 88, no. 9–12, pp. 2369–2387, 2017.
- [31] I. Boiko and D. Avisans. Study of shielding gases for MAG welding. **Materials Physics. Mechanics.**, vol. 16, no. 2, pp. 126–134, 2013.
- [32] O. Liskevych and A. Scotti. Influence of the CO₂ content on operational performance of short-circuit GMAW. **Welding in the World**, vol. 59, no. 2, pp. 217–224, 2014.
- [33] X. Cai, C. Fan, S. Lin, C. Yang, L. Hu, and X. Ji. Effects of shielding gas composition on arc behaviors and weld formation in narrow gap tandem GMAW. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology** vol. 91, no. 9–12, pp. 3449–3456, 2017.
- [34] M. Dreher, U. Füssel, S. Rose, M. Häbler, M. Hertel, and M. Schnick. Methods and results concerning the shielding gas flow in GMAW. **Welding in the World**, vol. 57, no. 3, pp. 391–410, 2013.
- [35] I. Bitharas, N. A. McPherson, W. McGhie, D. Roy, and A. J. Moore. Visualisation And Optimisation Of Shielding Gas Coverage During Gas Metal Arc Welding. **Journal of Materials Processing Technooly**, vol. 255, no. November 2017, pp. 451–462, 2018.
- [36] J. Norrish, **Advanced Welding Processes: Technologies and Process Control. 1º Edition**, Cambridge, England. 2006.
Disponível em :
<<http://www.elcoweld.com/files/editor/downloads/elmi/AWP1.pdf>>

Acesso em: 21/04/2018

- [37] J.-P. Keltanen. Narrow Gap Flux-Cored Arc Welding of High Strength Shipbuilding Steels. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Lappeenranta University of Technology.
- [38] KEMPPI. "Reduced Gap technology" (RGT) challenges conventional joint design principles. **Welding and Cutting**, vol. 1, p. 4, 2017.
- [39] J.-S. Kim and H.-J. Yi. Characteristics of GMAW Narrow Gap Welding on the Armor Steel of Combat Vehicles. **Applied Sciences**, vol. 7, no. 7, p. 658, 2017.
- [40] L. Wenji, L. Liangyu, Y. Jianfeng, Y. Peiyu, and L. Xiaohui. Research On The 'Jump Sidewall' Behavior And Its Signal Characteristics In Narrow Gap P-MAG Welding. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 91, no. 1–4, pp. 1189–1196, 2017.
- [41] G. Zhang, Y. Shi, M. Zhu, and D. Fan. Arc Characteristics and Metal Transfer Behavior in Narrow Gap Gas Metal Arc Welding Process. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 245, pp. 15–23, 2017.
- [42] C. Zhu, J. Cheon, X. Tang, S. J. Na, and H. Cui. Molten Pool Behaviors And Their Influences On Welding Defects In Narrow Gap GMAW Of 5083 Al-Alloy. **Internacional Journal of Heat Mass Transfer**, vol. 126, pp. 1206–1221, 2018.
- [43] C. Zhu, X. Tang, Y. He, F. Lu, and H. Cui. Characteristics and formation mechanism of sidewall pores in NG-GMAW of 5083 Al-alloy. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 238, pp. 274–283, 2016.
- [44] W. H. Xu, S. B. Lin, C. L. Fan, and C. L. Yang. Prediction and Optimization of Weld Bead Geometry in Oscillating Arc Narrow Gap All-position GMA Welding. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 79, no. 1–4, pp. 183–196, 2015.
- [45] J. Wang, J. Zhu, C. Zhang, N. Wang, R. Su, and F. Yang. Development of Swing Arc Narrow Gap Vertical Welding Process. **ISIJ International**, vol. 55, no. 5, pp. 1076–1082, 2015.
- [46] J. Wang, J. Zhu, X. H. Tang, and W. Li, "Effect of Arc Swing Parameters on Narrow Gap Vertical GMA," **ISIJ International**, vol. 75, no. 4, pp. 1–7, 2016.
- [47] H. C. Cui, Z. D. Jiang, X. H. Tang, and F. G. Lu. Research on Narrow-Gap GMAW with Swing Arc System in Horizontal Position. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 74, no. 1–4, pp. 297–305, 2014.
- [48] S. Province. Parameter Analysis And Optimization Of The Rotating Arc Ng-Gmaw Welding Process. **International Journal of Simulation Modelling**, vol. 17, pp. 170–179, 2018.

- [49] H. Zhang, J. Liu, Q. Chang, H. Lu, H. Wu, and J. Feng. A novel Rotating Wire GMAW Process to Change Fusion Zone Shape and Microstructure of Mild Steel. **Materials Letter**, vol. 123, pp. 101–103, 2014.
- [50] J. Y. Wang, Y. S. Ren, F. Yang, and H. B. Guo. Novel rotation Arc System for Narrow Gap MAG Welding. **Science and Technology of Welding and Joining**, vol. 12, no. 6, pp. 505–507, 2007.
- [51] S. Iwata, M. Murayama, and Y. Kojima. Application Of Narrow Gap Welding Process With High Speed Rotating Arc To Box Column Joints Of Heavy Thick Plates. **JFE Technical Report**, vol. 14, no. 14, pp. 16–21, 2009.
- [52] C. L. Yang, N. Guo, S. B. Lin, C. L. Fan, and Y. Q. Zhang. Application of Rotating arc system to horizontal narrow gap welding. **Science and Technology of Welding and Joining**, vol. 14, no. 2, pp. 172–177, 2009.
- [53] N. Guo, Y. F. Han, C. B. Jia, and Y. P. Du. Effects of Wire Rotating Frequency on Metal Transfer Process in Rotating Arc Narrow Gap Horizontal GMAW. **Advanced Materials Research**, vol. 189–193, no. 2016, pp. 3395–3399, 2011.
- [54] W. Xu, C. Fan, S. Lin, and C. Yang. Research On Droplet Transfer In Oscillating Arc Narrow Gap GMA Welding. **China Welding**, vol. 23, no. 2, 2014.
- [55] WeldRevolution. Experimental Study Of Spinarc[™] Technology, **CWA Journal**, pp. 12–17, 201.
- [56] H. Gonçalves, J. C. Dutra, and R. Gohr. Fundamentos Científicos e Tecnológicos para o Desenvolvimento do Processo MIG / MAG por Curto- Circuito Controlado (CCC) – Uma Revisão da Literatura . Parte 3 de 3 : Princípios dos Sistemas MIG / MAG em Curto-Circuito com Controle de Corrente. **Soldagem e Inspeção**, vol. 13, no. 1, pp. 70–81, 2008.
- [57] L. E. dos S. Paes. **Soldagem TIG Orbital: Uma Contribuição para a Mudança de Paradigma de Produtividade**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [58] T. A. Siewert, Sensing of G M A W Droplet Transfer Modes Using an ER100S-1 Electrode. **Welding Journal**, vol. March, no. April, pp. 1103–1108, 1990.
- [59] H. Waszink and L. H. J. Graat. Experimental Investigation of the Forces Acting on a Drop of Weld Metal. **Welding Journal**, no. April, pp. 108–116, 1983.
- [60] M. SUGITANI, Yuji; Kanjo, Yoshihiro; Ushio. High Efficiency Processes in Automatic Welding. **Physic, Process Instruments and Meas.**, no. 07, pp. 23–28, 1998 .

- [61] J. H. Waszink and G. J. P. M. Van Den Heuvel, Heat Generation and Heat Flow in the Filler in GMA Welding. *Welding Journal*, vol. 61, no. 8, pp. 269–280, 1982.
- [62] S. Liu and T. A. Siewert, Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding : Droplet Rate. *Welding Journal*, no. February, pp. 52–58, 1989.
- [63] N. Guo, Y. Han, L. Zhang, and Y. Zou. A Modified Heat Source Model For Rotating Arc Welding. *China Welding*, vol. 20, no. 3, 2011.
- [64] R. S. Carvalho. **Tecnologias para a Execução de Revestimentos via Soldagem Automática das Paredes d'água de Usina Termelétrica**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [65] Rodrigues. C.E.A.L. **Avaliação Cinemática E Dinâmica Da Transferência Metálica Na Soldagem MIG/MAG**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- [66] A. P. Institute, *API 1104. Standard for welding pipelings and related facilities*, vol. 552. 2005.